

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE PARA IMPLANTAÇÃO DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS TRANSLÚCIDOS INTEGRADO ÀS JANELAS DE UMA
EDIFICAÇÃO.**

por

Gabriel Moraes

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, maio de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE PARA IMPLANTAÇÃO DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS TRANSLÚCIDOS INTEGRADO ÀS JANELAS DE UMA
EDIFICAÇÃO.**

por

Gabriel Morais

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Lemos
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Letícia Jenisch Rodrigues

Banca examinadora:

Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu Zevallos

Prof. Dr. Arno Krenzinger

Eng. Me. Ary Paixão Borges Santana Júnior – Engie Brasil

Porto Alegre, maio de 2021

MORAIS, G. **Análise de viabilidade para implantação de módulos fotovoltaicos translúcidos integrado às janelas de uma edificação.** 2021. 22 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

RESUMO

A redução da disponibilidade de espaços para instalação de sistemas fotovoltaicos em centros urbanos de alta densidade populacional tem estimulado o desenvolvimento de novas soluções. Dentre essas, estão os sistemas fotovoltaicos integrados a estrutura de edificações (*BIPV* – do inglês *Building Integrated Photovoltaic*), que são conjuntos de módulos fotovoltaicos instalados sobre fachadas, janelas ou paredes de edificações. A instalação de filmes finos translúcidos de silício amorfo, a-Si, sobre as janelas de uma edificação proporcionam a redução da carga térmica proveniente da radiação solar para o ambiente interno quando há um ganho significativo de calor por essas aberturas. Nessa condição, é esperado um menor consumo energético com condicionamento de ar para manutenção da temperatura do ambiente interno, ao mesmo tempo em que há a geração de energia elétrica através das características fotovoltaicas dos filmes finos. É importante ressaltar que o uso de filmes finos sobre os vidros das janelas reduz a transmitância luminosa, o que implica em um consumo maior destinado à iluminação artificial dos ambientes internos, devendo esse consumo extra ser considerado nas análises financeira e de energia. Este trabalho visa analisar os impactos energéticos e financeiros da instalação de um sistema com as características descritas em uma edificação comercial na cidade de Porto Alegre e comparar tais resultados com a instalação de um sistema de silício policristalino, p-Si, no terraço da mesma edificação, atrelado ao uso de películas ópticas específicas para a redução da carga térmica sobre as janelas da edificação. Conforme resultados obtidos, o uso de módulos fotovoltaicos de p-Si no terraço da edificação atrelado à aplicação de películas ópticas para redução da carga térmica sobre as janelas se mostrou mais vantajoso financeiramente e em termos de de geração energética que a instalação de filmes finos de a-Si.

PALAVRAS-CHAVE: Filmes finos, Silício amorfo, BIVP, Carga Térmica.

MORAIS, G. **Feasibility analysis for the installation of a translucent photovoltaic modules integrated into the windows of a building.** 2021. 22 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ABSTRACT

The reduction of spaces for the installation of photovoltaic systems in high populated urban centers has stimulated the development of new solutions. Among these are the photovoltaic systems Building Integrated Photovoltaic (BIPV), which are series of photovoltaic modules installed on building's façades, windows and walls. The installation of translucent a-Si thin films on the windows of a building provides a reduction in the thermal load from solar radiation to the internal environment when there is a significant heat gain through these. In this condition, a lower energy consumption with air conditioning is expected to maintain the temperature of the internal environment, while there is the generation of electrical energy through the photovoltaic characteristics of thin films. It is important to emphasize that the use of thin films on the window glass reduces the luminous transmittance, which implies in a higher consumption for artificial lighting of the internal environments, and this extra consumption must be considered in the financial and energy analyzes. This work aims to analyze the energy and financial impacts of installing a system with the characteristics described in a commercial building in the city of Porto Alegre and to compare these results with the installation of a p-Si system on the terrace of the same building, linked to the use of specific optical films to reduce the thermal load on the building's windows. According to the results obtained, the use of p-Si photovoltaic modules on the building's terrace linked to the application of optical films to reduce light transmittance proved to be better financially and in terms of energy generation than the installation of thin films of a-Si.

PALAVRAS-CHAVE: *Thin Film, Amorphous Silicon, BIPV, Thermal Load.*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1	O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO E CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS.....	2
2.2	FILMES FINOS DE SILÍCIO AMORFO HIDROGENADO (<i>a-Si:H</i>).....	3
2.3	REDUÇÃO DA CARGA TÉRMICA:	5
3	METODOLOGIA DESENVOLVIDA	6
3.1	ESCOLHA DA EDIFICAÇÃO E ESTIMATIVA DE CONSUMO:	7
3.2	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO DE FILMES FINOS:	7
3.3	COMPARAÇÃO COM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE SILÍCIO POLICRISTALINO:.....	8
3.4	SIMULAÇÃO DA REDUÇÃO DA CARGA TÉRMICA:	8
3.5	SIMULAÇÃO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA:	10
3.6	IMPACTO DA REDUÇÃO DA TRANSMITÂNCIA LUMINOSA:	10
3.7	ANÁLISES FINANCEIRAS:	11
4	SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	12
4.1	ESTIMATIVA DE CONSUMO DE ENERGIA.....	12
4.2	GERAÇÃO FOTOVOLTAICA:.....	13
4.3	REDUÇÃO DA CARGA TÉRMICA:	14
4.4	REDUÇÃO DA TRANSMITÂNCIA LUMINOSA:.....	16
4.5	RESULTADOS DE ECONOMIA ENERGÉTICA:	17
4.6	RESULTADOS FINANCEIROS:.....	17
5	CONCLUSÕES.....	19
	APÊNDICES	23

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética verificada no mundo, aliada às diferentes limitações apresentadas pelas fontes de energia convencional, como o esgotamento das reservas e a poluição associada, têm impulsionado o uso de fontes alternativas de energia e suas diferentes aplicações. Conforme dados da Associação Brasileira de Energia Solar [ABSOLAR, 2020], a energia solar fotovoltaica tem crescido de forma acelerada no Brasil, uma vez que apresentou um aumento de mais de 7.000% entre os meses de janeiro de 2015 e julho de 2019.

Para atender essa crescente demanda em grandes centros urbanos, em que se busca maximizar a área de implantação, novas soluções, como a instalação de sistemas fotovoltaicos integrados a partes não convencionais das edificações, têm sido utilizadas. Dentre as soluções não convencionais que incrementam a geração solar fotovoltaica, encontram-se os filmes finos de silício amorfo, *a-Si*, translúcidos, que podem ser aplicados sobre os vidros das janelas de uma edificação sem impedir completamente a visibilidade para o ambiente externo.

Quando aplicado sobre o vidro da janela de uma edificação, os filmes finos translúcidos de *a-Si* também propiciam a redução da transmitância luminosa proveniente da radiação solar, reduzindo a intensidade de alguns comprimentos de onda do espectro eletromagnético e, conseqüentemente, a carga térmica proveniente da radiação solar para o ambiente interno. Nessa condição, é esperado um menor consumo energético com condicionamento de ar para manutenção da temperatura do ambiente interno nos períodos do ano em que há um ganho significativo de calor proveniente da radiação solar através das janelas, ao mesmo tempo em que há a geração de energia elétrica através das características fotovoltaicas dos filmes finos.

A aplicação de filmes finos de *a-Si* sobre a janela de uma edificação impacta ainda na transmitância luminosa do espectro visível da radiação solar para o ambiente interno. Sendo assim, as análises energéticas e financeiras devem considerar o impacto dessa redução da disponibilidade luminosa no consumo extra com iluminação artificial necessário para manutenção do fluxo luminoso adequado nas bancadas de trabalho da edificação comercial analisada.

Este trabalho visa apresentar os resultados de um estudo de viabilidade técnica e financeira referente à implantação de um sistema fotovoltaico composto por filmes finos de silício translúcido na cidade de Porto Alegre. A fim de verificar os impactos nos parâmetros de viabilidade financeira, serão analisados diferentes cenários de custos totais para aquisição do sistema fotovoltaico de filmes finos. Para fins de comparação financeira e de economia energética, os resultados obtidos serão comparados com um sistema fotovoltaico de silício policristalino, *p-Si*, de geração anual equivalente atrelado à aplicação de películas ópticas específicas para redução da carga térmica proveniente da radiação solar sobre as mesmas janelas.

Para obtenção dos resultados referente à redução da carga térmica, a economia do consumo destinado ao condicionamento de ar foi obtida através da diferença entre os resultados das simulações no *software EnergyPlus* da edificação na situação atual, com o sistema fotovoltaico de *a-Si* e das películas ópticas instalados sobre a janela orientada a Norte. A energia fotovoltaica gerada pelos sistemas de *a-Si* e *p-Si* foi determinadas através de simulações no *software System Advisor Model*, SAM, e as análises luminotécnicas realizadas através da reprodução tridimensional da edificação e das condições ambientais no *software DialuxEvo*.

A economia financeira da geração fotovoltaica foi calculada através das condições de faturamento para geração e consumo com a distribuidora local (CEEE-D) e a estimativa de custos referente à aquisição dos filmes finos de *a-Si* foi obtida diretamente com a fornecedora escolhida. Os custos para aquisição do sistema de *p-Si* e das películas ópticas foram obtidos através de pesquisas com fornecedores locais e os custos de instalação estimados considerando projetos conhecidos. Para obtenção dos parâmetros financeiros do projeto, foram elaborados diferentes fluxos de caixa descontados com as condições apresentadas que permitiram analisar o comportamento de variáveis financeiras como a Taxa Interna de Retorno, TIR, o Valor Presente Líquido, VPL, e o *Payback* dos empreendimentos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Conforme LU e LAW, 2012, a aplicação de módulos fotovoltaicos translúcidos nas janelas de uma edificação pode reduzir em até 65% o ganho total de calor para o ambiente interno, quando comparado com uma janela comum de vidro. Da mesma forma, as análises de ZHANG et al., 2018, mostraram que o ganho de calor para o ambiente interno através de uma janela pode ser reduzido em mais de 45% com a aplicação de módulos fotovoltaicos instalados sobre as janelas de uma edificação.

Para KAPSIS e ANDREAS, 2015, que buscaram determinar se haviam benefícios na implantação de sistemas fotovoltaicos translúcidos em edificações comerciais, o uso de um módulo fotovoltaico com 10% de transmitância visível aplicado sobre a camada mais externa de uma janela resultou em uma redução de consumo anual de 5 kWh/m².

Por outro lado, conforme apresentado por LIU et al., 2019, o uso de sistemas fotovoltaicos translúcidos sobre os vidros das janelas de uma edificação pode afetar significativamente o conforto visual dos ocupantes, resultando na possível necessidade de uma maior utilização de iluminação artificial interna. Sendo assim, a aplicação e a análise de sistemas fotovoltaicos translúcidos devem levar em consideração o impacto na redução da disponibilidade de luz solar para o ambiente interno.

As análises de QUANSAH e ADARAMOLA, 2016, buscaram determinar se havia vantagem no uso de filmes finos de silício amorfo (*a-Si*), quando comparados com filmes finos fabricados com Cobre, Índio, Gálio e Selênio (*CIGS*). Os resultados mostram que os filmes de *CIGS* requerem 15% mais espaço para instalação, além de produzirem 40% menos energia do que os filmes finos *a-Si*. As análises financeiras permitiram concluir que os filmes finos de *a-Si* são mais baratos que os filmes de *CIGS* e que, para ambos os casos, o tempo de retorno dos investimentos está acima da expectativa de vida dos equipamentos (*payback* de 29,25 anos para filmes finos de *a-Si* e 42 anos para filmes finos de *CIGS*).

A utilização de filmes finos de silício amorfo translúcidos proposta neste estudo demanda conhecimentos específicos nas áreas de transferência de calor e de energia elétrica. A seção seguinte apresenta os principais conceitos e como os mesmos podem ser aplicados ao modelo desenvolvido.

2.1 O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO E CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS

Os primeiros indícios da existência de ondas eletromagnéticas, além da luz visível, ocorreram em 1800, quando William Herschel descobriu a radiação infravermelha ao decompor a luz solar através de um prisma. Porém, somente em 1910 os físicos William Henry Bragg e Edward Andrade mediram experimentalmente o comprimento de onda dos raios gama, completando assim o espectro eletromagnético conhecido hoje.

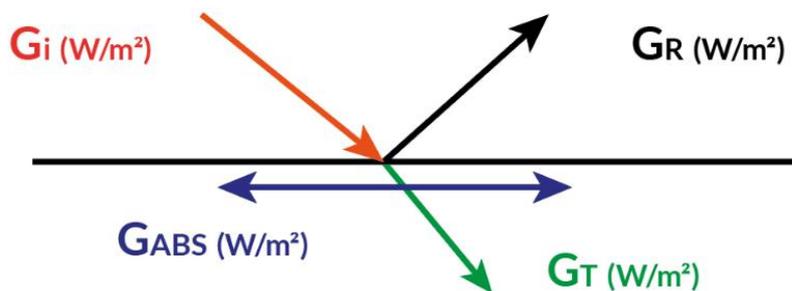
Ao estudar os efeitos da radiação utilizada para geração fotovoltaica em módulos translúcidos de silício amorfo, deve-se atentar para a faixa de comprimentos de onda entre 400 nanômetros e 750 nanômetros, que é a faixa de radiação da luz visível. Conforme definição de INCROPERA e DEWITT, 2003, a irradiância incidente em uma superfície *i* (G_i) é dada pela integral das parcelas da radiação em cada comprimento de onda do espectro eletromagnético ($G_\lambda(\lambda)$)

$$G_i = \int_0^{\infty} G_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

na qual, G_i é a irradiância total incidente em uma superfície *i*, em W/m², à temperatura absoluta T_i , em K, G_λ é a irradiância espectral emitida por esta superfície *i* em W/(μm m²), para um dado comprimento de onda λ (μm), dentro do intervalo infinitesimal de comprimento de onda $d\lambda$.

Segundo INCROPERA e DEWITT, 2003, toda a radiação incidente em uma superfície pode sofrer absorção, reflexão e transmissão, sendo que cada parcela dependerá das características ópticas do material analisado. Materiais opacos não são capazes de transmitir a radiação, de modo que as componentes absorvidas e refletidas da radiação incidente são maiores do que as verificadas em materiais translúcidos, como o vidro por exemplo. A Figura (1) ilustra esse fenômeno para um determinado valor de irradiância (G_i) em uma superfície translúcida. As parcelas apresentadas na mesma figura são as seguintes: G_i é a radiação incidente (W/m²), G_R é a parcela refletida (W/m²), G_{ABS} é a parcela absorvida (W/m²) e G_T é a parcela transmitida (W/m²).

Figura (1) – Comportamento da Radiação Solar Incidente ao atingir uma Superfície *i*



Fonte: Autor

A absorptividade (α) é definida como a parcela de radiação total incidente em determinada superfície que é absorvida.

$$\alpha = \frac{G_{\text{Abs}}}{G_i} = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

na qual, α_{λ} é a absorptividade espectral, adimensional.

A refletividade (ρ) é definida como a parcela de radiação total incidente em uma superfície que é refletida.

$$\rho = \frac{G_R}{G_i} = \frac{\int_0^{\infty} \rho_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

na qual, ρ_{λ} é a refletividade espectral, adimensional.

A transmissividade (τ) é definida como a parcela de radiação total incidente em uma superfície translúcida que é transmitida.

$$\tau = \frac{G_T}{G_i} = \frac{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

na qual, τ_{λ} é a transmissividade espectral, adimensional.

De acordo com a primeira lei da termodinâmica, que estabelece o princípio da conservação da energia para os sistemas termodinâmicos, a soma da absorptividade, da refletividade e da transmissividade de uma superfície é igual a 1

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (5)$$

Analogamente, a soma das componentes absorvidas, refletidas e transmitidas é igual a radiação incidente na superfície.

$$G_{\text{Abs}} + G_T + G_R = G_i \quad (6)$$

2.2 FILMES FINOS DE SILÍCIO AMORFO HIDROGENADO (*a-Si:H*)

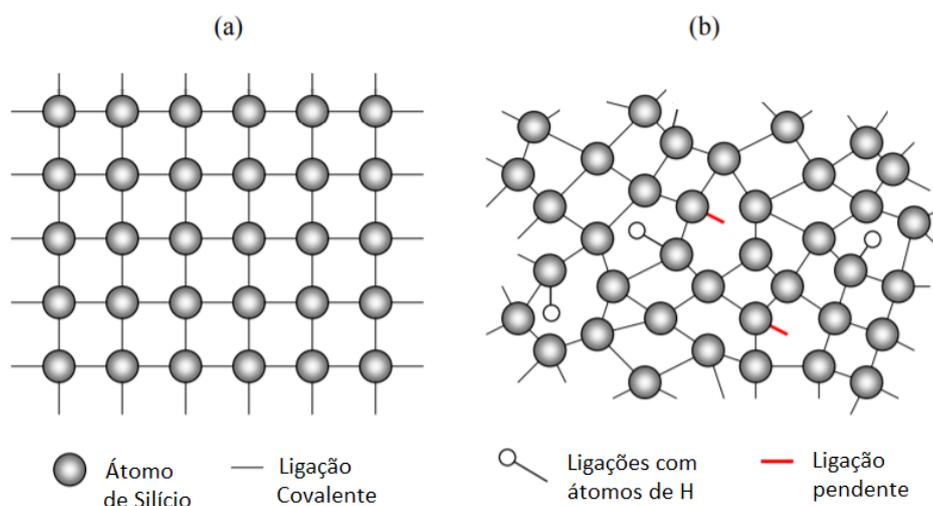
Os primeiros experimentos com filmes finos de silício amorfo hidrogenado (*a-Si:H*) foram apresentados em 1976 por Carlson, D. E. e Wronski, C. R. pelo RCA *Laboratory Services* LLC [CARLSON e WRONSKI, 1976]. O modelo apresentado consistia em uma célula de *a-Si:H* com uma eficiência de conversão fotovoltaica de 2,4%. Células de silício amorfo geralmente apresentam baixa eficiência, mas são

uma das tecnologias fotovoltaicas mais amigáveis ao meio ambiente, uma vez que não usam metais pesados tóxicos, como cádmio ou chumbo.

O silício amorfo (*a-Si*) é a forma não cristalina do silício. Sendo assim, nesse tipo de material as moléculas não estão geometricamente alinhadas como no caso de uma estrutura cristalina (*c-Si*). Conforme apontado por SMETS et al., 2017, o *a-Si:H* consiste na adição de moléculas de hidrogênio no silício amorfo a fim de obter propriedades elétricas mais parecidas com as de um semiconductor.

A Figura (2) ilustra a diferença entre a geometria de uma rede de *c-Si* e de *a-Si:H*. Como pode ser observado, no *a-Si:H* as moléculas de Silício não estão geometricamente alinhadas como no caso do *c-Si*. Por esse motivo, a estrutura atômica resultante do *a-Si* é chamada de rede aleatória contínua, na qual nem todos os átomos de Silício fazem quatro ligações covalentes com átomos vizinhos. A adição do hidrogênio permite que a maior parte dos átomos de Silício passe a realizar quatro ligações covalentes, gerando assim uma similaridade com o *c-Si*, o que permite o uso das propriedades dos semicondutoras e a análise através das bandas de energia.

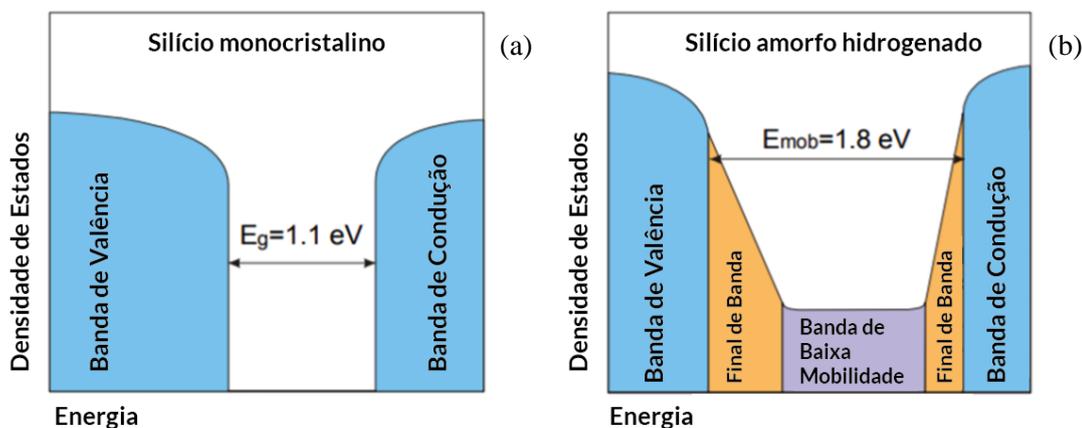
Figura (2): Representação esquemática da estrutura atômica de (a) estrutura cristalina de silício e (b) silício amorfo hidrogenado.



Fonte: Adaptado de [SMETS et al., 2017]

Como pode ser observado na Figura (3), diferentemente do que ocorre na estrutura cristalina do silício, no silício amorfo hidrogenado há uma distribuição contínua de densidade de estados e nenhum *gap* de energia bem definido existe entre a banda de valência e a banda de condução.

Figura (3): Representação das bandas de energia permitidas para (a) silício monocristalino (b) silício amorfo hidrogenado.



Fonte: Adaptado de [SMETS et al., 2017]

Devido à desordem na estrutura atômica do silício amorfo hidrogenado, as bandas de valência e de condução se estendem para a lacuna e formam regiões que são chamadas de estados finais de banda. Como apontado por SMETS et al., 2017, estados finais de banda mais largos significam maior desordem na estrutura atômica do *a-Si:H*. A mobilidade dos portadores de carga nos estados finais de banda é extremamente reduzida, sendo assim há menor probabilidade de portadores de carga serem encontrados nessas regiões.

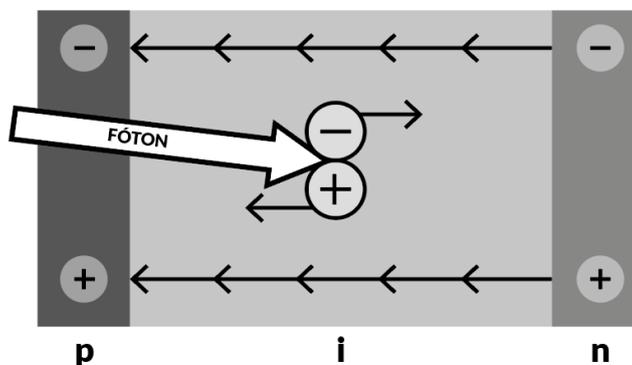
Essa característica de queda da mobilidade dos portadores de carga nas bandas centrais é usada para definir o *gap* de mobilidade no *a-Si:H*, denotado pelo termo E_{mob} . O *gap* de mobilidade do *a-Si:H* possui um valor típico de 1,8 eV, sendo maior que a lacuna de estruturas de silício monocristalino (E_g), com um valor aproximado de 1,1 eV.

Para que o efeito fotovoltaico ocorra, é imprescindível que os materiais escolhidos para fabricação dos módulos fotovoltaicos apresentem características específicas. A dopagem de semicondutores consiste na adição de pequenas quantidades de outros elementos químicos com propriedades específicas, capazes de alterar o comportamento elétrico do semicondutor conforme desejado. De forma geral, a dopagem do silício amorfo hidrogenado ocorre com os mesmos elementos que o silício na sua forma cristalina, Boro para o lado *p* da junção e Fósforo para o lado *n*.

O funcionamento fundamental de uma célula solar de silício amorfo é o mesmo de um fotodiodo composto por três camadas de semicondutores, depositado na sequência *p-i-n* ou *n-i-p* (a camada *i* é uma camada de semicondutor não dopado). Nessa estrutura os elétrons em excesso são doados da camada tipo *n* para a camada tipo *p*, criando um campo elétrico (V_0) na região de contato através da camada *i*.

Como pode ser observado na Figura (4), e segundo DENG e SCHIFF, 2003, a radiação solar entra na célula de *a-Si:H* através da camada *p*, que é uma fina camada translúcida (em torno de 20 nm) de silício dopado. A absorção dos fótons se dá principalmente na camada *i*, que é muito mais espessa. Cada fóton absorvido gerará um elétron e uma lacuna, que são transportados pelo campo elétrico intrínseco para as camadas do tipo *n* e do tipo *p*, respectivamente, gerando eletricidade.

Figura (4): Representação da estrutura de um fotodiodo p-i-n baseado em silício amorfo hidrogenado.



Fonte: Adaptado de [DENG e SCHIFF, 2003]

2.3 REDUÇÃO DA CARGA TÉRMICA:

De acordo com as definições do Escritório de Eficiência Energética e Energia Renovável dos E.U.A. [EERE, 2010], o Fator Solar (ou *SHGC* do inglês, *Solar Heat Gain Coefficient*) determina a parcela de calor proveniente da radiação solar que entra pelas janelas de uma edificação. O Fator Solar pode variar entre 0 a 1, quanto menor o índice, menor será o ganho de calor solar para um ambiente interno através da janela de uma edificação. Uma vez que a parcela da radiação que é transmitida pelo vidro varia conforme as propriedades ópticas do mesmo, é possível alterar o Fator Solar através das características do vidro escolhido ou pela aplicação de películas semitransparentes, por exemplo. Outra possibilidade, que foi melhor analisada neste estudo, é a alteração do Fator Solar através da aplicação de filmes finos translúcidos de *a-Si:H* e como essa alteração influencia no ganho de calor do ambiente interno.

Ainda conforme definições do EERE [EERE, 2010], o *U-Factor* é um parâmetro utilizado para determinar o quão bem isolada é a janela de uma edificação. Essa grandeza pode admitir qualquer valor, porém quanto mais baixo o *U-Factor* de uma janela, melhor será o seu isolamento.

Como descrito por PIACITELLI e DAL PAI, 2018, o valor médio da irradiância solar em uma superfície vertical é equivalente a 63,5% do valor total verificado em superfícies horizontais, o que evidencia o alto ganho de calor em ambientes internos de edificações através da radiação solar que incide nas janelas de vidro.

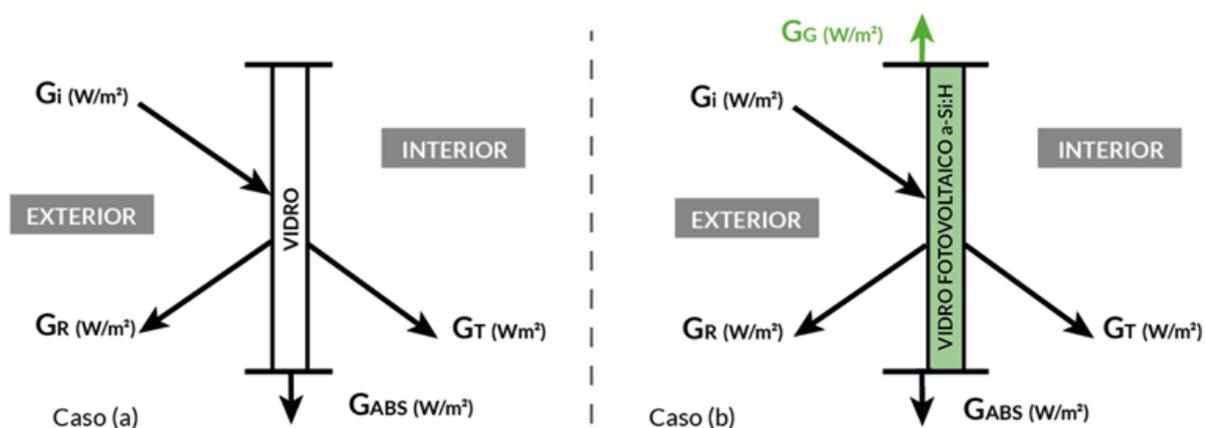
O caso (a) da Figura (5) representa a situação atual, em que a irradiância solar sobre uma janela de vidro (G_i) é em parte refletida para o meio externo (G_R) e em parte absorvida pelo vidro (G_{ABS}) e o restante transmitido para o interior, contribuindo para o aquecimento do ambiente. A aplicação de células fotovoltaicas de *a-Si* sobre os vidros está exemplificada no caso (b) da Figura (5), em que uma parte da irradiância (G_i) é aproveitada para geração fotovoltaica (G_G):

$$G_{ABS} + G_T + G_R = G_i \quad (8)$$

$$G_{ABS} + G_T + G_R + G_G = G_i \quad (9)$$

$$q_s'' = U\Delta T + F_sRS \quad (10)$$

Figura (5) – Representação do comportamento da radiação incidente



Fonte: Autor

O balanço para os casos (a) e (b) apresentados na Figura (5) permite constatar que a irradiância transmitida para o ambiente interno é menor quando há a aplicação de um vidro com característica de geração fotovoltaica, uma vez que o termo referente a geração fotovoltaica (G_G) é inserido no balanço e, para uma mesma condição de irradiância solar (G_i), a parcela transmitida (G_T) deve ser menor. As Equações (8) e (9) apresentam o balanço em [W/m²] para ambas as situações descritas.

3 METODOLOGIA DESENVOLVIDA

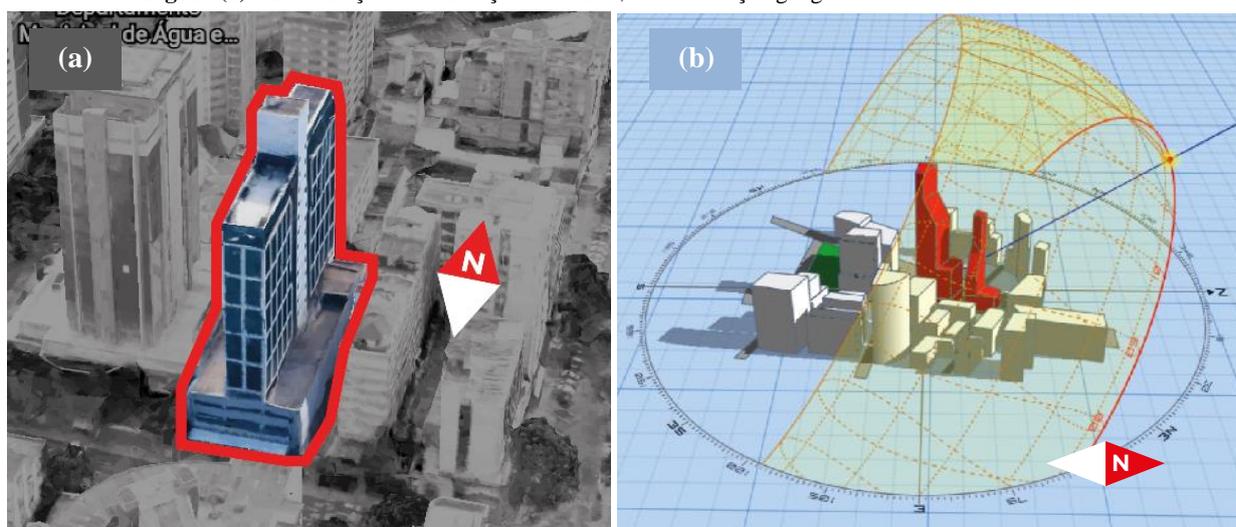
A metodologia desenvolvida busca quantificar os impactos energético e financeiro da implantação dos módulos fotovoltaicos translúcidos na janela da edificação escolhida. Para isso, utilizaram-se *softwares* de análise térmica, geração fotovoltaica e análise luminotécnica, em que foram simuladas a situação atual e a edificação com o sistema fotovoltaico e as películas ópticas instalados sobre a janela escolhida para instalação. Para obtenção dos parâmetros financeiros do projeto foi elaborado um fluxo de caixa descontado com as condições apresentadas, que permite analisar o comportamento de variáveis como tempo de retorno do investimento inicial (*payback*) e a Taxa Interna de Retorno (TIR). Buscando minimizar o desvio relativo dos resultados financeiros, foram analisados diferentes cenários de custos totais para aquisição do sistema fotovoltaico de filmes finos e das películas ópticas.

3.1 ESCOLHA DA EDIFICAÇÃO E ESTIMATIVA DE CONSUMO:

Para que um projeto de sistema fotovoltaico se viabilize é imprescindível que a escolha da edificação priorize a disponibilidade de radiação solar incidente na região. Para a cidade de Porto Alegre, buscou-se uma edificação comercial pouco influenciada pelo sombreamento da região, passando grande parte do dia sob radiação solar direta. Nessa condição, tanto o Fator Solar quanto a geração fotovoltaica são mais expressivos.

O item (a) da Figura (6) mostra a edificação comercial escolhida, localizada no bairro Moinhos de Vento, na cidade de Porto Alegre, e sua orientação geográfica. Como pode ser observado no item (b) da Figura (6), a fachada da edificação orientada para o Norte passa mais tempo sob radiação solar direta, sendo assim é a fachada escolhida para instalação dos módulos de *a-Si* e películas ópticas.

Figura (6) – Localização da edificação escolhida, sua orientação geográfica e o caminho solar anual



Fontes: Google Maps / Andrew Marsh 3d SunPath / Autor

O consumo médio mensal de cada andar da edificação será definido com base na estimativa dos aparelhos mais utilizados em uma edificação comercial composta por escritórios e na potência média dos aparelhos conforme o tempo que passam conectados na rede elétrica. As quantidades de aparelhos foram estimadas com base na ocupação máxima por andar. A NBR 5665 [ABNT, 1983] prevê para escritórios e consultórios uma proporção de uma pessoa para cada 7 m² quadrados de área útil. Para os 204 m² por andar da edificação escolhida, pode-se assumir uma ocupação de aproximadamente 25 pessoas por andar.

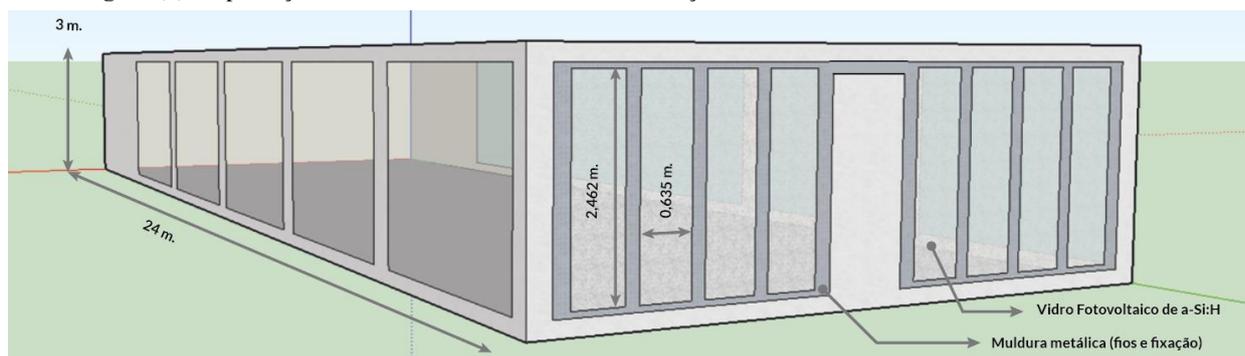
3.2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO DE FILMES FINOS:

O sistema fotovoltaico de *a-Si:H* escolhido é composto por filmes finos fabricados pelo fornecedor espanhol Onyx. Os vidros fabricados já são laminados com as camadas de *a-Si:H*, sendo assim há a necessidade de substituir os vidros atualmente instalados na edificação.

Cada vidro laminado possui transparência de 30%, 246,2 cm de comprimento e 63,5 cm de largura. É possível instalar até oito painéis de vidro laminado nas janelas orientadas a Norte, já considerando os espaços entre os vidros necessários para passagem de fios e fixação, conforme Figura (7). O sistema composto por oito módulos será replicado para oito andares, sendo assim haverá um total de 64 painéis de vidro laminado compondo a fachada (área total instalada de 100,05 m²), distribuídos em 16 conjuntos paralelos (*strings*) de 4 módulos cada. O inversor escolhido é o modelo 2000-S da marca Growatt.

Conforme dados do fabricante, o fator solar (F_s) e o *U-value* para o modelo de vidro escolhido valem 41% e 5,7 W/m²K, respectivamente. A aplicação da Equação (10) permite determinar o fluxo de calor (W/m²) que atravessa o vidro e contribui para o aquecimento do ambiente interno em um instante do dia. Assumindo que o ambiente interno deve ser mantido em 25°C, que o ambiente externo se encontra em 32°C e que a radiação solar incidente é de 900 W/m², o fluxo de calor para o ambiente interno será de 409 W/m².

Figura (7): Reprodução tridimensional de um andar da edificação com o sistema fotovoltaico de *a-Si:H* instalado.

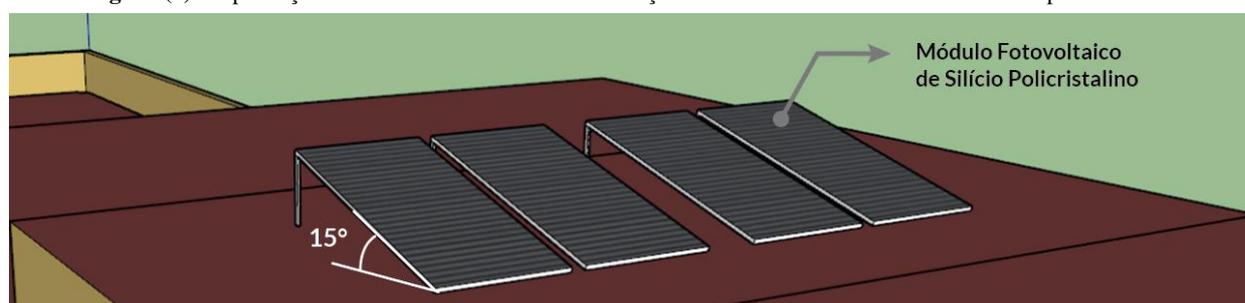


Fonte: Autor

3.3 COMPARAÇÃO COM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE SILÍCIO POLICRISTALINO:

Os resultados da simulação com filmes finos será comparado com um sistema de silício policristalino de geração de energia anual aproximada, instalado sobre o telhado da mesma edificação. Esse sistema de 1,72 kWp é composto por quatro módulos fotovoltaico de 430 W (Sunova Solar SS - 430-72MD), instalados no telhado da edificação orientados para o Norte com inclinação de 15° em relação à horizontal (área total instalada de 8,8 m²). Os quatro módulos estão instalados conectados em um microinversor para conexão com a rede elétrica (*on-grid*) de 1500 W da marca Hoymiles (modelo MI-1500). A Figura (8) apresenta uma reprodução tridimensional do sistema fotovoltaico de *p-Si* instalado sobre o terraço da edificação.

Figura (8): Reprodução tridimensional do telhado edificação com o sistema fotovoltaico de silício policristalino.



Fonte: Autor

Para comparação com as análises térmicas do sistema de *a-Si*, foi considerada a aplicação de películas ópticas específicas para redução do fator solar em oito andares da edificação (os mesmos oito andares analisados para o sistema de filmes finos) juntamente com o sistema de *p-Si*. Para que as análises energética e financeira com o sistema fotovoltaico de filmes finos possam ser comparadas, a película escolhida apresentará as mesmas características que o sistema de filmes finos (fator solar (F_s) de 41% e U -value de 5,7 W/m²K e transmitância luminosa de 30%).

3.4 SIMULAÇÃO DA REDUÇÃO DA CARGA TÉRMICA:

A economia mensal oriunda da redução da carga térmica pela instalação dos filmes finos de *a-Si* foi determinada através de simulações no *software EnergyPlus*. Para tal, a edificação foi reproduzida tridimensionalmente e as condições ambientais da região inseridas no *EnergyPlus*, sendo possível simular o consumo com energia elétrica destinado ao condicionamento de ar do ambiente interno. O consumo após a instalação dos filmes finos de *a-Si* deverá ser menor conforme balanços apresentados nas Equações (8) e (9), e a diferença entre ambos os casos é a energia mensalmente economizada.

Para essa simulação foi considerada a utilização de um sistema de condicionamento de ar com tecnologia PTHP (do inglês, *Packaged Terminal Heat Pump*), que são sistemas de aquecimento e refrigeração completos e sem dutos. O termostato do ambiente foi configurado para que a temperatura do

ambiente interno se mantenha em 20°C no inverno e 24°C no verão. Esse sistema de condicionamento de ar opera de segunda a sexta-feira, com 100% da capacidade entre as 08:00 e 12:00 e entre as 14:00 e 18:00, 50% da capacidade entre as 12:00 e as 14:00 e no restante do dia e em finais de semana com 5% da capacidade, a fim de contemplar eventuais usos noturnos ou nos finais de semana.

O *EnergyPlus* utiliza os parâmetros de um ou mais dias de projeto para simulação da demanda térmica. Nesse caso, serão utilizados dois dias de projeto referentes às Condições Anuais de Projeto de Aquecimento e Umidificação (em inglês, *Annual Heating and Humidification Design Conditions*) [ASHRAE, 2017], Um referente ao verão (temperatura de bulbo seco de 34,9 °C) e um de inverno (temperatura de bulbo seco de 3,9 °C), considerados, respectivamente, os dias mais quente e mais frio da região escolhida.

Outro aspecto considerado nessa análise são os cronogramas de ocupação do ambiente, já que uma maior ocupação implica em mais equipamentos ligados e, conseqüentemente, um maior consumo energético com condicionamento de ar para manutenção da temperatura interna. Considerou-se dois cronogramas, um referente aos dias da semana e outro referente aos finais de semana. O cronograma dos equipamentos elétricos e iluminação referente aos dias da semana foi configurado da seguinte forma:

- 5% da carga térmica dos equipamentos entre 00:00 e 07:59 e entre as 18:00 e 23:59;
- 100% da carga térmica dos equipamentos entre 08:00 e 11:59 e entre as 14:00 e 17:59;
- 50% da carga térmica dos equipamentos entre 12:00 e 13:59 (alternância período almoço);

Para os finais de semana, considerou-se 5% da carga térmica total dos equipamentos elétricos e de iluminação, com o objetivo de contemplar equipamentos mantidos em *stand-by* e não desligados. Considerou-se ainda uma demanda térmica de 117 W proveniente da atividade metabólica para cada um dos 25 ocupantes entre as 08:00 e 18:00 dos dias da semana [ASHRAE, 2017].

Após a reprodução tridimensional da edificação, foi necessário declarar no *EnergyPlus* as propriedades térmicas dos materiais que compõem as paredes, teto e piso da edificação. Para isso utilizou-se como base os valores disponibilizados no anexo D da NBR 15220-3 [ABNT, 2003]. Os valores de densidade aparente (kg/m³), condutividade térmica (W/m.K), calor específico (J/kg.K) e espessura (m) utilizados na simulação são os apresentados na Tabela (1).

Tabela (1): Propriedades térmicas dos materiais utilizados nas superfícies da simulação no EnergyPlus

Material	Densidade Aparente (kg/m ³)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)	Espessura (m)
Concreto Parede	2400	1,75	1000	0,010
Argamassa de reboco	2000	1,15	1000	0,010
Tijolo Furado	1300	0,70	900	0,115
Gesso	750	0,35	840	0,020
Concreto Teto e Piso	2200	1,75	1000	0,200
Madeira	600	0,15	1340	0,030

Fonte: Adaptado de NBR 15220-3 [ABNT, 2003].

As superfícies da edificação são compostas por mais de uma camada dos materiais apresentados na Tabela (1). A composição das superfícies das paredes, piso e teto são as apresentadas na Tabela (2). É importante ressaltar que os andares escolhidos para análise térmica não incluem o último andar da edificação (cujo teto está exposto à radiação solar), sendo assim as superfícies do piso e teto para os oito andares analisados (entre o 8º e o 15º andar) possuem condição de contorno adiabática.

Tabela (2): Composição das superfícies da edificação

	PAREDES	PISO	TETO
Exterior	Argamassa de reboco	Concreto Teto e Piso	Concreto Teto e Piso
↑ ↓	Concreto Parede	Madeira	Gesso
	Tijolo Furado	-	-
	Concreto Parede	-	-
	Interior	Argamassa de reboco	-

Fonte: Autor

Como detalhado na Seção 3.2, as propriedades ópticas e térmicas dos filmes finos utilizados na simulação foram disponibilizados pelo fabricante, tendo U -value de 5,7 W/m²K, Fator solar de 41% e transparência de 30%. Para a simulação sem o sistema fotovoltaico de a -Si, utilizou-se um vidro comum de 8 mm, que possui transmitância solar para incidência direta de 77,5%, transmitância visível para incidência direta de 88,1% e condutividade térmica de 0,9 W/m.K.

Por fim, para fins de simplificação, considerou-se que a transferência de calor pela moldura metálica representada na Figura (7) é igual à transferência de calor nas paredes da edificação. Sendo assim, a edificação reproduzida na simulação considerou que a região em que se encontra a moldura metálica é composta pelos mesmos materiais da parede.

3.5 SIMULAÇÃO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA:

A energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos de filmes finos e silício policristalino foi determinada através de duas simulações no *software System Advisor Model*, SAM, da NREL. Esse *software* simula a geração de energia em um sistema fotovoltaico através dos dados ambientais da região, obtidos através de um arquivo com dados climáticos e os parâmetros elétricos e técnicos disponibilizados nos catálogos dos fornecedores. Os parâmetros inseridos no *System Advisor Model* para o sistema de p -Si são os apresentados no Quadro (1) e, para o sistema de a -Si:H, os dados do Quadro (2).

Quadro (1): Parâmetros técnicos e elétricos dos módulos de p -Si e do microinversor escolhidos.

Painel Solar - Sunova Solar SS430-72MD				MicroInversor Hoymiles - MI-1500			
		STC	NOCT	Dados de Entrada (DC)		Dados de Saída (AC)	
Potência Máxima - Pmp (W)		430	326	Potência de entrada (W)	300-470	Potência de saída (W)	1500
Tensão de circuito aberto - Voc (V)		49,77	47,12	Tensão MPPT (V)	36-48	Potência máxima de saída (V)	1438
Corrente de curto-circuito - Isc (A)		11,19	8,99	Tensão de partida (V)	22	Corrente máxima de saída (A)	5,99
Tensão de máxima potência - Vmp (V)		40,81	38,45	Tensão de operação (V)	16-60	Tensão nominal de saída (V)	240
Corrente de máxima potência - Imp (A)		10,56	8,48	Tensão máxima de entrada (V)	60	Frequência Nominal (Hz)	60
Eficiência (%)		19,50%		Corrente máxima de entrada (A)	11.5	Fator de potência	>0,99
Comprimento (m)	2,108	Largura (m)	1,046	Eficiência máxima (%)		96,70%	
Área (m ²)		2,205					

Fonte: Elaborado pelo Autor com base nos *datasheets* disponibilizados pela Sunova Solar e Hoymiles.

Quadro (2): Parâmetros técnicos e elétricos dos filmes finos de silício e do inversor escolhidos.

Painel Onyx PV - 636BN-12452456				Inversor Growatt 2000-S			
		30% Transparência		Dados de Entrada (DC)		Dados de Saída (AC)	
Potência Máxima - Pmp (W)		44		Potência de entrada (W)	2300	Potência de saída (W)	2000
Tensão de circuito aberto - Voc (V)		50		Tensão MPPT (V)	70-450	Potência máxima de saída (V)	2000
Corrente de curto-circuito - Isc (A)		1,52		Tensão de partida (V)	80	Corrente máxima de saída (A)	9,5
Tensão de máxima potência - Vmp (V)		34		Tensão de operação (V)	70-450	Tensão nominal de saída (V)	220
Corrente de máxima potência - Imp (A)		1,29		Tensão máxima de entrada (V)	450	Frequência Nominal (Hz)	60
Eficiência (%)		2,80%		Corrente máxima de entrada (A)	10	Fator de potência	1
Comprimento (m)	2,462	Largura (m)	0,635	Eficiência máxima (%)		96,50%	
Área (m ²)		1,563					

Fonte: Elaborado pelo Autor com base nos *datasheets* disponibilizados pela Ônix Solar e Growatt.

3.6 IMPACTO DA REDUÇÃO DA TRANSMITÂNCIA LUMINOSA:

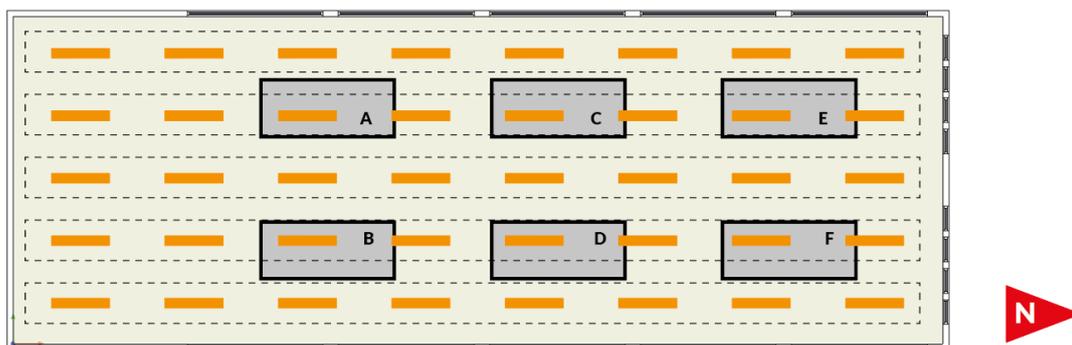
Um outro aspecto a ser considerado é como a instalação dos filmes finos de silício e das películas ópticas impactam no consumo de energia para iluminação devido à redução da transmitância luminosa. A NBR 5413 [ABNT, 1992] determina que nos escritórios e demais ambientes de trabalho, os valores ideais devem estar entre 500 e 1000 lux. O modelo de lâmpadas escolhido é do tipo fluorescentes tubulares de 61,2 W, capazes de fornecer 4044 lumens cada uma. Considerando os 204 m² do ambiente, serão necessários 40 pontos de luz compostos por uma lâmpada cada para atingir um fluxo luminoso médio de 792 lumens/m², considerando uma distribuição uniforme entre os pontos luminosos e apenas a iluminação artificial do ambiente.

Como pode ser observado na Figura (9), a edificação foi reproduzida tridimensionalmente no *software DialuxEvo*, com quatro bancadas de trabalho com altura de 80 cm cada. A fim de verificar a necessidade do uso da iluminação artificial, foram elaboradas três simulações distintas desconsiderando o

uso das lâmpadas, sendo elas: I) situação atual, II) com os filmes finos de a -Si instalados sobre as janelas orientadas para o norte e III) instalação das películas óptica sobre as janelas orientadas para o norte.

Foram considerados ainda dois períodos distintos do ano, um referente ao solstício de verão (21 de dezembro) e outro ao solstício de inverno (21 de junho), sendo esses períodos extremos opostos em termos da altitude solar. Para que fosse possível verificar o comportamento do fluxo luminoso sobre as bancadas de trabalho em diferentes horas do dia, foram simuladas cinco horas distintas para cada uma das datas analisadas, 09:00, 11:00, 13:00, 15:00 e 17:00.

Figura (9): Disposição das bancadas de trabalho e das lâmpadas tubulares utilizadas para iluminação artificial.



Fonte: Autor

3.7 ANÁLISES FINANCEIRAS:

O custo referente à aquisição dos módulos e à instalação do sistema fotovoltaico de filmes finos foi obtido diretamente com a fornecedora selecionada. A estimativa de custos para aquisição do sistema fotovoltaico de filmes finos informada está em torno de 250 €/m². Para os 100,05 m² de filmes finos necessários e considerando a cotação atual aproximada do euro frente ao real, de R\$ 6,50 para cada 1€, é possível estimar um custo total para aquisição dos filmes finos de aproximadamente R\$ 162.000,00.

Os custos com transporte, aquisição dos equipamentos e de outros componentes não estão sendo considerados nos 250 €/m², sendo assim, para um cenário conservador, foi assumido adicional de R\$ 50.000,00 para contemplar esses custos. Com o objetivo de analisar o impacto da cotação do euro frente ao real e da variação nos custos adicionais (componentes extras, transporte e instalação), serão considerados três cenários distintos para que se possa analisar o impacto dessas variações nos parâmetros financeiros. Os três cenários de custos totais analisados para o sistema de filmes finos são os apresentados na Tabela (3) e o cenário de custos totais considerado para o sistema de p -Si com as películas ópticas é o apresentado na Tabela (4).

Tabela (3): Cenários de custos totais para análise financeira do SFV de a -Si

	Cotação Euro (R\$/€)	Filmes Finos (R\$)	Custos Adicionais (R\$)	Custo Total (R\$)
Otimista	R\$3,00/€	R\$ 75.037,50	R\$ 20.000,00	R\$ 95.037,50
Conservador	R\$6,50/€	R\$ 162.581,25	R\$ 50.000,00	R\$ 212.581,25
Pessimista	R\$8,50/€	R\$212.606,25	R\$70.000,00	R\$282.606,25

Fonte: Autor

Tabela (4): Cenário de custos totais para análise financeira do SFV de p -Si e películas ópticas

Conjunto p-Si + transporte (R\$)	Instalação (R\$)	Aquisição e instalação películas (R\$)	Custo Total (R\$)
R\$8.500,00	R\$ 5.000,00	R\$ 13.000,00	R\$ 26.500,00

Fonte: Autor

A economia mensal gerada pela injeção de energia na rede elétrica foi determinada através das condições de faturamento para geração e consumo com a CEEE-D, levando em consideração as tarifas de consumo e geração determinadas pela ANEEL e impostos vigentes. O consumidor comercial se enquadra no nível de baixa tensão, subgrupo B3 e paga 30% de ICMS.

As tarifas utilizadas para elaboração da análise de viabilidade são as tarifas reguladas da CEEE-D pela ANEEL, determinadas na Resolução Homologatória 2798/2020, de 19/11/2020 [ANEEL, 2020]. As tarifas para consumidores comerciais do subgrupo B3 estão apresentados na Tabela (5).

Tabela (5): Tarifas de consumo da CEEE-D para o ciclo 2020/21 homologadas pela ANEEL

Subgrupo	Classe	ICMS	TE (R\$/MWh)	TUSD (R\$/MWh)	TE + TUSD c/ ICMS (R\$/MWh)
B3	Comercial	30%	0,2655	0,2835	0,7842

Fonte: Elaborado pelo Autor com base na Resolução Homologatória 2798/2020 [ANEEL, 2020]

A análise financeira das economias da geração de energia para um sistema conectado à rede elétrica deve levar em consideração parâmetros como o custo de disponibilidade da distribuidora e a incidência de impostos sobre as tarifas de consumo e geração. Para consumidores CEEE-D Subgrupo B3 o custo de disponibilidade é igual a 100 kWh, sendo assim, nos meses em que a diferença líquida entre o consumo e a geração for menor que 100 kWh, essa energia será faturada. É importante ressaltar que como o consumo total dos oito andares é muito superior a geração mensal de ambos os sistemas, dessa forma o custo de disponibilidade não será cobrado nos faturamentos da edificação.

Sobre as tarifas de consumo há a incidência de PIS/COFINS e ICMS, porém na TUSD de geração não há a incidência de ICMS. Nessa condição (assumindo uma tarifa igual de PIS/COFINS de 6,5% para consumo e geração) a tarifa de consumo com impostos (0,865 R\$/MWh) é maior que a de geração com impostos (0,739 R\$/MWh).

Para estimativa de economia financeira com a redução da carga térmica, considerou-se que toda energia economizada com condicionamento de ar é valorada ao que seria paga com impostos (ICMS e PIS/COFINS). Sendo assim, será considerada uma economia de R\$ 0,865 para cada MWh de energia que deixa de ser gasto com condicionamento de ar após a instalação do sistema de filmes finos.

4 SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir das metodologias apresentadas na Seção 3, foram obtidos os resultados para cada uma das análises descritas para o sistema de *a-Si*. Na sequência foram elaboradas as análises energética e financeira e a comparação com o sistema de *p-Si* instalado sobre o telhado da edificação atrelado ao uso das películas ópticas nas janelas orientadas a Norte.

4.1 ESTIMATIVA DE CONSUMO DE ENERGIA

Como melhor descrito na Seção 3.1, o consumo mensal de cada andar será definido com base na potência dos aparelhos mais comuns em uma edificação composta por escritórios comerciais e na estimativa de ocupantes com base na NBR 5665 [ABNT, 1983]. Para os 204 m² do ambiente analisado, em torno de 25 ocupantes poderiam permanecer no ambiente.

As Tabelas (6) e (7) apresentam a estimativa de consumo mensal para os meses de janeiro (verão) e julho (inverno), respectivamente. Esses períodos do ano são considerados extremos opostos em termos de condições climáticas na região escolhida. Os outros meses do ano serão distribuídos de forma linear entre janeiro e julho.

Para uma estimativa mais precisa do consumo, foi considerado que alguns dos aparelhos não operam o tempo todo em sua potência máxima, como os notebooks, que possuem baterias. Para esses aparelhos foi considerado um fator de redução de 30%, buscando aproximar os dados do consumo real. Para a geladeira, assumiu-se um fator de redução de 30% no verão e 50% no inverno, já que é necessária uma potência elétrica menor no inverno para manutenção da temperatura ideal. Para as lâmpadas utilizou-se um fator de redução médio de 10% com o objetivo de contemplar a luminosidade natural proveniente das janelas e períodos em que nem todas as lâmpadas estejam ligadas.

Tabela (6): Consumo mensal de energia para um andar no Verão na situação atual

VERÃO	[W]	Quant.	Horas/dia	Fator (%)	Dias/mês	kWh/dia	kWh/mês
Lâmpada Fluorescente	61,2	40	8	10,00%	20	11,52	352,512
Notebook	30	20	8	30,00%	20	3,36	67,2
Ar-condicionado	(consumo mensal para resfriamento e aquecimento obtido através do EnergyPlus)						990,76
Aspirador de pó	100	1	1	0,00%	15	0,1	1,5
Cafeteira Elétrica	800	4	2	0,00%	20	6,4	128
Chaleira elétrica	1000	1	1	0,00%	20	1	20
Computador	300	5	8	0,00%	20	12	240
Forno micro-ondas - 25 L	1500	2	1	0,00%	20	3	60
Geladeira 2 portas <i>frost free</i>	120	3	24	30,00%	30	6,048	181,44
Impressora Laser	400	4	1	0,00%	20	1,6	32
Consumo mensal para um andar (kWh)						2073,412	

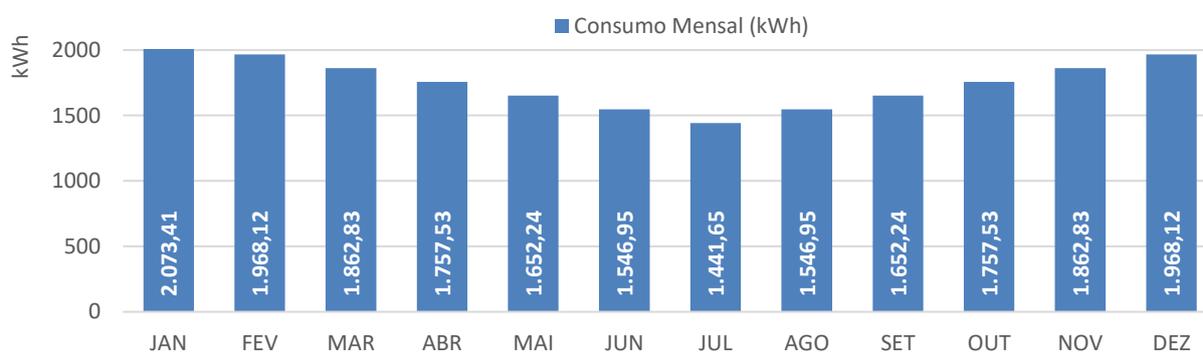
Fonte: Elaborado pelo Autor com base nas potências médias dos aparelhos escolhidos.

Tabela (7): Consumo mensal de energia para um andar no Inverno na situação atual

INVERNO	[W]	Quant.	Horas/dia	Fator (%)	Dias/mês	kWh/dia	kWh/mês
Lâmpada Fluorescente	61,2	40	8	10,00%	20	11,52	352,512
Notebook	30	20	8	30,00%	20	3,36	67,2
Ar-condicionado	(consumo mensal para resfriamento e aquecimento obtido através do EnergyPlus)						410,84
Aspirador de pó	100	1	1	0,00%	15	0,1	1,5
Cafeteira Elétrica	800	4	2	0,00%	20	6,4	128
Chaleira elétrica	1000	1	1	0,00%	20	1	20
Computador	300	5	8	0,00%	20	12	240
Forno micro-ondas - 25 L	1500	2	1	0,00%	20	3	60
Geladeira 2 portas <i>frost free</i>	120	3	24	50,00%	30	4,32	129,6
Impressora Laser	400	4	1	0,00%	20	1,6	32
Consumo mensal para um andar (kWh)						1441,652	

Fonte: Elaborado pelo Autor com base nas potências médias dos aparelhos escolhidos.

A Figura (10) apresenta os resultados da estimativa de consumo obtida para um andar da edificação. O meses de janeiro e julho foram estimados conforme Tabelas (6) e (7), os outros meses do ano foram distribuídos de forma linear entre janeiro e julho.

Figura (10): Consumo anual estimado para um andar da edificação escolhida.

Fonte: Autor com base nas potências médias dos aparelhos escolhidos

4.2 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA:

Como apresentado na Seção 3.5, a energia mensal gerada pelos sistemas fotovoltaicos foi determinada através de duas simulações no *software System Advisor Model*, da NREL. Os parâmetros

inseridos no *System Advisor Model* para o sistema de filmes finos foram apresentados no Quadro (2) e, para o sistema de silício policristalino, os dados inseridos no Quadro (1).

A geração mensal de energia simulada para o sistema composto por módulos de *p-Si* e *a-Si:H* estão apresentados na Figura (11). A análise dos dados mostra que a geração para o sistema fotovoltaico instalado na vertical (*a-Si:H*) é maior no inverno. Tal fato é esperado pois, como pôde ser observado na Figura (6), para a localidade escolhida, a inclinação solar máxima no verão é de $83,5^\circ$ e, dessa forma, a radiação solar que incide diretamente em uma superfície vertical nesse período é menor.

Figura (11): Geração mensal simulada para os sistemas fotovoltaicos no System Advisor Model



Fonte: Elaborado pelo Autor com base nos resultados da simulação no software SAM.

Conforme resultados apresentados na Figura (11), a variação da altura solar no período de um ano impacta nos resultados da geração de energia para ambos os sistemas fotovoltaicos analisados. Os módulos fotovoltaicos de *a-Si*, instalados na vertical sobre os vidros das janelas orientadas a Norte, apresentam uma maior geração no inverno, pois nesse período a altura solar é menor e há uma incidência mais direta da radiação solar do que se verifica no verão. O contrário ocorre com os módulos fotovoltaicos de *p-Si*, pois nesse caso estão instalados com uma diferença de 15° em relação à horizontal e, dessa forma, há uma incidência mais direta da radiação solar no verão, em que a altura solar é maior do que no inverno.

Como pode ser observado na Figura (11), devido a menor potência máxima total do sistema fotovoltaico de *p-Si* (1,72 kWp) quando comparada à potência máxima total do sistema fotovoltaico de *a-Si* (2,816 kWp), o sistema de *a-Si* possui um fator de capacidade menor que o sistema de *p-Si* (11,7% contra 18,42%, respectivamente). Além disso, devido a menor eficiência de conversão fotovoltaica dos filmes finos em relação aos módulos de *p-Si*, há a necessidade de uma área instalada em torno de 11,3 vezes maior para que os filmes finos de *a-Si* apresentem uma geração anual equivalente ao sistema de *p-Si* (em torno de 2.800 kWh).

4.3 REDUÇÃO DA CARGA TÉRMICA:

Conforme metodologia descrita na Seção 3.4, a simulação da redução da carga térmica se deu a partir da reprodução tridimensional da edificação e da simulação térmica através do *software EnergyPlus*. Os resultados obtidos para os módulos de *a-Si* são os apresentados no Quadro (3), em termos do consumo em kWh necessários para manter a temperatura do ambiente interno em 24°C no verão e 20°C no inverno.

Quadro (3): Redução da carga térmica em termos do consumo para condicionamento de ar após a instalação do SFV de a-Si

MÊS	AQUECIMENTO [kWh]	REFRIGERAÇÃO [kWh]	MÊS	AQUECIMENTO [kWh]	REFRIGERAÇÃO [kWh]	TOTAL (kWh)
JAN	0,000	990,630	JAN	0,000	991,010	0,380
FEV	0,000	898,000	FEV	0,000	898,000	0,000
MAR	0,000	965,240	MAR	0,000	968,850	3,610
ABR	0,000	699,150	ABR	0,000	718,690	19,540
MAI	51,800	376,640	MAI	40,920	406,020	18,500
JUN	254,760	239,300	JUN	231,380	260,120	-2,560
JUL	194,500	208,110	JUL	174,000	228,600	-0,010
AGO	51,260	329,800	AGO	41,020	356,690	16,650
SET	21,210	524,620	SET	16,710	547,980	18,860
OUT	0,000	761,730	OUT	0,000	772,280	10,550
NOV	0,000	866,740	NOV	0,000	872,090	5,350
DEZ	0,000	922,460	DEZ	0,000	922,460	0,000
APÓS INSTALAÇÃO PVGLASS			SITUAÇÃO ATUAL			90,870

Fonte: Autor

Ainda que a película óptica aplicada sobre a janela da edificação em complemento ao sistema de *p-Si* possua as mesmas características ópticas e térmicas que o vidro fotovoltaico de *a-Si*, há uma maior área de transmitância luminosa quando as películas ópticas são instaladas, pois nesse caso não há a moldura metálica representada na Figura (7). Os resultados obtidos referentes a redução da carga térmica após a instalação das películas ópticas são os apresentados no Quadro (4):

Quadro (4): Redução carga térmica em termos do consumo para condicionamento de ar após a instalação das películas ópticas

MÊS	AQUECIMENTO [kWh]	REFRIGERAÇÃO [kWh]	MÊS	AQUECIMENTO [kWh]	REFRIGERAÇÃO [kWh]	TOTAL (kWh)
JAN	0,000	990,230	JAN	0,000	990,760	0,530
FEV	0,000	897,990	FEV	0,000	898,000	0,010
MAR	0,000	964,740	MAR	0,000	969,760	5,020
ABR	0,000	698,080	ABR	0,000	725,280	27,200
MAI	53,570	383,160	MAI	38,270	422,770	24,310
JUN	257,540	245,460	JUN	225,000	274,670	-3,330
JUL	197,440	213,170	JUL	168,930	241,910	0,230
AGO	52,420	335,030	AGO	38,590	372,080	23,220
SET	22,390	523,200	SET	15,960	555,620	25,990
OUT	0,000	759,470	OUT	0,000	774,350	14,880
NOV	0,000	864,260	NOV	0,000	871,930	7,670
DEZ	0,000	922,460	DEZ	0,000	922,460	0,000
APÓS INSTALAÇÃO PELÍCULAS			SITUAÇÃO ATUAL			125,730

Fonte: Autor

Como pôde ser observado nos Quadros (3) e (4), a instalação do sistema fotovoltaico de *a-Si* e das películas ópticas na janela orientada a Norte não reduz de forma expressiva a carga térmica proveniente da radiação solar nos meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro. Tal fato se deve à maior altura solar nesse período, que pode ser verificado na Figura (6), pois nessa condição há um menor ganho de calor pelas janelas da edificação. Nos meses mais frios (junho e julho), que é quando o ganho de calor através das janelas é benéfico para manutenção da temperatura interna, a instalação do sistema fotovoltaico de *a-Si* e das películas ópticas é prejudicial, já que é necessário um maior consumo energético com condicionamento de ar para aquecimento para manutenção da temperatura interna em 20°C.

Nos outros meses do ano, em que a altura solar é intermediária em relação aos solstícios de inverno e verão, e é necessário o uso dos sistemas de condicionamento de ar para manutenção da temperatura

interna, a economia energética proveniente da redução da carga térmica é mais significativa, chegando perto dos 20 kWh para cada andar da edificação mensalmente.

4.4 REDUÇÃO DA TRANSMITÂNCIA LUMINOSA:

A partir da metodologia descrita na Seção 3.6, foi possível determinar o fluxo luminoso sobre cada uma das seis bancadas de trabalho para cinco horas distintas do dia e para as três situações descritas na Seção 3.6. Os resultados obtidos das simulações no *software DialuxEvo* para os solstícios de verão e de inverno são, respectivamente, os apresentados nos Quadros (5) e (6). Os valores em vermelho são os em que o fluxo luminoso está abaixo de 500 lux, sendo esse o mínimo estabelecido na NBR 5413 [ABNT, 1992] para escritórios e demais ambientes de trabalho.

Quadro (5): Impacto no consumo com iluminação para o solstício de verão.

21/dez	Bancada	A	B	C	D	E	F
D) Situação Atual	09:00	842 lx.	4854 lx.	1040 lx.	5551 lx.	1572 lx.	5479 lx.
	11:00	382 lx.	1615 lx.	473 lx.	1774 lx.	859 lx.	2054 lx.
	13:00	263 lx.	604 lx.	324 lx.	686 lx.	603 lx.	946 lx.
	15:00	637 lx.	986 lx.	779 lx.	1149 lx.	1283 lx.	1691 lx.
	17:00	8924 lx.	954 lx.	9116 lx.	1118 lx.	9384 lx.	1444 lx.
II) Filmes de α -Si	09:00	822 lx.	4837 lx.	973 lx.	5491 lx.	988 lx.	4983 lx.
	11:00	371 lx.	1609 lx.	426 lx.	1730 lx.	455 lx.	1685 lx.
	13:00	254 lx.	593 lx.	288 lx.	649 lx.	323 lx.	659 lx.
	15:00	620 lx.	967 lx.	716 lx.	1079 lx.	759 lx.	1118 lx.
	17:00	8914 lx.	939 lx.	9081 lx.	1068 lx.	9050 lx.	1078 lx.
III) Película Óptica	09:00	832 lx.	4830 lx.	980 lx.	5500 lx.	1084 lx.	5045 lx.
	11:00	371 lx.	1608 lx.	435 lx.	1740 lx.	521 lx.	1741 lx.
	13:00	254 lx.	596 lx.	299 lx.	656 lx.	363 lx.	706 lx.
	15:00	624 lx.	971 lx.	726 lx.	1091 lx.	843 lx.	1206 lx.
	17:00	8915 lx.	944 lx.	9080 lx.	1080 lx.	9098 lx.	1129 lx.

Fonte: Autor

Quadro (6): Impacto no consumo com iluminação para o solstício de inverno.

21/jun	Bancada	A	B	C	D	E	F
D) Situação Atual	09:00	321 lx.	2384 lx.	377 lx.	2392 lx.	1571 lx.	2617 lx.
	11:00	521 lx.	2001 lx.	666 lx.	2190 lx.	2227 lx.	3901 lx.
	13:00	456 lx.	1452 lx.	612 lx.	1643 lx.	2718 lx.	3658 lx.
	15:00	3473 lx.	839 lx.	3470 lx.	969 lx.	4028 lx.	1995 lx.
	17:00	88 lx.	142 lx.	93 lx.	156 lx.	139 lx.	178 lx.
II) Filmes de α -Si	09:00	308 lx.	2378 lx.	329 lx.	2352 lx.	491 lx.	2283 lx.
	11:00	483 lx.	1967 lx.	532 lx.	2067 lx.	750 lx.	2228 lx.
	13:00	416 lx.	1411 lx.	460 lx.	1498 lx.	748 lx.	1707 lx.
	15:00	3454 lx.	817 lx.	3382 lx.	876 lx.	3034 lx.	965 lx.
	17:00	86 lx.	142 lx.	86 lx.	149 lx.	90 lx.	115 lx.
III) Película Óptica	09:00	312 lx.	2380 lx.	340 lx.	2354 lx.	690 lx.	2337 lx.
	11:00	493 lx.	1970 lx.	553 lx.	2088 lx.	998 lx.	2493 lx.
	13:00	424 lx.	1419 lx.	488 lx.	1524 lx.	1126 lx.	2075 lx.
	15:00	3461 lx.	821 lx.	3402 lx.	893 lx.	3204 lx.	1151 lx.
	17:00	87 lx.	141 lx.	87 lx.	150 lx.	98 lx.	126 lx.

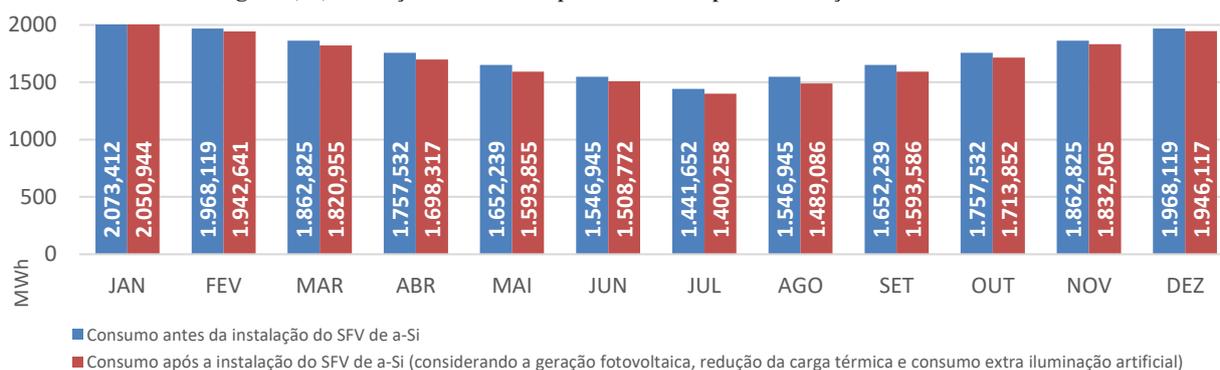
Fonte: Autor

Os resultados das simulações luminotécnicas apresentados nos Quadros (5) e (6) permitem concluir que mesmo após a instalação dos filmes finos de *a-Si* e das películas ópticas nas janelas orientadas para o Norte, os menores fluxos luminosos ocorrem nas bancadas A e C (conforme disposição apresentada na Figura (9)), tanto nos solstícios de verão quanto de inverno. Ao comparar com a situação atual, é possível verificar que as bancadas A e C são pouco impactadas pela instalação dos módulos de filmes finos e pelas películas ópticas. Considerando a hipótese simplificadora de que as lâmpadas estejam conectadas em paralelo conforme grupos apresentados na Figura (9), a necessidade de uso da iluminação artificial será sempre devido as bancadas A e C e não das bancadas E e F. Sendo assim, como a necessidade do uso da iluminação artificial ocorrerá majoritariamente por consequência da posição e características da edificação e não da instalação dos módulos de filmes finos e das películas ópticas, o impacto no consumo referente à redução da transmitância luminosa foi desconsiderado das análises energética e financeira.

4.5 RESULTADOS DE ECONOMIA ENERGÉTICA:

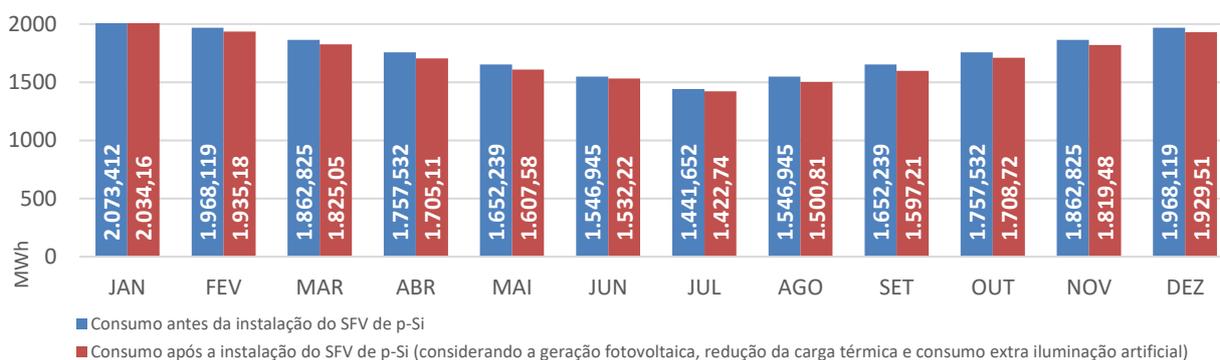
Como pôde ser observado nas Seções 4.2, 4.3 e 4.4, a instalação do sistema fotovoltaico de *a-Si* impacta de diferentes formas no consumo de energia da edificação. Dessa forma, o impacto final na economia energética deve levar em consideração o consumo extra com condicionamento de ar e o desconto líquido da geração fotovoltaica. A redução do consumo para um andar da edificação para cada um dos sistemas fotovoltaicos analisados (*a-Si* e *p-Si*) pode ser observado nas Figuras (12) e (13):

Figura (12): Redução do consumo para um andar após a instalação do sistema de *a-Si*



Fonte: Autor

Figura (13): Redução do consumo para um andar após a instalação do sistema de *p-Si* e das películas ópticas



Fonte: Autor

4.6 RESULTADOS FINANCEIROS:

A partir dos resultados obtidos nesta Seção 3.7 e da metodologia descrita na Seção 3.7, foram elaborados fluxos de caixa descontados com o objetivo de analisar a viabilidade financeira da implantação de cada um dos sistemas analisados e como diferentes condições impactam nas variáveis financeiras.

Para que fosse possível elaborar as análises apresentada nesta Seção, foram assumidos parâmetros como a inflação média prevista para o período, de 4% ao ano conforme previsões atuais do Banco Central

do Brasil [BACEN, 2021] para os índices IGP-M e IPCA, e um reajuste médio anual de 3% para as tarifas da distribuidora.

Outro aspecto relevante para as análises financeiras é a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), que determina qual deve ser a Taxa Interna de Retorno (TIR) mínima para que o empreendimento possa ser considerado atrativo. Neste caso, foi utilizada uma TMA de 6%, considerando o retorno de alguns investimentos bancários de médio prazo (entre 3 e 5 anos), já que a taxa básica de juros no Brasil (SELIC) está em 2,75% ao ano e investimentos de curto prazo não são atrativos economicamente. Com essas definições e conhecendo as estimativas de custos iniciais apresentados na Seção 3.7, foram elaborados os fluxos de caixa descontados apresentados abaixo.

A primeira análise buscou determinar a viabilidade financeira da implantação do sistema de *p-Si* no telhado da edificação e da aplicação das películas específicas para redução da carga térmica nos oito andares. Os resultados obtidos são os apresentados no Quadro (7):

Quadro (7): Resultados fluxo de caixa descontado para o SFV *p-Si* e películas ópticas

Sistema de <i>p-Si</i> + Películas para redução da carga térmica		
Economia Geração + Calor no 1º ano (R\$)	R\$ 2.920,76	Redução geração Anual
Custo total SFV (Aquisição e Instalação) (R\$)	R\$ 13.500,00	0,50%
Custo Total Películas (Aquisição e Instalação) (R\$)	R\$ 13.000,00	Inflação
Valor Presente Líquido 20 anos - VPL (R\$)	R\$ 23.825,42	4,00%
Taxa Interna de Retorno 20 anos - TIR (%)	12,50%	Reajuste Anual
Retorno do Investimento - Payback (Anos)	7,6	3,00%

Fonte: Autor

Da mesma forma, foi elaborado um fluxo de caixa descontado para determinar o comportamento dos parâmetros financeiros para o SFV de *a-Si*. Os resultados obtidos, para o cenário de custos otimista (ver Tabela (3)), são os apresentados no Quadro (8):

Quadro (8): Resultados fluxo de caixa descontado para o SFV *a-Si*

Sistema de <i>a-Si</i> - Cenário Otimista		
Economia Geração + Calor no 1º ano (R\$)	R\$ 2.761,27	Redução geração Anual
Custo aquisição SFV - R\$3,00/€ (R\$)	R\$ 75.037,50	0,50%
Custo de instalação (R\$)	R\$ 20.000,00	Inflação
Valor Presente Líquido 35 anos - VPL (R\$)	-R\$ 25.662,76	4,00%
Taxa Interna de Retorno 35 anos - TIR (%)	1,63%	Reajuste Anual
Retorno do Investimento - Payback (Anos)	27,1	3,00%

Fonte: Autor

Como pode ser observado no Quadro (8), O cenário otimista de custos iniciais para o sistema de *a-Si* apresentou retorno financeiro em 27,1 anos, sendo assim não há viabilidade de retorno financeiro para instalação desse sistema, já que esse período é acima da vida útil estimada do equipamento, de 20 anos. Dessa forma, pode-se concluir que os cenários de custos iniciais conservador e pessimista (ver Tabela (3)) também não apresentarão viabilidade financeira dentro da vida útil do equipamento.

Duas análises pertinentes são encontrar quais custos totais máximos viabilizariam retornos financeiros iguais a TMA (6%) e igual a TIR do fluxo de caixa do sistema de *p-Si* (12,5%). Os resultados para essas condições são os apresentados, respectivamente, nos Quadros (9) e (10):

Quadro (9): Resultados fluxo de caixa descontado para o SFV *a-Si* para TIR = 6%

Sistema de <i>a-Si</i> - Custo máximo para TIR = TMA = 6,00%		Redução geração Anual
Economia Geração + Calor no 1º ano (R\$)	R\$ 2.761,27	0,50%
Taxa Interna de Retorno 20 anos - TIR (%)	6,00%	Inflação
Custo máximo de Aquisição, Transporte e Instalação (R\$)	R\$ 39.035,44	4,00%
Valor Presente Líquido 20 anos - VPL (R\$)	R\$ 8.541,88	Reajuste Anual
Retorno do Investimento - Payback (Anos)	11,8	3,00%

Fonte: Autor

Quadro (10): Resultados fluxo de caixa descontado para o SFV *a-Si* para TIR = 12,5%

Sistema de <i>a-Si</i> - Custo máximo para TIR = TIR (<i>p-Si</i>) = 12,5%		Redução geração Anual
Economia Geração + Calor no 1º ano (R\$)	R\$ 2.761,27	0,50%
Taxa Interna de Retorno 20 anos - TIR (%)	12,50%	Inflação
Custo máximo de Aquisição, Transporte e Instalação (R\$)	R\$ 25.052,92	4,00%
Valor Presente Líquido 20 anos - VPL (R\$)	R\$ 22.524,39	Reajuste Anual
Retorno do Investimento - Payback (Anos)	7,6	3,00%

Fonte: Autor

Para que houvesse retorno financeiro desse empreendimento equivalente a TMA (6%), seria necessário que o custo total de aquisição, transporte e instalação do equipamento fosse igual R\$ 39.035,44, o que é inviável considerando o cenário macroeconômico atual, em que há uma significativa desvalorização do Real quando comparado ao Euro. Mesmo que a cotação do Euro fosse de R\$1,00/€, o custo máximo para transporte e instalação dos módulos de *a-Si* deveria ser de R\$13.910,44, o que também é inviável considerando que se trata de um transporte internacional e que a instalação requer a substituição dos vidros de oito andares da edificação.

5 CONCLUSÕES

A instalação de filmes finos translúcidos de *a-Si* sobre as janelas de uma edificação propicia a geração de energia fotovoltaica e reduz a carga térmica proveniente da radiação solar, sem impedir completamente a visibilidade para o ambiente externo. Essa tecnologia, porém, apresenta uma eficiência de conversão fotovoltaica muito menor que módulos fotovoltaicos de *p-Si*, por exemplo, sendo necessária uma área muito maior instalada de filmes finos de *a-Si* para que haja uma geração de energia anual equivalente entre esses equipamentos.

Conforme resultados da Seção 4.3, a instalação de filmes finos de *a-Si* se mostrou mais oportuna nos meses de abril, maio, agosto e setembro, sendo esses os meses do ano em que a altura solar é intermediária em relação aos solstícios de inverno e verão, e é necessário o uso dos sistemas de

condicionamento de ar para manutenção da temperatura interna. Da mesma forma, a variação da altura solar no período de um ano impactou de forma significativa nos resultados da geração de energia para ambos os sistemas fotovoltaicos analisados, sendo verificada uma geração maior para o sistema de *p-Si* no verão e para o sistema de *a-Si* no inverno. Os resultados das simulações luminotécnicas apresentados nos Quadros (5) e (6) permitem concluir que mesmo após a instalação dos filmes finos de *a-Si* e das películas ópticas nas janelas orientadas para o Norte, os menores fluxos luminosos ocorrem nas bancadas A e C, dessa forma o impacto no consumo referente à redução da transmitância luminosa foi desconsiderado das análises energética e financeira.

Conforme resultados apresentados na Seção 4.6, não há retorno do investimento necessário para instalação dos módulos de *a-Si* dentro da vida útil estimada do equipamento informada pelo fornecedor, de 20 anos, em todos os cenários de custos iniciais analisados. Por outro lado, a instalação dos módulos de *p-Si* atrelada ao uso de películas ópticas específicas para redução da carga térmica nas janelas dos oito andares da edificação, apresentou bons resultados financeiros, já que houve retorno do investimento inicial em 7,6 anos, sendo esse período menos da metade da vida útil estimada do equipamento, que está entre 20 e 25 anos. Uma vez que os resultados de geração fotovoltaica e da análise térmica de energia são similares para o sistema de *p-Si*, o empreendimento de *a-Si* poderia ser financeiramente viável caso o custo de aquisição, instalação e transporte dos equipamentos fosse menor.

As análises apresentadas neste trabalho permitiram verificar a viabilidade financeira e energética quanto à instalação de filmes finos de *a-Si* sobre a janela de uma edificação comercial na cidade de Porto Alegre e compará-los com a instalação de um sistema de *p-Si* atrelado ao uso de películas ópticas específicas para redução da carga térmica. Análises futuras sobre esse tema podem buscar determinar se haveria viabilidade financeira caso os filmes finos de *a-Si* fossem fabricados nacionalmente, por exemplo, pois nessa condição espera-se um custo menor de aquisição dos equipamentos (considerando a atual desvalorização do Real frente ao Euro). Outro parâmetro de sensibilidade para as análises foi o impacto da altura solar nos resultados de economia térmica e geração solar, dessa forma futuros estudos sobre o tema podem buscar determinar como essa grandeza impacta nos resultados e qual latitude para instalação dos filmes finos de *a-Si* na vertical otimiza os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL) Resolução Homologatória 2798/2020, **Homologa o resultado do reajuste tarifário anual - CEEE-D**, Brasília, DF, Brasil, 2020. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20202798ti.pdf>>. Acesso em 20/01/2021.
- ASHRAE, **Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Estados Unidos, 2010. Disponível em: <https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/140_2007_b.pdf> Acesso em 10/07/2020.>
- ASRHAE, **Handbook Fundamentals**, SI Edition, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR), **Infográfico ABSOLAR**, 2020. Disponível em <<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar.html>>. Acesso em 23/07/2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5413: Iluminância de interiores**. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5665: Manual de Transporte Vertical em Edifícios**. Rio de Janeiro, 1983.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL (BACEN). **Relatório Focus Semanal**. Brasília, 2021. Disponível em <<https://www.bcb.gov.br/publicacoes/focus>> Acessado em 05/04/2021.
- CARLSON D. E. e WRONSKI C. R., **Amorphous silicon solar cell**, 1976. apresentado na 18ª Conferência Anual de Materiais Eletrônicos, Salt Lake City, Utah. Disponível em <<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.88617>>. Acesso em 04/04/2021.
- DENG X. e SCHIFF E. A. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering - Amorphous Silicon Based Solar Cells**, University of Toledo, Toledo, OH, USA, e Syracuse University, Syracuse, NY, USA, 2003. Disponível em <<https://surface.syr.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1046&context=phy>>. Acesso em 04/01/2021.
- EERE Info Center. **Guide to Energy Efficient Windows**, US DEPARTMENT OF ENERGY, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, Washington DC, USA, 2010. Disponível em <https://www.energy.gov/sites/prod/files/guide_to_energy_efficient_windows.pdf>. Acesso em 15/02/2021.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), **Balanco Energético Nacional 2019** (referente ao ano base de 2018), São Paulo, 2019. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>. Acesso em 13/07/2020.
- GROWATT, **Datasheet Inversor Growatt 2000-S**, 2019. Disponível em <<https://www.hoymiles.com/files/6de55a06-81fe-4d20-9cd5-31c1214c3186.pdf>> Acesso em 02/02/2021.

- HOYMILES, **Datasheet Microinverter MI-1500N**, 2019. Disponível em <<https://www.hoymiles.com/files/6de55a06-81fe-4d20-9cd5-31c1214c3186.pdf>> Acesso em 02/02/2021.
- INCROPERA, F.P. e DEWITT, D.P., **Fundamentos de transferência de Calor e Massa**, LTC-Livros Técnicos e Científicos, São Paulo, 5a Edição, 2003.
- KALOGIROU, S.A., **Engenharia de energia solar: processos e sistemas**, Elsevier, Rio de Janeiro – Brasil, 2a Edição, 2016.
- KAPSIS, K. e ANDREAS K. A., **A study of the potential benefits of semi-transparent photovoltaics in commercial buildings**, Concordia University, Canadá, 2015. Disponível em <www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15000869>. Acesso em 20/07/2020.
- LIU D, SUN Y., WILSON R. e Wu Y., **Comprehensive evaluation of window-integrated semi-transparent PV for building daylight performance**, Department of Architecture and Built Environment, Faculty of Engineering, The University of Nottingham, Reino Unido, 2019. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119306512>>. Acesso em 14/07/2020.
- LU, L. K. e LAW, M., **Overall energy performance of semi-transparent single-glazed photovoltaic (PV) window for a typical office in Hong Kong**, Renewable Energy Research Group, Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, China, 2012. Disponível em <www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112000328>. Acesso em 20/07/2020.
- ONYX SOLAR, **Datasheet PV GLASS**, 2019. Disponível em <http://onyxsolardownloads.com/docs/ALL-YOU-NEED/Technical_Guide.pdf> Acesso em 22/02/2020.
- PIACITELLI C. e DAL PAI A., **Radiação solar global em superfícies verticais**, Dep. de Bioprocessos e Biotecnologia, VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, 2018. Disponível em <www.anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/719>. Acesso em 24/07/2020.
- QUANSAH D. e ADARAMOLA M. **Economic assessment of a-Si and CIS thin film solar PV technologies in Ghana**, Department of Mechanical Engineering, Kwame Nkrumah University of Science and Technology (KNUST), Kumasi, Ghana, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138816301308>>. Acesso em 22/02/2020.
- SMETS A. e ZEMAN M. **Solar Energy: Photovoltaic (PV) Technologies**, TU Delft OpenCourseWare, Nova Zelândia, 2017. Disponível em: <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Solar-Cells-R5-CH7_Thin_film_Si_solar_cells.pdf> Acesso em 22/02/2021.
- SUNOVA SOLAR, **Datasheet solar panel SS-430-72MD**, 2020. Disponível em <<https://microinversor.com.br/downloads/Datasheet-Painel-Solar-SUNOVA-SS-430-450-72MD.pdf>> Acesso em 10/02/2021.
- ZHANG et al. **Investigation on the energy performance of a novel semi-transparent BIPV system integrated with vacuum glazing**, Renewable Energy Research Group (RERG), Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China, 2018. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217307788>>. Acesso em 23/09/2020.

APÊNDICES

APÊNDICE (A): Fluxo de caixa descontado para o sistema de *p-Si* e películas ópticas.

TIR	Ano	Capital Próprio	Economia	Balanco Ajustado	Valor Presente	VP ACUMULADO
12,50%	0	-R\$ 26.500,00	R\$ 2.920,76	-R\$ 23.579,24	-R\$ 23.579,24	-R\$ 23.579,24
VPL	1		R\$ 2.993,34	R\$ 2.930,50	R\$ 2.920,76	-R\$ 20.658,48
R\$ 23.825,42	2		R\$ 3.065,05	R\$ 3.003,32	R\$ 2.983,40	-R\$ 17.675,08
Economia Geração + Calor	3		R\$ 3.135,87	R\$ 3.075,26	R\$ 3.044,71	-R\$ 14.630,37
R\$ 2.920,76	4		R\$ 3.205,83	R\$ 3.146,33	R\$ 3.104,72	-R\$ 11.525,64
TMA	5		R\$ 3.274,90	R\$ 3.216,51	R\$ 3.163,44	-R\$ 8.362,21
6,00%	6		R\$ 3.343,10	R\$ 3.285,82	R\$ 3.220,86	-R\$ 5.141,35
Inflação	7		R\$ 3.410,43	R\$ 3.354,25	R\$ 3.277,01	-R\$ 1.864,33
4,00%	8		R\$ 3.476,87	R\$ 3.421,79	R\$ 3.331,90	R\$ 1.467,57
Custo Conjunto+Transporte	9		R\$ 3.542,44	R\$ 3.488,46	R\$ 3.385,53	R\$ 4.853,10
R\$ 8.500,00	10		R\$ 3.607,14	R\$ 3.554,25	R\$ 3.437,92	R\$ 8.291,02
Custo Instalação	11		R\$ 3.670,96	R\$ 3.619,16	R\$ 3.489,08	R\$ 11.780,10
R\$ 5.000,00	12		R\$ 3.733,90	R\$ 3.683,19	R\$ 3.539,01	R\$ 15.319,11
Custo Total	13		R\$ 3.795,97	R\$ 3.746,35	R\$ 3.587,73	R\$ 18.906,84
R\$ 13.500,00	14		R\$ 3.857,16	R\$ 3.808,62	R\$ 3.635,25	R\$ 22.542,09
Rajuste médio Anual	15		R\$ 3.917,47	R\$ 3.870,01	R\$ 3.681,58	R\$ 26.223,66
3,00%	16		R\$ 3.976,91	R\$ 3.930,53	R\$ 3.726,72	R\$ 29.950,39
Custo aquisição e Instalação Películas	17		R\$ 4.035,47	R\$ 3.990,16	R\$ 3.770,70	R\$ 33.721,08
R\$ 13.000,00	18		R\$ 4.093,15	R\$ 4.048,92	R\$ 3.813,51	R\$ 37.534,59
	19		R\$ 4.149,96	R\$ 4.106,80	R\$ 3.855,17	R\$ 41.389,77
	20		R\$ 4.205,90	R\$ 4.163,80	R\$ 3.895,69	R\$ 45.285,46

Fonte: Autor

APÊNDICE (B): Fluxo de caixa descontado para o sistema de *a-Si* para cenário otimista de custos iniciais.

CENÁRIO OTIMISTA	Ano	Capital Próprio	Economia	Balanco Ajustado	Valor Presente	VP ACUMULADO
	0	-R\$ 95.037,50	R\$ 2.761,27	-R\$ 92.276,23	-R\$ 92.276,23	-R\$ 92.276,23
TIR	1		R\$ 2.829,88	R\$ 2.770,47	R\$ 2.761,27	-R\$ 89.514,97
1,63%	2		R\$ 2.897,67	R\$ 2.839,32	R\$ 2.820,48	-R\$ 86.694,48
VPL	3		R\$ 2.964,63	R\$ 2.907,33	R\$ 2.878,45	-R\$ 83.816,03
-R\$ 25.662,76	4		R\$ 3.030,77	R\$ 2.974,52	R\$ 2.935,19	-R\$ 80.880,84
Economia Geração + Calor	5		R\$ 3.096,07	R\$ 3.040,87	R\$ 2.990,69	-R\$ 77.890,15
R\$ 2.761,27	6		R\$ 3.160,55	R\$ 3.106,39	R\$ 3.044,98	-R\$ 74.845,17
TMA	7		R\$ 3.224,19	R\$ 3.171,08	R\$ 3.098,07	-R\$ 71.747,10
6,00%	8		R\$ 3.287,01	R\$ 3.234,94	R\$ 3.149,96	-R\$ 68.597,15
Inflação	9		R\$ 3.349,00	R\$ 3.297,97	R\$ 3.200,66	-R\$ 65.396,49
4,00%	10		R\$ 3.410,17	R\$ 3.360,17	R\$ 3.250,19	-R\$ 62.146,30
Custo Conjunto	11		R\$ 3.470,50	R\$ 3.421,53	R\$ 3.298,55	-R\$ 58.847,75
R\$ 75.037,50	12		R\$ 3.530,00	R\$ 3.482,07	R\$ 3.345,76	-R\$ 55.502,00
Custo Instalação	13		R\$ 3.588,68	R\$ 3.541,77	R\$ 3.391,82	-R\$ 52.110,18
R\$ 20.000,00	14		R\$ 3.646,53	R\$ 3.600,64	R\$ 3.436,74	-R\$ 48.673,44
Custo Total	15		R\$ 3.703,55	R\$ 3.658,68	R\$ 3.480,54	-R\$ 45.192,90
R\$ 95.037,50	16		R\$ 3.759,74	R\$ 3.715,90	R\$ 3.523,22	-R\$ 41.669,68
Rajuste médio Anual	17		R\$ 3.815,11	R\$ 3.772,27	R\$ 3.564,79	-R\$ 38.104,89
3,00%	18		R\$ 3.869,64	R\$ 3.827,82	R\$ 3.605,27	-R\$ 34.499,62
	19		R\$ 3.923,35	R\$ 3.882,54	R\$ 3.644,65	-R\$ 30.854,97
	20		R\$ 3.976,23	R\$ 3.936,42	R\$ 3.682,96	-R\$ 27.172,01
	21		R\$ 4.028,28	R\$ 3.989,48	R\$ 3.720,20	-R\$ 23.451,81
	22		R\$ 4.079,50	R\$ 4.041,70	R\$ 3.756,38	-R\$ 19.695,43
	23		R\$ 4.129,89	R\$ 4.093,09	R\$ 3.791,50	-R\$ 15.903,93
	24		R\$ 4.179,45	R\$ 4.143,66	R\$ 3.825,59	-R\$ 12.078,35
	25		R\$ 4.228,19	R\$ 4.193,39	R\$ 3.858,64	-R\$ 8.219,71
	26		R\$ 4.276,10	R\$ 4.242,28	R\$ 3.890,66	-R\$ 4.329,05
	27		R\$ 4.323,18	R\$ 4.290,35	R\$ 3.921,67	-R\$ 407,37
	28		R\$ 4.369,43	R\$ 4.337,59	R\$ 3.951,68	R\$ 3.544,30
	29		R\$ 4.414,85	R\$ 4.383,99	R\$ 3.980,69	R\$ 7.524,99
	30		R\$ 4.459,45	R\$ 4.429,57	R\$ 4.008,71	R\$ 11.533,70
	31		R\$ 4.503,21	R\$ 4.474,31	R\$ 4.035,75	R\$ 15.569,44
	32		R\$ 4.546,15	R\$ 4.518,22	R\$ 4.061,81	R\$ 19.631,26
	33		R\$ 4.588,26	R\$ 4.561,30	R\$ 4.086,92	R\$ 23.718,18
	34		R\$ 4.629,54	R\$ 4.603,55	R\$ 4.111,07	R\$ 27.829,25
	35		R\$ 4.669,99	R\$ 4.644,97	R\$ 4.134,28	R\$ 31.963,53

Fonte: Autor

APÊNDICE (C): Fluxo de caixa descontado para o sistema de *a-Si* para TIR=TMA.

CUSTO MÁXIMO PARA TIR=6%	Ano	Capital Próprio	Economia	Balanco Ajustado	Valor Presente	VP ACUMULADO
	0	-R\$ 39.035,44	R\$ 2.761,27	-R\$ 36.274,17	-R\$ 36.274,17	-R\$ 36.274,17
TIR	1		R\$ 2.829,88	R\$ 2.770,47	R\$ 2.761,27	-R\$ 33.512,91
6,00%	2		R\$ 2.897,67	R\$ 2.839,32	R\$ 2.820,48	-R\$ 30.692,42
VPL	3		R\$ 2.964,63	R\$ 2.907,33	R\$ 2.878,45	-R\$ 27.813,97
R\$ 8.541,88	4		R\$ 3.030,77	R\$ 2.974,52	R\$ 2.935,19	-R\$ 24.878,78
Economia Geração + Calor	5		R\$ 3.096,07	R\$ 3.040,87	R\$ 2.990,69	-R\$ 21.888,09
R\$ 2.761,27	6		R\$ 3.160,55	R\$ 3.106,39	R\$ 3.044,98	-R\$ 18.843,11
TMA	7		R\$ 3.224,19	R\$ 3.171,08	R\$ 3.098,07	-R\$ 15.745,04
6,00%	8		R\$ 3.287,01	R\$ 3.234,94	R\$ 3.149,96	-R\$ 12.595,09
Inflação	9		R\$ 3.349,00	R\$ 3.297,97	R\$ 3.200,66	-R\$ 9.394,43
4,00%	10		R\$ 3.410,17	R\$ 3.360,17	R\$ 3.250,19	-R\$ 6.144,24
Custo Total	11		R\$ 3.470,50	R\$ 3.421,53	R\$ 3.298,55	-R\$ 2.845,69
R\$ 39.035,44	12		R\$ 3.530,00	R\$ 3.482,07	R\$ 3.345,76	R\$ 500,06
Rajuste médio Anual	13		R\$ 3.588,68	R\$ 3.541,77	R\$ 3.391,82	R\$ 3.891,88
3,00%	14		R\$ 3.646,53	R\$ 3.600,64	R\$ 3.436,74	R\$ 7.328,62
	15		R\$ 3.703,55	R\$ 3.658,68	R\$ 3.480,54	R\$ 10.809,16
	16		R\$ 3.759,74	R\$ 3.715,90	R\$ 3.523,22	R\$ 14.332,38
	17		R\$ 3.815,11	R\$ 3.772,27	R\$ 3.564,79	R\$ 17.897,17
	18		R\$ 3.869,64	R\$ 3.827,82	R\$ 3.605,27	R\$ 21.502,44
	19		R\$ 3.923,35	R\$ 3.882,54	R\$ 3.644,65	R\$ 25.147,09
	20		R\$ 3.976,23	R\$ 3.936,42	R\$ 3.682,96	R\$ 28.830,05

Fonte: Autor

APÊNDICE (D): Fluxo de caixa descontado para o sistema de *a-Si* para TIR=12,5%.

CUSTO MÁXIMO PARA TIR=TIR_c:Si	Ano	Capital Próprio	Economia	Balanco Ajustado	Valor Presente	VP ACUMULADO
	0	-R\$ 25.052,92	R\$ 2.761,27	-R\$ 22.291,66	-R\$ 22.291,66	-R\$ 22.291,66
TIR	1		R\$ 2.829,88	R\$ 2.770,47	R\$ 2.761,27	-R\$ 19.530,39
12,50%	2		R\$ 2.897,67	R\$ 2.839,32	R\$ 2.820,48	-R\$ 16.709,90
VPL	3		R\$ 2.964,63	R\$ 2.907,33	R\$ 2.878,45	-R\$ 13.831,45
R\$ 22.524,39	4		R\$ 3.030,77	R\$ 2.974,52	R\$ 2.935,19	-R\$ 10.896,27
Economia Geração + Calor	5		R\$ 3.096,07	R\$ 3.040,87	R\$ 2.990,69	-R\$ 7.905,58
R\$ 2.761,27	6		R\$ 3.160,55	R\$ 3.106,39	R\$ 3.044,98	-R\$ 4.860,59
TMA	7		R\$ 3.224,19	R\$ 3.171,08	R\$ 3.098,07	-R\$ 1.762,53
6,00%	8		R\$ 3.287,01	R\$ 3.234,94	R\$ 3.149,96	R\$ 1.387,43
Inflação	9		R\$ 3.349,00	R\$ 3.297,97	R\$ 3.200,66	R\$ 4.588,09
4,00%	10		R\$ 3.410,17	R\$ 3.360,17	R\$ 3.250,19	R\$ 7.838,28
Custo Total	11		R\$ 3.470,50	R\$ 3.421,53	R\$ 3.298,55	R\$ 11.136,83
R\$ 25.052,92	12		R\$ 3.530,00	R\$ 3.482,07	R\$ 3.345,76	R\$ 14.482,58
Rajuste médio Anual	13		R\$ 3.588,68	R\$ 3.541,77	R\$ 3.391,82	R\$ 17.874,40
3,00%	14		R\$ 3.646,53	R\$ 3.600,64	R\$ 3.436,74	R\$ 21.311,14
	15		R\$ 3.703,55	R\$ 3.658,68	R\$ 3.480,54	R\$ 24.791,68
	16		R\$ 3.759,74	R\$ 3.715,90	R\$ 3.523,22	R\$ 28.314,90
	17		R\$ 3.815,11	R\$ 3.772,27	R\$ 3.564,79	R\$ 31.879,69
	18		R\$ 3.869,64	R\$ 3.827,82	R\$ 3.605,27	R\$ 35.484,95
	19		R\$ 3.923,35	R\$ 3.882,54	R\$ 3.644,65	R\$ 39.129,61
	20		R\$ 3.976,23	R\$ 3.936,42	R\$ 3.682,96	R\$ 42.812,57

Fonte: Autor