

ANÁLISE ÓPTICA COMPUTACIONAL DE FILMES DE PDMS SOBRE O VIDRO EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Carolina Defferrari – sdefferrari@gmail.com

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia de Materiais

Resumo. Entre os materiais estudados e aplicados na obtenção de superfícies auto-limpantes para vidros de módulos fotovoltaicos está o PDMS. O material é aplicado na forma de um filme fino, e afeta também a característica óptica da interface na qual é aplicado. Foi analisado o efeito óptico de redução da refletividade por interferência da radiação em um filme de PDMS sobre vidros de módulos fotovoltaicos, e impacto sobre o aumento total de transmissão de radiação em um módulo. A análise foi realizada através de um modelo computacional de transmissão de radiação em um módulo fotovoltaico de silício monocristalino em função de comprimento de onda e ângulo de incidência. A faixa de espessuras do filme observada foi de 10 a 200 nm. A transmissividade ponderada para o espectro de referência e a resposta espectral de uma célula de silício mono cristalino foi elevada pela presença de filmes de PDMS, chegando ao aumento máximo da corrente fotogerada de 2,7%, na espessura ideal, de 110 nm.

Palavras-chave: Análise óptica, filme fino, PDMS.

1. INTRODUÇÃO

Os módulos fotovoltaicos de silício cristalino (Si-c) são construídos de modo a obter-se um dispositivo com dimensões e resistência mecânica mais adequados ao manuseio, instalação e exposição a intempéries. São produzidos através da superposição de uma série de camadas, acima e abaixo do plano das células, e laminação. Com isso forma-se um conjunto de 3 a 4 camadas transparentes sobre a superfície das células. São elas um filme de passivação e efeito anti-reflexo (AR) sobre a superfície da célula, um polímero encapsulante, vidro, e possivelmente um filme fino sobre o vidro, com a finalidade de produzir um efeito auto-limpante e evitar o depósito de resíduos diversos sobre o vidro.

As perdas por reflexão na superfície de uma célula não encapsulada são muito elevadas e ultrapassam o valor de 30% para incidência normal, segundo Magnin e Harari (2014). As camadas presentes sobre uma célula inserida em um módulo reduzem essa reflexão. Por isso, devem ser otimizadas para reduzi-la ao máximo, pois têm um impacto direto na eficiência de um módulo.

Ao incidir em um módulo fotovoltaico a radiação solar sofre diversos eventos de extinção antes de atingir o interior da célula; a radiação é refletida em cada uma das interfaces presentes entre as camadas, sofre interferência nos dois filmes finos presentes no sistema, absorção pelos materiais, e efeito de aprisionamento da radiação na superfície texturizada do silício, conforme descrito em Krauter (2006). Além disso a radiação sofre infinitas reflexões no interior das camadas que antecedem a célula. Entre os eventos de reflexão nas camadas, o que representa a maior perda de radiação ocorre na superfície do vidro, e pode ser reduzida pela presença de um filme fino capaz de produzir um efeito de redução da refletividade por mecanismo de interferência da radiação.

Assim, é válido analisar o potencial de redução da refletividade por tal mecanismo em materiais utilizados na obtenção de superfícies auto limpantes, de modo que, com um só filme, seja possível obter-se o efeito óptico e o efeito químico descritos.

Estudos de diferentes materiais para aplicação em filmes finos para vidros destinados à aplicação fotovoltaica já foram realizados. Em Mehmood (2016) foi feita uma revisão de materiais para efeito auto-limpante, e foi relatada a produção de filmes transparentes, constituídos de diversos materiais. Entre eles está o polidimetilsiloxano (PDMS), que é um polímero com elevada resistência química e térmica, boa aderência ao vidro, elevada transparência (pode ter, com os parâmetros de fabricação corretos), e possui baixa energia de superfície. Estas propriedades, associadas a uma micro/nano rugosidade (que não produza espalhamento da radiação), produzem o efeito de hidrofobicidade, que faz com que mesmo em pequenas inclinações a água seja eliminada da superfície e arraste com ela depósitos de material. Além disso, índice de refração (n) de 1.4, valor entre o índice de refração do ar (1.0003) e do vidro (em torno de 1.5) na faixa de interesse (dentro da resposta espectral de uma célula de silício cristalino). Essas características apontam a adequação do material para redução da refletividade em uma interface Vidro-Ar por mecanismo de interferência da radiação.

No presente trabalho foi quantificada e observada detalhadamente, para melhor compreensão do problema, a redução da refletividade pelo efeito anti-reflexo de um filme de PDMS depositado sobre o vidro, através de um método computacional baseado em um modelo óptico de transmissão da radiação em módulo fotovoltaico de silício monocristalino. O método é descrito em Defferrari (2017). O modelo prevê os principais eventos de interação da

radiação com os materiais e interfaces, e demonstra o aumento de transmissividade da radiação em relação à transmissividade total.

2. MÉTODO

A análise do efeito óptico produzido pelo filme de PDMS sobre o vidro foi desenvolvida em Matlab e baseia-se em um modelo óptico de interação da radiação com as camadas superpostas a uma célula inserida em um módulo fotovoltaico. São previstas de 3 a 4 camadas superpostas à célula, sendo elas filme de passivação/AR sobre a célula, encapsulante e vidro, que, pode ou não receber um filme anti-aderente com potencial para redução da refletividade. A descrição da célula emprega a resposta espectral de uma célula de silício monocristalino, e superfície texturizada em solução alcalina (textura de micropirâmides). Na Fig. 1 está representado um corte do sistema óptico descrito no método, no qual estão apresentadas as camadas e os eventos de interação da radiação previstos. As entradas, etapas do cálculo, e resultados gerados são apresentados no diagrama da Fig. 2.

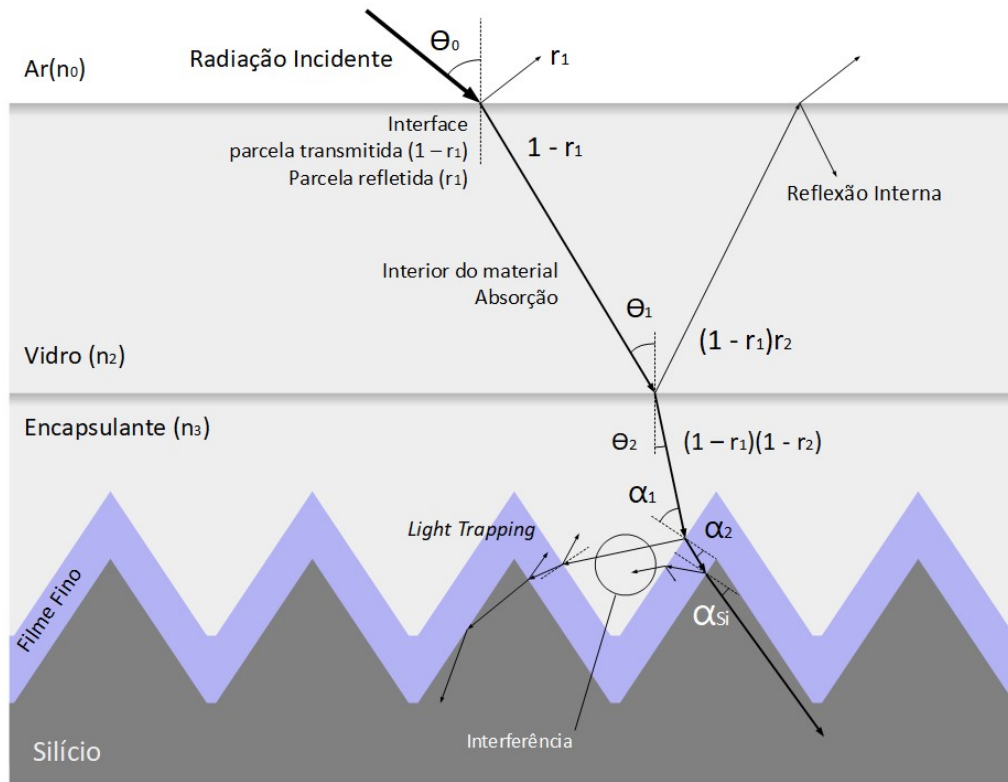


Figura 1 – Representação em corte das camadas que compõem o módulo acima da célula, e fenômenos de interação da radiação com os materiais previstos pelo modelo.

Os cálculos foram realizados em varreduras em função de comprimento de onda (λ) na faixa de 200 a 300 nm, com resolução de 5 nm, e do ângulo de incidência da radiação de 0° a 90°, com resolução de 5°. O intervalo de λ definido contém 99,5% da intensidade da radiação solar.

Os dados de entrada relativos ao filme de PDMS foram o índice de refração do material, considerado constante na faixa de comprimentos de onda considerada, com valor de 1.4, e espessura variável. A transmissividade final da interface ar-vidro contendo o filme foi calculada para diferentes espessuras, em uma faixa de 10 a 200 nm, observando a influência da espessura de um filme fino no efeito de interferência por ele produzido, que altera a intensidade da radiação refletida. A máxima transmissividade que pode ser obtida com um filme anti-reflexo é definida pela refletividade das interfaces superior e inferior ao filme, e ocorre em uma espessura ideal de máxima interferência destrutiva entre os feixes refletidos. A refletividade das interfaces tem relação direta com os índices de refração relativos, entre o filme e os materiais das camadas adjacentes.

Os dados de entrada de índice de refração - $n(\lambda)$ - e coeficiente de extinção - $k(\lambda)$ - dos outros materiais que compõe o sistema foram valores conhecidos para vidro soda-cálcico com baixo teor de ferro, encapsulante composto por EVA, e filme de passivação/antireflexo sobre a célula, de Si_3N_4 , em sua espessura ideal conforme estudos anteriores, de 70 nm, depositado sobre a superfície texturizada em solução alcalina de uma célula de silício monocristalino.

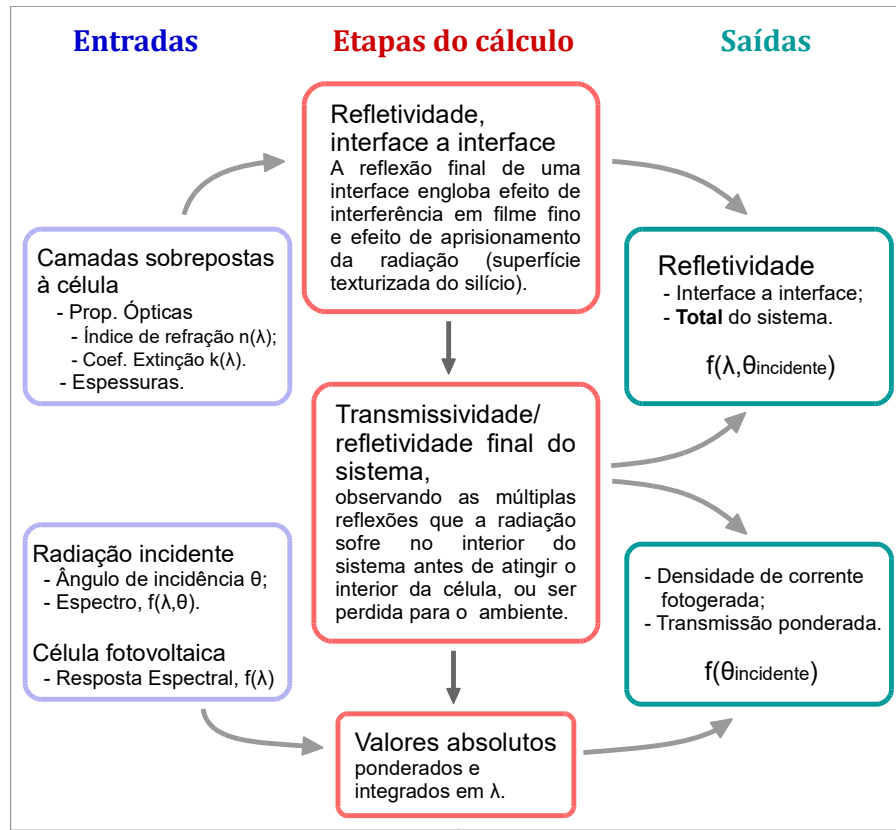


Figura 2 - Diagrama esquemático do funcionamento do modelo óptico empregado no estudo.

Foram utilizados como dados de entrada o espectro de referência, definido pela norma ASTM G173-03, e a resposta espectral de uma célula de silício monocristalino (RS Si-m) gerada pelo *software* PC1D para uma célula padrão de alta qualidade. Ambos estão representados em gráficos na Fig. 3 para comprimentos de onda entre 200 e 1300 nm. Na Eq. (1) está definida a densidade de corrente fotogerada ideal ($j_{fg\text{ideal}}$), que representa uma situação de 100% de transmissão de uma radiação incidente ao interior de uma célula. A transmissividade total de um sistema em função do comprimento de onda $\tau(\lambda)$ é definida através do modelo proposto; uma vez conhecida a $\tau(\lambda)$ de um conjunto de camadas calcula-se a densidade de corrente fotogerada para um dado cenário, j_{fg} , pela aplicação da Eq. (2); integrando-se em λ esses valores obtêm-se os valores totais de densidade de corrente, através da Eq. (3). Pode-se calcular a densidade de corrente ideal ($J_{SC\text{ideal}}$) ou atenuada pela transmissividade do sistema (J_{SC}); a razão entre tais resultados resulta na transmissividade ponderada de um sistema - Eq. (4).

$$j_{fg\text{ideal}} = SRi(\lambda)g(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

$$j_{fg} = SRi(\lambda)\tau_{\text{sistema}}(\lambda)g(\lambda)d\lambda \quad (2)$$

$$J_{SC} = \int_0^{\infty} j_{fg}(\lambda)d\lambda \quad (3)$$

$$T_{\text{pond}} = \frac{J_{SC}}{J_{SC\text{ideal}}} \quad (4)$$

onde:

$SRi(\lambda)$: Resposta espectral interna, desconsiderando perda por reflexão;

$g(\lambda)$: Espectro da radiação incidente;

$\tau_{\text{sistema}}(\lambda)$: Transmissividade final de um conjunto de camadas, desde o meio externo até o interior da célula, calculada através do modelo proposto;

J_{SC} : Densidade total de corrente fotogerada, que corresponde à corrente de curto-circuito de um dispositivo ideal;

T_{pond} : Transmissividade ponderada de um sistema.

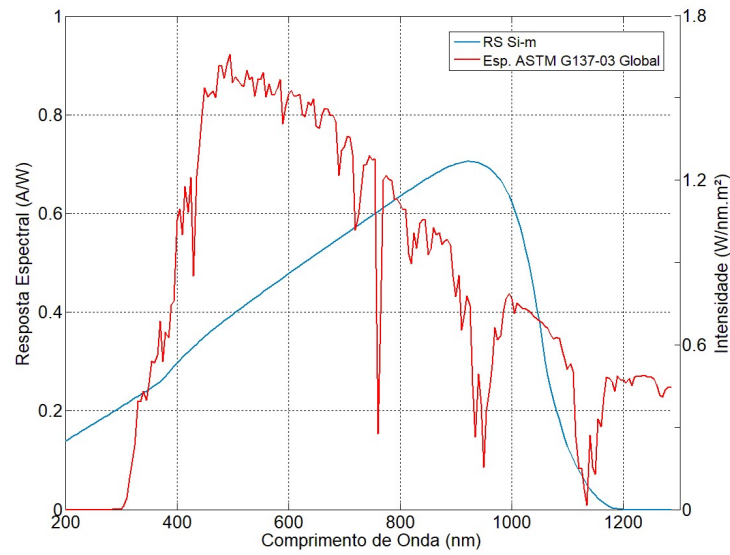


Figura 3 - Espectro de referência e resposta espectral de uma célula de silício monocristalino em função de λ .

3. RESULTADOS

A J_{SC} foi elevada pela presença de filmes de PDMS para todas as espessuras observadas. A J_{SC} máxima foi obtida na espessura de 110 nm, e representou um ganho de 2,7% em relação ao sistema sem o filme, em incidência normal. No gráfico da Fig. 4 são apresentadas as curvas de J_{SC} para a faixa de ângulos de incidência da radiação direta entre 0 e 90°, para três espessuras; na Fig.5 é apresentada uma ampliação do gráfico da Fig. 4, e resultados para outras espessuras são apresentados. Na Tab. 1 são apresentados os valores de J_{SC} Ideal, do sistema sem filme e com filmes em diferentes espessuras, para incidência normal.

Tabela 1 - Valores de J_{SC} gerados no sistema sem filme e com diferentes espessuras do filme.

Sistema	J_{SC} (mA/cm²)	$J_{SC}/37,38$ (%)
J_{SC} Ideal	37,38	-
Sem Filme	35,43	94,8
Filme 50 nm	35,74	95,6
Filme 110 nm	36,43	97,5
Filme 170 nm	35,91	96,1

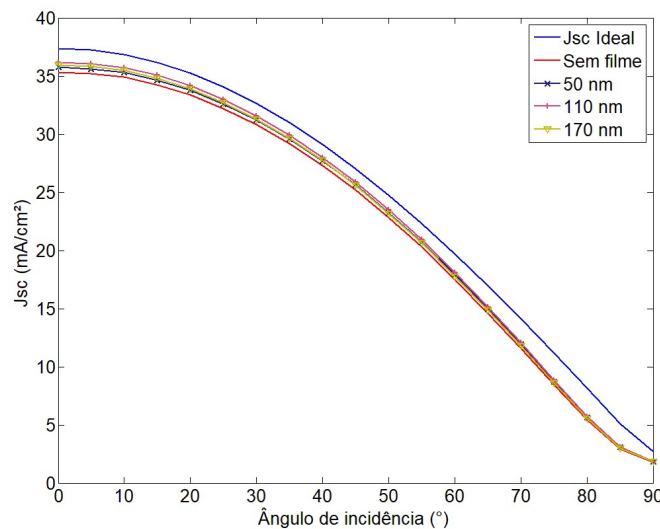


Figura 4 - J_{SC} em função do ângulo de incidência para diferentes espessuras de filme, sistema sem filme e $J_{SCideal}$.

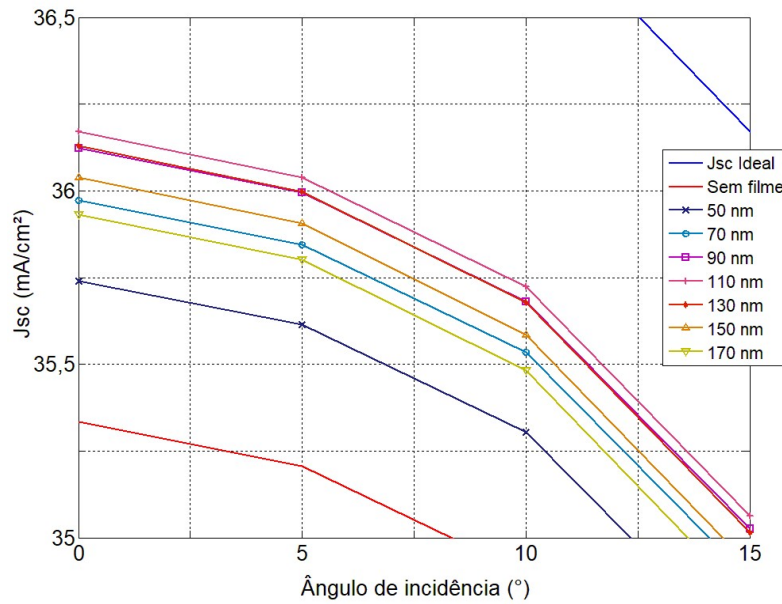


Figura 5 - Ampliação do gráfico da figura 4 e apresentação de mais curvas relativas a diferentes espessuras do filme.

No gráfico da Fig. 6 observa-se como a J_{SC} varia em função da espessura, para diferentes ângulos de incidência de 0 a 60°. Verifica-se que a espessura correspondente à maior JSC sofre uma redução à medida que o ângulo de incidência aumenta, e em 60° a espessura que produz a J_{SC} máxima é de 90 nm.

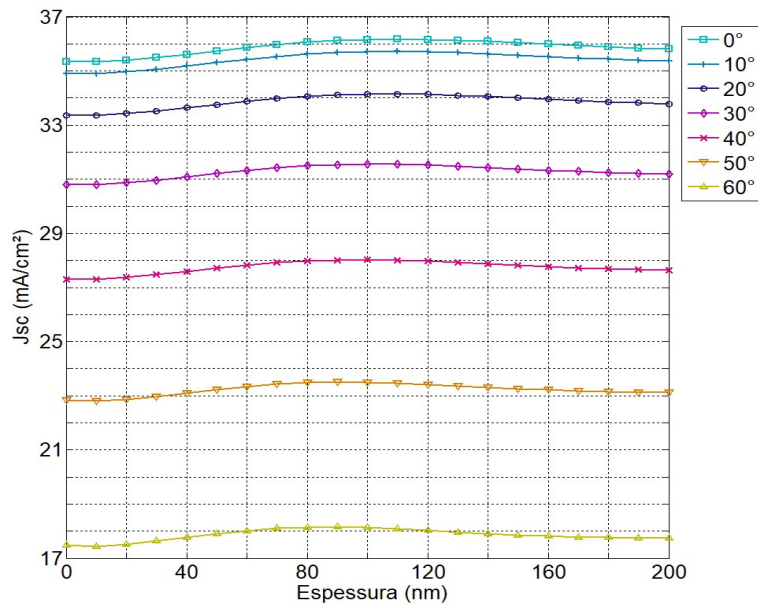


Figura 6 - J_{SC} em função da espessura do filme para diferentes ângulos de incidência entre 0 e 60°.

Na Fig. 7 são apresentadas as transmissividades ponderadas (TP) das interfaces encapsulante-silício, vidro-encapsulante, e ar-vidro, sem filme, e com o filme de espessura de 110 nm, e, final do sistema, com vidro sem filme e com filme de espessura de 110 nm. Observa-se que a interface responsável pela maior parte da perda em transmissão é a vidro-ar. Na Fig. 8 é feita uma ampliação da Fig. 7 na qual observa-se em detalhe a variação da TP do sistema e da interface ar-vidro com e sem filme. A TP do sistema, para incidência normal, vai de 94,9% para 97,2% quando inserido o filme.

As refletividades em incidência normal para filmes de diferentes espessuras sobrepostas à densidade de corrente fotogerada ideal, $j_{fideal}(\lambda)$, podem ser visualizadas na Fig. 9, bem como a refletividade das interfaces superior e inferior do filme, e do vidro sem filme (interface direta com o ar). É possível enxergar que o filme de melhor desempenho não apresenta uma menor refletividade comparado aos outros, mas uma maior sobreposição à j_{fideal} .

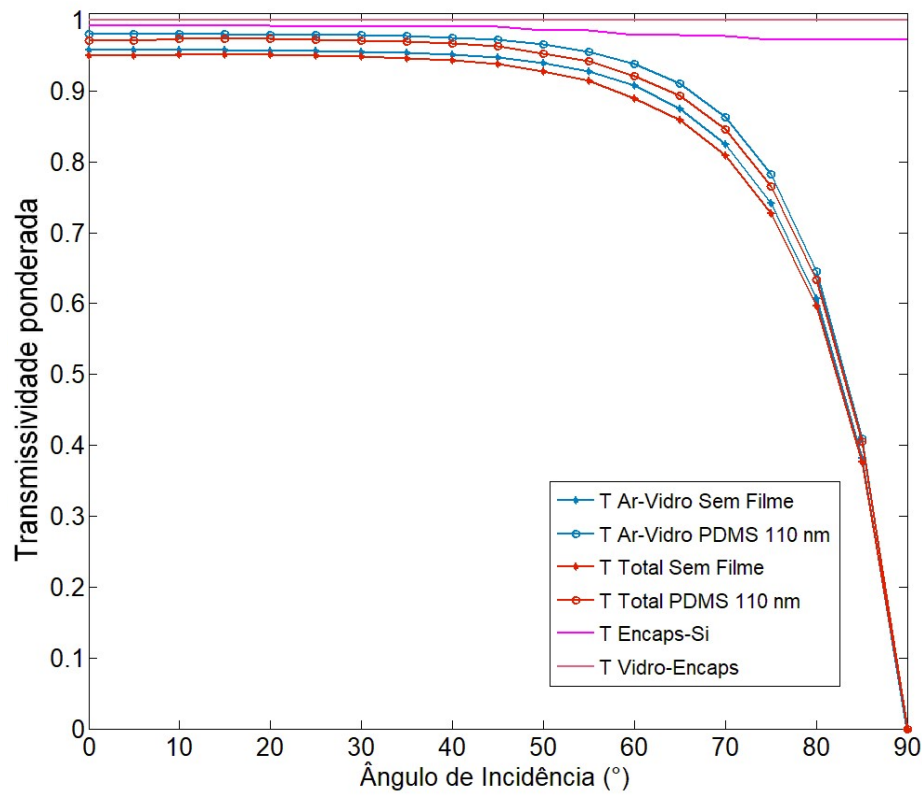


Figura 7 – Transmissividade ponderada nas três interfaces do sistema e final, para o vidro sem filme, e com filme de espessura de 110 nm.

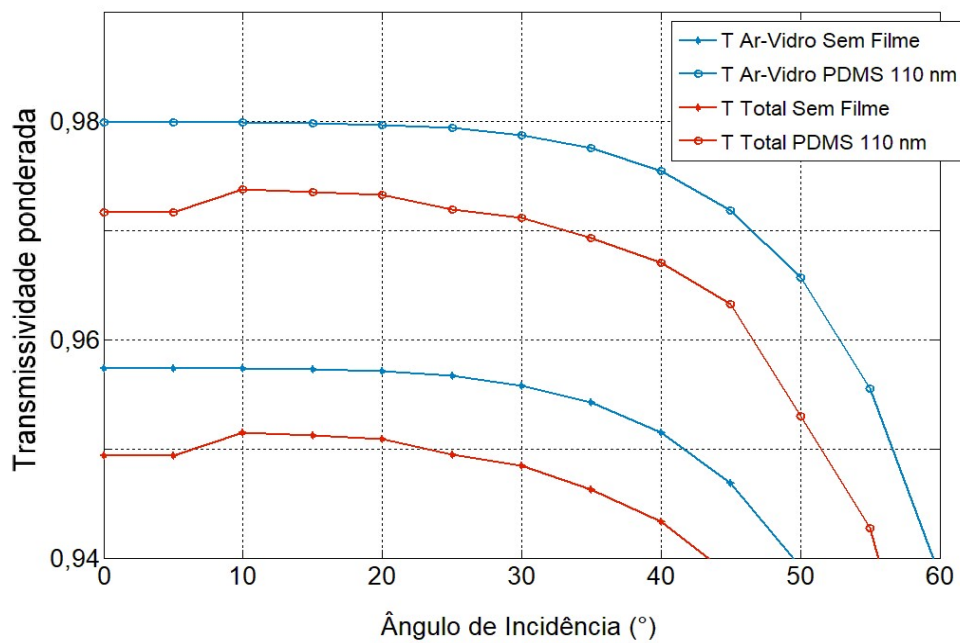


Figura 8 - Ampliação do gráfico da Fig. 7, transmissividade ponderada do sistema e da interface externa do vidro com (espessura ótima) e sem filme.

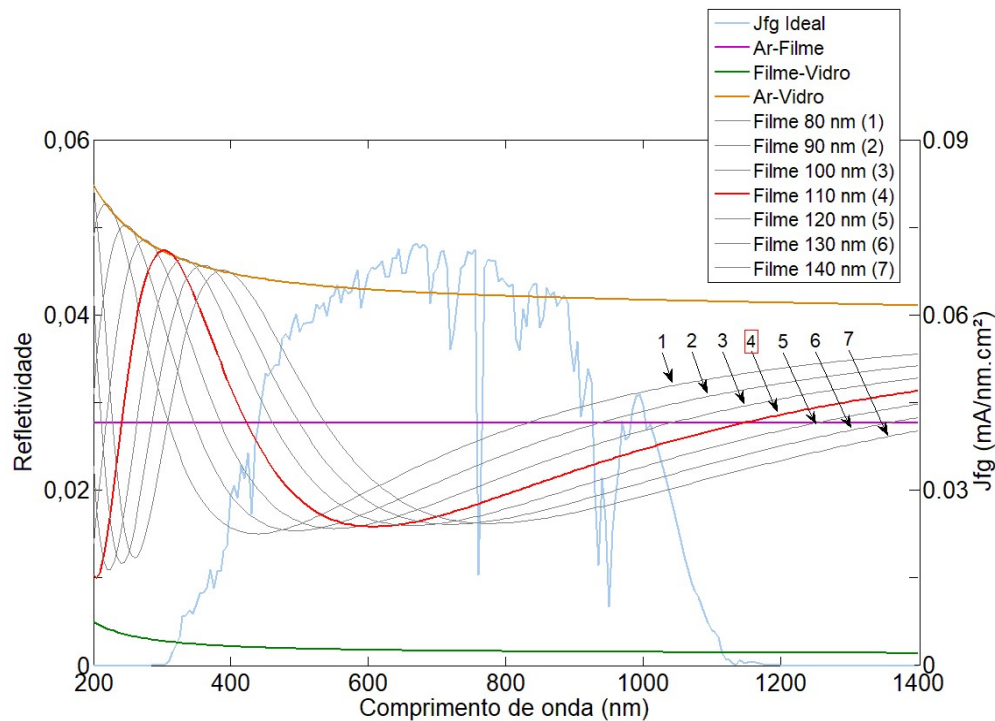


Figura 9 - Refletividade final de filmes de diferentes espessuras, das interfaces superior e inferior aos filmes, e do vidro sem filme, e j_{fg} ideal.

4. CONCLUSÕES

A deposição de um filme de PDMS sobre o vidro de um módulo de silício monocristalino produz um aumento da transmissividade na interface, o que representa um ganho em corrente de até 2,7%, na espessura ideal do filme, de 110 nm. Do ponto de vista óptico a presença de tal filme é vantajosa, de modo que acrescenta uma função à sua aplicação, com finalidade primária de evitar aderência de resíduos à superfície.

REFERÊNCIAS

- Defferrari, C. D., 2017. Metodologia Computacional para Análise Óptica de Células Fotovoltaicas Encapsuladas, Dissertação de Mestrado, PPGEM, UFRGS, Porto Alegre.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2013. Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons.
- Krauter, S., 2006. Solar Electric Power Generation – Photovoltaic Energy Systems. Springer.
- Magnin, V., Harari, J. et al., 2014. Angle-dependent Ray Tracing Simulations of Reflections on Pyramidal Textures for Silicon Solar Cells. Solar Energy, vol. 110, pp. 378-385.
- Mehmood, U., Al-Sulaiman, F. A., et al, 2016. Superhydrophobic surfaces with antireflection properties for solar applications: A critical review, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 157, pp. 604-623.

COMPUTATIONAL OPTICAL ANALYSIS OF THIN PDMS FILMS AS GLASS COATING FOR PHOTOVOLTAIC MODULES

Abstract. Thin PDMS films are applied for their self-cleaning behavior as a thin film over mainly glass surfaces. At the same time, as a translucent thin film, it can increase solar radiation transmission through glass surface. Its reflection changing effect through light interference mechanism was assessed using a computational method. Results show that the film presence increases transmission through the glass top interface, reaching the highest gain in transmission for thickness of 110 nm, in which it increases the photogenerated current in 2,7%.

Key words: Optical analysis, thin film, PDMS.