

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
INSTITUTO DE FÍSICA E MATEMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA



Dissertação

**Aplicação de Filmes Finos Texturizados para o Incremento da
Conversão Energética de Painéis Fotovoltaicos**

Ramon Dadalto Carvalho

Pelotas, 2019

Ramon Dadalto Carvalho

**Aplicação de Filmes Finos Texturizados para o Incremento da
Conversão Energética de Painéis Fotovoltaicos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física do Instituto de Física e Matemática da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Física.

Orientador: Prof. Dr. Mario Lucio Moreira

Pelotas, 2019

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

C331a Carvalho, Ramon Dadalto

Aplicação de filmes finos texturizados para o incremento da conversão energética de painéis fotovoltaicos / Ramon Dadalto Carvalho ; Mario Lucio Moreira, orientador. — Pelotas, 2019.

62 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Física, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, 2019.

1. Nanoestruturas. 2. índice gradual de refração. 3. Alta transmitância. I. Moreira, Mario Lucio, orient. II. Título.

CDD : 530.41

Ramon Dadalto Carvalho

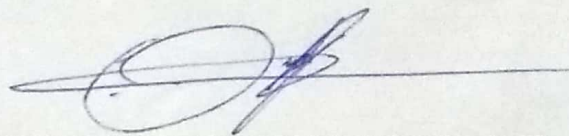
Título: Aplicação de Filmes Finos Texturizados para o Incremento da Conversão Energética de Painéis Fotovoltaicos

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Física, Programa de Pós-Graduação em Física, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 17 de Julho de 2019

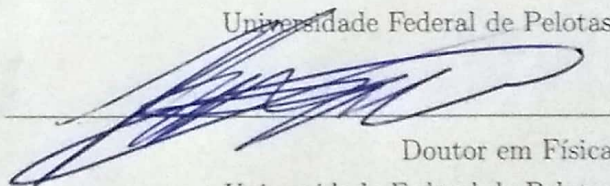
Banca examinadora:

Mario Lucio Moreira (Orientador)



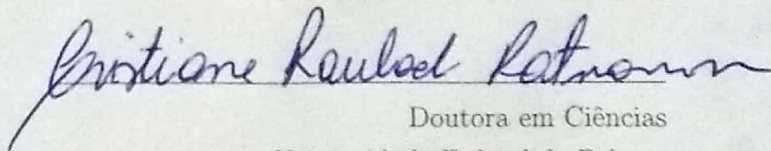
Doutor em Ciências
Universidade Federal de Pelotas

Pedro Lovato Gomes Jardim



Doutor em Física
Universidade Federal de Pelotas

Cristiane Wienke Raubach Ratmann



Doutora em Ciências
Universidade Federal de Pelotas

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelas graças alcançadas.

Agradeço a minha família, meu pai Claudimar Catarinozi Carvalho, minha mãe Maria Aparecida Dadalto Carvalho e ao meu irmão Rodrigo Dadalto Carvalho, pelos incentivos a prosseguir nos estudos.

Agradeço a minha namorada Bruna Caetano Moreira, pelo apoio e a toda a ajuda que me prestou no trabalho.

Agradeço aos amigos da pós-graduação de pelo incentivo e ajuda.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelos recursos para a compra de equipamentos.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul - FAPERGS pelos recursos para a aquisição de equipamento.

Também gostaria de agradecer à Fundação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado e recursos para viagens.

Ao Curso de Pós-Graduação em Física pela oportunidade de estudo e utilização de suas instalações.

A Universidade Federal de Pelotas - UFPel, pela infraestrutura de modo geral.

Ao grupo de pesquisas de Crescimento de Cristais Avançados e Fotônica - CCAF, pelo apoio com a pesquisa.

Ao meu orientador professor Mario Lucio Moreira, pela disponibilidade e paciência.

Aos professores e pesquisadores conhecimento compartilhado.

RESUMO

CARVALHO, Ramon, **Aplicação de Filmes Finos Texturizados para o Incremento da Conversão Energética de Painéis Fotovoltaicos** 2019, 64p. Dissertação (Mestrado em Física) - Programa de Pós-Graduação em Física, Departamento de Física, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

A energia fotovoltaica vem se destacando como fonte de energia alternativa, o que desperta o interesse por métodos que possam aumentar a conversão energética de painéis fotovoltaicos, com a finalidade de reduzir o custo de geração da energia solar. Neste trabalho, propomos uma metodologia de tratamento de superfícies para painéis fotovoltaicos comerciais, de silício policristalino do modelo *Aiyima* com dimensões $19mm$ por $39mm$ com eficiência de 17% e tensão máxima de $0,5V$. Assim sendo, utilizou-se filmes finos depositados em substratos de vidro (lâmina de microscópio), com dimensões de $26mm$ por $76mm$, por meio de recobrimento por imersão e posteriormente submetidos ao processo de desbaste químico, com os tempos de $0s$, $4s$, $512s$ e $1024s$, para a formação de diferentes rugosidades em sua superfície resultando em nanoestruturas. Tais nanoestruturas, conferem a amostra de $512s$ de *etching* transmitância de até 99,70%, na faixa espectral do visível, devido ao índice gradual de refração gerado na interface ar-filme, enquanto, o vidro plano tem uma transmitância de 94,45%, na mesma faixa do comprimento de onda. Os painéis fotovoltaicos encapsulados por substrato de vidro plano, com e sem filme fino depositados, foram submetidos às medidas elétricas, a fim de determinar os parâmetros fotovoltaicos, que para o painel fotovoltaico com o filme fino de $512s$ obteve diferença de potencial de circuito aberto V_{oc} de $0,45V$, corrente de curto-circuito I_{sc} de $8,95mA$ e que foram utilizados para o cálculo do fator de preenchimento FF de 0,58 que, por sua vez, é a medida de conversão energética do painel. Os parâmetros obtidos para o painel fotovoltaico sem vidro, descoberto, (CSF), foram I_{sc} $9,26mA$, V_{oc} $0,42V$ e um FF de 0,54. O painel fotovoltaico com filme fino de $512s$, obteve uma V_{oc} e um FF maiores que o painel descoberto e, por conseguinte, um incremento na conversão energética do painel fotovoltaico.

Palavras Chave: Nanoestruturas, índice gradual de refração, alta transmitância

ABSTRACT

CARVALHO, Ramon, **Application of Textured Thin Films to Enhance the Energy Conversion of Photovoltaic Panels** 2019, 64p. Dissertation (Master Degree in Physics) - Programa de Pós-Graduação em Física, Departamento de Física, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, 2019.

Photovoltaic energy has been emerging as an alternative energy source, which arouses interest in methods that can increase the energy conversion of photovoltaic panels in order to reduce the cost of solar energy generation. In this paper, we propose a surface treatment methodology for commercial polycrystalline silicon photovoltaic panels of the *Aiyima* model with dimensions $19mm$ for $39mm$ with efficiency of 17% and maximum voltage of $0,5V$. Therefore, thin films deposited on glass substrates (microscope slide), with dimensions of $26mm$ for $76mm$, were used by immersion coating and subsequently submitted to the chemical grinding process, with the times of $0s$, $4s$, $512s$, and $1024s$, for forming different roughness on its surface resulting in nanostructures. Such nanostructures give the $512s$ etching transmittance sample up to $99,70\%$ in the visible spectral range due to the gradual refractive index generated at the air-film interface, while flat glass has a transmittance of $94,45\%$, in the same wavelength range. The flat glass substrate encapsulated photovoltaic panels, with and without deposited thin film, were subjected to electrical measurements in order to determine the photovoltaic parameters, which for the $512s$ thin film photovoltaic panel obtained circuit potential difference. open V_{oc} of $0,45V$, short circuit current I_{sc} of $8,95mA$ and which were used to calculate the FF fill factor of $0,58$ which, in turn, is the energy conversion measure of the panel. The parameters obtained for the bare glass photovoltaic panel (CSF) were I_{sc} $9,26mA$ V_{oc} $0,42V$ and an FF of $0,54$. The $512s$ thin-film photovoltaic panel achieved a larger V_{oc} and an FF than the bare panel and therefore an increase in the photovoltaic panel's energy conversion.

Key-words: Nanostructures, gradual index of refraction, high transmittance

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRAFICA | 21 |
| 2.1 | Gerações das Células Fotovoltaicas | 21 |
| 2.1.1 | Primeira Geração | 21 |
| 2.1.2 | Segunda Geração | 22 |
| 2.1.3 | Terceira Geração | 23 |
| 2.2 | Estudos para o Aumento da Eficiência de Células Solares | 24 |
| 2.3 | Superfícies de Alta Transmitância e Aplicação | 29 |
| 2.3.1 | Superfícies de Alta Transmitância | 29 |
| 2.3.2 | Aplicação de Superfície de Alta Transmitância | 32 |
| 2.4 | Óxido de Alumínio (Al_2O_3) - Alumina | 33 |
| 2.5 | Método de Recobrimento por Imersão | 34 |
| 3 | OBJETIVOS | 35 |
| 3.1 | Objetivo Geral | 35 |
| 3.2 | Objetivos Específicos | 35 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS | 37 |
| 4.1 | Síntese da Alumina | 37 |
| 4.2 | Deposição dos Filmes Finos por meio de Revestimento por Imersão | 38 |
| 4.3 | Desbaste Químico | 39 |
| 4.4 | Espectroscopia UV-Visível | 39 |
| 4.5 | Encapsulamento dos Painéis Fotovoltaicos | 40 |
| 4.6 | Medidas Elétricas e Parâmetros Fotovoltaicos | 42 |
| 4.6.1 | Medidas Elétricas | 42 |
| 4.6.2 | Parâmetros Fotovoltaicos | 42 |
| 5 | RESULTADOS | 45 |
| 5.1 | Espectroscopia de Transmitância UV-VIS dos Filmes Finos | 45 |
| 5.2 | Microscopia Eletrônica de Varredura das Superfície dos Filmes Finos | 49 |
| 5.3 | Caracterização dos Parâmetros Elétricos dos Painéis Fotovoltaicos | 51 |

| | |
|---|-----------|
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS | 57 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 59 |

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 1.1 Representação esquemática de um painel fotovoltaico e seus constituintes. | 18 |
| 2.1 Representação do funcionamento da junção p-n que compõe as células fotovoltaicas de primeira geração. | 22 |
| 2.2 Representação das frústulas de diatomáceas e suas diferentes camadas, adaptado de [21]. | 24 |
| 2.3 Resultados das simulações do espectro de absorção de luz para cada camada da frústula de diatomáceas, adaptado de [21]. | 25 |
| 2.4 Espectro de absorção de luz para o modelo simplificado da frústula de diatomáceas, adaptado de [21]. | 26 |
| 2.5 (A) Representação esquemática da célula solar experimental. (B) Espectro de absorção de luz da célula solar experimental, adaptado de [21]. | 27 |
| 2.6 (A) Nanoestrutura difrativa. (B) Nanoestrutura plasmônica, adaptado de [8]. | 28 |
| 2.7 Espectro de absorção de luz para célula solar de $a - Si$. Sem estrutura de captura de luz, referência, com a nanoestrutura difrativa e com nanoestrutura plasmônica, adaptado de [8]. | 29 |
| 2.8 Esquemas ilustrativos do índice gradual de refração: (A) recastamento com índice gradual de refração; (B) região com o gradiente do índice de refração. | 30 |
| 2.9 Esquema ilustrativo da superfície final após o desbaste químico com atmosfera reativa [24]. | 31 |
| 2.10 Ilustração do índice de refração gradual, adaptado de [25]. | 32 |
| 2.11 Esquema ilustrativo do encapsulamento das células fotovoltaicas, com o vidro plano e também com o vidro nanotexturizado, adaptado de [29]. | 33 |
| 2.12 Esquema ilustrativo do processo de deposição por imersão, adaptado de [37]. | 34 |
| 4.1 Esquema ilustrativo da síntese da alumina. | 37 |
| 4.2 Equipamento de deposição por imersão, <i>dip-coater</i> | 38 |
| 4.3 Equipamentos para a espectroscopia de transmitância UV-VIS com feixe não colimado: (A) fonte de luz ultravioleta-infravermelho; (B) esfera integradora; (C) espectrofotômetro | 39 |
| 4.4 Equipamentos para a espectroscopia de transmitância UV-VIS com feixe colimado: (A) fonte de luz ultravioleta-infravermelho; (B) esfera integradora e lente; (C) espectrofotômetro | 40 |
| 4.5 Painel solar antes e depois da soldagem dos contatos elétricos: (A) antes da soldagem, imagem da parte superior e inferior do painel; (B) após a soldagem. | 41 |

| | | |
|-----|---|----|
| 4.6 | Processo de encapsulamento do painel solar: (A) suporte de vidro com fita adesiva dupla face; (B) painel fixado no suporte de vidro; (C) painel após a fixação do substrato de vidro na parte frontal. | 41 |
| 4.7 | Equipamentos para as medidas de diferença potencial vs. corrente elétrica: (A)-(1) varivolt e (A)-(2) lâmpadas halogêneas; (B) potenciostato. | 42 |
| 4.8 | Curva de corrente vs. diferença de potencial para o painel fotovoltaica, esquema ilustrativo para o cálculo do fator de preenchimento. | 43 |
| 5.1 | Imagem do substrato de vidro, sem filme fino e com os filmes de: com 0s de desbaste, sem modificação de superfície; com os tempos de desbastamento de 4s, 512s e 1024s | 45 |
| 5.2 | Espectro de transmitância com o feixe de luz incidente não colimado, as amostras são: substrato de vidro; filme fino de 0s, sem desbaste químico; filmes finos desbastados com os tempos de 4s, 512s e 1024s. A legenda indicativa de cada curva com a respectiva amostra está no espectro. | 46 |
| 5.3 | Espectro de transmitância com o feixe de luz incidente colimado, as amostras são: substrato de vidro; filme fino de 0s, sem desbaste químico; e filmes finos desbastados com os tempos de 4s, 512s e 1024s. A legenda indicativa de cada curva com a respectiva amostra está no espectro. | 48 |
| 5.4 | MEV do (A) substrato de vidro e (B) filmes finos 0s sem desbastamento químico. . | 49 |
| 5.5 | MEV dos filmes finos submetidos ao desbaste químico com os seguintes tempos: (A) 4s; (B) 512s (C); 1024s. | 50 |
| 5.6 | Gráficos de potencial vs. corrente, para as luminosidades correspondentes à diferenças de potencial nas lâmpadas halogêneas de 40V e 60V, para os painéis fotovoltaicos com: CSF; filme fino 0s; filme fino 4s; filme fino 512s; filme fino 1024s e; com substrato de vidro. | 52 |
| 5.7 | Gráficos de potencial vs. corrente, para as luminosidades correspondentes à diferenças de potencial nas lâmpadas halogêneas de 80V e 100V, para os painéis fotovoltaicos com: CSF; filme fino 0s; filme fino 4s; filme fino 512s; filme fino 1024s e; com substrato de vidro. | 54 |
| 5.8 | Gráfico dos fatores de preenchimento dos painéis fotovoltaicos com: CSF; filme fino 0s; filme fino 4s; filme fino 512s; filme fino 1024s e; com substrato de vidro. Quando submetidas a diferentes luminosidades | 56 |

1 INTRODUÇÃO

Nas discussões sobre energias renováveis, a solar tem papel central devido ao seu grande potencial, além de estar presente nas políticas energéticas de países desenvolvidos e emergentes. Pois, a busca por redução das emissões de gases de efeito estufa, tendo como esforço principal a diminuição do uso de combustíveis fósseis, para tal, é necessário um maior desenvolvimento tecnológico dos dispositivos fotovoltaicos, que implica, portanto, em sustentabilidade ambiental, social e econômica [1, 2].

Atualmente o desenvolvimento tecnológico do setor fotovoltaico está concentrado em países como a China, maior produtor de painéis fotovoltaicos, EUA, inserido no contexto da retomada econômica, e também como o Japão, no redirecionamento das políticas energéticas pós-Fukushima [1].

No Brasil existem poucas usinas instaladas para a geração de energia fotovoltaica, mesmo este sendo um país com grande potencial de geração, sobretudo, na região Nordeste, porém, esta situação vem mudando nos últimos anos com o aumento da capacidade de geração de energia fotovoltaica instalada [3]. No entanto, um grande entrave para a ampliação da geração fotovoltaica é o custo elevado da implantação do sistema, que ocorre devido à dependência de dispositivos importados, uma vez que o país não dispõe de tecnologia 100% nacional [2].

Dentro da concepção de custo de produção e eficiência das células fotovoltaicas, o desenvolvimento tecnológico já está em sua terceira geração, sendo a primeira de células constituídas por junção p-n com base em lâminas de silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si) [4]. Quanto a segunda, as células foram desenvolvidas por meio da utilização de filmes finos de silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe) e cobre, índio, gálio e selênio (CIGS) [5]. Por último, a terceira, com células sensibilizadas por corante (DSSC) e orgânicas [6]. Essas três gerações foram desenvolvidas visando uma melhora na eficiência, redução de custos de produção e, conseqüentemente, um menor valor no custo do painel fotovoltaico.

Entretanto, visando a obtenção de célula fotovoltaica com maior eficiência, os pesquisadores foram em busca de estruturas de captura de luz, utilizando filmes finos anti reflexivos que reduzem a reflectância por índice gradual de refração, de modo a aumentar a absorção de radiação pelas células. Portanto, o objetivo destas estruturas é fazer com que a quantidade fótons incidentes na camada ativa da célula seja maior, obtendo assim um acréscimo na fotocorrente [7].

Na literatura é possível encontrar alguns métodos empregados na captura de luz para

aumentar a absorção desta pela camada ativa de células fotovoltaicas, como por exemplo nanoestruturas difrativas e plasmônicas [8], e cristais fotônicos [9]. Além disso, podem ser encontradas pesquisas sobre a texturização do vidro para a obtenção de superfícies de espalhamento de luz, seja na parte frontal [7, 10, 11] ou como refletor traseiro [12]. Porém, todas essas pesquisas foram feitas com o vidro texturizado sendo incorporado na estrutura da célula fotovoltaica, sobretudo, em célula de filme fino de silício de segunda geração.

Nesta pesquisa, foram realizados estudos com vidro que é utilizado como camada de proteção dos painéis fotovoltaicos, como pode ser visualizado na ilustração da Figura 1.1. Pois, esta proteção é necessária devido a exposição dos painéis as intempéries do meio ambiente. Porém, este vidro utilizado, mesmo tendo transmitância próxima a 94,0%, ainda assim, parte da luz é desviada devido a reflectância.

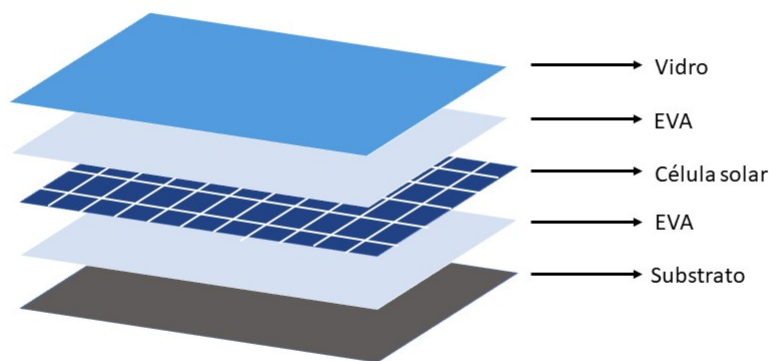


Figura 1.1 - Representação esquemática de um painel fotovoltaico e seus constituintes.

Os constituintes do painel fotovoltaico da Figura 1.1 são para: vidro, proteção contra intempéries do meio ambiente; EVA, película translúcida e não refletora da radiação solar e garante também o isolamento elétrico entre as células; célula solar, converte a luz do sol em corrente elétrica; substrato, proteção da parte posterior do painel evitando a entrada de água.

Portanto, utilizando um revestimento de filme fino de alumina (Al_2O_3) depositado em substrato de vidro, para minimizar a reflectância. Para tal, submetemos o filme fino de alumina a um desbaste químico para formar nanoestruturas em sua superfície e, com isso, uma interface, ar-filme, com um índice gradual de refração. Sendo assim, decidimos

utilizar alumina, por ser um composto com outros aspectos já estudados no grupo de pesquisas de crescimento de cristais avançados e fotônica CCAF, rota de síntese bem estabelecida [13], processo de deposição por imersão com disponibilidade de equipamento e processo de desbaste químico relativamente simples.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 Gerações das Células Fotovoltaicas

As células solares estão categorizadas em três gerações, com diferentes custos de produção, materiais e também eficiências. Com o objetivo de tornar-se mais competitiva no mercado de geração de energia, o desenvolvimento de novas células solares tem como premissa um menor custo de produção e maior eficiência, pois a energia solar é aproximadamente quatro vezes mais dispendiosa financeiramente que as fontes de energia fosseis [4].

2.1.1 Primeira Geração

A primeira geração de células fotovoltaicas, compreende-se por dispositivos baseados em filmes de silício cristalino que podem ser monocristalino (m-Si) [14, 15], podendo chegar à 24,4% de eficiência, ou policristalino (p-Si), com 19,9% de eficiência [16]. Sendo, as células mais comercializadas, com aproximadamente, 90% do mercados de painéis fotovoltaicos. Este sucesso na comercialização, se deve a algumas qualidades do silício, como a abundância no planeta, a estabilidade e a não toxicidade, com sensibilização na faixa do espectro eletromagnético emitido pelo sol e que chega até a terra, contendo um "band-gap" de 1,1eV e também sua compatibilidade com a indústria de fabricação de microeletrônicos de silício, como transistores e circuitos integrados. Contudo, possuem um alto custo de produção [4, 17].

Estas células fotovoltaicas são do tipo junção p-n, que consiste na união de duas regiões com materiais semicondutores com diferentes concentrações de elétrons, veja a Figura 2.1. Sendo, uma região com material com excesso de elétrons, tipo-n e a outra com material com excesso de cargas positivas, chamadas de buracos, tipo-p, todavia, ambos os semicondutores são eletricamente neutros. Quando as regiões estão em contato, os buracos fluem da região p e os elétrons da região n através da junção p-n, que é chamada de corrente de difusão. Além disso, próximo a junção os íons que estão fixos geram um campo elétrico de direção contrário a corrente de difusão. Assim, os íons gerados na região p, constitui uma barreira que impede que os elétrons livres do material do tipo-n se recombinem com os buracos do material do tipo-p [4, 17].

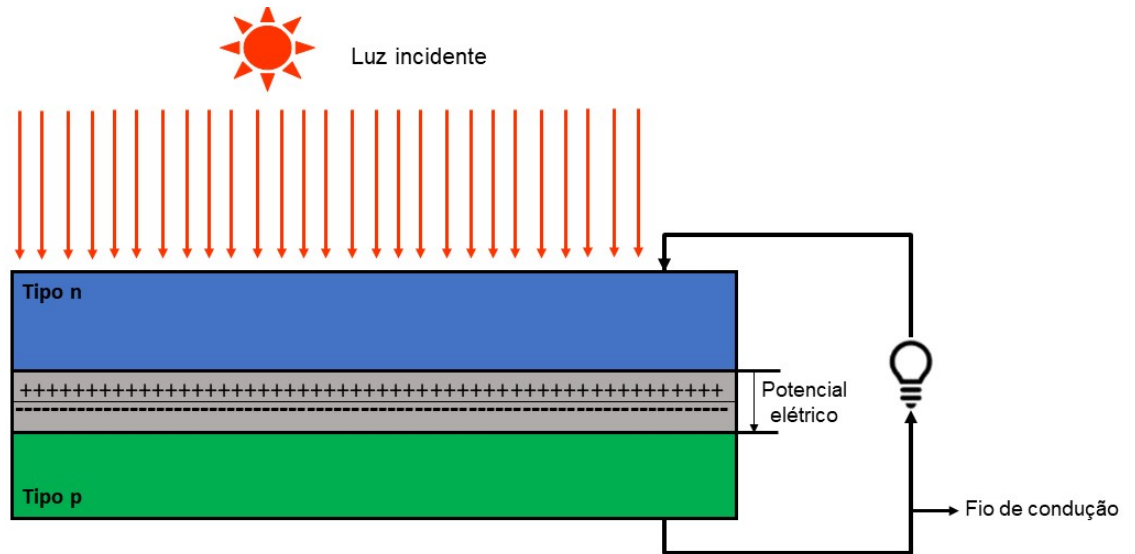


Figura 2.1 - Representação do funcionamento da junção p-n que compõe as células fotovoltaicas de primeira geração.

Quando, a luz incide na superfície da célula solar os fótons são absorvidos pelos elétrons que, por sua vez, rompem suas ligações criando pares de elétrons e buracos, que são movidos pelo campo elétrico através da junção p-n, para exemplificar, veja a Figura 2.1. Portanto, quando uma carga externa é conectada, uma corrente e uma diferença de potencial entre os terminais da célula solar são estabelecidos [4, 17].

2.1.2 Segunda Geração

Devido ao alto custo de produção das células de primeira geração, serviu de motivação para o desenvolvimento da tecnologia de segunda geração. Baixando custo com a eliminação do excesso de material e mantendo, aproximadamente, a eficiência da geração anterior, para tal utilizou-se filmes finos. Essas células, foram desenvolvidas com a utilização de filmes finos de Silício amorfo (a-Si) e Telureto de Cádmio (CdTe) e Cobre, Índio, Gálio e Selênio (CIGS), depositados em substratos de baixo custo, como por exemplo, vidro [5].

Dentre as células de filmes finos, de segunda geração, a de Silício amorfo (a-Si) foi a que obteve melhor eficiência. Essa tecnologia tem uma estrutura atômica aleatoriamente localizada, contribuindo para que o material tenha um maior "band-gap" de $1,7eV$, enquanto

que as células de Silício cristalino (c-Si), primeira geração, tem um "band-gap" de $1,1\text{eV}$. Com isso, o material ativo da célula de a-Si absorve a faixa de frequência da luz visível do espectro solar, melhor que o infravermelho. Algumas variações dessa tecnologia são: com junção única, dupla ou tripla junções ou junção tandem; deposição em vidro ou materiais flexíveis [6]. Quanto a eficiência, as células de junção única com 10,2%, de múltiplas junções com 14,0% e de junção tandem com 12,3% de eficiência [16].

Os dispositivos fotovoltaicos de CdTe tem uma absorção elevada, podendo absorver grande parte do espectro solar. Além disso, tem um processo de produção simples e barato, sendo uma vantagem em relação as células de primeira geração [6]. A eficiência desse dispositivo, já alcança os 23,3% [16]. Entretanto, células solares com esse material ainda enfrentam problemas, que incluem a dificuldade de dopar o CdTe, a instabilidade no desempenho e também o fato do Cádmio ser tóxico [6].

2.1.3 Terceira Geração

Na busca por dispositivos fotovoltaicos que ofereçam um baixo custo e uma alta eficiência, surgiu a terceira geração, com células sensibilizadas por corante (DSSC) e as células orgânicas [5, 6].

A célula solar sensibilizada por corante foi desenvolvida visando baixar os custos de produção e, conseqüentemente, energia mais barata. Essa célula é baseada em um filme opticamente transparente de dióxido de titânio (TiO_2), adsorvido com um corante para sensibilizar o filme para absorção da luz. A combinação da área do semicondutor e as características de absorção espectrais do corante foi importante para o desenvolvimento de uma célula que absorve boa parte da energia solar incidente. A eficiência desse tipo de dispositivo, quando desenvolvido, foi entre 7,1% e 7,9% utilizando-se como fonte de luz um simulador solar em laboratório e na luz difusa do dia com 12% de eficiência [18]. Estudos recentes, mostram que a eficiência desse tipo de célula é de aproximadamente 11,9% [16].

Quanto as células orgânicas, nos últimos anos esse tipo de dispositivo vem sendo pesquisado e obtendo bons resultados. Uma vantagem é a sua espessura e peso que podem ser fatores importantes na redução de custos e uma desvantagem é a sua rápida degradação [5]. Essas células solares são, basicamente, um sanduíche de uma polímero orgânico entre um vidro revestido por um filme fino de óxido de índio dopado com estanho (ITO) e um cátodo para fazer o contato elétrico [19]. Em uma recente pesquisa, uma célula orgânica obteve eficiência de 11,2%, com eficiência equivalente a das células de c-Si e a-Si, sob as mesmas condições de teste [20].

2.2 Estudos para o Aumento da Eficiência de Células Solares

Pesquisas teóricas e experimentais foram realizadas nos últimos anos, com o objetivo de melhorar o entendimento do processo de aprisionamento e absorção de luz pelas células solares resultando em um aumento na eficiência da conversão fotovoltaica. Estas pesquisas foram, por exemplo: Investigação numérica e experimental do efeito de captura de luz de frústulas de diatomáceas (fitoplâncton) nanoestruturadas [21]; Nanoestruturas plasmônicas e difrativas para o aprisionamento de luz, uma comparação experimental [8] e; Desordem em estruturas de captura de luz melhora a absorção de luz em células solares de filme fino de silício cristalino [22]. Entretanto, os trabalhos que estão apresentados nesta seção, serviram apenas para termos uma ideia das pesquisas realizadas, de modo geral, visando um aumento de eficiência das células solares e não tendo uma intensa sinergia com a nossa pesquisa.

Na pesquisa realizada por Chen *et al.* [21], foram estudadas as propriedades fotônicas das frústulas de diatomáceas, com investigações por meio de simulações computacionais e experimentais. A frústula consiste em uma estrutura hierárquica, constituída de três camadas denominadas por cribelo, cribrum e placa interna. Cada camada corresponde a uma película fina de matriz hexagonal com orifícios circulares, como mostra a Figura 2.2.

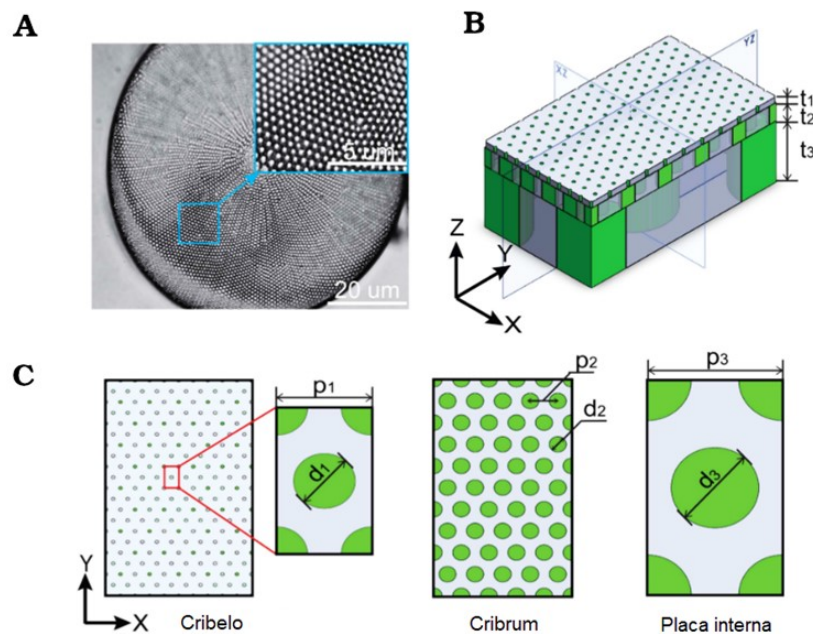


Figura 2.2 - Representação das frústulas de diatomáceas e suas diferentes camadas, adaptado de [21].

Assim, para o estudo do processo de captura de luz pela frústula de diatomácea, foi empregado método de análise de ondas acopladas. E para realizar a simulação foi considerado um modelo de célula solar de filme fino de material ativo PTB7: PC₇₁BM com 50nm de espessura e sobre essa camada, foram depositadas as frústulas que agiram como um dispersor de luz. Assim, a partir dessas considerações, simulações para cada película da frústula foram efetuadas. Outra ponderação, foi para o caso de controle em que a camada individual tinha índice de refração efetivo. Como referência, utilizou-se apenas uma camada ativa, sem sobreposição. Os resultados das simulações para cada camada individual, podem ser observados nos gráficos presentes na Figura 2.2 [21].

Portanto, pode ser observado na Figura 2.3 B, que o cribelo não contribui de forma significativa para haver um aumento no aprisionamento da luz, pois não ocorre nenhum aumento expressivo na absorção de luz. Entretanto, para os casos do Cribrum e Placa Interna, os gráficos das Figuras 2.3 C e 2.3 D, respectivamente, apresentam picos de absorção em 390nm e 750nm. Evidenciando que, essas camadas contribuem para o aprisionamento de luz [21].

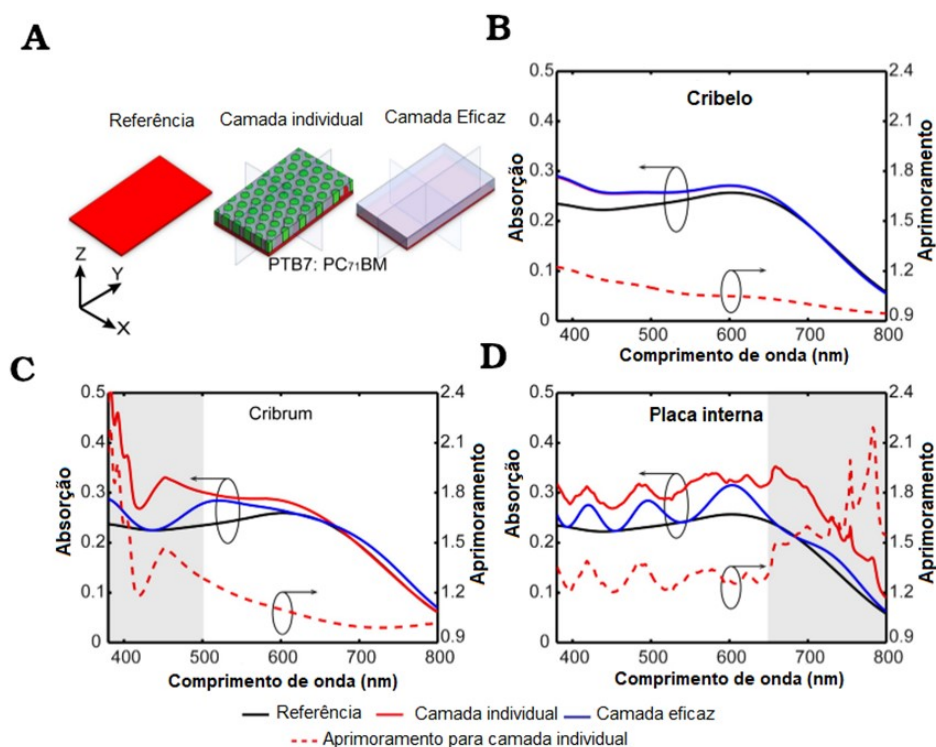


Figura 2.3 - Resultados das simulações do espectro de absorção de luz para cada camada da frústula de diatomáceas, adaptado de [21].

Para avaliar os efeitos de captura de luz, as frústulas de diatomáceas foram sobrepostas ao filme fino de PTB7: PC₇₁ BM, como mostra a Figura 2.2. Para o caso do controle, foi considerada uma camada individual com índice de refração efetivo e homogêneo. O resultado da simulação que pode ser visto no gráfico da Figura 2.2, mostra que as frústulas aumentam o coeficiente de absorção na faixa espectral de 380nm a 800nm, obtendo um acréscimo de 32% na absorção de luz. O gráfico da Figura 2.4 apresenta dois picos de absorção, identificados por λ_1 e λ_2 , nas faixas espectrais de 380nm a 500nm e 650nm a 800nm, com seus respectivos fatores de aumento de absorção de 1,73 e 2,18 [21].

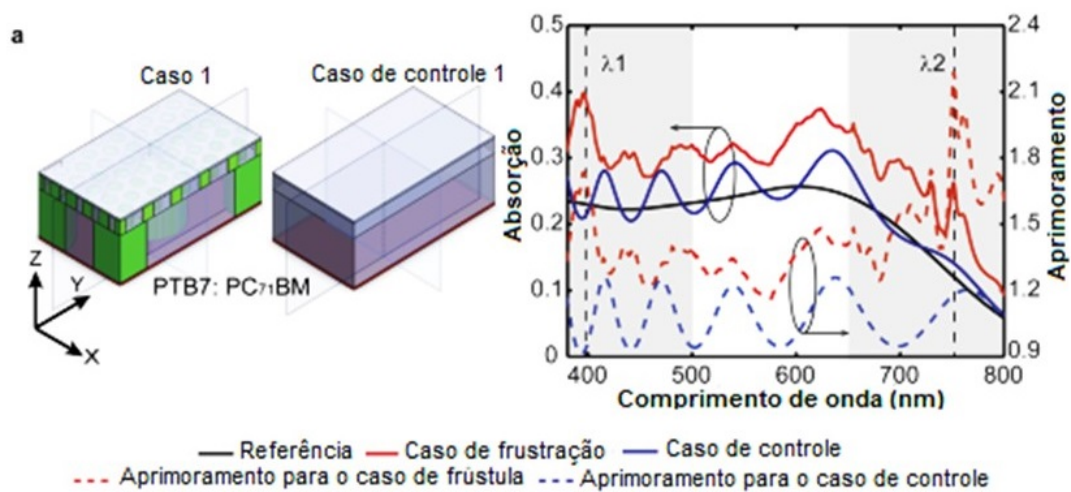


Figura 2.4 - Espectro de absorção de luz para o modelo simplificado da frústula de diatomáceas, adaptado de [21] .

Quanto aos resultados experimentais, serviram para corroborar com os resultados das simulações. A amostra experimental consistiu em um filme fino ativo de 50nm de espessura, o mesmo no qual o índice de refração foi utilizado nas simulações, PTB7: PC₇₁ BM e com uma camada de frústula de diatomácea depositada sobre, como mostra a Figura 2.5 A. Assim, quanto ao resultado experimental, demonstra que ocorreu um aumento no espectro de absorção, com um resultado acima da amostra de referência apresentando picos de absorção nas regiões espectrais de 380nm a 500nm e 650nm até 800nm, como podem ser observados na Figura 2.5 B [21].

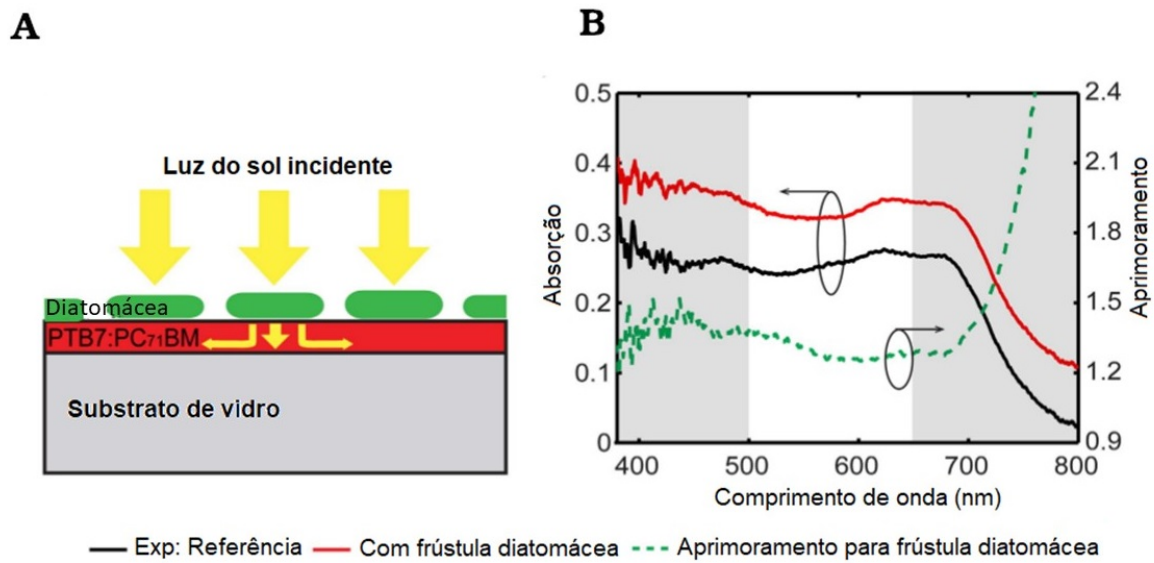


Figura 2.5 - **(A)** Representação esquemática da célula solar experimental. **(B)** Espectro de absorção de luz da célula solar experimental, adaptado de [21].

No trabalho realizado por Schuster *et al.* [8], foi feita uma comparação entre a nanoestrutura difrativa e as nanopartículas de metal. Com o intuito de analisar os processos de captura e absorção de luz, em células fotovoltaicas de filme fino de silício amorfo, com espessura de 240nm . Para o caso difrativo, foi utilizada texturização quase aleatória e para a estrutura plasmônica, foram empregadas nanopartículas de prata. Para ambos os casos, o material ativo foi o mesmo. As configurações das amostras utilizadas no trabalho, podem ser visualizadas na Figura 2.6.

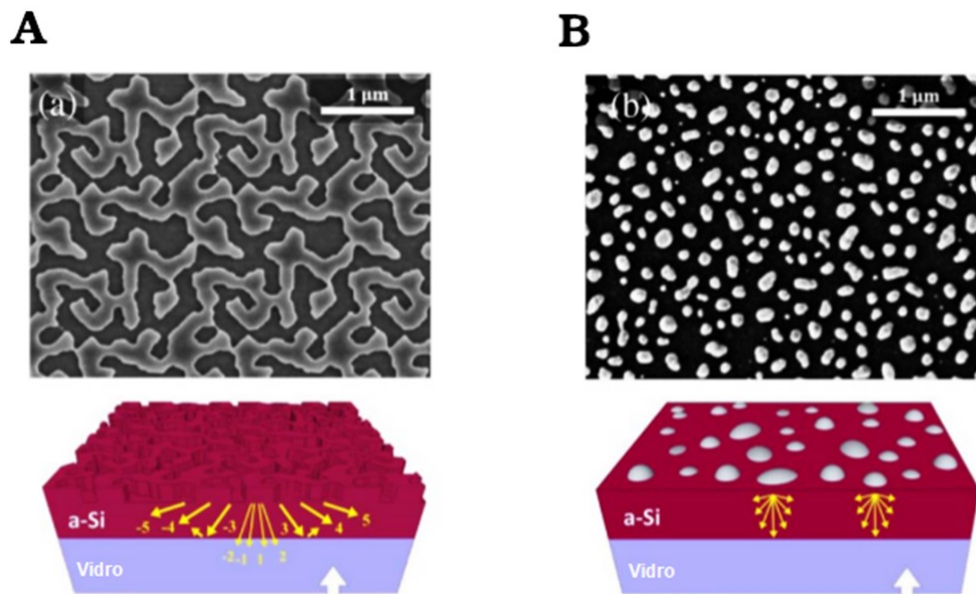


Figura 2.6 - **(A)** Nanoestrutura difrativa. **(B)** Nanoestrutura plasmônica, adaptado de [8].

Para os dois casos estudados por Schuster *et al.* [8], a luz foi incidida na superfície do substrato de vidro semiconductor. A célula solar de estrutura difrativa, obteve um melhor desempenho de absorção de luz na faixa espectral de 550nm a 700nm . Entretanto, para o caso do dispositivo fotovoltaico com nanoestrutura plasmônica, a melhor eficiência na absorção de luz ocorreu na faixa espectral de 700nm a 1000nm . Os resultados podem ser visualizados no gráfico da Figura 2.7.

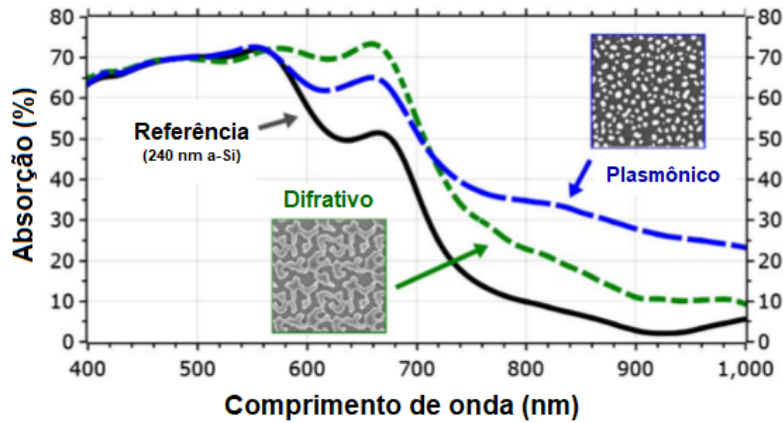


Figura 2.7 - Espectro de absorção de luz para célula solar de $a - Si$. Sem estrutura de captura de luz, referência, com a nanoestrutura difrativa e com nanoestrutura plasmônica, adaptado de [8].

De acordo com os resultados obtidos no estudo mencionado acima, a nanoestrutura difrativa acarretou em um aumento de 25% na absorção de luz pelo silício, enquanto a nanoestrutura plasmônica ocasionou em um aumento de apenas 7%. Esses resultados foram obtidos, por meio da comparação com o resultado da célula solar de silício amorfo, sem modificação na estrutura [8].

Os trabalhos descritos nesta seção, demonstram uma ideia geral de estudos que estão sendo realizados em se tratando de eficiência de células solares. Entretanto, a metodologia empregada neste trabalho é diferente das utilizadas nos estudos citados .

2.3 Superfícies de Alta Transmitância e Aplicação

Esta seção, é sobre superfícies de alta transmitância, apresentando alguns trabalhos com este tema, visando expor quais fatores influenciaram para que estas obtivessem tais transmitâncias e aplicações destas superfícies em células solares, visando um aprimoramento de sua eficiência, correlacionado com este trabalho.

2.3.1 Superfícies de Alta Transmitância

Para se obter um revestimento que minimize a reflectância e também maximize a transmitância, existem alguns métodos, como: revestimentos interferométricos; índice de refração gradual e; guia de onda. Entretanto, vamos nos ater a superfície de alta transmitância obtida pelo índice de refração gradual, representado na Figura 2.8, para tal,

utilizamos dois trabalhos para exemplificar este método [23], sendo: a pesquisa do Diao *et al.* [24], superfícies "steath" nanoestruturada; e também o trabalho realizado por Jia *et al.* [25], sobre revestimento antirreflexivo nanoestruturado, ambos obtiveram superfícies de alta transmitância.

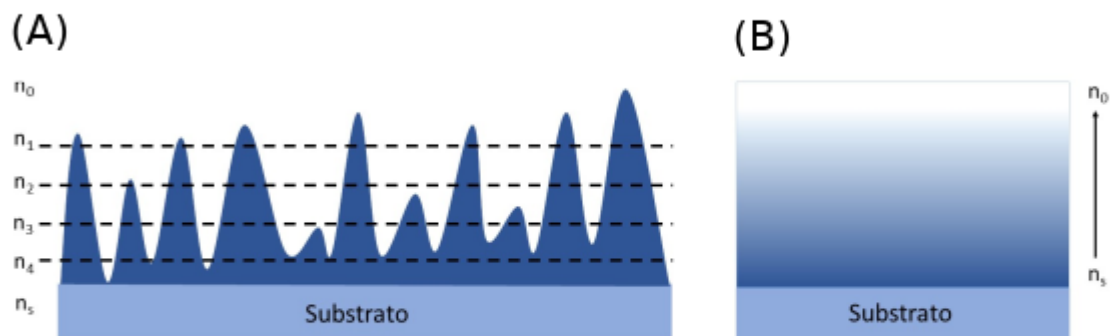


Figura 2.8 - Esquemas ilustrativos do índice gradual de refração: (A) recestimento com índice gradual de refração; (B) região com o gradiente do índice de refração.

O índice de refração gradual pode ser desenvolvido, por meio da texturização de superfícies, que geram um composto de ar e revestimento, ou seja, de modo que o ar esteja entre as nanoestruturas do filme fino. Basicamente, um filme fino não homogêneo, nanoestruturado com índices de refração diferentes em cada altura do revestimento, como pode ser visualizado na Figura 2.8 (A). Portanto, para se obter uma superfície com a reflectância minimizada e a transmitância maximizada, o índice de refração do revestimento deve ter variação gradual, começando com um índice próximo ao do ar e ir aumentando, ao longo da espessura do filme fino, para um índice próximo ao do substrato, de forma a não ter variações abruptas no índice de refração, veja o esquema ilustrativo da Figura 2.8 (B). Com isso, grande parte da luz incidente na superfície do revestimento não é desviada por meio da reflexão [26–28].

Para construir nanopilares para o substrato de dióxido de silício (SiO_2), Diao *et al.* [24] utilizou uma técnica de litografia copolímero em bloco, para produzir uma máscara na superfície do substrato. Esta técnica, consiste na deposição de nanopartículas de metal, espaçadas periodicamente. Assim, o substrato é submetido ao desbaste químico composto por duas etapas de atmosferas reativas, sendo a primeira uma mistura de Ar com SF_6 , seguida por outra de Ar e CHF_3 , na proporção de 1:1, respectivamente. Portanto, formando nanopilares perpendiculares à interface do substrato, veja na Figura 2.9 uma ilustração

do perfil da superfície final, após o ataque químico com atmosfera reativa [24].

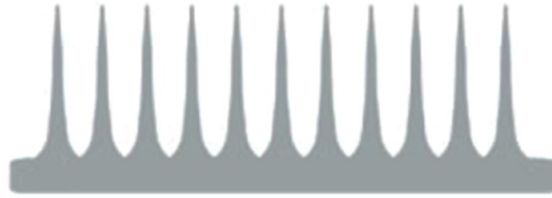


Figura 2.9 - Esquema ilustrativo da superfície final após o desbaste químico com atmosfera reativa [24].

Portanto, estes nanopilares ajustam de forma gradual o índice de refração do substrato na interface com o meio adjacente, podendo ser, por exemplo, ar [23, 24]. Assim, quanto aos resultados obtidos por Diao *et al.* [24], a superfície com os nanopilares em 450nm de altura a transmitância foi maximizada em 99,80% no comprimento de onda de 606nm , no visível. Todavia, para uma altura de 780nm , obteve-se uma transmitância de 99,84%, porém o comprimento de onda foi deslocado para 963nm . Portanto, uma forma de ajustar o comprimento de onda para obter máxima transmitância é realizando uma alteração da altura do nanopilar [24].

No trabalho de Jia *et al.* [25], foi produzida uma superfície de alta transmitância por meio da deposição por imersão de filmes finos de sílica (SiO_2) em um substrato transparente de vidro. O filme fino consiste em nanopartículas de SiO_2 com diâmetro de 50nm , em média, entretanto, o diâmetro interno das partículas variam entre 0nm , partícula maciça, até 38nm , partícula oca. Assim, cada filme fino depositado, de um total de cinco revestimentos, era composto por partículas com um diâmetro interno diferente. Assim sendo, essa variação do diâmetro interno resultou em um filme fino com índice de refração gradual [23, 25]. Portanto, o índice de refração do filme fino obtido foi de 1,33 até 1,11 e o substrato de vidro com 1,46, tal esquema de deposição pode ser visualizado na Figura 2.10 [25].

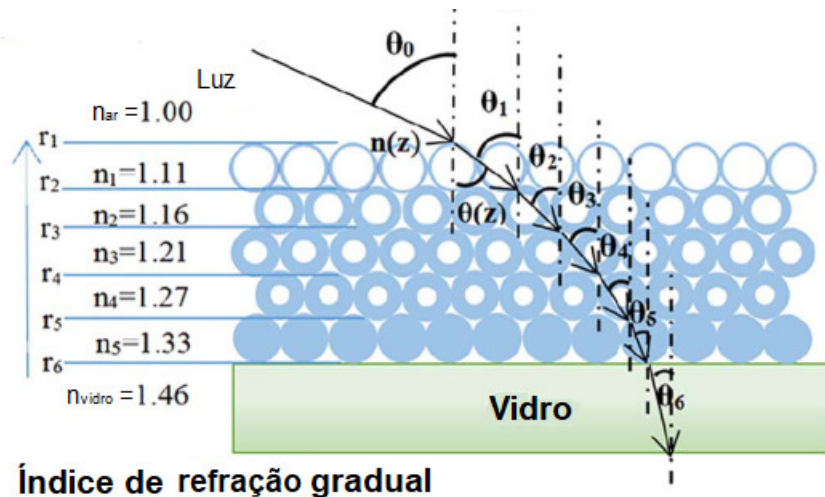


Figura 2.10 - Ilustração do índice de refração gradual, adaptado de [25].

Com esta metodologia, Jia *et al.* [25] obteve resultados de transmitâncias interessantes. Com a superfície obtida, foram realizadas medidas com incidência normal à superfície e também em ângulo, tanto para o substrato de vidro quanto para o filme fino, com valores de transmitâncias de 91,45% e 99,04%, respectivamente, ambos no comprimento de onda de 503nm , que resultou em um incremento de 7,59% na transmitância. Quando as medidas foram realizadas em ângulo de incidência de 75° , o acréscimo foi de 17,51%, com as transmitâncias do vidro e do filme fino, respectivamente, 75,59% e 93,00%, obtendo um aumento de transmitância considerável [25].

Diante do exposto, foram apresentados dois trabalhos como exemplos de aplicações do conceito de índice de refração gradual, visando obter superfícies de alta transmitância, que mais adiante nos resultados, tal conceito também será empregado.

2.3.2 Aplicação de Superfície de Alta Transmitância

Como mencionado anteriormente no início da seção, vamos tratar sobre a aplicação e a influência de superfícies de alta transmitância na eficiência de células fotovoltaicas. Portanto, na pesquisa de Liapis [29], foi produzida uma superfície de alta transmitância e aplicada em uma célula solar.

Para produzir tal superfície, Liapis [29] utilizou o método de auto-montagem de copolímero em bloco para produzir uma máscara de óxido de alumínio, após este processo, o substrato de sílica é submetido a uma atmosfera reativa assim, é transferido ao substrato cones em nanoescala, distribuídos de modo uniforme em sua superfície. Por conseguinte,

a texturização produzida no vidro gera uma região, na interface ar-vidro, com índice de refração gradual [23, 29].

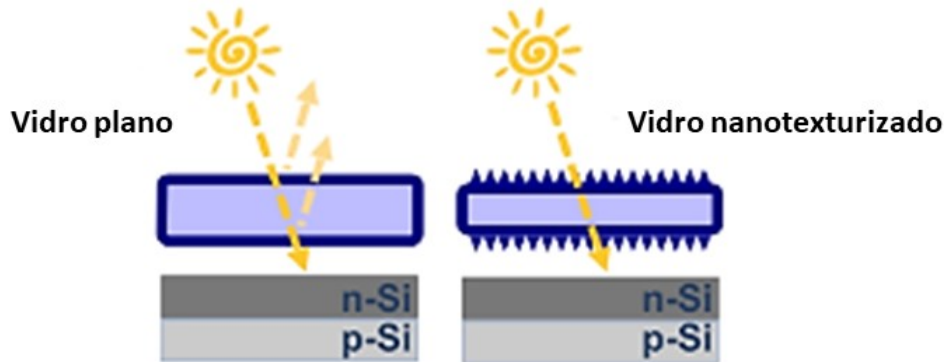


Figura 2.11 - Esquema ilustrativo do encapsulamento das células fotovoltaicas, com o vidro plano e também com o vidro nanotexturizado, adaptado de [29].

Portanto, Liapis [29] obteve como resultado uma superfície com transmitância de 99,8% no visível e utilizou esta superfície para encapsular uma célula solar de silício policristalino comercial e realizou as medidas da corrente em função da diferença de potencial, com a célula encapsulada com vidro convencional e também descoberta, para fins de comparação. A eficiência para cada caso foi de 8,12% para a descoberta, 8,07% com vidro nanotexturizado e 7,68% para a célula encapsulada com o vidro plano. Portanto, o vidro de alta transmitância, praticamente, não influenciou na eficiência da célula solar, quando sua eficiência é comparada com a da célula sem vidro [29].

2.4 Óxido de Alumínio (Al_2O_3) - Alumina

O composto que utilizamos para produzir os filmes finos foi o óxido de alumínio (Al_2O_3), como mencionado na introdução. Os interesses pela alumina, são os mais diversos, como por exemplo, aplicabilidade em superfícies que exigem propriedades resistentes a água e facilidade de limpeza [13, 30], como camada de proteção à radiação ultravioleta [31], estudos sobre suas propriedades ópticas [32, 33] e elétricas [34]. Assim, as mais diferentes propriedades, podem ser possíveis a partir de diferentes rotas de síntese.

Na pesquisa realizada por Dhonge *et al.* [35] na síntese da alumina utilizou-se o precursor $Al(acac)_3/etanol$, após análises observou que as propriedades ópticas da alumina se alteravam de acordo com a temperatura de deposição do filme em substratos de quartzo. Os

resultados mostraram que, ocorreu um incremento no 'band-gap' de 4,76, 5,49 e 5,63eV e o índice de refração um decréscimo 1,62, 1,58 e 1,47 para os filmes depositados com a temperatura de 500, 600 e 700°C, respectivamente [35].

Tadanaga [36], estudou as propriedades de repelência de água por filmes de alumina depositados em substratos de vidro, por meio de revestimento por imersão, tratamento térmico de 400°C por 10 minutos e posterior desbaste químico com água fervente para produzir filmes rugosos. Além disso, foi percebida uma transmitância acima de 92% na luz visível. O método de síntese da alumina foi o sol-gel [36], estes processos foram abordados, mais adiante, no capítulo de metodologia pois, foi esta rota de síntese e processo de deposição que utilizamos neste trabalho.

2.5 Método de Revestimento por Imersão

Revestimento por imersão ou *Dip coating*, que foi empregada neste trabalho como mencionado na introdução, é uma das técnicas mais utilizadas para o crescimento de filmes finos em substratos planos ou em forma cilíndrica, por meio de precursores em fase líquida. Este método de deposição também pode ser empregado no processo de revestimento de uma folha ou de um filamento longo e flexível, que é um procedimento de deposição contínuo [37].

O revestimento por imersão é composto por cinco etapas: imersão; emersão; deposição; drenagem e; evaporação. Sendo que, as três primeiras são em sequência, terceira e a quarta são em simultâneo e a quinta, e última, ocorre ao longo de todo o processo de deposição [37] estas etapas podem ser visualizadas na Figura 2.12, que representa o processo de revestimento por imersão.

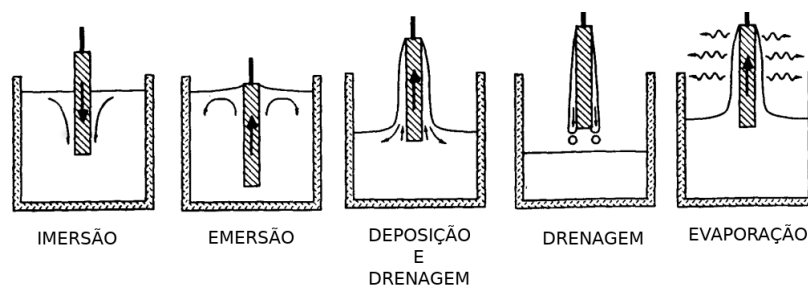


Figura 2.12 - Esquema ilustrativo do processo de deposição por imersão, adaptado de [37].

Neste método de deposição, a espessura do filme dependerá da velocidade de emersão, da viscosidade do precursor e da condição de evaporação [38].

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Utilizar um revestimento de filme fino de alumina depositado por imersão em substrato de vidro para minimizar a reflectância;

3.2 Objetivos Específicos

- Produzir nanoestruturas no filme fino, depositado em substrato de vidro, por meio do processo de desbaste químico.
- Avaliar se as nanoestruturas do filme fino tem alguma influência em sua transmitância;
- Estabelecer a correlação entre a característica topográfica do filme fino e sua transmitância com a influência na eficiência fotovoltaica.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Síntese da Alumina

Quanto a metodologia de síntese da alumina, empregamos a mesma realizada por Tadanaga [36], sendo necessária a seguinte proporção molar 20 : 1 : 4 : 1 : *i-PrOH* : *EAcAc* : H_2O : $Al(O-sec-Bu)_3$, álcool isopropílico, etil-aceto-acetato, água destilada e tri-sec-butil-alumina, respectivamente.

Assim sendo, inicialmente inserimos em uma recipiente 0,400mols álcool isopropílico e 0,041mols de tri-sec-butil-alumina, submetidos a agitação magnética por 1 hora, posteriormente foi acrescentado 0,041mols de etil-aceto-acetato e após, nova agitação magnética por mais 3 horas ao final temos a solução que denominamos de solução 1. Além disso, em outro recipiente foram misturados, com o agitador magnético, 0,401mols de álcool isopropílico e 0,164mols de água destilada, obtendo a solução 2. Para finalizar a síntese, a solução 2 e gotejada na solução 1 ao mesmo tempo em que a solução 1 estava em agitação magnética, por um período de 1 hora. Portanto, ao final deste processo obtivemos, aproximadamente, 60ml de alumina. Para resumir a metodologia de síntese de forma esquemática, observe a Figura 4.1.

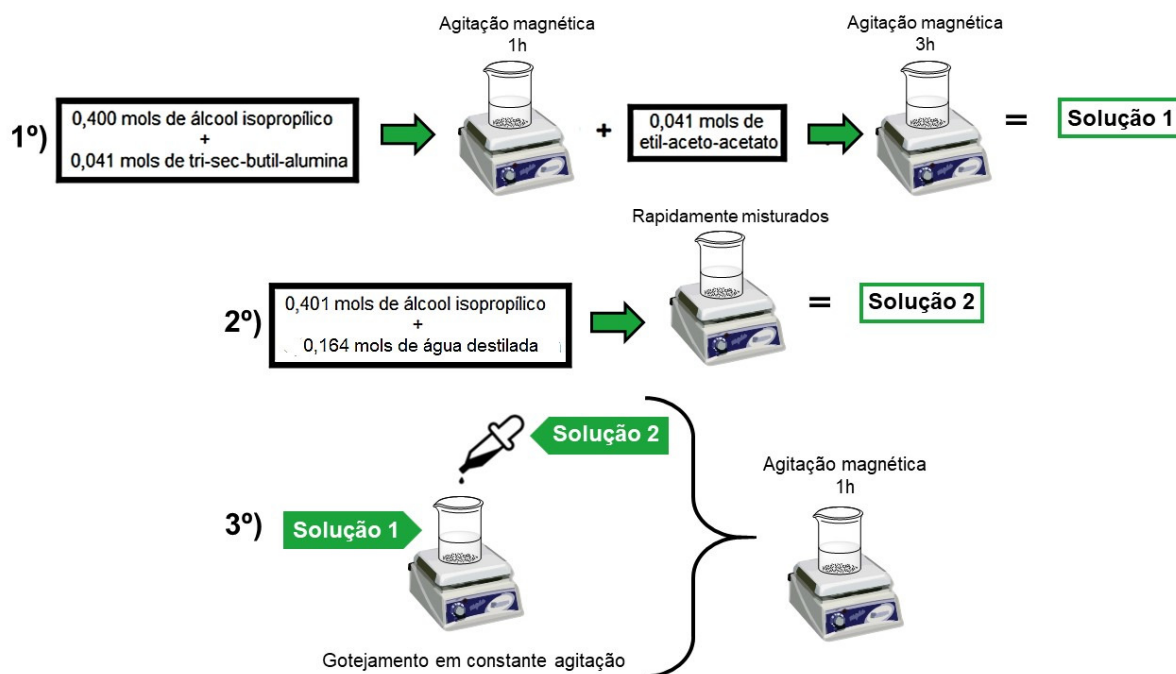


Figura 4.1 - Esquema ilustrativo da síntese da alumina.

4.2 Deposição dos Filmes Finos por meio de Revestimento por Imersão

Para deposição dos filmes finos foi escolhido o método revestimento por imersão, *dip-coating*, o qual permite controlar a espessura do filme fino depositado, por meio da velocidade de emersão do substrato e mesmo sendo simples, esta técnica apresenta boa repetitividade. Quanto ao equipamento utilizado, foi o de *dip-coater* desenvolvido por integrantes do grupo de pesquisa Crescimento de Cristais Avançados e Fotônica - CCAF, a imagem de tal equipamento pode ser visualizada na Figura 4.2.



Figura 4.2 - Equipamento de deposição por imersão, *dip-coater*.

Assim, o processo de deposição ocorre por meio do mergulho do substrato na solução, no caso alumina, tendo parâmetros, tais como velocidade de imersão, tempo de imersão e velocidade de emersão, controlados.

Para iniciar as deposições, primeiramente, os substratos de vidro foram limpos utilizando álcool isopropílico no ultrassom por aproximadamente 20 minutos e posteriormente secos na estufa por 10 minutos a $100^{\circ}C$. Quanto a solução, passou por agitação magnética por 30 minutos. Os parâmetros de deposição utilizados no dip-coater, foram velocidade de imersão $1mm/s$, tempo de imersão 10s e velocidade de emersão $2mm/s$, sendo que este ultimo tem influência na espessura do filme fino. Entretanto, vale salientar que estes parâmetros foram os quais melhor adequaram-se à este trabalho. Após a deposição, os filmes finos foram submetidos a um tratamento térmico em forno Mufla à $400^{\circ}C$ por 10 minutos, com a finalidade de aumentar a adesão do filme no substrato e melhorar a resposta mecânica.

4.3 Desbaste Químico

Para modificar a superfície do filme fino de alumina, a fim de produzir nanoestruturada utilizamos a técnica de desbaste químico (*etching*) que para este caso, consiste no mergulho do filme em água fervente. Portanto, o tempo de desbastamento químico de cada filme é da ordem de $t = 2^n$ sendo n um número inteiro. O intervalo contendo os tempos de desbaste é de 0s até 1024s, possibilitando a obtenção de superfícies com rugosidades graduadas.

4.4 Espectroscopia UV-Visível

Após o processo de texturização, os filmes finos passaram por caracterização óptica, por meio da espectroscopia UV-VIS na configuração de transmitância e reflectância para os feixes de luz incidentes colimado e não colimado, com a finalidade de selecionar os filmes finos de interesse, reduzindo o número de amostras, para os próximos passos desta pesquisa e, assim, realizar as demais caracterizações. As medidas de transmitância foram realizadas no Laboratório de Caracterização Óptica do CCAF, os equipamentos utilizados foram um espectrofotômetro modelo *Ocean Optics HR2000+*, fonte de luz ultravioleta-infravermelho modelo *Ocean Optics DH-2000* uma fibra óptica ultravioleta-visível, uma esfera integradora modelo *Thorlabs IS200-4* e duas fibras ópticas uma ultravioleta-visível, conectando a fonte de luz até a superfície da amostra e esfera integradora, outra fibra óptica visível-infravermelho, conectando a esfera integradora ao espectrofotômetro. Para o caso do feixe de luz incidente não colimado, os equipamentos podem ser visualizados na Figura 4.3

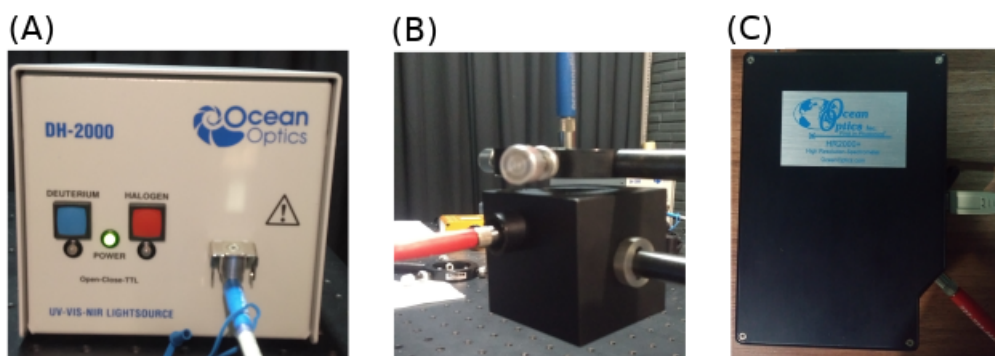


Figura 4.3 - Equipamentos para a espectroscopia de transmitância UV-VIS com feixe não colimado: (A) fonte de luz ultravioleta-infravermelho; (B) esfera integradora; (C) espectrofotômetro

Porém, para as medidas com o feixe de luz incidente colimado, inclui-se uma lente localizada entre a fibra óptica e a esfera integradora, que pode ser visualizada na Figura 4.4 (B)

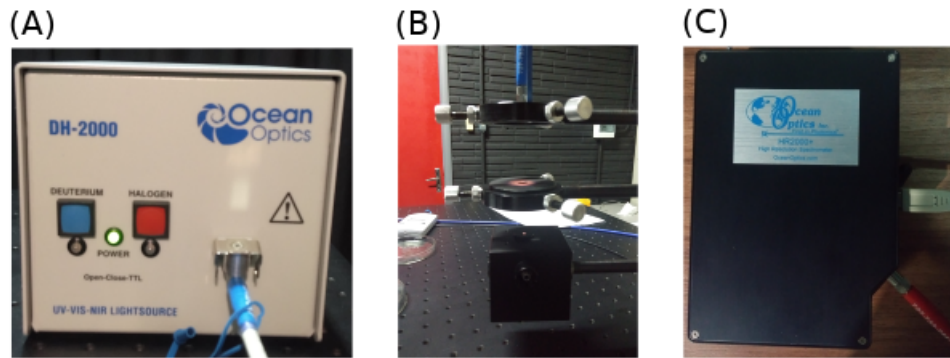


Figura 4.4 - Equipamentos para a espectroscopia de transmitância UV-VIS com feixe colimado: (A) fonte de luz ultravioleta-infravermelho; (B) esfera integradora e lente; (C) espectrofotômetro

4.5 Encapsulamento dos Painéis Fotovoltaicos

Para este trabalho, foi utilizado painel fotovoltaico de silício policristalino, sendo de primeira geração, comercial com dimensões 19mm por 39mm , veja a Figura 4.5 (A) da marca *Aiyima* com eficiência de 17% e a diferença de potencial pode chegar até $0,5\text{V}$, informações do fabricante.

Para utilizar este modelo de painel é necessário realizar a soldagem dos contatos elétricos, como pode ser visualizado na Figura 4.5 (B) sendo um contato na parte de cima e outro na parte de baixo da mesma. Para tal soldagem, utilizamos cola prata e uma fita de cobre estanhado. Para o processo de soldagem, a cola prata foi aplicada nos dois contatos da célula e em seguida a fita condutiva foi afixada no contato, a secagem da cola prata foi feita na estufa à uma temperatura de 120°C por 20 minutos, na Figura 4.5 pode-se visualizar o painel fotovoltaico antes e depois do processo de soldagem.

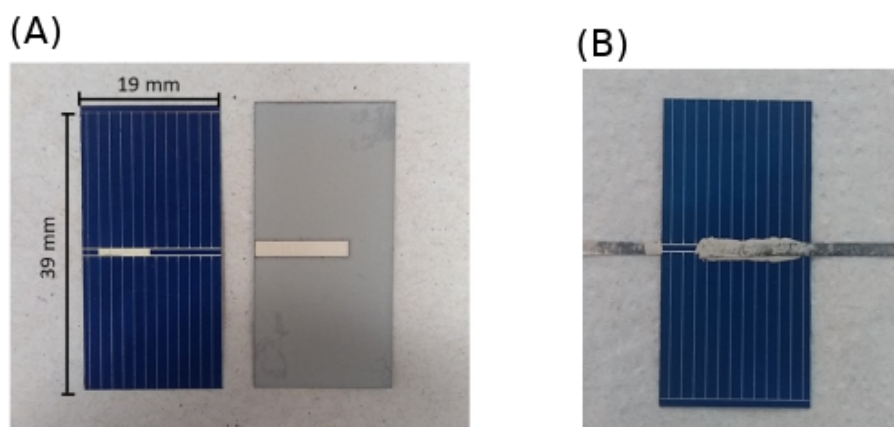


Figura 4.5 - Painel solar antes e depois da soldagem dos contatos elétricos: (A) antes da soldagem, imagem da parte superior e inferior do painel; (B) após a soldagem.

Para fazer a montagem dos painéis solares, para posterior realização das medidas elétricas, foi necessário encapsular o painel de silício. Devido a sua fragilidade foi preciso fixá-lo em um suporte de vidro, no caso uma lâmina de microscópio, por meio de fita adesiva dupla face, como pode ser visualizado na Figura 4.6. Assim, obteve-se pontos para fazer a fixação do substrato de vidro com o filme fino na parte frontal do painel fotovoltaico, como mostra na Figura 4.6 e com isso, realizar o encapsulamento dos dispositivos fotovoltaicos.

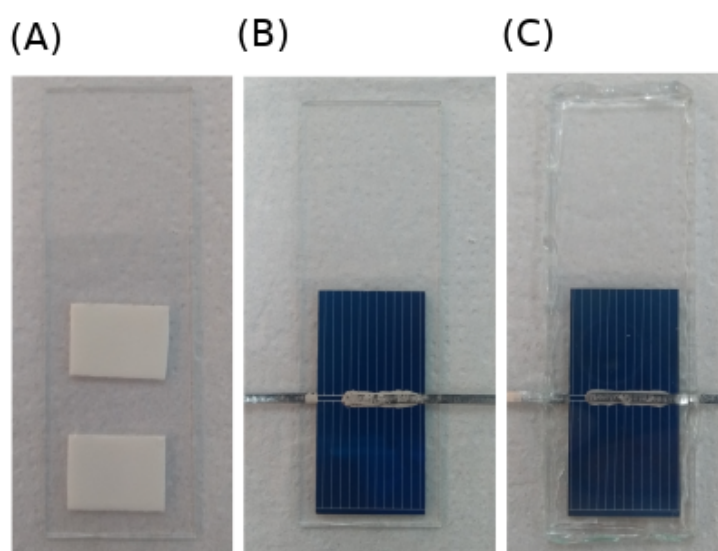


Figura 4.6 - Processo de encapsulamento do painel solar: (A) suporte de vidro com fita adesiva dupla face; (B) painel fixado no suporte de vidro; (C) painel após a fixação do substrato de vidro na parte frontal.

4.6 Medidas Eléctricas e Parâmetros Fotovoltaicos

4.6.1 Medidas Eléctricas

Para realizar as medidas eléctricas, uma fonte de radiação para excitar o painel fotovoltaico, varistor para alterar a tensão na fonte de radiação e o potenciostato para a coleta dos dados referentes, tais como tensão e corrente.

Como fonte de radiação, foram utilizadas duas lâmpadas halogêneas com potência de 100W e tensão de 220V cada uma, entretanto, as medidas foram realizadas com tensão máxima nas lâmpadas de 100V. As diferenças de potencial nas lâmpadas foram de 40, 60, 80 e 100 volts, com isso a luminosidade incidente no painel foi diferente, estas potenciais deveu-se ao fato do varivolt ter diferença de potencial máxima de saída de 110V. Os equipamentos utilizados podem ser visualizados na Figura 4.7. Quanto ao potenciostato, o modelo é *VersaSTAT 3*, responsável por aplicar uma diferença de potencial no painel fotovoltaico e medir a corrente eléctrica correspondente a esta.

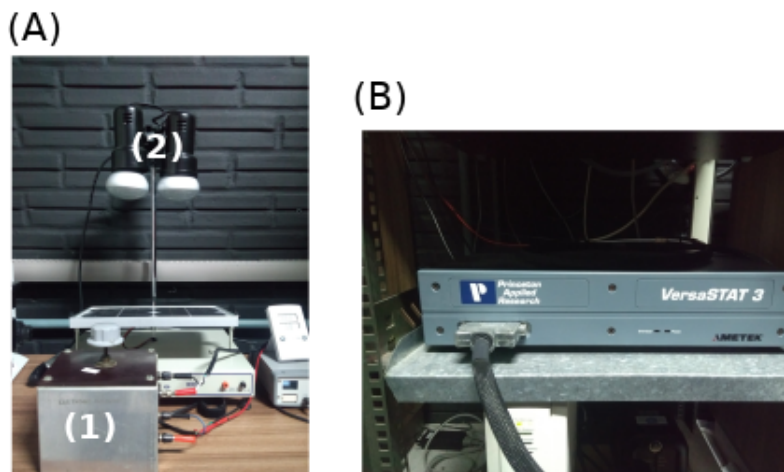


Figura 4.7 - Equipamentos para as medidas de diferença potencial vs. corrente eléctrica: (A)-(1) varivolt e (A)-(2) lâmpadas halogêneas; (B) potenciostato.

4.6.2 Parâmetros Fotovoltaicos

Dois parâmetros importantes para os painéis fotovoltaicos, são a corrente de curto-circuito I_{sc} a diferença de potencial de circuito aberto V_{oc} . O caso da I_{sc} é quando os contatos eléctricos do painel estão em curto-circuito, isto é, quando a diferença de potencial é nula. E para a V_{oc} , é quando a corrente é nula, ou seja, para o caso em que os contatos eléctricos

encontram-se isolados [39].

Contudo, para o painel fotovoltaico obter melhor conversão energética, a potência máxima P_{max} medida, que é representada pelo retângulo hachurado na Figura 4.8 que, por sua vez, é definido por $I_m \cdot V_m$, corrente e potencial medidas, respectivamente, deve ser o mais próximo possível da potência total P_{total} , que é representado pelo retângulo definido por $I_{sc} \cdot V_{oc}$, presente na Figura 4.8. Assim, uma medida que indica a proximidade dos valores das áreas dos retângulos é o fator de preenchimento FF (4.1), ou seja, representa a conversão energética do painel [39].

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{total}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (4.1)$$

E a partir de FF , I_{sc} , V_{oc} , área da célula solar A e a radiância incidente R_i é possível obtermos a eficiência da célula solar η (4.2).

$$\eta = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{(R_i \cdot A)} \quad (4.2)$$

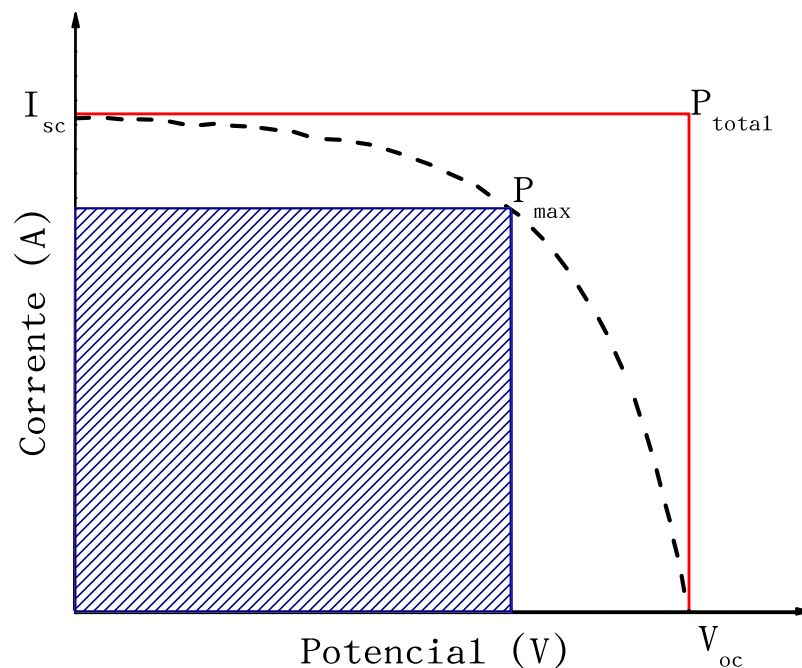


Figura 4.8 - Curva de corrente vs. diferença de potencial para o painel fotovoltaica, esquema ilustrativo para o cálculo do fator de preenchimento.

5 RESULTADOS

5.1 Espectroscopia de Transmitância UV-VIS dos Filmes Finos

Nesta seção, trataremos dos resultados das transmitâncias das amostras, tanto para o caso com feixe de luz incidente não colimado quanto para o caso do feixe colimado. Contudo, iniciaremos com o caso do feixe não colimado.

Após o processo de texturização dos filmes finos, foi possível perceber visualmente que tal processo alterava a transmitância dos filmes finos, tendo-se maior percepção para os filmes com os tempos de desbastamento de 512s e 1024s, pode se ter esta percepção pela Figura 5.1.

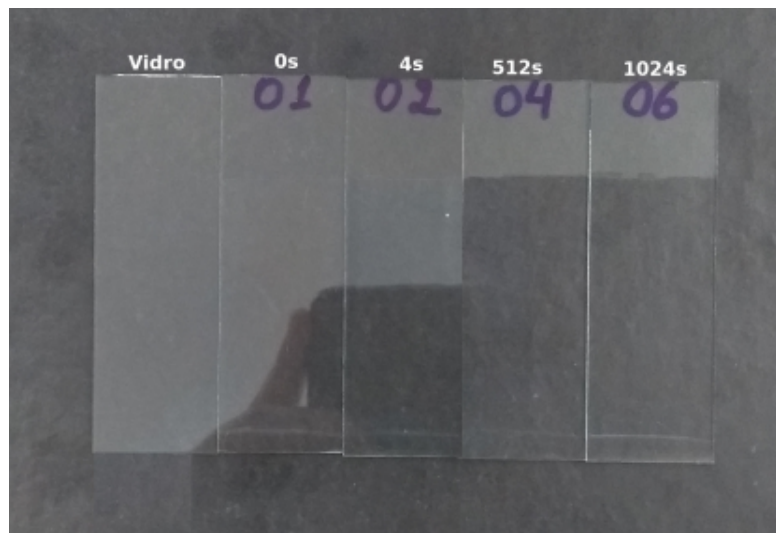


Figura 5.1 - Imagem do substrato de vidro, sem filme fino e com os filmes de: com 0s de desbaste, sem modificação de superfície; com os tempos de desbastamento de 4s, 512s e 1024s

A Figura 5.1, mostra que o processo de desbaste químico modificou a superfície dos filmes finos de alumina depositados em substratos de vidro, de tal modo a criar filmes finos antirreflexivos, máximizandando a transmitância. O fenômeno é perceptível com maior intensidade, para os filmes finos com os tempos de desbastamento de 512s e 1024s, sendo possível visualizar que nas amostras de substrato de vidro, filmes finos de 0s e 4s, que nestes casos é evidente o reflexo do "smartphone" utilizado na captura da imagem, porém o mesmo reflexo não é visível nos filmes finos 512s e 1024s.

De modo a quantificar este aumento de transmitância, estes filmes finos e o substrato foram submetidos à medidas do espectro de transmitância para o caso com o feixe de

luz não colimado, nas quais os resultados podem ser visualizados na Figura 5.2. Para a obtenção destes espectros, no processo de calibração do sistema de medidas, ou seja, para a normalização das curvas foi utilizado como transmitância 100% o ar. Dentre as curvas de transmitância, chamam a atenção às curvas do vidro e a do filme fino 512s, nota-se um distanciamento entre estas curvas, indicando uma variação significativa da transmitância.

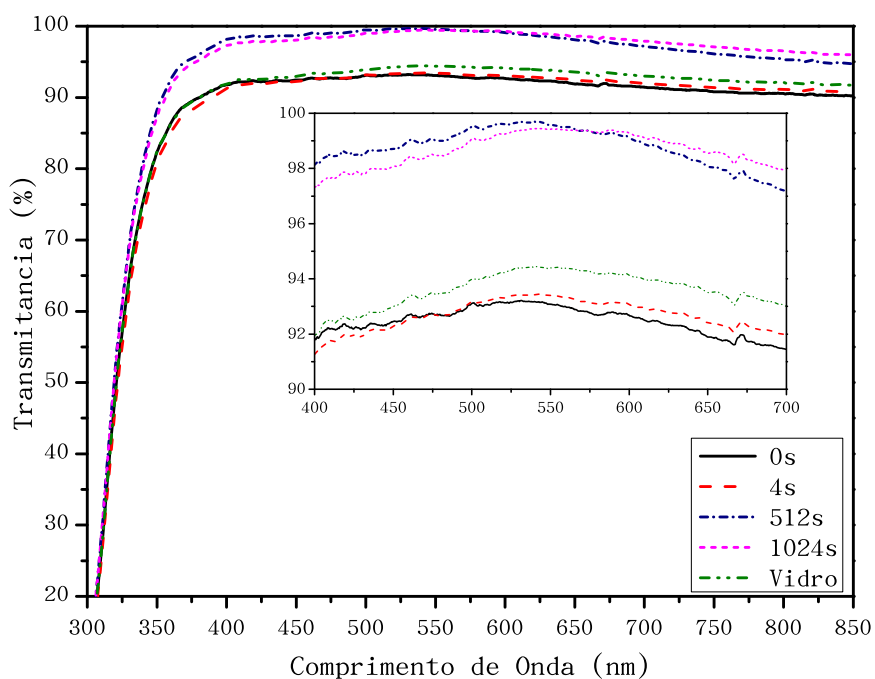


Figura 5.2 - Espectro de transmitância com o feixe de luz incidente não colimado, as amostras são: substrato de vidro; filme fino de 0s, sem desgaste químico; filmes finos desgastados com os tempos de 4s, 512s e 1024s. A legenda indicativa de cada curva com a respectiva amostra está no espectro.

Para o caso com o feixe não colimado, a transmitância máxima do vidro foi de 94,45%, enquanto que para o filme fino de 512s, com maior transmitância, com 99,70%. Os valores das transmitâncias máximas com o respectivo comprimento de onda, destas e das demais amostras, podem ser visualizados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Transmitância máxima com o feixe não colimado de cada amostra e o respectivo comprimento de onda.

| | Vidro | 0s | 4s | 512s | 1024s |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| T_{max} | 94,45% | 93,21% | 93,45% | 99,70% | 99,46% |
| ΔT_{max} | 0,04% | 0,09% | 0,07% | 0,05% | 0,34% |
| Comp. Onda | 541nm | 531nm | 545nm | 541nm | 542nm |

O acréscimo na transmitância do vidro, quando comparado com o filme de 512s, foi de 5,56%, o aumento de transmitância com o auxílio de revestimento antirreflexivo também foi percebido por Jia *et al.* [25] que em sua pesquisa obteve um aumento de transmitância de 7,59% e transmitância máxima de 99,04%. Portanto, mesmo com o nosso revestimento tendo um incremento de transmitância menor, a transmitância máxima que obtivemos neste trabalho foi maior, com 99,70%.

O que levou à este aumento de transmitância, foram, possivelmente, as nanoestruturas formadas na superfície do filme fino, já mencionadas na seção anterior. Portanto, estas nanoestruturas geram uma região com índice gradual de refração, que vai aumentando em direção ao substrato de vidro, ou seja, a alumina tem um índice de refração de aproximadamente 1,7 [40] assim, estas nanoestruturas fazem com que este índice refração, na interface ar-filme, seja menor que 1,7 e a medida que se aproxima da região da interface filme-vidro o índice de refração gradual vai aumentando, com isso a luz tem maior desvio em sua propagação, pois a sua velocidade de propagação se altera de modo gradual, minimizando as perdas por reflectância e maximizando a transmitância [23], este fenômeno de maximização da transmitância também foi percebido por Jia *et al.* [25] e Diao *et al.* [24] em suas respectivas pesquisas.

Agora, vamos para o caso dos espectros de transmitância obtidos com o feixe de luz colimado, que podem ser visualizados na Figura 5.3. Observou-se uma alteração na transmitância, na comparação com o caso anterior do feixe de luz não colimado. Esta, foi percebida, de forma mais evidente, para os filmes de 512s e 1024s, sendo que os valores das transmitâncias excederam 100%, tendo como possibilidade o nível de ruído apresentado pelo espectrofotômetro neste arranjo experimental. E mesmo subtraindo o erro, os valores da transmitância, ainda assim, permanecem acima de 100%. Os resultados de transmitância máxima obtidos para cada amostra, estão evidenciados na Tabela 5.2. com seus respectivos comprimento de onda e incerteza.

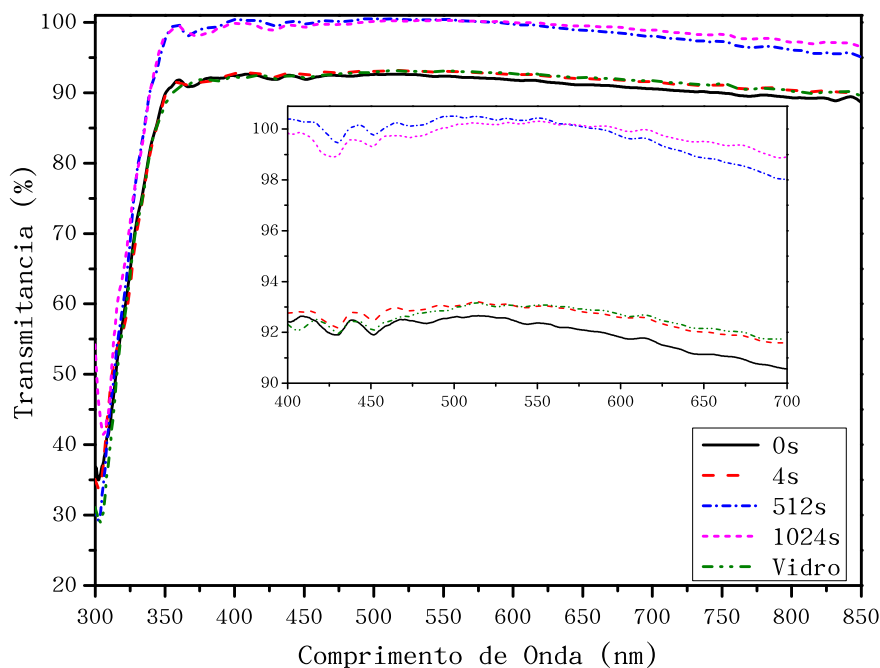


Figura 5.3 - Espectro de transmitância com o feixe de luz incidente colimado, as amostras são: substrado de vidro; filme fino de 0s, sem desbaste químico; e filmes finos desbastados com os tempos de 4s, 512s e 1024s. A legenda indicativa de cada curva com a respectiva amostra está no espectro.

Tabela 5.2 - Transmitância máxima com o feixe colimado de cada amostra e o respectivo comprimento de onda

| | Vidro | 0s | 4s | 512s | 1024s |
|------------------|--------|--------|--------|---------|---------|
| T_{max} | 93,30% | 93,12% | 93,39% | 100,98% | 100,44% |
| ΔT_{max} | 0,12% | 0,43% | 0,46% | 0,88% | 0,27% |
| Comp. Onda | 516nm | 410nm | 462nm | 405nm | 516nm |

De modo geral, os espectros de transmitância das amostras, mesmo com o feixe de luz colimado, permaneceram no mesmo padrão na comparação com os resultados obtidos com o feixe de luz não colimado, isto é, se observarmos os valores na Tabela 5.2 e as curvas de transmitância na Figura 5.3 é possível notar, que a ordem das amostras, em termos de maior para a de menor transmitância, continuou inalterada, ou seja, o filme fino com 512s tanto para o caso com o feixe não colimado quanto para o feixe colima, continua sendo a amostra com maior transmitância dentre as analisadas.

5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura das Superfície dos Filmes Finos

Com a finalidade de observar a capacidade que o processo de desbaste químico teve para modificar a superfície dos filmes finos, foram realizadas medidas de MEV em amostras com o substrato de vidro e $0s$, que pode ser visualizada na Figura 5.4 e as imagens dos filmes finos com os seguintes tempos de desbatamento com $4s$, $512s$ e $1024s$, presentes na Figura 5.5. Contudo, para que tal caracterização fosse realizada, uma seleção das amostras foi efetuada, assim o parâmetro considerando foi a transmitância, no qual os resultados já foram apresentados, as amostras com maiores transmitância foram incluídas.

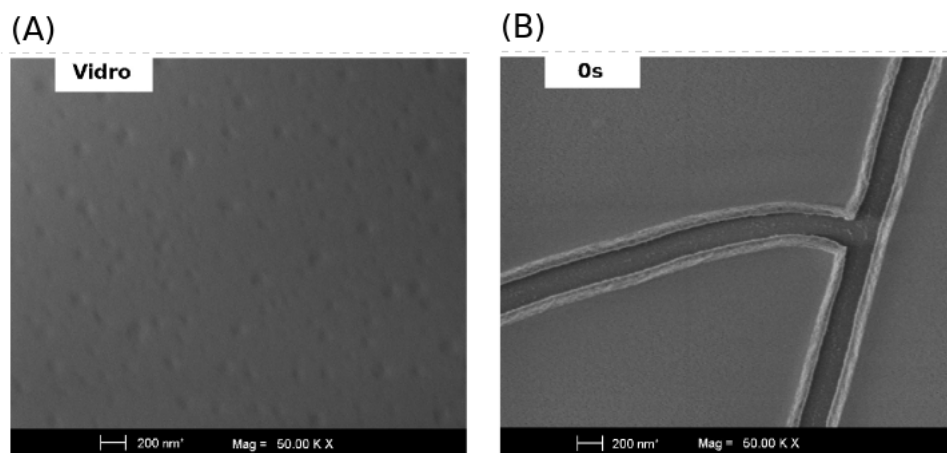


Figura 5.4 - MEV do (A) substrato de vidro e (B) filmes finos $0s$ sem desbaste químico.

Desta maneira, pode se visualizar na Figura 5.4 o MEV da topografia do substrato vidro, com a finalidade de conhecer a superfície do substrato e também para a confirmação que o filme fino foi, realmente, depositado. Além disso, quando analisamos a superfície do filme fino $0s$, as fissuras nos indica que existe um filme fino depositado, sendo possível visualizar o substrato de vidro através delas. Após a submissão dos filmes finos ao processo de desbaste químico, as superfícies destes podem ser visualizadas na Figura 5.5, com os diferentes tempos de *etching*.

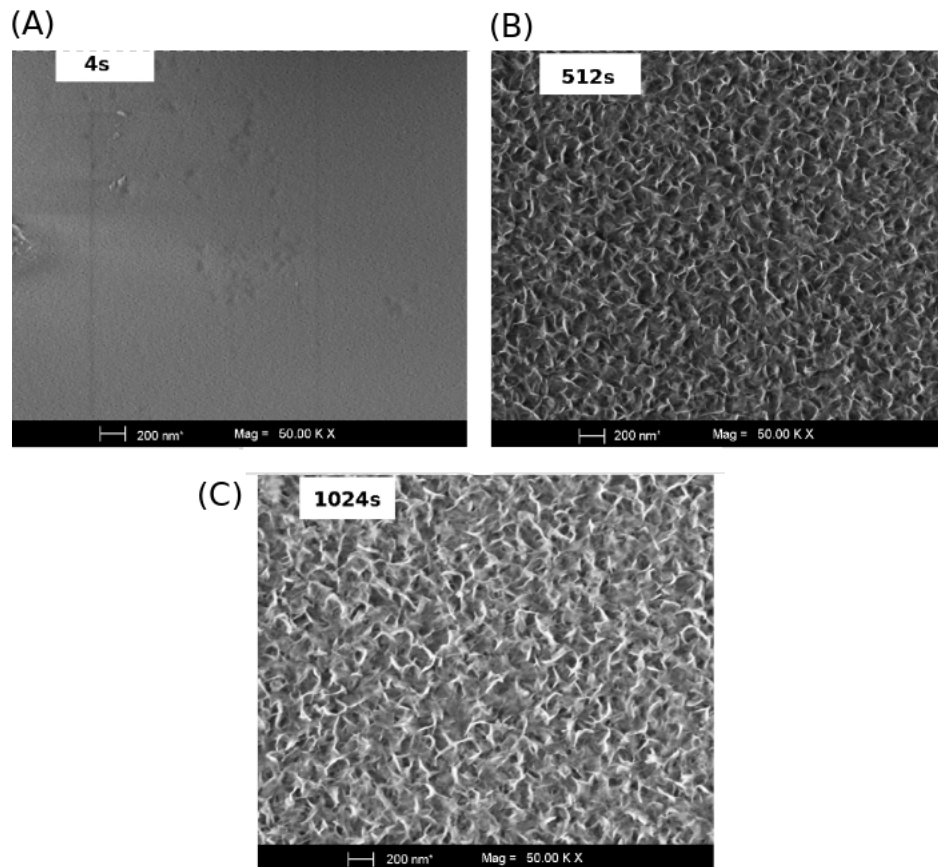


Figura 5.5 - MEV dos filmes finos submetidos ao desbaste químico com os seguintes tempos: (A) 4s; (B) 512s (C); 1024s.

Na Figura 5.5, observamos que o filme fino com 4s de desbastamento, teve sua superfície levemente modificada pelo processo de desbaste químico. Porém, para os casos de tempos de 512s e 1024s de *etching*, influenciou na topografia dos filmes finos, quando comparamos estas entre si e, por sua vez, com os filmes com 0s e 4s de *etching*, sendo possível visualizar a formação de estruturas na escala nanométrica. Estas nanoestruturas, são conhecidas como pétalas de flor [13] e são responsáveis por gerar uma interface com índice de refração gradual [23].

5.3 Caracterização dos Parâmetros Elétricos dos Painéis Fotovoltaicos

Nesta seção, apresentamos os resultados dos parâmetros fotovoltaicos, obtidos a partir dos painéis sem filme fino - CSF (descoberto), encapsulado com o substrato de vidro (sem deposição) e também encapsulados com os substratos de vidro com os filmes finos com os tempos de 0s, 4s, 512s e 1024s de desbaste químico. Os resultados das medidas destes painéis, estão dispostos nas Figuras 5.6 e 5.7 em gráficos de corrente elétrica em função da diferença de potencial.

Inicialmente, analisaremos os resultados para os casos em que as lâmpadas halogêneas foram submetidas às diferenças de potencial de 40 e 60 volts, com isso as luminosidades incidentes nos painéis fotovoltaicos foram diferentes, dependendo do potencial aplicado na fonte de irradiação. Tendo em vista, que os painéis tiveram comportamentos muito próximos para estes os casos, os respectivos gráficos então na Figura 5.6.

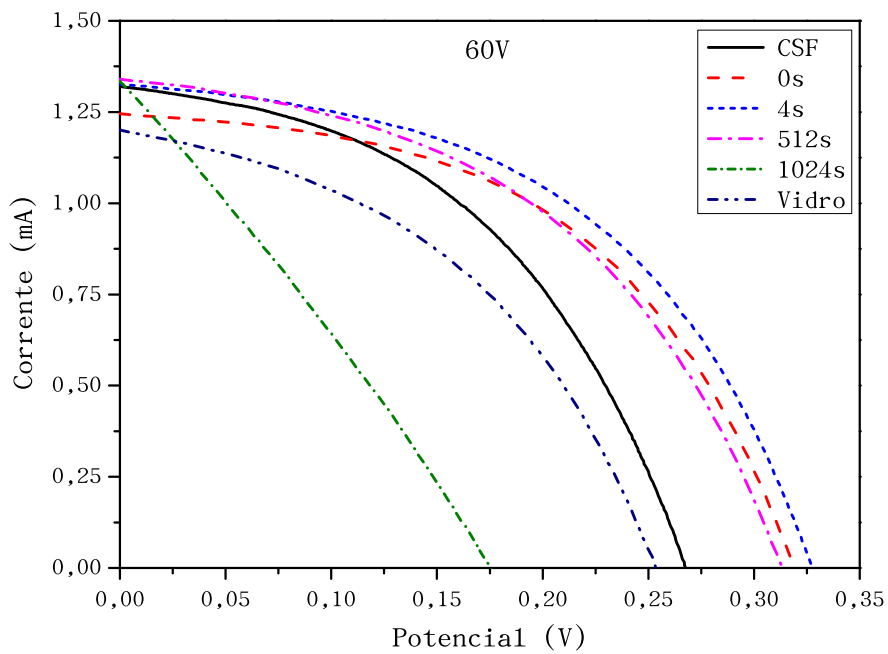
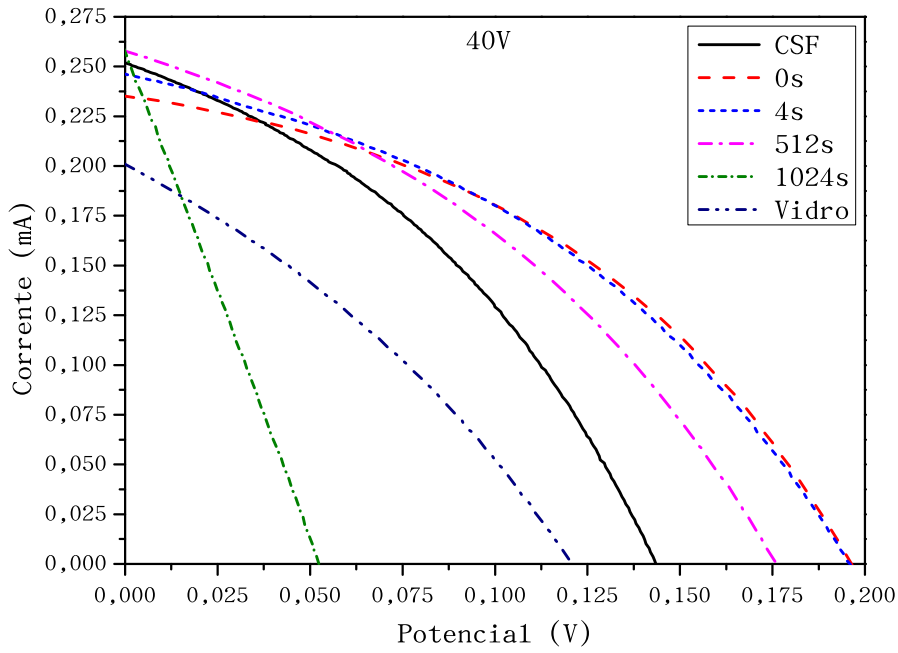


Figura 5.6 - Gráficos de potencial vs. corrente, para as luminosidades correspondentes à diferenças de potencial nas lâmpadas halôgenas de 40V e 60V, para os painéis fotovoltaicos com: CSF; filme fino 0s; filme fino 4s; filme fino 512s; filme fino 1024s e; com substrato de vidro.

Para os painéis fotovoltaicos com os filmes finos de 0s, 4s e 512s de *etching*, suas diferenças de potencial de circuito aberto V_{oc} foram maiores que a obtida pelo painel CSF.

Entretanto, o que pode explicar este resultado é a alta transmitância do filme fino de 512s, que contribui para que haja um maior número de fótons incidindo no painel fotovoltaico.

Porém, para os casos com os filmes finos de 0s e 4s de *etching*, pode ser um processo distinto do caso do painel com o filme fino de 512s, pois estes filmes não apresentaram alta transmitância, pelo contrário, apresentaram transmitâncias inferiores a do substrato vidro. Assim, pode estar ocorrendo um processo de aprisionamento de luz, devido a variação abrupta do índice de refração na interface ar-filme, na região entre as superfícies do painel e do filme fino o que aumenta a reflectância [41]. Pois, considerando o índice de refração da alumina como 1,7 [40] e o do ar igual a 1,0, sendo assim, temos uma diferença significativa entre os valores, de modo a propiciar uma elevada mudança no índice de refração, porém, é algo que ainda carece de mais estudos.

O painel fotovoltaico com filme fino de 1024s, para os casos de 40 e 60 volts, não apresentou curva fotovoltaica. Possivelmente, o filme fino está contribuindo para o desvio da luz na interface filme-vidro, fazendo com que o substrato de vidro funcione como um guia de onda e, assim, guiando a luz para outras direções e não para a superfície do painel fotovoltaico. E isto pode estar sendo agravado pela baixa luminosidade incidente para estas diferenças de potencial, mesmo que o filme fino de 1024s de *etching* tenha apresentado alta transmitância.

Analisando os resultados dos parâmetros fotovoltaicos obtidos para as diferenças de potencial nas lâmpadas halogêneas de 80 e 100 volts, para os painéis fotovoltaicos CSF, encapsulado com o substrato de vidro e também encapsulados com os substratos de vidro com os filmes finos depositados com os tempos de 0s, 4s, 512s e 1024s de desbaste químico. Os gráficos podem ser visualizados na Figura 5.7.

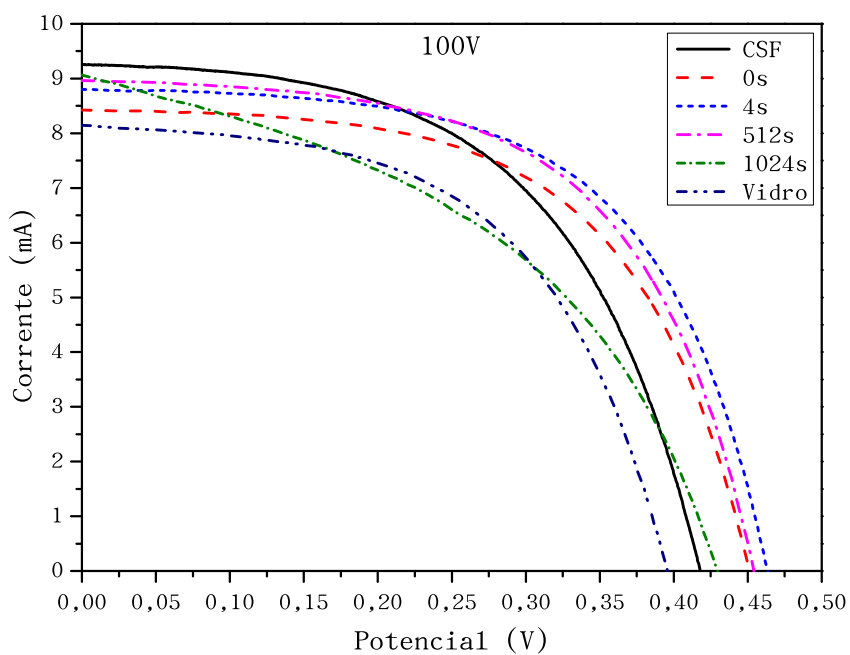
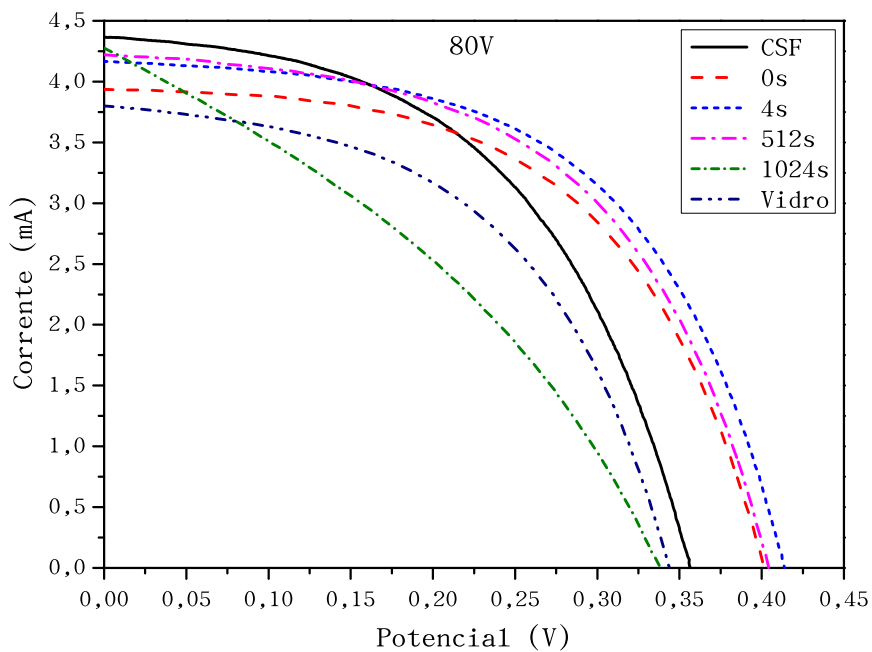


Figura 5.7 - Gráficos de potencial vs. corrente, para as luminosidades correspondentes à diferenças de potencial nas lâmpadas halôgenas de 80V e 100V, para os painéis fotovoltaicos com: CSF; filme fino 0s; filme fino 4s; filme fino 512s; filme fino 1024s e; com substrato de vidro.

O painel fotovoltaico com substrato com o filme fino depositado de 1024s de desbaste químico, apresentou curvas fotovoltaicas para ambos as luminosidades, diferentemente do ocorrido para as diferenças de potencial de 40 e 60 volts. Apesar deste painel ter apresentado um valor de corrente de curto-circuito I_{sc} igual ou maior que os painéis com os substratos com os filmes finos depositados com os tempos de 0s, 4s e 512s de desbaste, o sua diferença de potencial de circuito aberto V_{oc} ficou abaixo, porém, com V_{oc} um pouco acima do painel CSF. Assim, o painel com substrato depositado com o filme fino 1024s, obteve respostas fotovoltaicas distintas para diferentes luminosidades incidentes.

Quanto aos painéis fotovoltaicos com o substrato depositados com os filmes finos de tempos 0s, 4s e 512s de desbaste químico, apresentaram V_{oc} 's maiores que os demais, porém com os valores de I_{sc} 's abaixo do painel CSF. Resultados que podem ser conferidos nos gráficos da Figura 5.7, algo que também foi perceptível para as medidas realizadas com as diferenças de potencial nas lâmpadas halogêneas de 40 e 60 volts. Consequentemente, seus fatores de preenchimento permaneceram acima dos valores dos painéis CSF, sendo resultados interessantes. Portanto, os painéis com os substratos depositados com os filmes finos de tempos de 0s, 4s e 512s de desbastamento, estão contribuindo para o aumento do valor da V_{oc} , que é diretamente proporcional ao fator de preenchimento que, por sua vez, é diretamente proporcional a eficiência dos painéis fotovoltaicos, ou seja, contribuindo para o aumento da eficiência fotovoltaica, mostrando que a quantidade fótons incidentes no painel fotovoltaico, nestes casos aumentou.

Após a obtenção dos gráficos de diferença de potencial versus corrente, foi possível realizar os cálculos dos fatores de preenchimento para todos os painéis fotovoltaicos testados, estes resultados podem ser visualizados na Figura 5.8 com gráfico do fator de preenchimento em função da diferença de potencial empregadas nas lâmpadas halogêneas.

Para os painéis fotovoltaicos com o substrato de vidro e CSF, iluminados com a diferença de potencial nas lâmpadas de 100V, resultaram em fatores de preenchimento de 0,55 e 0,54, respectivamente, praticamente o mesmo resultado. Entretanto, quando comparamos estes dois, com os painéis com filmes finos de 0s, 4s e 512s, com FF de 0,58, 0,59 e 0,58, respectivamente, vemos uma melhora nos valores da conversão energética. Porém, isto não se repete para o caso do painel com filme fino de 1024s, que obteve FF de 0,44, bem abaixo dos painéis CSF e com substrato de vidro. Deste modo, percebemos uma mudança significativa nos fatores de preenchimento, para os casos dos painéis com os filmes finos, tal alteração pode ser visualizada mais facilmente no gráfico na Figura 5.8.

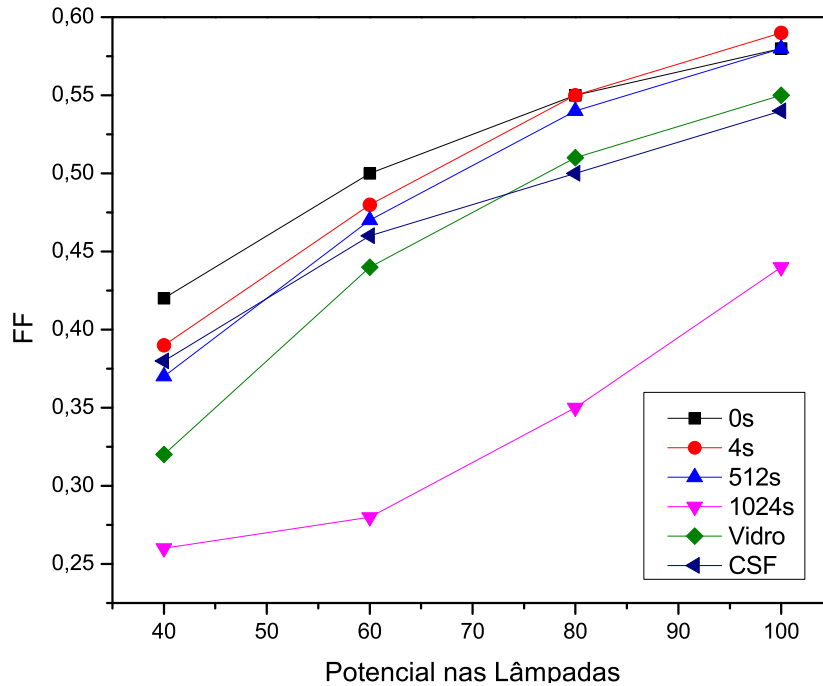


Figura 5.8 - Gráfico dos fatores de preenchimento dos painéis fotovoltaicos com: CSF; filme fino 0s; filme fino 4s; filme fino 512s; filme fino 1024s e; com substrato de vidro. Quando submetidas a diferentes luminosidades

Além disso, para o caso com baixa luminosidade, com diferença de potencial de 60V nas lâmpadas, o painel com melhor conversão energética é o com filme fino de 0s com FF de 0,50. Quanto aos painéis CSF e com os filmes finos de 4s e 512s, estes obtiveram resultados de FF muito próximos, com 0,46, 0,48 e 0,47, respectivamente. E para o painel com o substrato de vidro, o FF ficou um pouco abaixo dos demais, com 0,44. O painel com o filme de 1024s, não apresentou curva fotovoltaica para esta luminosidade. Para uma visão mais geral dos resultados, veja o gráfico na Figura 5.8.

Portanto, diante dos resultados dos parâmetros fotovoltaicos, observou-se que houve um aumento na V_{oc} dos painéis com os filmes finos de 0s, 4s e 512s. Tal aumento, pode estar relacionado a um maior número de fótons incidindo no painel fotovoltaico o que aumenta a relação elétrons-buracos na junção p-n, sendo a V_{oc} proporcional ao fator de preenchimento e, por conseguinte, um incremento da conversão energética do painel fotovoltaico.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

No processo de deposição dos filmes finos, foram testados parâmetros de deposição com maiores valores de velocidade de emersão e tempo de imersão, mas os efeitos de borda foram acentuados, atingindo regiões indesejadas dos filmes finos, de modo a resultar em uma transmitância não homogênea. Por fim, foram utilizados os parâmetros descritos na metodologia, que melhor adequaram-se ao nosso trabalho.

Em decorrência da fragilidade dos painéis frente aos vários métodos de soldagem utilizados, optou-se pela cola prata, que mostrou ser mais eficaz. Pois, inicialmente a soldagem era realizada com o método de estanhamento, o que devido a utilização da fonte de calor (ferro quente) danificava o painel fotovoltaico de modo irreversível, por isso optou-se por cola prata.

Devido a limitação do sistema de aquisição de medidas elétricas, se fez necessário o desenvolvimento de um sistema de iluminação. Inicialmente, visava-se a utilização do simulador solar, mas quando o painel fotovoltaico de silício policristalino foi excitado com esta fonte de radiação, a corrente elétrica gerada por ele foi maior que a capacidade de medida do potenciostato. Portanto, fez-se necessário utilizar uma fonte que irradiasse com menor potência, que foi apresentado na metodologia deste trabalho, para realizar as medidas dos parâmetros fotovoltaicos.

Após o processo de desbastamento químico, as amostras foram submetidas às medidas de transmitância. Obtivemos superfícies de alta transmitância como o filme fino de 512s com 99,70%, enquanto que o vidro plano com 94,45%, um aumento de 5,56%;

Após a modificação do sistema de irradiação, foi possível realizar as medidas dos parâmetros fotovoltaicos e obter o fator de preenchimento dos painéis. Para o painel fotovoltaico CSF observou-se um FF de 0,54, enquanto que para o painel com o filme de 512s foi observado um FF de 0,58, com um aumento de 6,82% mostrando que a metodologia empregada neste trabalho incrementou a conversão energética de painéis fotovoltaicos;

Em relação aos trabalhos futuros, podem ser realizadas medidas de espessura dos filmes finos e avaliar qual a influência destas na transmitância. Além disso, medidas de Microscopia de Força Atômica para mais informações sobre a topografia dos filmes finos e correlacionar com a transmitância e também com possíveis alterações nos parâmetros fotovoltaicos. Outro ponto, é buscar uma explicação para o fato dos filmes finos estarem alterando o valor da diferença de potencial de circuito aberto, V_{oc} , dos painéis fotovoltaicos, o que é diretamente proporcional ao fator de preenchimento e, conseqüentemente, da conversão energética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ESPOSITO, A. S.; FUCHS, P. G. Desenvolvimento tecnológico e inserção da energia solar no brasil. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2013. 17
- [2] JONG, P. de; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A. Economic and environmental analysis of electricity generation technologies in brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 52, p. 725–739, 2015. 17
- [3] VELLOSO, M. F. A.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Case study for hybrid power generation combining hydro-and photovoltaic energy resources in the brazilian semiarid region. **Clean Technologies and Environmental Policy**, Springer, p. 1–12, 2019. 17
- [4] BAGNALL, D. M.; BORELAND, M. Photovoltaic technologies. **Energy Policy**, Elsevier, v. 36, n. 12, p. 4390–4396, 2008. 17, 21, 22
- [5] RAVAL, N.; GUPTA, A. K. Historic developments, current technologies and potential of nanotechnology to develop next generation solar cells with improved efficiency. **International Journal of Renewable Energy Development**, v. 4, n. 2, 2015. 17, 22, 23
- [6] ABDIN, Z.; ALIM, M.; SAIDUR, R.; ISLAM, M.; RASHMI, W.; MEKHILEF, S.; WADI, A. Solar energy harvesting with the application of nanotechnology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 26, p. 837–852, 2013. 17, 23
- [7] SAHRAEI, N.; VENKATARAJ, S.; ABERLE, A. G.; PETERS, I. M. Investigation of the optical absorption of a-si: H solar cells on micro-and nano-textured surfaces. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 33, p. 166–172, 2013. 17, 18
- [8] SCHUSTER, C. S.; MORAWIEC, S.; MENDES, M. J.; PATRINI, M.; MARTINS, E. R.; LEWIS, L.; CRUPI, I.; KRAUSS, T. F. Plasmonic and diffractive nanostructures for light trapping-an experimental comparison. **Optica**, Optical Society of America, v. 2, n. 3, p. 194–200, 2015. 15, 18, 24, 27, 28, 29
- [9] DOTTERMUSCH, S.; QUINTILLA, A.; GOMARD, G.; ROSLIZAR, A.; VOGGU, V.; SIMONSEN, B.; PARK, J.; PERNIK, D.; KORGEL, B.; PAETZOLD, U. et al. Infiltrated photonic crystals for light-trapping in cuinse 2 nanocrystal-based solar cells. **Optics Express**, Optical Society of America, v. 25, n. 12, p. A502–A514, 2017. 18
- [10] HONGSINGTHONG, A.; KRAJANGSANG, T.; LIMMANEE, A.; SRIPRAPHA, K.; SRITHARATHIKHUN, J.; KONAGAI, M. Development of textured zno-coated

- low-cost glass substrate with very high haze ratio for silicon-based thin film solar cells. **Thin Solid Films**, Elsevier, v. 537, p. 291–295, 2013. 18
- [11] HUSSAIN, S. Q.; LE, A. H. T.; MALLEM, K.; PARK, H.; JU, M.; KIM, Y.; CHO, J.; PARK, J.; KIM, Y.; YI, J. Using the light scattering properties of multi-textured azo films on inverted hemisphere textured glass surface morphologies to improve the efficiency of silicon thin film solar cells. **Applied Surface Science**, Elsevier, v. 447, p. 866–875, 2018. 18
- [12] YANG, G.; SWAAIJ, R. A. van; ISABELLA, O.; ZEMAN, M. A novel way of texturing glass for microcrystalline silicon thin film solar cells application. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, Wiley Online Library, v. 23, n. 10, p. 1283–1290, 2015. 18
- [13] TADANAGA, K.; KATATA, N.; MINAMI, T. Formation process of super-water-repellent Al_2O_3 coating films with high transparency by the sol-gel method. **Journal of the American Ceramic Society**, Wiley Online Library, v. 80, n. 12, p. 3213–3216, 1997. 19, 33, 50
- [14] SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 74, p. 590–601, 2017. 21
- [15] SINKE, W. C. Development of photovoltaic technologies for global impact. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 138, p. 911–914, 2019. 21
- [16] GREEN, M. A.; HISHIKAWA, Y.; DUNLOP, E. D.; LEVI, D. H.; HOHL-EBINGER, J.; HO-BAILLIE, A. W. Solar cell efficiency tables (version 51). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 26, n. 1, p. 3–12. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.2978>. 21, 23
- [17] LUCEÑO-SÁNCHEZ, J. A.; DÍEZ-PASCUAL, A. M.; CAPILLA, R. P. Materials for photovoltaics: State of art and recent developments. **International journal of molecular sciences**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 20, n. 4, p. 976, 2019. 21, 22
- [18] O'REGAN, B.; GRÄTZEL, M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films. **nature**, Nature Publishing Group, v. 353, n. 6346, p. 737, 1991. 23
- [19] TANG, C. W. Two-layer organic photovoltaic cell. **Applied Physics Letters**, AIP, v. 48, n. 2, p. 183–185, 1986. 23

- [20] MORI, S.; OH-OKA, H.; NAKAO, H.; GOTANDA, T.; NAKANO, Y.; JUNG, H.; IIDA, A.; HAYASE, R.; SHIDA, N.; SAITO, M. et al. Organic photovoltaic module development with inverted device structure. **MRS Online Proceedings Library Archive**, Cambridge University Press, v. 1737, 2015. 23
- [21] CHEN, X.; WANG, C.; BAKER, E.; SUN, C. Numerical and experimental investigation of light trapping effect of nanostructured diatom frustules. **Scientific reports**, Nature Publishing Group, v. 5, p. 11977, 2015. 15, 24, 25, 26, 27
- [22] SHI, Y.; WANG, X.; YANG, F. Disorder improves light absorption in thin film silicon solar cells with hybrid light trapping structure. **International Journal of Optics**, Hindawi, v. 2016, 2016. 24
- [23] BUSKENS, P.; BURGHOORN, M.; MOURAD, M. C. D.; VROON, Z. Antireflective coatings for glass and transparent polymers. **Langmuir**, ACS Publications, v. 32, n. 27, p. 6781–6793, 2016. 30, 31, 33, 47, 50
- [24] DIAO, Z.; KRAUS, M.; BRUNNER, R.; DIRKS, J.-H.; SPATZ, J. P. Nanostructured stealth surfaces for visible and near-infrared light. **Nano letters**, ACS Publications, v. 16, n. 10, p. 6610–6616, 2016. 15, 30, 31, 47
- [25] JIA, G.; JI, Z.; WANG, H.; CHEN, R. Preparation and properties of five-layer graded-refractive-index antireflection coating nanostructured by solid and hollow silica particles. **Thin Solid Films**, Elsevier, v. 642, p. 174–181, 2017. 15, 30, 31, 32, 47
- [26] CHATTOPADHYAY, S.; HUANG, Y.; JEN, Y.-J.; GANGULY, A.; CHEN, K.; CHEN, L. Anti-reflecting and photonic nanostructures. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, Elsevier, v. 69, n. 1-3, p. 1–35, 2010. 30
- [27] LI, X.; GAO, J.; XUE, L.; HAN, Y. Porous polymer films with gradient-refractive-index structure for broadband and omnidirectional antireflection coatings. **Advanced Functional Materials**, Wiley Online Library, v. 20, n. 2, p. 259–265, 2010. 30
- [28] BRUCE, R. C.; SUNAL, P.; RIVERO-BALEINE, C.; MAYER, T. S. High-performance surface-engineered gradient refractive index (grin) coatings. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **Advanced Optics for Imaging Applications: UV through LWIR IV**. [S.l.], 2019. v. 10998, p. 109980B. 30
- [29] LIAPIS, A. C.; RAHMAN, A.; BLACK, C. T. Self-assembled nanotextures impart broadband transparency to glass windows and solar cell encapsulants. **Applied Physics Letters**, AIP Publishing, v. 111, n. 18, p. 183901, 2017. 15, 32, 33

- [30] CHO, M.-Y.; PARK, S.-J.; KIM, S.-M.; LEE, D.-W.; KIM, H.-K.; KOO, S.-M.; MOON, K.-S.; OH, J.-M. Hydrophobicity and transparency of al₂o₃-based poly-tetra-fluoro-ethylene composite thin films using aerosol deposition. **Ceramics International**, Elsevier, v. 44, n. 14, p. 16548–16555, 2018. 33
- [31] JANG, E.; SRIDHARAN, K.; PARK, Y. M.; PARK, T. J. Eliminated phototoxicity of tio₂ particles by an atomic-layer-deposited al₂o₃ coating layer for uv-protection applications. **Chemistry—A European Journal**, Wiley Online Library, v. 22, n. 34, p. 12022–12026, 2016. 33
- [32] HU, B.; YAO, M.; XIAO, R.; CHEN, J.; YAO, X. Optical properties of amorphous al₂o₃ thin films prepared by a sol–gel process. **Ceramics International**, Elsevier, v. 40, n. 9, p. 14133–14139, 2014. 33
- [33] KOUSHKI, E.; MOUSAVI, S.; MOHAMMADI, S. J.; ARA, M. M.; OLIVEIRA, P. de. Optical properties of aluminum oxide thin films and colloidal nanostructures. **Thin Solid Films**, Elsevier, v. 592, p. 81–87, 2015. 33
- [34] HU, B.; JIA, E.; DU, B.; YIN, Y. A new sol-gel route to prepare dense al₂o₃ thin films. **Ceramics International**, Elsevier, v. 42, n. 15, p. 16867–16871, 2016. 33
- [35] DHONGE, B. P.; MATHEWS, T.; SUNDARI, S. T.; THINAHARAN, C.; KAMRUDDIN, M.; DASH, S.; TYAGI, A. Spray pyrolytic deposition of transparent aluminum oxide (al₂o₃) films. **Applied Surface Science**, Elsevier, v. 258, n. 3, p. 1091–1096, 2011. 33, 34
- [36] TADANAGA, K.; KATATA, N.; MINAMI, T. Super-water-repellent al₂o₃ coating films with high transparency. **Journal of the American ceramic society**, Wiley Online Library, v. 80, n. 4, p. 1040–1042, 1997. 34, 37
- [37] SCRIVEN, L. Physics and applications of dip coating and spin coating. **MRS Online Proceedings Library Archive**, Cambridge University Press, v. 121, 1988. 15, 34
- [38] BRINKER, C.; FRYE, G.; HURD, A.; ASHLEY, C. Fundamentals of sol-gel dip coating. **Thin solid films**, Elsevier, v. 201, n. 1, p. 97–108, 1991. 34
- [39] SHAH, A.; TORRES, P.; TSCHARNER, R.; WYRSCH, N.; KEPPNER, H. Photovoltaic technology: the case for thin-film solar cells. **science**, American Association for the Advancement of Science, v. 285, n. 5428, p. 692–698, 1999. 43

- [40] APETZ, R.; BRUGGEN, M. P. V. Transparent alumina: a light-scattering model. **Journal of the American Ceramic Society**, Wiley Online Library, v. 86, n. 3, p. 480–486, 2003. 47, 53
- [41] YU, Z.; RAMAN, A.; FAN, S. Fundamental limit of nanophotonic light trapping in solar cells. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, National Acad Sciences, v. 107, n. 41, p. 17491–17496, 2010. 53

