

Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Curso Superior de Tecnologia em Microeletrônica

Gabriel Oliveira Louzada

**ESTUDO DE LAMINULAS DE VIDRO COMO CAMADA
ANTIRREFLEXIVA PARA CELULA FOTOVOLTAICA MOS EM
APLICAÇÕES DE ENERGY HARVESTING**

SÃO PAULO

2020

GABRIEL OLIVERIA LOUZADA

**ESTUDO DE LAMINULAS DE VIDRO COMO CAMADA
ANTIRREFLEXIVA PARA CELULA FOTOVOLTAICA MOS EM
APLICAÇÕES DE ENERGY HARVESTING**

Trabalho de Conclusão do Curso,
apresentado para obtenção do grau de
Tecnólogo no Curso de Tecnologia em
Microeletrônica da Faculdade de Tecnologia
de São Paulo, FATEC-SP.
Orientador Me. Marcos Norio Watanabe

São Paulo

2020

Aos meus pais,

Maria Antonia de Oliveira

Ricardo Ferreira Louzada

Por nunca me deixar desistir dos estudos

Agradecimentos

Aos meus amigos e familiares que sempre me inspiraram a dar o meu melhor independente da dificuldade

Ao Me. Marcos Watanabe por me orientar no trabalho e ajudar sempre que precisei

Ao Prof. Ricardo Rangel por ter dado a oportunidade de começar a trabalhar e me apresentar ao GSIDE

Ao Prof. Sebastião por nos acolher e nos dar a oportunidade de trabalhar com o grupo GSIDE da EPUSP

Aos amigos pesquisadores do GSIDE na USP: Fabio Izumi, Veronica Christiano e Marcel Castilho

Ao laboratório de sistemas integrados (LSI) da USP por ceder a infraestrutura e os materiais necessários para o projeto

“O momento em que verdadeiramente entendo meu inimigo o suficiente para derrotá-lo, então naquele mesmo momento eu também o amo pois é quase impossível entender alguém e não ama-lo como ele ama a si mesmo”

Orson Scott Gard.

Resumo

Esse artigo discute o uso de lamínulas de vidro com espessura entre (70 - 108) μm como camada antirreflexiva para o aumento da eficiência de células fotovoltaicas MOS com espessura de dielétrico de 1.7 nm, estrutura Al/SiO₂/Si-P com resistividade de 10 $\Omega\cdot\text{cm}$ com dielétrico de porta crescido pelo processamento térmico rápido (RTP) a 850°C. A geometria de porta possui formato de espinha peixe com largura da linha (W) de 100 μm e espaçamento entre linhas (S) de 150 μm . Diferentes espessuras das lamínulas de vidro foram obtidas através de afinamento químico controlado utilizando BOE (Buffered Oxide Etch; 1HF : 6NH₄F) com tempo de corrosão entre 2 h e 12 h e tratamento químico superficial com uma solução de amoníaco (4H₂O : 1 H₂O₂ : 1 NH₄OH). Foram extraídas as curvas de densidade de corrente x tensão (JxV) e os principais parâmetros foram obtidos como a corrente de curto-circuito (J_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}) e rendimento de conversão (η). Obteve-se um aumento significativo do rendimento para as espessuras em torno de 80 μm quando comparadas a uma lamínula sem processamento químico com aproximadamente 130 μm de espessura (aumento de ~ 53%) e sem lamínula de vidro (aumento de ~ 93%).

Palavras Chaves: Colheita de energia, Célula fotovoltaica MOS, Lamínulas de vidro, Vidro antirreflexivo, Corrosão controlada de vidro

Abstract

This article discusses the use of glass coverslips with thickness in the range of 70 to 108 μm as anti-reflection layers in order to increase the efficiency of MOS PV cells with Al/SiO₂(1.73 nm)/Si-P structure fabricated on 10 $\Omega\cdot\text{cm}$ substrates using rapid thermal oxidation (RTO) at 850°C. The gate design was a fishbone geometry with line width (W) of 100 μm and line spacing (S) of 150 μm . Different thicknesses of glass coverslips were obtained through controlled chemical thinning using BOE (Buffered Oxide Etch; 1HF: 6NH₄F) with corrosion time varying from 2 h to 12 h followed by a surface chemical treatment with an ammonia-based solution (4H₂O: 1H₂O₂:1NH₄OH). Current density x voltage curves (JxV) were extracted for different thicknesses of the fabricated glass coverslips and the main electrical parameters were obtained for the MOS photovoltaic cells such as the short circuit current (J_{sc}), the open circuit voltage (V_{oc}) and energy conversion efficiency (η). As a result, a significant increase of the energy conversion efficiency was obtained for the thickness of the glass coverslip of 81.7 μm compared to those without chemical thinning (~130 μm thick), this is to say, $\eta \approx 4.8\%$ against $\eta \approx 3.1\%$, respectively.

Keywords: energy harvesting, MOS PV cell, glass coverslip, Anti-reflection layer, glass etching.

Índice de Ilustrações

Figura 1 Matriz Elétrica Brasileira.....	14
Figura 2 Projeções MW/ano.....	16
Figura 3 Representação do Efeito Fotovoltaico – Fonte: GreenPro.....	20
Figura 4 Representação do funcionamento de uma célula fotovoltaica de silício cristalizado – Fonte: Blue Sol.....	21
Figura 5 Parâmetros J_xV e P_xV de uma célula sola. Fonte – adaptado (Jäger, 2014).....	21
Figura 6 Células Solar MOS da primeira geração Fonte -Adaptado (HEZEL, 1997; IZUMI, 2017; WATANABE, 2019).....	23
Figura 7 Células Solar MOS da segunda geração Fonte -Adaptado (HEZEL, 1997; IZUMI, 2017; WATANABE, 2019).....	24
Figura 8 Exemplo da célula fotovoltaica MOS GSIDE	26
Figura 9 a) Ponto de medida para espessura média b) Lamínula de Microscopia.....	27
Figura 10 Ponto de medida para espessura média.....	28
Figura 11 típicas curvas das características I_xV e P_xV	29
Figura 12 Gráfico Densidade de corrente X Tensão em função da espessura da lamínula	31
Figura 13 Gráfico Densidade da Potência X Tensão em função da espessura da lamínula.....	31
Figura 14 Valores de J_{sc} e V_{oc} em função da espessura	32
Figura 15 Valores de J_{SC} e V_{OC} em função da espessura.....	33
Figura 16 Refletância x Lambda com t_1 constante	35
Figura 17 Refletância x Lambda com t_1 constante 100nm 81 μ m	36
Figura 18 Valores de refletância para espessura da porosidade constante.....	36
Figura 19 Refletância x Lambda com t_2 constante	37
Figura 20 Gráfico comparativo para espessura do vidro constante	37
Figura 21 Modelo da construção no COMSOL	39
Figura 22 Esquematização da geometria no sistema.....	40
Figura 23 COMSOL - Refletância X Lambda com t_1 constante	41
Figura 24 COMSOL- Refletância x Lambda com t_2 constante	41
Figura 25 Comparativo de Refletância X Lambda das simulações	42

Índice de Tabelas

Tabela 1 Eficiência das células Solares.....	17
Tabela 2 Medidas e simulações da potência máxima P_{max} (mW) e eficiência η (%) medido e simulado das células PV de vários produtos sob irradiação interior mista. ¹ Fonte – Adaptado (Apostolou, Reinders, Verwaal, 2016)	18
Tabela 3 Geometria das Células fotovoltaicas MOS: largura de linha (L), distância entre linhas (D), Número de linhas (N° L), área (A) e perímetro (cm).....	26
Tabela 4 Principais valores da caracterização elétrica para cada espessura obtida	32
Tabela 5 Definições Globais	40

Sumário

1- Introdução	12
1.1 O desenvolvimento sustentável.....	12
1.2 O mercado brasileiro	12
1.3 Justificativas	15
1.3.1 Projeções.....	15
1.3.2 Células solares	16
1.3.3 O estudo de Energy Harvesting em ambiente indoor	17
1.3.4 Motivação	18
1.4 Objetivos	18
2. Células Solares	20
2.1 Junção PN	20
2.2 Célula solar de silício cristalino (Si-c)	22
2.3 Célula Solar MOS	23
2.3.1 1ª Geração da Células Solares MOS.....	23
2.3.2 2ª Geração da Células Solares MOS.....	23
3. Procedimentos Experimentais	25
3.1 Fabricação das Células fotovoltaicas MOS.....	25
3.2 Lamínulas de vidro.....	27
3.3 Processo químico.....	27
3.4 Caracterização física	28
3.5 Caracterização elétrica	28
4. Resultados das caracterizações.....	31
5. Simulações.....	33
5.1 Simulação Numérica	33
5.2 COMSOL	38
5.2.1 Construindo o modelo para simulação	39
6. Conclusões e perspectivas futuras	43
7. Referências	44
8. Lista de Publicações	46

1- Introdução

1.1 O desenvolvimento sustentável

O desenvolvimento sustentável é caracterizado por ações que não prejudicam as gerações futuras, como o sistema global de desenvolvimento, focado na extração de matérias-primas e no impacto ambiental. Portanto, a prática da sustentabilidade acredita que a necessidade de satisfazer seus desejos hoje não prejudicará seus filhos, netos e bisnetos. “Ao mesmo tempo, a energia renovável advém basicamente do reabastecimento contínuo de recursos naturais, como sol, vento, água, marés e ondas. No entanto, uma fonte de energia renovável não é necessariamente uma fonte de energia sustentável, porque precisa ser inesgotável.” (PORTAL SOLAR, 2015). Portanto, a sustentabilidade é apenas uma maneira de manter o desenvolvimento energético atual e pode ser esgotado a qualquer momento.

“Dessa forma, o desenvolvimento sustentável só pode ser estabelecido a partir da coordenação entre três eixos básicos: meio ambiente, sociedade e economia. Para o seu desenvolvimento, tanto a energia renovável quanto a energia sustentável são responsáveis por medir o uso dos recursos naturais e da proteção ambiental, a fim de alcançar um bom nível de desenvolvimento ambiental, social e econômico.” (ODS-ONU, 2012). Ao considerar energia e sustentabilidade, hoje devemos considerar a importância de combinar esses dois fatores. Portanto, o uso de energia renovável é essencial, para que não afete as gerações futuras, porque os recursos não serão esgotados e poderão ser obtidos gratuitamente.

“O desenvolvimento sustentável não apenas desempenha um papel importante na geração de energia limpa, mas também desempenha um papel muito importante nas questões sociais, econômicas e ambientais. Portanto, além de ajudar a reduzir o impacto no meio ambiente, a energia renovável também ajuda a economizar até 95% dos custos de eletricidade, o que permite que áreas de baixa renda usem eletricidade.” (PORTAL SOLAR, 2016)

1.2 O mercado brasileiro

Em 2019, o mercado solar brasileiro cresceu mais de 212%, atingindo 2,4 GW de capacidade instalada. Segundo a Aneel, foram instalados mais de 110.000 sistemas micro fotovoltaicos, equivalentes a R \$ 4,8 bilhões, e 15.000 profissionais trabalham na área. Devido ao

alto nível de radiação solar no país, podemos obter um bom desempenho do sistema fotovoltaico com base em fatores climáticos, porque a captura da luz solar pode tornar os sistemas fotovoltaicos em determinadas áreas mais eficientes.

Além disso, outros aspectos também promoveram o aumento do uso de energia fotovoltaica no Brasil. Por exemplo, a crise da água tornou os preços da energia mais caros e incentivos governamentais, como estender o período de pagamento e diminuir a taxa de juros do financiamento solar. Além de reduzir o custo de compra de painéis solares. Segundo dados da IEA (International Energy Agency), apontam que a energia solar representou um percentual de 2% da geração da energia mundial em 2018, um crescimento em sua porcentagem de aproximadamente 230% nos últimos 7 anos. Estima-se que, dentre as energias renováveis, a energia fotovoltaica será líder mundial até 2040 (Renewables, 2018).

De acordo com o mapa da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) visto na Figura 1, baseado na conversão direta de radiação solar em eletricidade renovável limpa, sustentável e cada vez mais competitiva, a capacidade instalada total de fontes solares fotovoltaicas atinge 2.056 MW em operação, o que equivale à eletricidade do país 1,2% da matriz, ocupando a posição de sétima maior fonte de eletricidade do Brasil, superando a energia nuclear, dos quais 1.990 MW (1,2%) vieram de Angra I e Angra II no Rio de Janeiro.

Para Ronaldo Koloszuk, presidente do conselho de administração da ABSOLAR, a energia solar fotovoltaica trouxe muitos benefícios ao desenvolvimento do Brasil. “A fonte contribui para a redução de gastos com energia elétrica, atração de novos investimentos privados, geração de empregos locais de qualidade, redução de impactos ao meio ambiente, redução de perdas elétricas na rede nacional, postergação de investimentos em transmissão e distribuição e alívio do sistema elétrico em horários de alta demanda diurna, como nos meses de verão”, destaca Koloszuk.

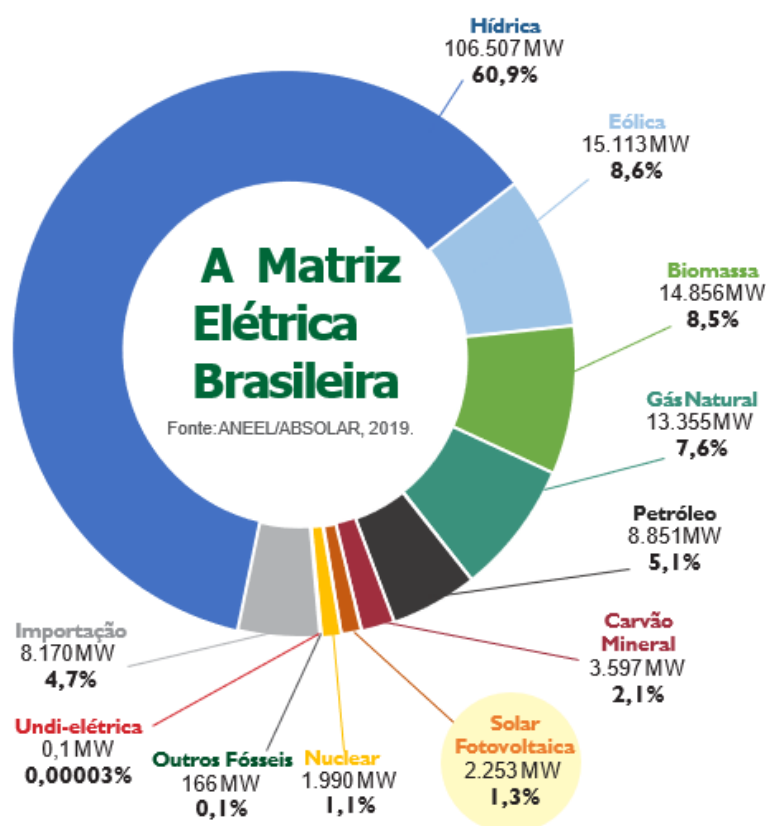


Figura 1 - Matriz Elétrica Brasileira.

As vantagens de se utilizar a energia solar no Brasil são inúmeras, abaixo as principais:

- A energia solar é totalmente renovável.
- A energia solar é infinita.
- Não faz barulho.
- Não polui.
- Manutenção mínima.
- Baixo custo considerando a vida útil de um sistema fotovoltaico
- Fácil de instalar.
- Pode ser usado em áreas remotas onde não existe energia.

São vários os benefícios econômicos da energia solar no Brasil, abaixo listamos os mais importantes:

- Sistemas fotovoltaicos valorizam a propriedade.

- Quanto mais energia solar instalada no Brasil menor é a necessidade de utilizarmos as usinas termoeletricas que são caras e, menor a inflação na conta de luz.
- A indústria de energia solar no Brasil gera milhares de empregos todos os anos

A produção da energia solar traz diversos benefícios ambientais para o Brasil. Se uma boa parte da população instalar energia solar nas casas e empresas, não seria mais necessário inundar áreas imensas da floresta amazônica para construir usinas hidrelétricas como a Belo Monte enquanto uma usina solar de 100MWp gera energia para 20.000 casas e evita a emissão de 175.000 toneladas de CO₂ por ano (ABSOLAR, 2017).

1.3 Justificativas

1.3.1 Projeções

Segundo dados da ANEEL como podemos ver na Figura 2 há uma clara aceleração do crescimento no uso de células solares no Brasil, e esse a projeção puder ser alcançado, até o final de 2020, o Brasil instalará cerca de 174.000 sistemas fotovoltaicos conectados à rede para geração de energia, representando cerca de 0,21% do total de consumo que poderiam adquirir sistemas de geração distribuída de energia solar. Estima-se que até 2024, haverá 886.700 sistemas fotovoltaicos. Seguindo essa tendência, a ANEEL elaborou o gráfico da Figura 2 com base no número de sistemas instalados e na potência em megawatts. Pode-se observar que a distribuição entre residenciais, comerciais e outros três grandes grupos é mais equilibrada. Isso significa que os sistemas comerciais manterão um número menor, mas o tamanho médio do sistema é maior que o tamanho médio dos sistemas residenciais e comerciais. Os sistemas comerciais nesse caso ficam com cerca de 24% do total da potência instalada, e serão responsáveis por cerca de 784 MW de um total de 3,2 GW.

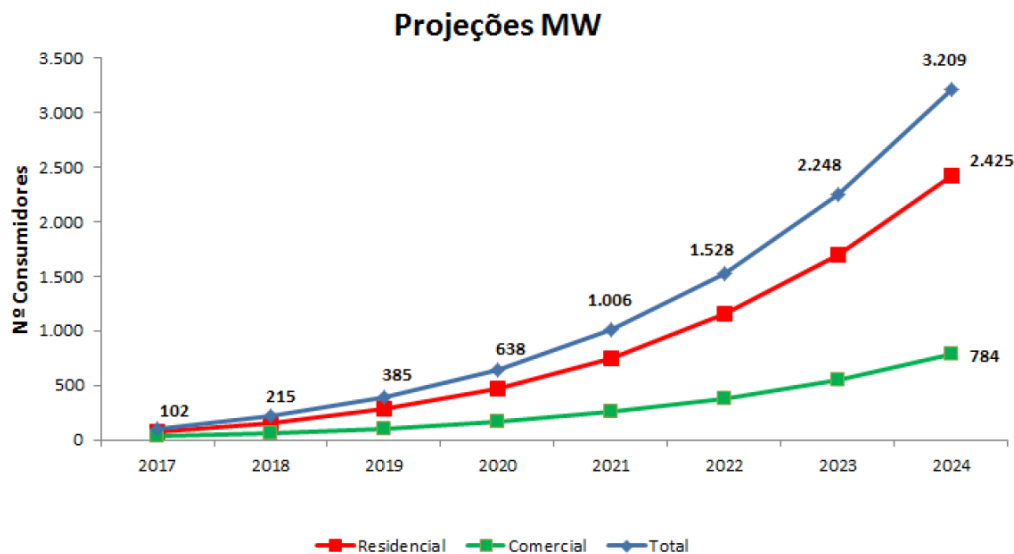


Figura 2 - Projeções MW/ano.

1.3.2 Células solares

Como pode ser visto na Tabela 1 atualmente dentro das células solares a que obteve melhor resultado em laboratório foi a III-V de GaAs com 28,8% de eficiência, porém o foco do trabalho será nas células solares a base de silício que são as que predominam no mercado, cerca de 97% da produção atual.

Como as células a base de silício foram a escolha para esse estudo pois ainda apresentem em laboratório um limite experimental de 26,7% enquanto seu limite teórico é de 33,5% (MCCARTHY, 2012; SHOCKLEY, 1961).

As células que foram escolhidas para o estudo são as células MOS (Metal-Oxido-Semicondutor) se silício cristalino pois seu processo da fabricação é simples e de baixo custo. Onde o aspecto mais importante é o crescimento do dielétrico de porta com espessura que variam de 1 a 1,5 nm. A corrente de escuro é considerada o mais importante parâmetro de degradação e, atualmente, ele tem sido um ponto crucial de análise nos trabalhos de pesquisa (CHEN, 2002; HEZEL, 1997; PULFREY, 1978; SHEWCHUN, 1977; WATANABE, 2018).

Tabela 1 - Eficiência das células Solares.

Célula solar		η (%)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)
Silício	Cristalino	26,7	0,738	42,65	84,9
	Policristalino	22,3	0,6742	41,08	80,5
III-V	GaAs	28,8	1,122	29,68	86,5
	InP	24,2	0,939	31,15	82,6
Filme fino calcogeneto	CIGS	22,9	0,744	38,77	79,5
	CdTe	21	0,8759	30,25	79,4
	CZTS	10	0,7083	21,77	65,1
	Amorfo/microcristalino	11,9	0,55	29,72	75
	Perovskita	20,9	1,125	24,92	74,5
	Tintas sensibilizadas	11,9	0,744	22,47	71,2
	Orgânicas	11,2	0,78	19,3	74,2

Fonte: adaptado (GREEN, 2018).

1.3.3 O estudo de Energy Harvesting em ambiente indoor

A Colheita de energia, do inglês Energy Harvesting, é o processo em que através de fontes externas como a claridade ambiente seja ela natural ou artificial a energia é capturada e armazenada para aparelhos pequenos, autônomos e sem fio. A colheita de energia provê uma pequena quantidade de energia, na ordem de mW ou μ W para o eletrônicos com baixo consumo energético como tecnologias IOT, calculadoras, teclados, implantes de chip e etc. (CHEN, 2017; MATIKO, 2014; WATANABE, 2019).

A conversão energética é pequena se comparada a uma célula solar em aplicações outdoor, a eficiência média para o Si-c em aplicações indoors varia entre 4~7% como podemos ver na Tabela 2. O principal fator que é visto para aplicações indoor é a potência na ordem de mW e não a eficiência já que visa aplicações de baixo consumo energético. (APOSTOLOU 2016; WATANABE, 2019).

Tabela 2 - Medidas e simulações da potência máxima P_{max} (mW) e eficiência η (%) medido e simulado das células PV de vários produtos sob irradiação interior mista.¹ Fonte – Adaptado (Apostolou, 2016).

Produto PV	Função do produto	Tipo de célula solar	Irradiancia Total ² (W/m ²)	P _{max} medido (mW)	P _{max} simulado (mW)	Eficiência simulada η (%)
Sunnan	Lighting	mc-Si	9.9 ± 0.5	1.2 ± 0.5	1.0 ± 0.3	3.8 ± 1.1
Little Sun	Lighting	c-Si	10.2 ± 0.5	1.2 ± 0.6	1.5 ± 0.5	6.2 ± 1.9
Voltaic bag	Charger	c-Si	8.6 ± 0.4	3.7 ± 0.5	2.3 ± 0.7	6.0 ± 1.8
Solio	Charger	mc-Si	10.2 ± 0.5	0.8 ± 0.2	0.9 ± 0.3	3.8 ± 1.1
Frog toy	Moving	c-Si	10.2 ± 0.5	1.3 ± 0.7	1.8 ± 0.5	7.3 ± 2.2
Philips control	Charger	a-Si	10.5 ± 0.5	0.8 ± 0.4	1.7 ± 0.5	7.0 ± 2.1
Car toy	Moving	mc-Si	10.5 ± 0.5	1.1 ± 0.3	1.4 ± 0.4	6.0 ± 1.8
WakaWaka	Lighting	c-Si	10.9 ± 0.5	0.8 ± 0.3	1.5 ± 0.5	4.2 ± 1.3
Ranex	Lighting	mc-Si	9.5 ± 0.5	0.3 ± 0.1	0.5 ± 0.1	3.6 ± 1.1
Logitech keyboard	Entertainment	mc-Si	11.5 ± 0.5	3.3 ± 0.1	4.1 ± 0.3	10.9 ± 1.1
PV mouse	Entertainment	a-Si	10.5 ± 0.5	0.7 ± 0.2	1.2 ± 0.5	7.3 ± 2.3
Kitchen weight bar	Cooking	mc-Si	10.5 ± 0.5	1.2 ± 0.4	1.7 ± 0.6	5 ± 1.6

¹Irradiação indoor mista: natural e artificial medido dentro de casa

²Irradiação medida com espectralradiômetro

1.3.4 Motivação

O uso da energia solar vem crescendo exponencialmente nas últimas décadas e como foi dito a previsão é que ela se torne a líder no mercado mundial de energias sustentáveis até 2040. Sabendo disso, foi desenvolvido um método de fácil reprodução e barato para melhorar a eficiência das células fotovoltaicas.

1.4 Objetivos

Esse trabalho tem como principal objetivo é o estudo e a caracterização do uso de lamínulas de vidro como camada antirreflexiva para as células fotovoltaicas MOS em ambiente indoor para espessuras próximas a 80 μ m, para chegar a esse objetivo os seguintes passos foram seguidos:

- Utilizar células solares MOS previamente construídas com área de 4 cm^2 em lâminas de silício de 3 polegadas de diâmetro utilizando alumínio como metal de porta.
- Produzir diversas espessuras de lamínulas de vidro por afinamento químico controlado utilizando BOE.
- Realizar a caracterização elétrica obtendo a curva $I \times V$ para cada amostra para assim extrair os valores de J_{SC} (Densidade de corrente de curto-circuito), V_{OC} (Tensão de circuito aberto), FF (Fator de forma), η (rendimento).
- Estabelecer qual é a melhor faixa de espessura que apresenta melhor rendimento da curva.
- Realizar simulações para consolidar o estudo e verificar a melhoria da eficiência.

2. Células Fotovoltaicas

2.1 Junção PN

Para fabricar uma célula solar (ou um diodo) dois tipos de semicondutores são unidos. Onde ocorre essa união, chamada de Junção PN, os elétrons livres do semicondutor tipo N irão migrar para as lacunas do semicondutor tipo P para ocuparem esses espaços, conforme mostrado na Figura 3. Essa migração não ocorre indefinidamente, pois na região onde ocorre a recombinação dos elétrons livres com as lacunas forma-se um campo elétrico que impede que os elétrons continuem fluindo livremente.



Figura 3 - Representação do Efeito Fotovoltaico – Fonte: GreenPro

Ao receberem fótons de luz visível, os elétrons são energizados, mas não conseguem fluir da **camada N** para a **camada P**. Se ligarmos as duas camadas externamente, podemos aproveitar a corrente elétrica que se forma na passagem dos elétrons de uma camada para outra. Podemos ver na Figura 4 o funcionamento da célula fotovoltaica.

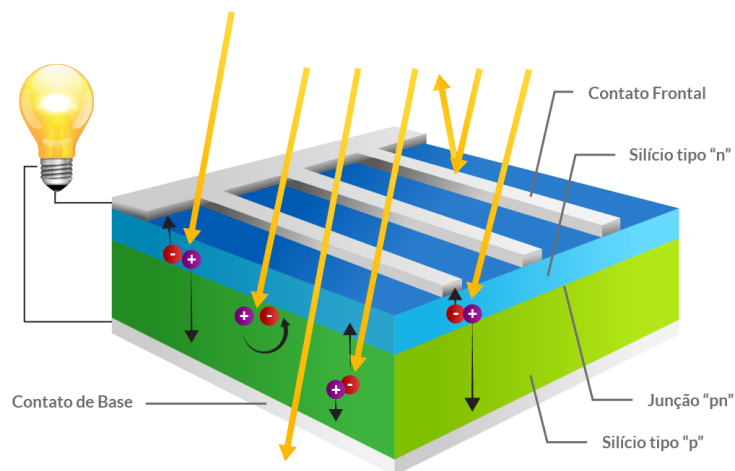


Figura 4 - Representação do funcionamento de uma célula fotovoltaica de silício cristalizado – Fonte: Blue Sol

A caracterização elétrica nas células solares é feita com a extração de duas curvas, a densidade de corrente pela tensão ($J \times V$) e densidade de potência pela tensão ($P \times V$) que apresentam uma curva idêntica ao de um diodo, então somam-se uma corrente que irá deslocar a curva $J \times V$ para dentro do quarto quadrante que é a área de operação da célula solar para a geração de energia e desse quadrante retiramos os parâmetros importantes como mostrados na Figura 5:

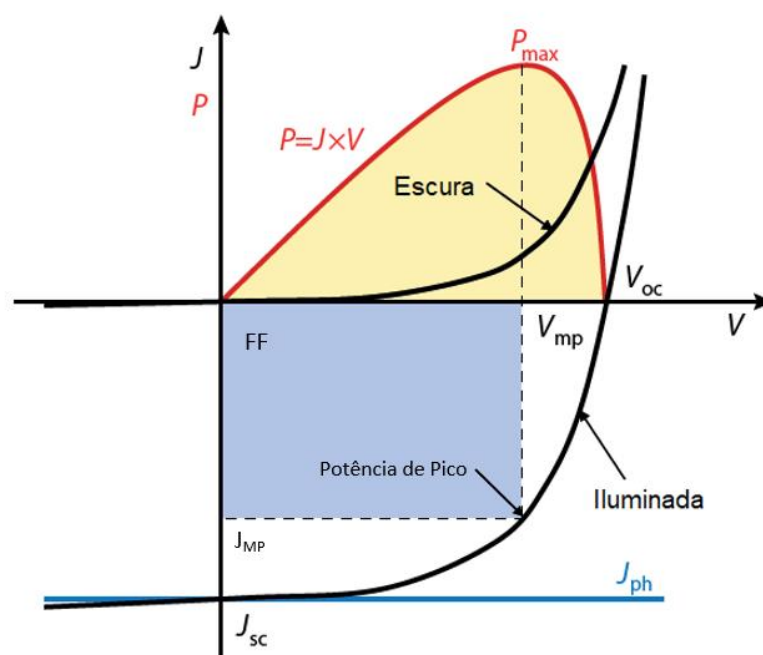


Figura 5 - Parâmetros $J \times V$ e $P \times V$ de uma célula solar. Fonte – adaptado (Jäger, 2014).

Os principais parâmetros obtidos nessas curvas são:

- V_{OC} - Tensão de circuito aberto
- J_{sc} – Corrente de curto-circuito
- P_{MAX} – Potência máxima ou potência de pico
- FF – Fator de forma

Cabe ressaltar que embora as células solares de junção PN sejam as células solares convencionais empregadas nos painéis fotovoltaicos, seu processo de obtenção é complexo no sentido de que é necessário texturizar o substrato para obter uma junção PN na qual seja possível controlar a velocidade de recombinação de portadores e, além disso, costuma-se adicionar uma camada anti-refletora para aumentar a absorção de radiação solar a fim de aumentar o rendimento de conversão da célula solar de junção PN (SZE, 1981; HAR-LAVAN, 2013; DHANDA, 2017)

2.2 Célula solar de silício cristalino (Si-c)

A célula solar mais comum é composta de uma lâmina de silício dopada, ao mesmo tempo, com boro e fósforo. A parte dopada com fósforo, do tipo-N, fica exposta ao sol. A parte dopada com boro, do tipo-P, fica na parte inferior da célula, e é maior que o tipo-N são colocados contatos frontais e traseiros, sendo que os contatos frontais, sobre a parte tipo-N, causam sombra e reflexão, diminuindo a eficiência da célula (RODRIGUEZ, 1992).

Seria teoricamente possível diminuir as perdas por reflexão, diminuindo a quantidade de contatos frontais, mas, quanto menos condutores para captar os elétrons liberados pelo efeito fotovoltaico, mais elétrons serão recombinados nos átomos de silício, após perderem a energia adquirida que é transformada em calor, fazendo com que a célula seja ainda mais ineficiente. As células fotovoltaicas de silício cristalizado absorvem a radiação solar em uma faixa muito estreita do espectro da radiação. Fótons com energia superior à necessária (próximos à luz ultravioleta, com frequência mais alta) concedem energia em excesso, que será transformada em calor. Fótons com energia inferior à necessária (próximos à luz infravermelha, com frequência mais baixa) não concedem energia suficiente para a liberação dos elétrons de sua órbita, e essa energia é convertida em calor (BLUESOL, 2019).

2.3 Célula Solar MOS

2.3.1 1ª Geração da Células Solares MOS

A primeira geração das células solares MOS, como mostrado na Figura 6, foram construídas pela seguinte sequência: Em cima de um substrato tipo P foi crescido um fino óxido de silício em sequência foi feita uma deposição de alumínio, onde são feitos os contatos elétricos e pôr fim a aplicação de uma camada antirreflexiva para melhorar o rendimento, um dessas camadas é o nitreto de silício (Si_3N_4) que naturalmente produz uma carga positiva na superfície do oxido que por sua vez conduz uma inversão do substrato P (CHRISTIANO, 2017).

“O processo permite a passivação da superfície além de evitar o processo de envelhecimento” (WATANABE, 2019).

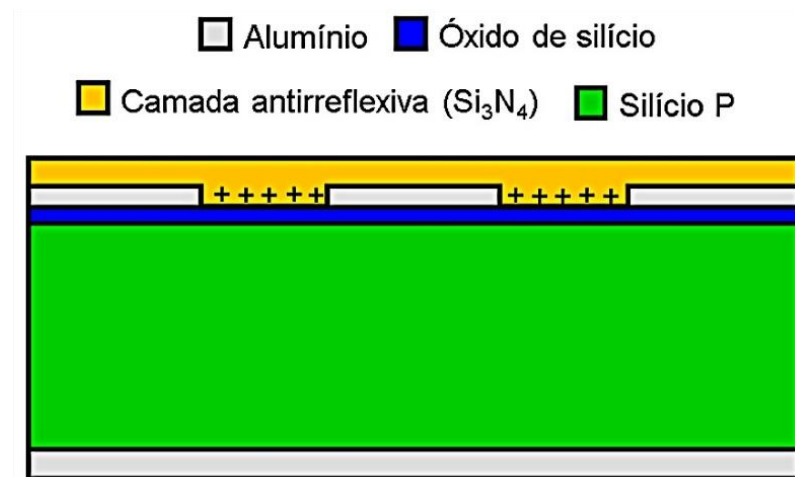


Figura 6 - Células Solar MOS da primeira geração. Fonte -Adaptado (HEZEL, 1997; IZUMI, 2017; WATANABE, 2019).

2.3.2 2ª Geração da Células Solares MOS

A Segunda geração como pode ser visto na Figura 7 foi marcada pelo aperfeiçoamento da passivação superficial. Durante o processo de aperfeiçoamento foram

incorporados íons positivos de Cs (Césio) entre a interface antirreflexiva do Si_3N_4 e o óxido de porta, que junto ao nitreto de silício, garantem uma melhor estabilidade térmica e uma melhor fixação das cargas interiores na superfície do óxido (HAR-LAVAN e CAHEN, 2013; HEZEL, 1997; IZUMI, 2017; WATANABE, 2019).

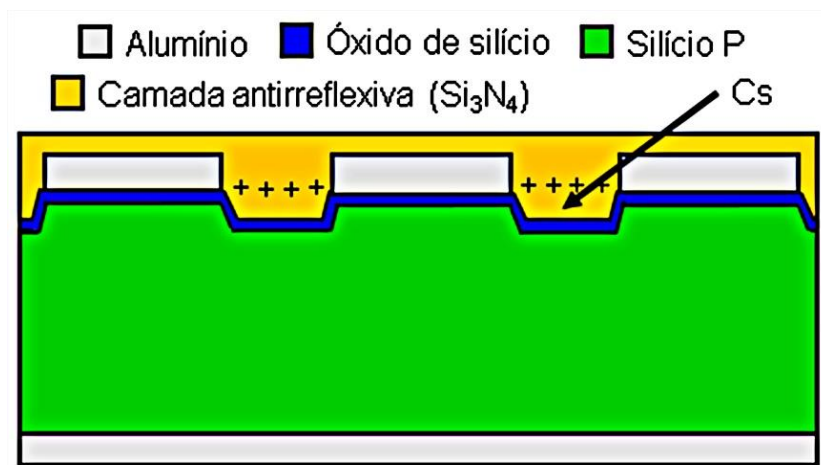


Figura 7 - Células Solar MOS da segunda geração Fonte -Adaptado (HEZEL, 1997; IZUMI, 2017; WATANABE, 2019).

3. Procedimentos Experimentais

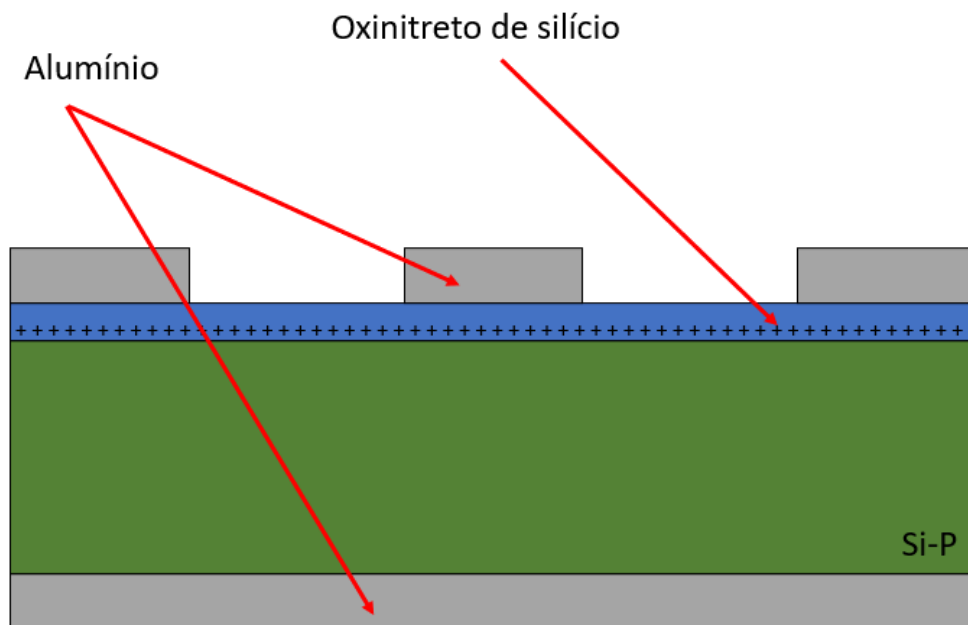
3.1 Fabricação das Células fotovoltaicas MOS

A célula fotovoltaica MOS tem sido um dos focos de estudos do grupo GSIDE e foi utilizado em duas dissertações (ALANDIA, 2016; WATANABE, 2019) e duas teses de doutorado (CHRISTIANO, 2017; IZUMI, 2017). Na Figura 8 temos o esquema da célula PV MOS construída pelo grupo GSIDE.

Foram utilizados substratos Si-p (100), resistividade de $10 \Omega \cdot \text{cm}$, 3 polegadas de diâmetro onde foram limpas quimicamente usando a limpeza RCA modificada da seguinte forma: I) $16\text{H}_2\text{O} + 7\text{H}_2\text{O}_2$ (37%) + $1\text{NH}_4\text{OH}$ (38%), II) $4\text{H}_2\text{O} + 1\text{HCl}$ (38%), ambos aquecidos a 90°C por 15 min. Entre cada banho e no início da limpeza, as lâminas de silício foram imersas em água deionizada (DI) por 5 min. Após esse processo, os lâmina foram mergulhados em ácido fluorídrico diluído, na proporção $80\text{H}_2\text{O} : 1\text{HF}$ (49%) por 100 s, em temperatura ambiente. E por fim, as lâminas foram lavadas em água DI por 3 min.

O dielétrico de porta foi crescido pelo processamento térmico rápido (RTP) a 850°C durante 20 s em um ambiente ultrapuro de nitrogênio e oxigênio na proporção $5\text{N}_2 : 1 \text{O}_2$ para obter uma espessura de dielétrico de $1,7 \pm 0,85\text{nm}$, no qual foi medida pelo elipsômetro Autoel IV, com comprimento de onda de 632 nm e as medidas foram confirmadas com Microscópio Eletrônico de Transmissão (TEM) com erro abaixo de 5%.

O Alumínio foi depositado por deposição física à vapor (PVD: Edwards vacuum coater auto 306) para a formação do material de porta e o contato traseiro. A Litografia foi usada para definir a geometria de porta as células PV MOS. O alumínio foi corroído por uma solução ($175 \text{H}_3\text{PO}_4 + 70 \text{H}_2\text{O} + 15\text{HNO}_3$) na temperatura de 40°C . O processo completo foi estudado e desenvolvido por Christiano, 2017.



Fonte: Autor

Figura 8 - Exemplo da célula fotovoltaica MOS GSIDE

A área das células fotovoltaicas MOS foi feita por litografia, utilizando a geometria chamado de “Espinha de peixe” e os valores obtidos podem ser visto na Tabela 3.

Tabela 3 Geometria das Células fotovoltaicas MOS: largura de linha (L), distância entre linhas (D), Número de linhas (N° L), área (A) e perímetro (cm).

	Dispositivo	L (mm)	D (mm)	N° L	A _g (cm ²)	Perímetro (cm)
		50x50	50	50	180	1,63
	50x100	50	100	120	1,09	434,4
	100x100	100	100	90	1,63	325,8
	100x150	100	150	71	1,34	257,0

Fonte: CHRISTIANO,2017

3.2 Lamínulas de vidro

As lamínulas de vidro utilizadas no trabalho foram lamínulas de microscopia (Figura 9b) de aproximadamente 4cm² de área e espessura média inicial de (130±12) μm. As amostras foram previamente limpas com jatos de nitrogênio e foram mensuradas em 5 diferentes regiões de cada lamínulas (Figura 9a) e então foi efetuado uma média dos valores obtidos. As medidas das espessuras foram realizadas com auxílio de um micrometro digital da marca Digimess 0-25mm de 0,002 mm de precisão.

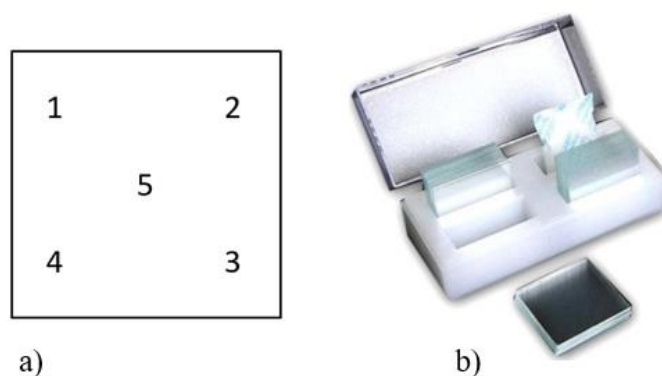


Figura 9 a) Ponto de medida para espessura média b) Lamínula de Microscopia.

3.3 Processo químico

As lamínulas foram preparadas em pares de espessuras próximas e afinadas por meio do processamento químico descrito a seguir:

- I. Solução baseado em amônia na proporção 4H₂O : 1H₂O₂ : 1NH₄OH por 15 minuto a 60 °C;
- II. Imersão de 2 a 12 horas na solução BOE (Buffered Oxide Etch) na proporção 1HF:6NH₄F com uma afinação média de aproximadamente (8 ± 1) μm/h;
- III. Novamente, solução baseada em amônia afim de promover uma fina camada de SiO₂ cristalino para proteger a lamínula dos particulados que possam aderir a superfície.

Entre cada Processo foi realizado um enxague durante 10 minutos em água DI, no início e no final do processo de obtenção das lamínulas de vidro é realizado o banho na solução baseada em amoníaco para garantir uma melhor limpeza antes da corrosão e criar a fina camada de SiO₂ para proteger as amostras de particulados, o que também auxiliou na corrosão garantindo melhor

uniformidade. Para espessuras menores que $30\mu\text{m}$ a lamínula foi corroída totalmente no banho químico impossibilitando qualquer tipo de análise.

3.4 Caracterização física

Após o afinamento foram obtidas espessuras de (30 a 120) μm para o estudo, para as espessuras maiores que $85\mu\text{m}$ foi utilizado novamente o micrometro digital e medidos 5 pontos para se obter a média como na Figura 9a. Para as lamínulas com espessura menores a $85\mu\text{m}$ os dados foram extraídos com o auxílio de um perfilômetro “Dektak^o 6M Stylus” da marca Veeco com precisão de 10 angström para a faixa próxima a $100\mu\text{m}$. Foram feitas 4 medidas de fora em direção ao centro uma em cada lado da lamínula como mostrado na Figura 10.

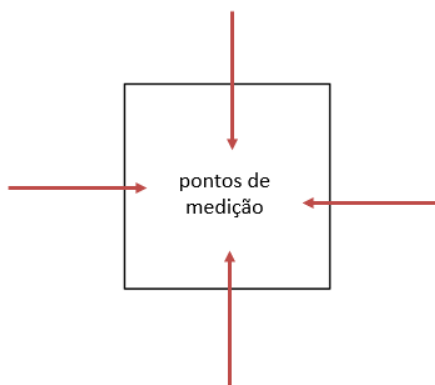


Figura 10 Ponto de medida para espessura média.

3.5 Caracterização elétrica

O equipamento utilizado para a caracterização elétrica foi o Agilent 4156C source measurement unit, dentro de uma caixa preta aterrada para evitar interferência externa foi programado para aplicar tensão na porta entre 2 V a -2 V com variação de tensão de 0,1 V, utilizou-se uma lâmpada halógena de 50 W e 650 cd como fonte de luz a uma distância de $d = 4,5\text{ cm}$. Utilizou-se célula fotovoltaica de área de $3,24\text{ cm}^2$ como previamente dito e as lamínulas de vidros foram posicionadas sobre células MOS.

Não foi necessário o uso de nenhum sol-gel ou mecanismo parecido para fixar as lamínulas de vidro a célula MOS, pois as lamínulas apresentaram uma boa fixação natural.

Os principais parâmetros fotovoltaicos como J_{sc} (densidade de corrente), V_{oc} (tensão de circuito aberto), FF (Fator de Forma), P_{MAX} (máxima densidade de potência), η (rendimento) usados foram extraídos por meio de suas curvas de densidade de corrente x tensão (JxV) e densidade de potência x tensão (PxV), conforme podem ser vistas na Figura 11.

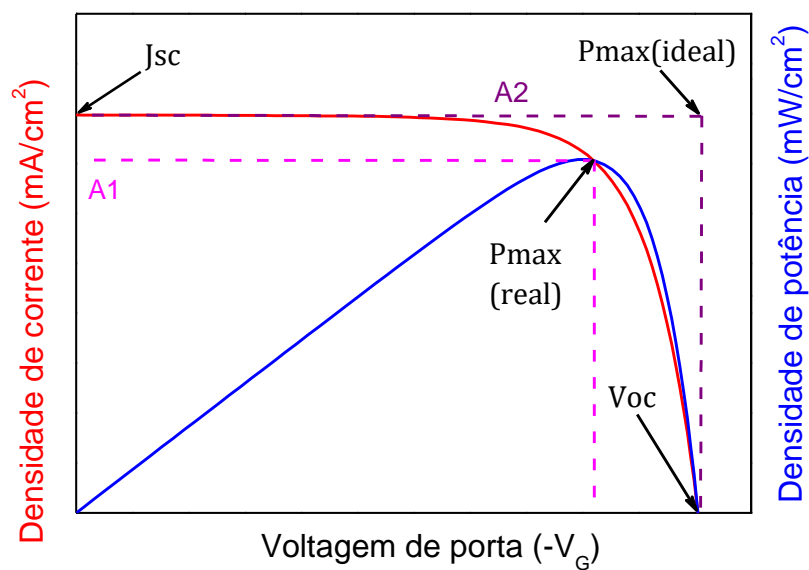


Figura 11 típicas curvas das características IxV e PxV .

O fator de preenchimento pode ser obtido pela equação:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot J_{sc}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Onde P_{max} é a máxima densidade de potência (W/cm^2), V_{oc} é a tensão de circuito aberto (V), J_{sc} é a densidade de corrente (A/cm^2). O rendimento de conversão da célula pode ser obtido por:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Onde P_{in} é densidade da intensidade luminosa que incide sobre célula fotovoltaica (P_{in}) que é aproximadamente 47 mW/cm^2 e pode ser obtida por meio da relação:

$$P_{in} = \frac{I_L \cdot f(\Delta\lambda)}{683d^2} \quad (3)$$

Onde I_L é a intensidade luminosa em candelas (cd), d é a distância entre a lâmpada halógena e a célula fotovoltaica e $f(\Delta\lambda)$ é a função luminosa integrada onde contabiliza diferentes penetrações dos diferentes comprimentos de onda (λ), para célula MOS é adotado como valor unitário.

4. Resultados das caracterizações

Foi realizada a caracterização elétrica para a faixa de espessura que varia entre (70~130) μm e dessa as curvas como a densidade de corrente que pode ser vista na Figura 12 e a densidade de potência como visto na Figura 13 e desses gráficos extraímos os parâmetros essenciais citados no Capítulo 3.5. Como destacado na Figura 12 cor azul a curva com melhor resultado foi a de 81,7 μm de espessura.

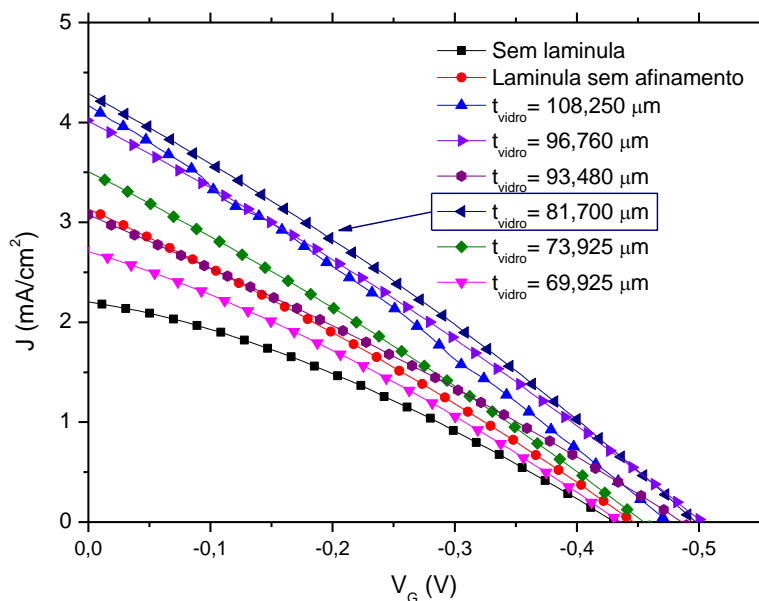


Figura 12 Gráfico Densidade de corrente X Tensão em função da espessura da lamínula.

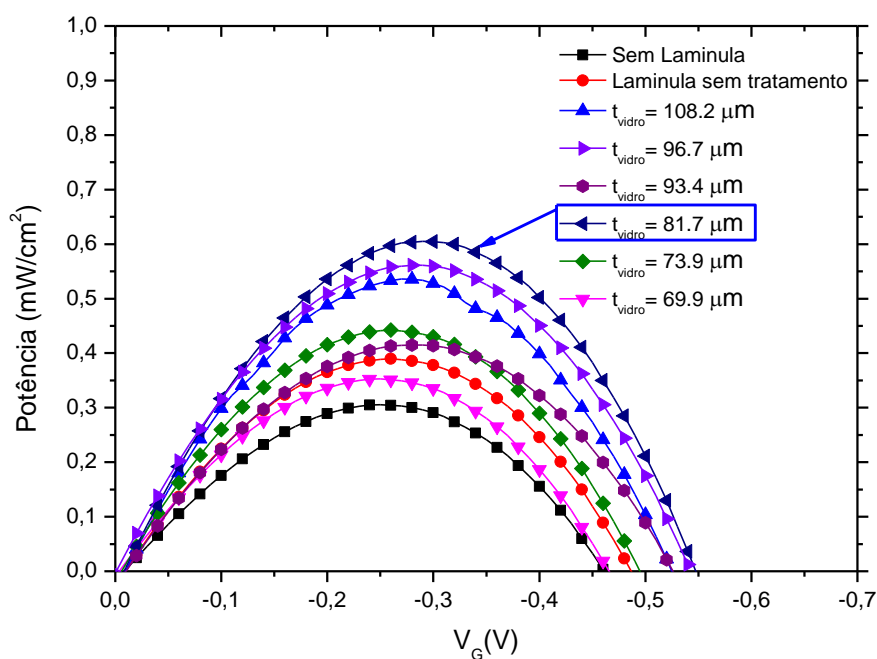


Figura 13 Gráfico Densidade da Potência X Tensão em função da espessura da lamínula.

Após a obtenção dos gráficos foi possível extrair individualmente cada parâmetro essencial das curvas, da curva IxV extraímos o J_{sc} e o V_{oc} para cada ponto de espessura como mostrado na Figura 14 e utilizando a curva IxV montamos o gráfico de potência JxV para obter o valor de P_{MAX} .

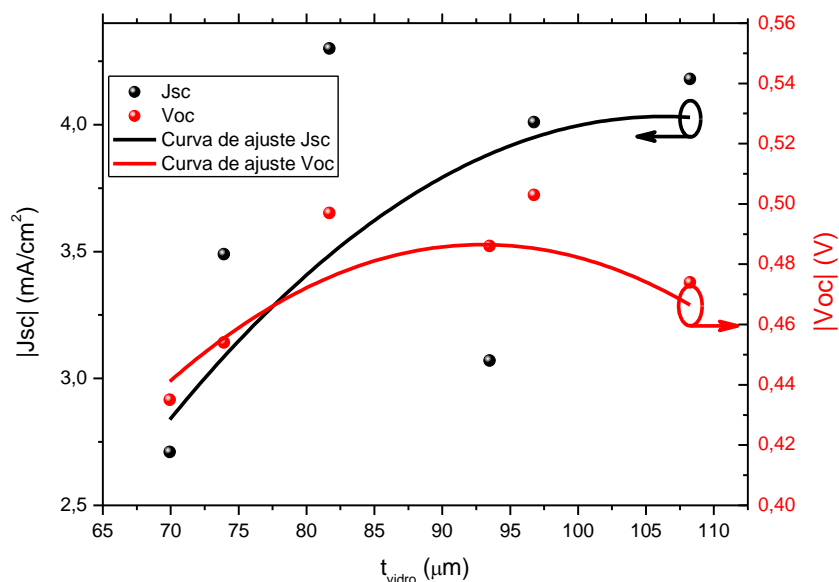


Figura 14 Valores de J_{sc} e V_{oc} em função da espessura.

Com os 3 parâmetros principais parâmetros da curva, J_{sc} , V_{oc} e P_{MAX} foi possível calcular o Fator de forma (FF) e o rendimento(η).

Tabela 4 Principais valores da caracterização elétrica para cada espessura obtida.

Glass Thickness (μm)	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (V)	FF (%)	Pmax (mW/cm^2)	η (%)
without glass	2.20	0.432	36.65	0.305	2.47
without chemical process ~(130)	3.13	0.446	33.94	0.389	3.11
108.25	4.18	0.474	34.63	0.536	4.21
96.76	4.01	0.503	27.62	0.561	4.45
93.48	3.07	0.486	27.80	0.415	3.35
81.70	4.30	0.497	27.91	0.606	4.77
73.93	3.49	0.454	34.61	0.443	3.50
69.93	2.71	0.435	33.83	0.352	2.83

A Tabela 4 nos mostra uma melhora na eficiência se comparar o valor de 2,47% obtidos sem a lamínula com os 3,11% de uma lamínula sem tratamento, um aumento de $\approx 26\%$ e se comparado com os 4,77% da lamínula com 81,70 μm de espessura, é possível ver uma grande

melhora de $\approx 93\%$. Na Figura 15 temos a representação gráfica da Tabela 4 em função da espessura pela eficiência.

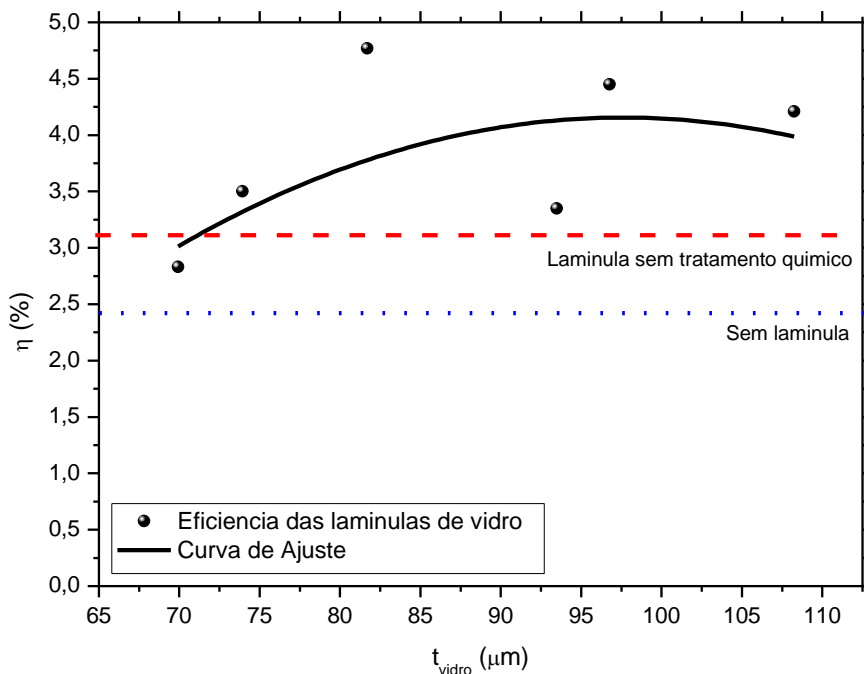


Figura 15 Valores de JSC e VOC em função da espessura.

5. Simulações

5.1 Simulação Numérica

Com os dados obtidos experimentalmente foi constatado a existência de uma fina camada superficial porosa no vidro, responsável por ajudar na refletância servindo como camada antirreflexiva afetando o rendimento final através das ondas de interferência destrutivas e construtivas que a luz é submetida. Foi realizada uma simulação numérica afim de comprovar a existência da mesma além de reproduzir os resultados experimentais.

Considerando as perdas óticas que as células solares sofrem é comum colocar camadas antirreflexivas para diminuir as perdas pelas reflexões como é o caso do exemplo DLARC que será utilizado na simulação.

DLARC é um revestimento antirreflexo de camada dupla, as equações para mais de um revestimento antirreflexivo são complexas e para a equação principal é necessário primeiro calcular os parâmetros R_1 , R_2 , R_3 , θ_1 e θ_2 através dos parâmetros: n_0 (ar), n_1 (Porosidade), n_2 (vidro),

n_3 (silício), t_1 (Espessura porosidade), t_2 (espessura vidro) e λ (comprimento de onda) simulado na faixa de 300 a 1200nm a fim de analisar o espectro da luz solar:

$$R_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad (4)$$

$$R_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (5)$$

$$R_3 = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} \quad (6)$$

$$\theta_1 = \frac{2\pi n_1 t_1}{\lambda} \quad (7)$$

$$\theta_2 = \frac{2\pi n_2 t_2}{\lambda} \quad (8)$$

Onde: $n_0 = 1$; $n_1 = 1,25$; $n_2 = 1,5$; $n_3 = 3,5$ e $\lambda = 300$ á 1200 nm

Com os valores dos parâmetros é aplicada a fórmula da refletância

$$R = |r^2| = \frac{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + r_1^2 r_2^2 r_3^2 + 2r_1 r_2 (1 + r_3^2) \cos 2\theta_1 + 2r_2 r_3 (1 + r_1^2) \cos 2\theta_2 + \dots}{1 + r_1^2 r_2^2 + r_1^2 r_3^2 + r_2^2 r_3^2 + 2r_1 r_2 (1 + r_3^2) \cos 2\theta_1 + 2r_2 r_3 (1 + r_1^2) \cos 2\theta_2 + \dots} \quad (9)$$

$$\dots \frac{+2r_1 r_3 \cos 2(\theta_1 + \theta_2) + 2r_1 r_2^2 r_3 \cos 2(\theta_1 - \theta_2)}{+2r_1 r_3 \cos 2(\theta_1 + \theta_2) + 2r_1 r_2^2 r_3 \cos 2(\theta_1 - \theta_2)}$$

Foram efetuadas 5 variações na faixa de (50 a 300) nm da espessura t_1 (porosidade) para cada uma das 9 espessuras de t_2 (vidro) que foi obtida experimentalmente e variando de (45 a 160) μ m a espessura t_2 , ao todo 45 simulações distintas.

Foi observado que a espessura do vidro por ser relativamente pequena não influencia diretamente no aumento ou na diminuição da eficiência final. Utilizando os 4 parâmetros: Ar, porosidade, vidro e Silício e aplicando na equação o constatamos que o

fator responsável pelo aumento da eficiência é a fina camada de vidro poroso(t_1) na superfície, e que realmente a espessura do vidro não influencia no resultado da refletância como pode ser visto na Figura 16, onde podemos ver a comparação de 4 gráficos.

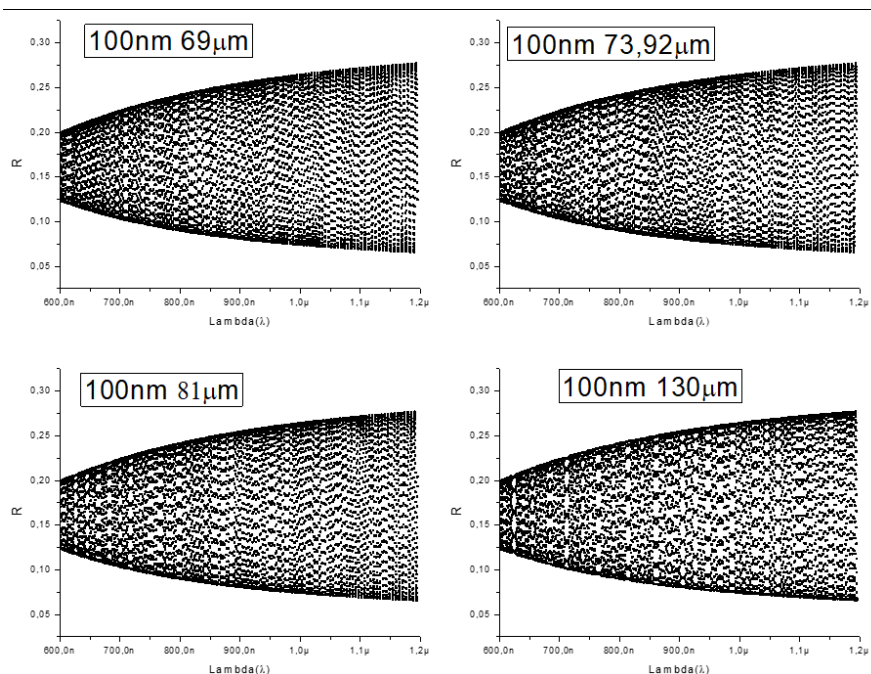


Figura 16 Refletância x Lambda com t_1 constante.

Na Figura 16 ao aplicar a equação 9 da refletância mantivemos t_1 (espessura da porosidade) constante e alteramos t_2 (espessura do vidro) em 8 valores distintos e como é possível enxergar nos 4 gráficos selecionados os valores, ou a área da refletância se mantem quase o mesmo apesar de variar a espessura do vidro entre 70 e 130 μm .

Foram retirados entre 100 e 150 pontos máximos de refletância de cada curva como destacado na Figura 17 em vermelho para assim obter um gráfico comparativo de máximos para cada espessura como pode ser visto na Figura 18 os valores permanecem o mesmo com pouquíssima alteração de rendimento com t_1 constante.

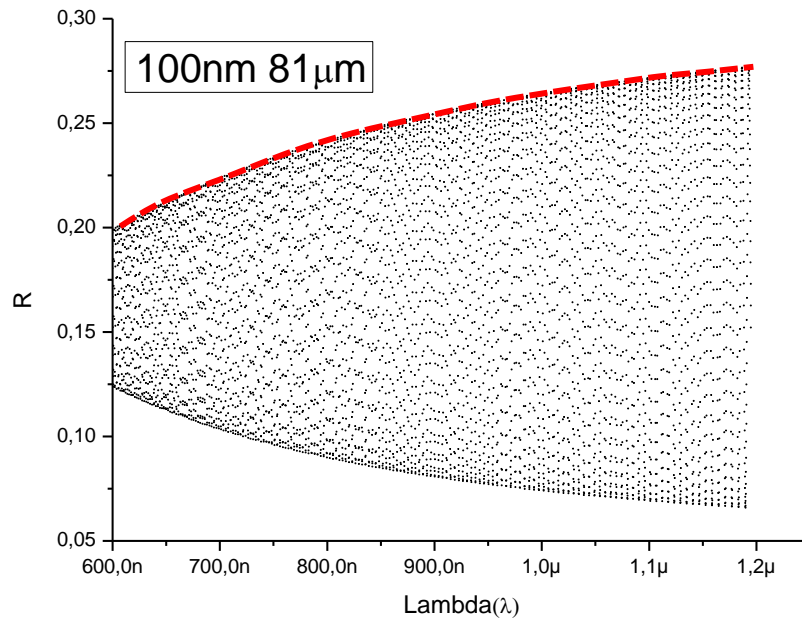


Figura 17 Refletância x Lambda com t1 constante 100nm 81μm.

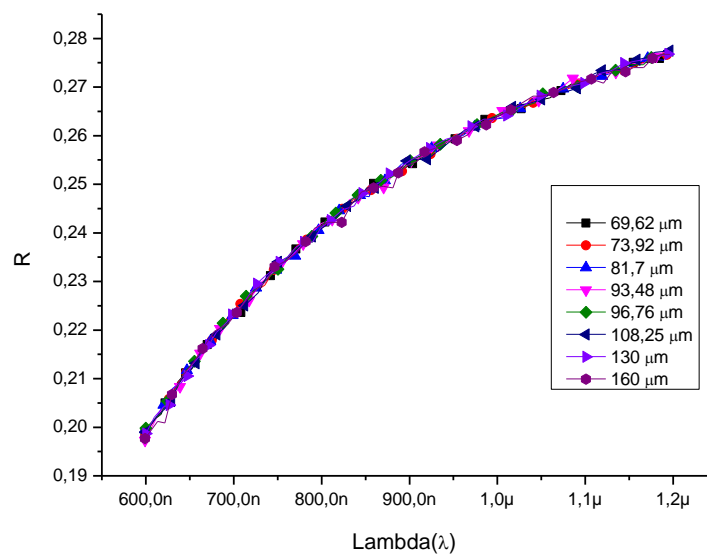


Figura 18 Valores de refletância para espessura da porosidade constante.

O mesmo procedimento foi realizado considerando dessa vez t2(espessura do vidro) constante e t1(espessura da porosidade) variável e assim obtivemos os gráficos da Figura 19 onde é nítida a diferença da área de cada refletância em função da porosidade.

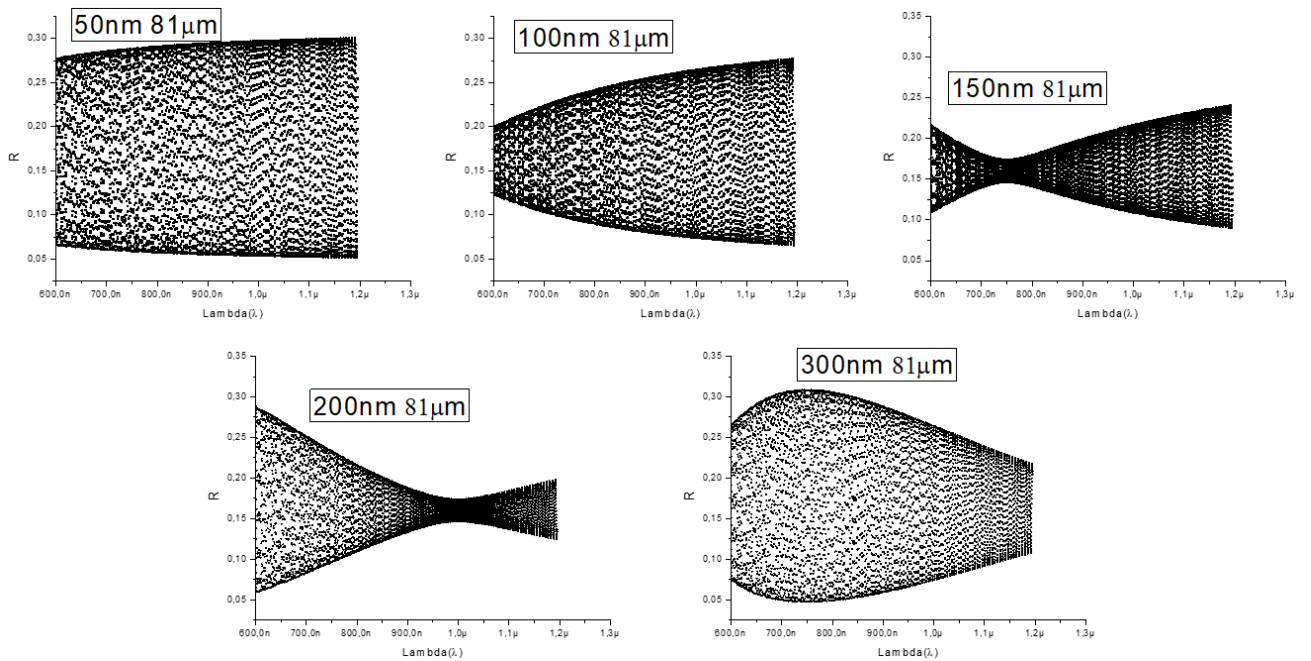


Figura 19 Refletância x Lambda com t2 constante.

Com os valores da área de cada gráfico diferente foram extraídos novamente assim como na Figura 17 entre 100 e 150 assim pontos máximos de cada curva para gerar o gráfico comparativo da espessura da porosidade pelo espectro da luz.

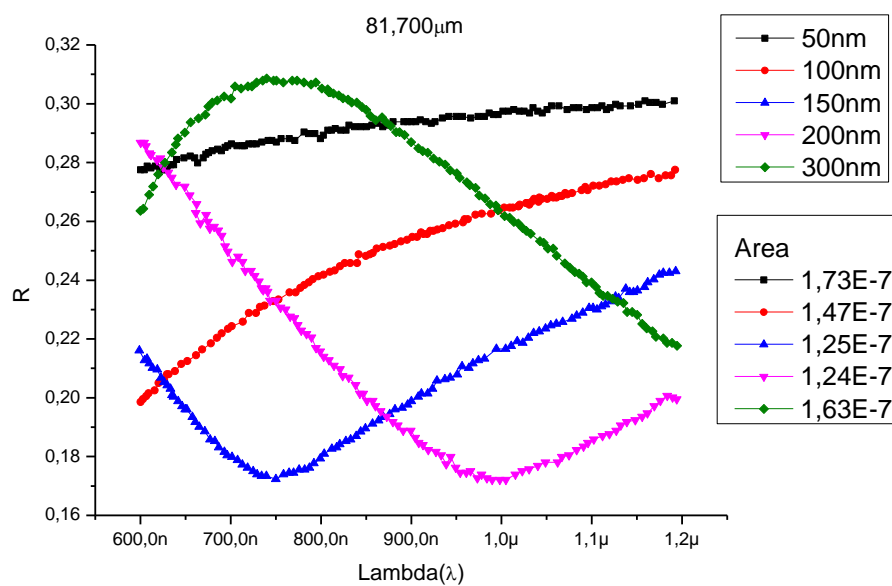


Figura 20 Gráfico comparativo para espessura do vidro constante

Os dados obtidos pela simulação numérica comprovam que a melhor conversão energética é obtida para t_1 (espessura da porosidade) com o valor próximo a 50nm, o que corresponde a lamínula de 81,7 μ m que por sua vez foi a que na prática obteve o melhor desempenho de conversão energética.

5.2 COMSOL

O modelo antirreflexivo oferecido pelo banco de dados do Simulador COMSOL considera que o “revestimento antirreflexivo” como um conjunto de filmes finos transparentes que quando aplicados a um sistema óptico reduz o reflexo, e assim aumenta a eficiência do sistema. O sistema de revestimento antirreflexivo do COMSOL é análogo ao sistema DLARC do PVEducation utilizado na simulação numérica.

O exemplo dado pelo modelo considera a camada como um quarto do comprimento de onda e um único filme fino cuja espessura corresponde a um quarto do comprimento de onda incidente e sendo assim é possível reduzir o coeficiente de reflexão a zero quando o índice de refração do material for a raiz do produto entre os dois materiais.

Considerando o índice de refração do ar como $n_0=1$ e o índice de refração do substrato como $n_S=3,5$. Quando aplicado o produto entre os dois índices e retirado a raiz obtemos 1,87 que seria o índice ideal para reduzir o coeficiente a zero nesse sistema.

Em aplicações normais quase não existe materiais em que o índice de refração igual a zero, outro problema que surge com a utilização do sistema de um quarto de onda é que aumenta o coeficiente de reflexão para os demais comprimentos de onda próximo e varia com o ângulo de incidência da luz. Sendo assim a utilização de um revestimento ao aplicar a técnica de multicamadas obtemos mais facilmente um coeficiente de reflexão pequeno para uma faixa de comprimento de onda como é o caso desse estudo onde trabalhamos com a faixa de comprimento e 600nm a 1200nm utilizando o modelo de multicamadas onde as 4 camadas são: Ar, vidro poroso, vidro e substrato(silício).

5.2.1 Construindo o modelo para simulação

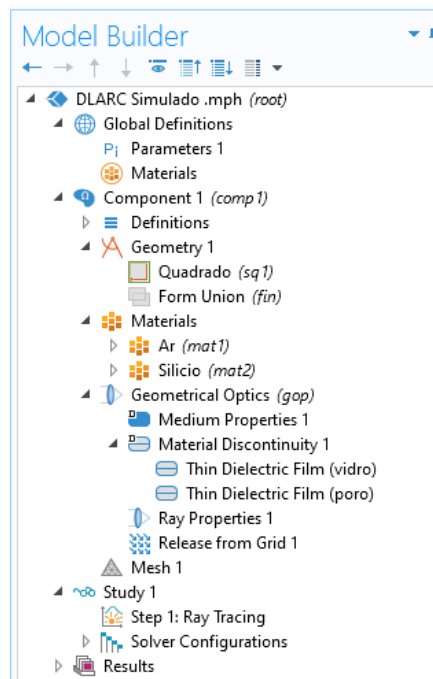


Figura 21 Modelo da construção no COMSOL

Seguindo o sistema proposto pela COMSOL no banco de dados e simulações foram adicionados no modelo físico “Ray Optics – Geometrical Optics (gop)” e o modelo de estudo do “Physics interfaces – Ray tracing”

O modelo “gop” adiciona a interface física que calcula todos os caminhos das ondas eletromagnéticas até os limites da alta frequência, as ondas são tratadas como luz que se propagam através das geometrias óticamente grandes podendo refletir ou refratar, também possui uma de forma integrada de opções para calcular intensidade do raio, polarização, fase e comprimento do caminho ótico, assim como a propriedade de descontinuidade do material e das propriedades da luz incidente.

O nó de descontinuidade é utilizado como se fossem camadas de filmes finos entre os materiais grandes assim como exemplificado na Figura 22 onde o Azul representa o Ar com espessura infinitamente maior que o sistema e o cinza representa o Silício com espessura de aproximadamente ~ 5 mm e entre elas os materiais descontínuos como o vidro com espessuras de $(40\sim 130)$ μm e o vidro poroso com espessuras de $(50\sim 300)$ nm que visualmente não é possível enxergar porém está acima do vidro em contato direto com o ar. O modelo “Ray Tracing” é a etapa de estudo onde as trajetórias de cada raio são calculadas em função do tempo.

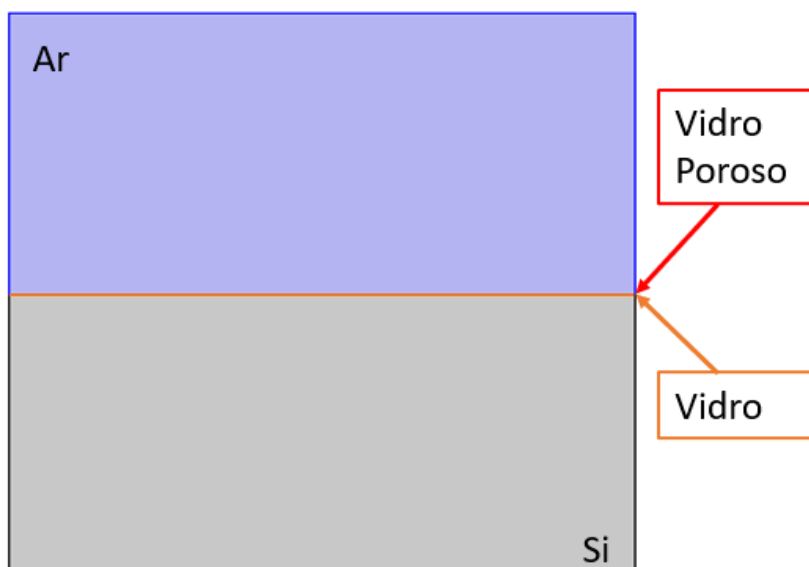


Figura 22 Esquematização da geometria no sistema.

As definições globais ou parâmetros para a simulação estão na *Tabela 5*, foram efetuadas 5 variações de t_1 de 50 a 300nm para cada uma das 9 espessuras de t_2 assim como na simulação numérica.

Tabela 5 - Definições Globais

Nome	Expressão	Valor	Descrição
n_air	1	1	Índice de refração do ar
n_glass	1.5	3.5	Índice de refração do vidro
n_poro	1.25	1.25	Índice de refração da porosidade
n_si	3.5	3.5	Índice de refração da Silício
lam0	550[nm]	5,5E-7m	Comprimento de onda de vácuo
t1	50~100[nm]	5E-8 ~ 1E-7	Espessura da porosidade
t2	70~130[um]	7E-5 ~ 1,3E-4	Espessura do vidro

Os dois materiais adicionados como mostrado na Figura 22 foram o ar e o silício assim como seus valores de refração que foram fixados. Em seguida foram adicionados os dois materiais descontínuos (vidro e porosidade) entre o ar e o silício, os valores de refração foram fixados juntos com t_1 e alterou-se os valores de t_2 , foram selecionados 4 gráficos das 9 simulações feitas como pode-se observar na da Figura 23. Os gráficos

correspondem perfeitamente a simulação numérica para t_1 constante para os mesmos valores de t_2 como foi mostrado na Figura 16 durante a simulação numérica.

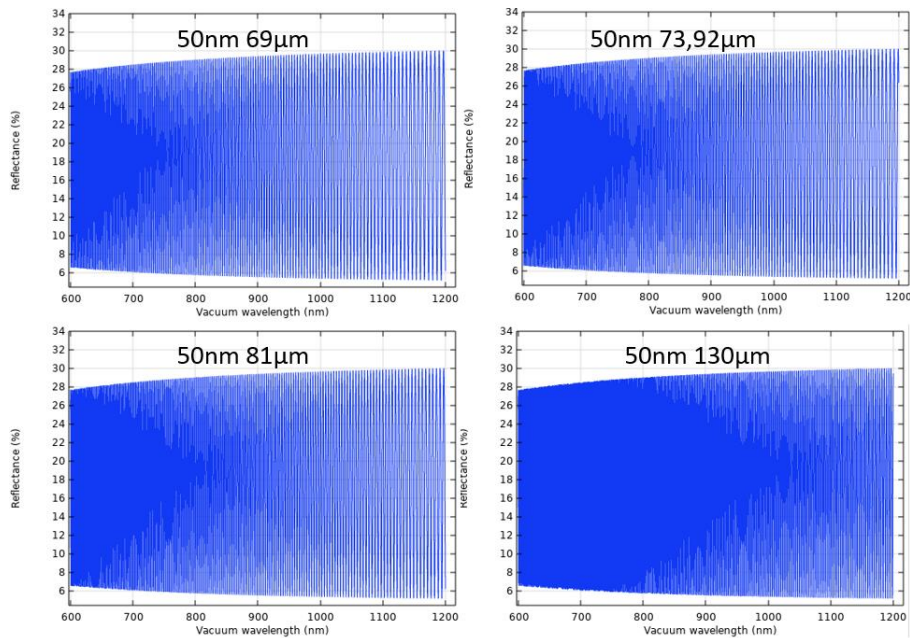


Figura 23 COMSOL - Refletância X Lambda com t_1 constante.

Então foram simulados os 9 gráficos para t_2 constante e variou-se t_1 entre 50 e 100, foram selecionados 4 dentre as 9 simulações como pode ser visto nos gráficos da Figura 24, e novamente os gráficos visualmente correspondem aos da Figura 19.

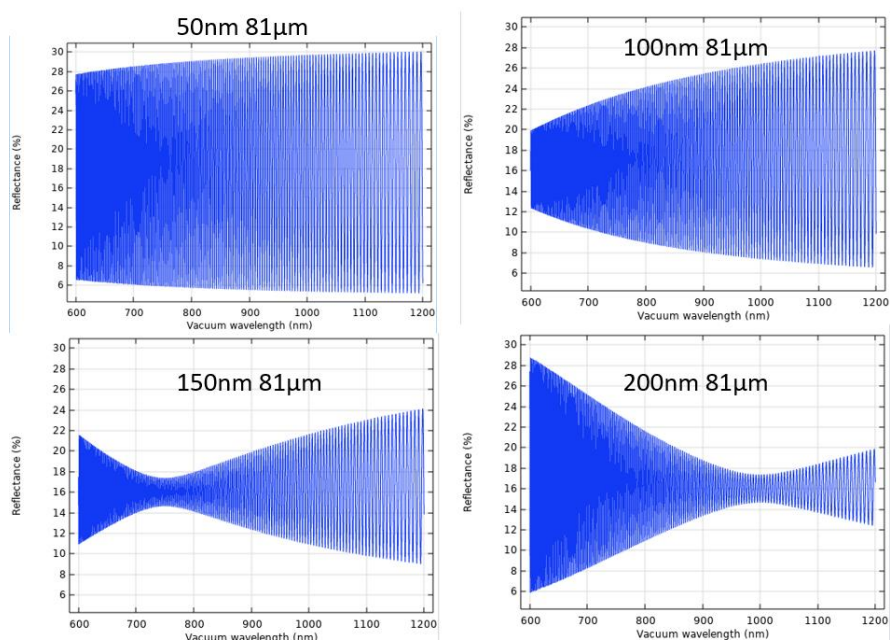


Figura 24 COMSOL- Refletância x Lambda com t_2 constante.

Visualmente os gráficos para a simulação numérica e pelo COMSOL eram idênticos para comprovar que os valores da área de cada gráfico eram iguais para as duas simulações foram extraídos novamente assim como na Figura 17 entre 100 e 150 dos pontos máximos de cada curva para gerar o gráfico comparativo da espessura da porosidade pelo espectro da luz.

Na Figura 25, temos a comparação entre as duas simulações, a única coisa que difere entre as duas é a área total que contém 2 ordens de grandeza a mais para a simulação feita no COMSOL pois no mesmo o valor da refletância sai em porcentagem enquanto na simulação numérica sai em valor absoluto. Para ajustar os gráficos no Origin e manter os mesmos valores de eixo para as duas simulações o valor do eixo Y do Comsol foi dividido por 100, passando os valores de porcentagem gerado pelo COMSOL para absoluto os valores de área variam no máximo 2% entre as duas simulações.

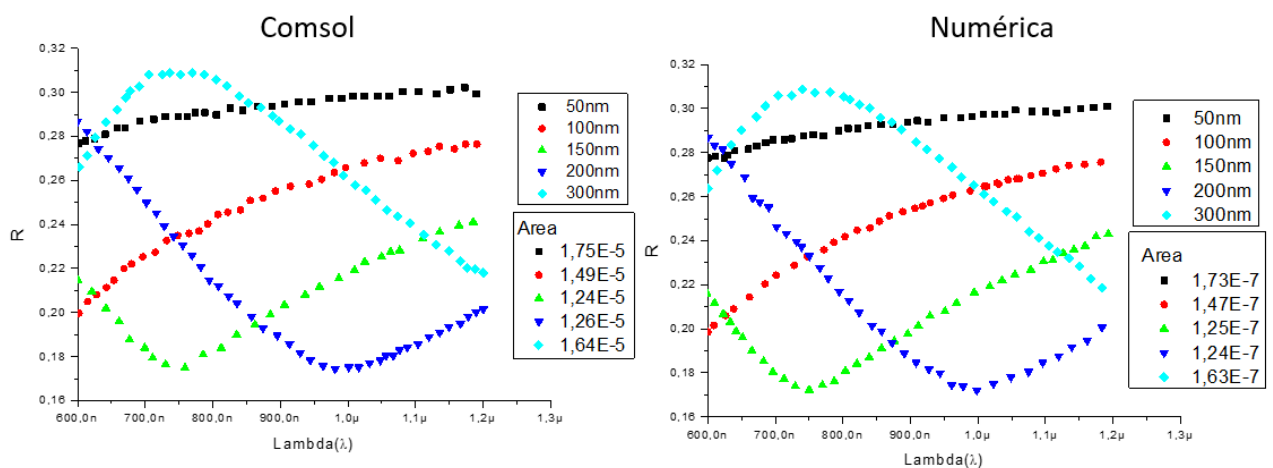


Figura 25 Comparativo de Refletância X Lambda das simulações.

6. Conclusões e perspectivas futuras

Foi comprovado que dentre a ampla faixa de espessuras estudadas de (30 a 120) μm as que estão próximas a 80 μm apresentam uma grande melhora no rendimento (LOUZADA, 2019). Pois a espessura da porosidade de 50 nm foi obtida com 6 h de afinção química o que corresponde a ~ 80 μm de espessura da lamínula. É possível observar que a eficiência final quase dobra em comparação a célula fotovoltaica sem o acrescentar uma lamínula em sua superfície uma melhora de aproximadamente 93%, e apresentando uma melhora de 53,3% se comparada a uma lamínula sem tratamento químico ($\sim 130\mu\text{m}$) adicionado por cima da célula fotovoltaica.

Em relação a tantos outros métodos para aumentar a eficiência experimental máxima das células Fotovoltaicas MOS atualmente em 26% até o patamar teórico de 33,5% para ambientes outdoor e subir o patamar de $\sim 7\%$ para ambiente indoor e assim a potência gerada, concluímos que a utilização das finas lamínulas de vidro como camada antirreflexiva para criar uma “armadilha” de luz fazendo a luz sofrer uma reflexão interna é uma forma eficiente e barata.

Para trabalhos futuros extrair os dados da transmitância pois ao colocar a lamínula sobre uma superfície espelhada a medição da transmitância sofre muita interferência devido a superfície rugosa do vidro tratado que espalha a luz refletida. Só foi constatado a existência da rugosidade durante a pandemia o que limitou o uso dos equipamentos para contornar o problema descoberto como a realização de um RBS e um AFM

Como próximas etapas para busca aumentar ainda mais a eficiência serão depositadas finas camadas de SiO por evaporação térmica sobre a lamínula, e fazer dopagem de terras raras, outro método encontrado é fazer a deposição de dopantes através das corrosões químicas controladas.

7. Referências

- [1] G. Masson and I. Kaizuka. IEA PVPS: TRENDS IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS. International Energy Agency-Photovoltaic Power Systems, 2019.
- [2] G. Masson and I. Kaizuka. IEA PVPS: TRENDS IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS. International Energy Agency-Photovoltaic Power Systems, 2013.
- [3] IEA, Renewables 2017. International Energy Agency-Photovoltaic Power Systems. 2017
- [4] IEA PVPS 23RD 2018, Trends 2018 in photovoltaic applications, Survey Report of Selected IEA Countries Between 1992 and 2017
- [5] Dr. Rodrigo Lopes Sauaia, Energia Solar Fotovoltaica: Panorama, Oportunidades e Desafios, 2017. ANEL(Agencia Nacional de Energia Elétrica)
- [6] W. Shockley and H. Queisser. Detailed balance limit of efficiency of p-n iunction solar cells. Journal of Applied Physics. v.32, n.3, p.510-519, 1961.
- [7] R. Mccarthy and H. Hill. The shockley-queisser limit and practical limits of nanostructured hotovoltaics. IEEE Photovoltaic Specialists Conference, p.1663-1668, 2012.
- [8] M. A. Green et al. Solar cell efficiency tables (version 54). Progress in Photovoltaics: Research and Applications. v.27, p. 565-575, 2019.
- [9] M. N. Watanabe, W. Chiappim Junior, V. Christiano, F. Izumi and S. G. Santos Filho. Fabrication and Electrical Characterization of MOS Solar Cells for Energy Harvesting. IEE 33rd Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro), 2018.
- [10] M. N. Watanabe, W. Chiappim Junior, V. Christiano, F. Izumi and S. G. Santos Filho. MOS solar cells for indoor LED energy harvesting. IEE 34th Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro), 2019.
- [11] V. Christiano. Fabricação de células solares MOS utilizando oxinitretos de silício obtidos por processamento térmico rápido (RTP). Ph.D. Thesis presented to the Escola Politécnica of São Paulo of the University of São Paulo (EPUSP), 2017
- [12] M. Watanabe. Fabricação, Caracterização e Modelagem elétrica de células solares MOS para aplicação em energy harvesting. Master's dissertation presented to the Escola Politécnica of São Paulo of the University of São Paulo (EPUSP), 2019.

- [13] J. Shewchun, R. Singh and M. A. Green. Theory of metalinsulatorsemiconductor solar cells. *J. Appl. Phys.*, vol. 48, p.765, 1977.
- [14] D. Pulfrey. MIS Solar Cells: A Review. *IEE Transactions on Electron devices*, vol. 25, p.11, 1978.
- [15] R. Hezel. Recent Progress in MIS solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 5, p.2, pp. 109-120, 1997.
- [16] C. Chen, C. Hong and J. Hwu. Silicon Metal-oxide-semiconductor Solar Cells with Oxide Prepared by Room Temperature Anodization in Hydrofluosilicic Acid Solution. *J. Electrochem. Soc.*, v.149, p. 6, pp. G362-G366, 2002.d
- [17] G. Louzada. Estudo de laminulas de vidro como camada antirreflexiva para células solares MOS. 21º Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica (SICT-2019) , 2019.
- [18] K. Reinhardt and W. Kern. *Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology*. 2nd edition. Norwich, NY: William Adrew, 2008.
- [19] Liu, L.-Q., Wang, X.-L., Jing, M., Zhang, S.-G., Zhang, G.-Y., Dou, S.-X. and Wang, G. (2012), Broadband and Omnidirectional, Nearly zero reflective Photovoltaic Glass. *Adv. Mater.*, 24: 6318-6322. doi:10.1002/adma.201201740
- [20] Chistiana Honsberg, Stuart Bowden. *Double Layer anti Reflection Coatings*.
- [21] RONILSON DI SOUZA. *Célula Fotovoltaica, o guia tecnico absolutamente completo*. BlueSol energia solar
- [22] Jäger, Klaus. *Solar Energy, Fundamentals, Technology, and systems*, 2016.
- [23] COMSOL Multiphysics® v. 5.6. www.comsol.com COMSOL AB, Stockholm, Sweden.

8. Lista de Publicações

LOUZADA, G.; REGIS, S.; SHIGA, W; IZUMI, F.; WATANABE, M.; RANGEL,R.; SANTOS S. Estudo de lamínulas de vidro como camada antirreflexiva para células solares MOS. 21º Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica (SICT – 2019), p. 67, v. 48, 2019.

REGIS, S.; SHIGA, W.; **LOUZADA, G.**; WATANABE, M.; IZUMI, F.; RANGEL, R; SANTOS, S. **Filmes finos de SiO como camada de passivação em células solares MOS.** 21º Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica (SICT – 2019). p. 71, v. 48, 2019.

LOUZADA, G.; WATANABE, M.; RANGEL,R.; SANTOS S. **Characterization of glass coverslips as anti-reflective layers for mos solar cells.** XV Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology (Seminatec), 2021.

SHIGA, W.; REGIS, S.; **LOUZADA, G.**; WATANABE, M.; IZUMI, F. ; CHRISTIANO ABÊ, V. ; RANGEL, R.; GOMES DOS SANTOS FILHO, S. . Electrical Characterization of Positively Charged SiO Coatings for MOS Solar Cells. JICS. JOURNAL OF INTEGRATED CIRCUITS AND SYSTEMS (ED. PORTUGUÊS), v. 15, p. 1-5, 2020.

Submissões

LOUZADA, G.; WATANABE, M.; RANGEL,R.; SANTOS S **Anti-reflection glass coverslips for indoor MOS photovoltaic cells.** 35th Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro), 2021, São Paulo.