

Influence of Operating Temperature on the Performance of Photovoltaic Solar Tile (BIPV) for the Western Region of Paraná

C. Becerra Díaz and O. H. Ando Junior

Abstract—The efficiency of photovoltaic solar cells decreases linearly with increasing temperature, fundamentally due to the increase in the concentrations of the charge carriers, causing fluctuations in the operating temperature and consequently in the photovoltaic conversion process, affecting the efficiency of the cell. In this paper, a study is presented on the phenomenon of temperature decrease applied in integrated photovoltaic cells - also called Building Integrate Photovoltaics - dimensioned on a photovoltaic solar tile with an superimposed photovoltaic arrangement model, in conditions of simulation of Standard Test Conditions for 1000 W/m² irradiation, for maximum and minimum Summer temperatures of Foz do Iguacu during 2017-2018. The simulation was performed with Comsol Multiphysics® software and used as a constituent material of the photovoltaic solar tiles Concrete, Polypropylene and PVC. The study compares the effect of varying efficiency with varying temperatures and tile designs for a 16% efficiency value of the datasheet, resulting in a maximum decrease of 12.53% in the cell at 30.6°C, and reduction of linear efficiency of approximately 0.05%/°C for the proposed models. Also, a comparison was made to verify how they influence the materials in the civil-structural characteristics of the roof. Hereafter, the simulated system is compared with the polycrystalline, monocrystalline and CIS photovoltaic systems in some cases with the literature, comparing the decrease of efficiency and power with the temperature in the same conditions of the study, obtaining a divergence between 0.05%/°C and 0.24%/°C.

Keywords— Building Integrate Photovoltaics, Efficiency, Solar Tile, Heat Transfer.

I. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação pela diversificação da base geradora e a constante busca pela sustentabilidade energética tem impulsionado a busca por novas fontes de energia e a disseminação do uso das energias renováveis não convencionais [1], exigindo a transição para uma economia verde com a implementação de políticas públicas e regulações específicas, impondo também ao setor produtivo ações inovadoras de sustentabilidade [2]. Neste quesito, o Brasil assume um papel de destaque no cenário Mundial devido sua base geradora ser predominantemente hídrica e pela implementação de programas de incentivos, como por exemplo,

o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, que visa incentivar o investimento em novas tecnologias sustentáveis [3]. Porém, apesar dos esforços político-econômicos no Brasil com a destinação de R\$ 226 milhões para aplicação em projetos de mitigação, adaptação às mudanças climáticas de 2011; e leis federais de incentivo às energias renováveis, a diversificação da base geradora tendo em conta o PIB, tem sido tardia quando comparado a nível Latino-Americano em com países como Costa Rica e Uruguai [2], [4], [5].

Atualmente a matriz energética Brasileira está condicionada à oferta hidráulica nacional [6], evidenciando uma forte dependência com o regime de chuvas, que somados as constantes mudanças climáticas entre os anos 2012-2017, resultou em períodos de chuvas irregulares ocasionando a redução do volume dos reservatórios e conseqüentemente, o aumento significativo do preço da energia pela utilização da geração termelétrica como sistema de *back-up* [7], [8].

Dentre as possibilidades de diversificação da base geradora Brasileira destaca-se as fontes alternativas, como por exemplo, a energia eólica e fotovoltaica. Evidencia-se que o potencial eólico é o segundo maior no território nacional, com valores que variam em torno dos 60.000 MW (dependendo da metodologia empregada) [9]; juntamente, dentre as energias renováveis não convencionais o custo da eólica é um dos menores em função do retorno do investimento [10].

En quanto ao potencial solar fotovoltaico no Brasil, apresenta valores tão elevados de irradiação direta, que alcançam os 2400 kWh/m².ano em regiões como Bahia e Paraíba, em comparação é possível gerar mais eletricidade solar do que no local mais ensolarado da Alemanha que possui grandes investimentos em geração com esta tecnologia [6]. É importante ressaltar que nos meses de verão, a geração é máxima nos estados do extremo Sul e Sudeste do Brasil e coincide com os máximos de demanda registrados pelo ONS para essas regiões. Neste contexto, a geração solar fotovoltaica tem também um grande potencial de contribuição para a redução dos picos de demanda dos sistemas de transmissão do SIN [6], [9].

In thanks to the "Battery Project" for the use of Comsol Multiphysics® software.

C. Becerra Díaz, Federal University of Latin America Integration (UNILA), Foz do Iguacu, Paraná, Brazil, cristobal.becerra.diaz@live.com

O. H. Ando Junior, Latin American Institute of Technology, Infrastructure and Territory (ILATIT), Federal University of Latin American Integration (UNILA), Foz do Iguacu, Paraná, Brazil, eng.oswaldo@gmail.com

Siglas & Símbolos	
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APs	Autoprodutores de Energia Elétrica
BAPV	<i>Building Applied Photovoltaics</i>
BIPVs	<i>Building Integrate Photovoltaics</i>
CdTe	Telureto de Cádmi
CIGS	Cobre-Índio-Gálio Selenio/Azufre
CI	Concreto integrado
CIS	Cobre-Índio-Selênio
CS	Concreto sobreposto
NZEBs	Edifícios de Energia Líquida Zero
PV	Photovoltaics
OPV	Fotovoltaica orgânica
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MC	Monocristalinas
ONS	Operador Nacional do Sistema
PCM	<i>Phase change materials</i>
PC	Policristalinas
PI	Polipropileno integrado
PS	Polipropileno sobreposto
PQs	Pontos Quânticos
PVC	Policloreto de Vinila
PVCI	PVC integrado
PVCS	PVC sobreposto
a-Si	Silício Amorfo
m-Si	Silício Monocristalino
p-Si	Silício Policristalino
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
SFIC	Sistemas Fotovoltaicos Incorporados à Construção
SIN	Sistema Interligado Nacional
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
T&D	Transmissão e Distribuição
TRE	<i>Test Reference Environment</i>
TSF	Telha Solar Fotovoltaica
C_p	Calor específico a pressão constante
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção
k	Condutividade térmica do material
ρ	Massa específica
Re	Número de Reynolds
μ	Viscosidade dinâmica

Diante do exposto, e considerando as possibilidades que apresenta no território nacional para a massificação das fontes alternativas de energias, a solar fotovoltaica apresenta-se como promissória para o uso de energias alternativas. Entre as novas técnicas de geração PV destacam-se as tecnologias de geração fotovoltaica integrada á edificações ou também chamadas *Building Integrate Photovoltaics (BIPVs)*, as quais adaptam-se ao design original do projeto arquitetônico, substituindo os materiais de revestimento da estrutura, economizando no custo total da instalação. Também, contribuem esteticamente na edificação e aportam características únicas que podem auxiliar no conforto térmico dependendo o material constituinte [11].

Do ponto de vista da eficiência energética, os *BIPVs* são “ideais”, visto que geração e consumo de energia têm coincidência temporal, minimizando assim as perdas por transmissão que ocorrem em sistemas *tradicionais* de energia [12].

As *BIPVs* têm uma ampla abrangência de metodologias para montagem de sistemas fotovoltaicos, dos quais destacam-se fachadas, janelas, muros, telhados e telhas por serem mais conhecidos. É esta última classificação que apresenta o real interesse das *BIPVs* nesta pesquisa, já que telhas solares com

célula fotovoltaica integrada (*solar tile*) são um produto novo, ainda em aperfeiçoamento e com ampla possibilidade de melhora.

No Brasil, o setores residencial e comercial são responsáveis pelo 23% e 11% respectivamente do total do consumo nacional da energia elétrica [12], onde equipamentos de ventilação e condicionamento de ar representam 50% do consumo no verão, chegando até o 70% em construções envidraçadas [12]. Neste contexto, o presente artigo apresenta a análise da influência da temperatura de operação no desempenho da uma telha solar fotovoltaica (TSF) para uso residencial e predial de pequeno porte incorporada à construção (*BIPVs*) para a região Oeste do Paraná – Brasil.

A. Objetivo Geral e Objetivos Específicos

Estudar e verificar a influência da temperatura no desempenho da Telha Solar incorporada à construção para diferentes arranjos técnicos (Material - Arranjo Solar Fotovoltaico), considerando as condições de transferência de calor com o ambiente por mecanismos de condução e dados da literatura de convecção e radiação.

Ao longo do desenvolvimento desta pesquisa pretende-se atingir os seguintes objetivos específicos: (i) Mapear, classificar e caracterizar as tecnologias *BIPVs*; (ii) Modelar e Analisar tipos de arranjos técnicos propostos por meio de simulação estrutural e mecanismos de transferência de calor, usando o software Comsol Multiphysics® e realizar aproximações de estudo; (iii) Efetuar testes de transferência de calor conforme os parâmetros coletados para diversos materiais e condições; (iv) Estimar numericamente a redução da eficiência e da potência gerada com a elevação da temperatura para uma TSF na Região do Oeste do Paraná; (v) Apresentar as vantagens e desvantagens de cada configuração sobre as condições avaliada e (vi) Analisar os resultados obtidos na simulação com os dados encontrados na literatura e com sistema fotovoltaico convencional.

B. Justificativa e Relevância

O aumento de temperatura das células fotovoltaicas é um problema crítico que impacta no desempenho do sistema, causando redução drástica do rendimento, degradação do material e redução do tempo de vida [13]. A medida que a temperatura da célula aumenta, a mobilidade dos elétrons e buracos no material diminui, aumentando o valor da resistividade do fotocondutor conforme a lei de ação de massas, ao mesmo tempo com o aumento da temperatura de operação, ocorre uma queda do valor de tensão circuito aberto, reduzindo o valor da potência entregue à carga [14].

Esta problemática tem sido amplamente estudada em diversas condições para os módulos convencionais, mas não abrangem a especificidade das *BIPVs*, em especial as TSF. Diante do exposto, esta pesquisa visa investigar os efeitos da temperatura de operação na eficiência das células incorporadas às telhas solares, além de verificar o comportamento e analisar outros fatores que afetam a Telha Solar e diretamente à estrutura.

Para fins de avaliação das PV, é utilizado os valores de

referências em *Standard Test Conditions (STC)* para irradiação 1000 W/m² e temperatura de 25°C [15]. Porém, tais condições raramente ocorrem durante a operação cotidiana, sendo assim é importante avaliar as telhas solares frente a condições reais de operação, com variações diárias da temperatura ambiente e quantificando a influência de fatores como a velocidades do vento, propriedades térmicas dos materiais, geometria das TSF e sua influência no comportamento do sistema.

C. Contribuições da Pesquisa

A principal contribuição desta pesquisa quanto a modelagem, trata-se de uma análise específica do desempenho do arranjo técnico proposto sobre a influência da temperatura de operação na eficiência das células incorporadas à telha solar, que visa suprir a lacuna existente sobre estudos de *BIPVs*. Destaca-se que a importância desta pesquisa, está em determinar a temperatura de operação do arranjo fotovoltaico em STC, é fundamental para propor estudos e análise desta problemática. Porém, os efeitos desta problemática ainda não tem sido estudada para as TSF, que possuem características distintas dos sistemas fotovoltaicos convencionais, por interagir diretamente com os materiais da estrutura da construção, que necessitam de análise para verificar sua influência nas condições de operação e no rendimento da TSF.

Enquanto que a contribuição desta pesquisa quanto ao arranjo técnico proposto, tem-se modificado o modelo comercial de telha plana e célula de silício monocristalino incorporado, com eficiência aproximada de 16% para células convencionais, para um formato sobreposto de célula, já que esta configuração não tem sido estudada nem desenvolvida comercialmente. Com base neste produto, pretendesse verificar as características enquanto a diferenciação da influência dos efeitos térmicos para diferentes condições.

No que diz respeito aos materiais constituintes, o aporte da pesquisa incorpora materiais que não tem sido utilizado para construção de *BIPVs* em telhas, pelo que se plantea a inovação de materiais, sendo utilizando o Concreto, Polipropileno e Policloreto de Vinila (PVC) com o objetivo de caracterizar o aporte destes materiais tanto na célula em função de características como: a influência de transferência de calor, assim como na estrutura em função do peso do material, resistência mecânica e conforto térmico.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão abordadas as tecnologias e arranjos fotovoltaicos existentes, descrevendo o campo de atuação, materiais constituintes dos painéis e sua respectiva eficiência. Em seguida serão abordadas mais detalhamento as *BIPVs*, caracterizando seus usos e aspectos para implantação e uma breve comparação entre as PV e *BIPVs* para diferentes fatores. Por fim, será abordado o estado da arte das tecnologias *BIPVs*, as normativas e regulamentações vigentes.

As tecnologias fotovoltaicas podem ser classificadas de diversas formas, uma delas é agrupando a gama de tecnologias existentes em atuais e possíveis opções futuras, classificando-as em 1ª, 2ª e 3ª geração [16].

A atual produção de tecnologia PV, correspondente à 1ª

geração, é dominada por células de junção única baseadas em pastilhas de silício monocristalino (m-Si) e o silício policristalino (p-Si), com eficiências alcançadas em laboratório que variam entre a faixa do 18% a 21% , mas com elevado custo [17]. No entanto, o modelo comercial m-Si são fabricados com eficiências entre o 13-14% para um menor valor no mercado [18]. Metade do custo da PV de 1ª geração é a junção de silício de 200-250 micrones de espessura, um custo superlativo, já que a maior parte da absorção solar ocorre nos primeiros 10 micrones. Portanto, a redução da espessura da “bolacha” oferece um potencial de redução de custo [16], [17]. Apesar de muitos progressos científicos, as PV de 1ª Geração custa em média US US\$4/W, que ainda é cerca de 4 vezes mais caro para uma produção comercial verdadeiramente competitiva [18].

A 2ª geração para a evolução das PV trata da redução de US\$/W, reduzindo o material usando dispositivos de filme fino, mas mantendo as eficiências da 1ª geração [17]. Utilizam Silício Amorfo (a-Si), uma associação de Cobre-Índio-Selênio (CIS) de película fina, Telureto de Cádmio (CdTe) ou Silício Policristalino (p-Si) depositado em substratos de baixo custo como vidro [16]. A redução de custo foi possível graças a que as tecnologias CdTe, o CIS e o a-Si absorvem o espectro solar com muita mais eficiência do que o m-Si ou o p-Si, usando entre 1-10µm de material ativo [17].

Pesquisas recentes em escala laboratorial evidenciam o potencial do filme fino, com eficiências de 16,5% CdTe e 18,4% CIGS [19], no entanto, as PV de CdTe e CIGS tem sido lento para aumentar a escala a nível comercial. Isso se deve em parte à lacuna entre eficiências de laboratório e as eficiências de módulo para produção comercial de 10,7% para CdTe [19] e 13,4% para CIGS [20] que são baixas como resultado de problemas não resolvidos relacionados à reprodutibilidade do material e uniformidade para grandes áreas [17]. Dado o precursor progresso do silício de filme fino ao longo dos últimos anos, a tendência indica o potencial da 2ª geração é mais provável de ser realizado por dispositivos de película fina à base de silício, reforçada pelo desenvolvimento de ferramentas de produção para o setor de telhas planas [17].

A 3ª geração trata de dispositivos que podem ou não exceder os limites de junção única e apresentam ultra-alta eficiência para os mesmos custos de produção da 1ª e 2ª geração, melhorando a eficiência de m-Si e p-Si, e reduzindo o custo de US\$/W [16]. Esta tecnologia utiliza filmes finos aplicados em substratos de baixo custo para manter a economia nos materiais e aumentar a eficiência.

Além de utilizar filmes finos e tripla junção, esta tecnologia incluem materiais orgânicos (OPV) e produtos de pontos quânticos (PQs), com ambas tecnologias ainda em desenvolvimento [21]. Embora a 3ª geração de PV ainda careça de eficiência de conversão, exibem grande potencial e diversas vantagens sobre as tecnologias estabelecidas, entre elas o processamento de baixo custo sobre grandes áreas, estudo de efeitos de semi-transparência, flexibilidade mecânica e baixo peso [21]. Aplicações desses dispositivos incluem equipamentos de baixa potência (para uso residencial) e integração em edificações conhecida como *Building Integrated Photovoltaics*. A comparação das três gerações de PV em

termos de eficiência, custo de US\$/W e US\$/m² é representada na Fig. 1.

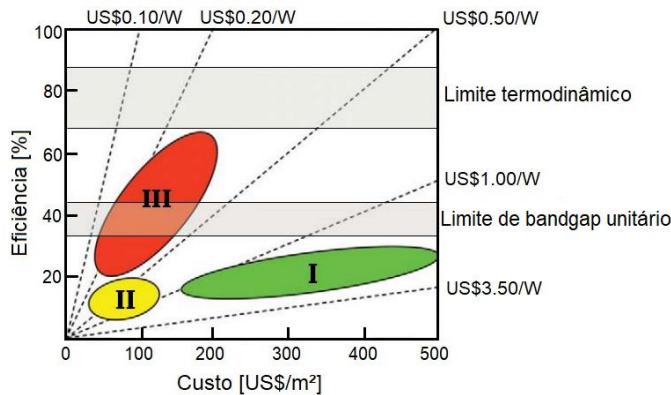


Fig. 1. Comparação de custo, eficiência para as três gerações de tecnologia de células solares: junção única, películas finas e películas avançadas [22].

Como exibido na Fig. 1, as tecnologias PV da 1ª e 2ª não alcançam o 30% de eficiência para o limite de bandgap unitário, já as da 3ª geração estão próximas de alcançarem o limite termodinâmico, com eficiências próximas ao 70%. Os custos de US\$/m², da 1ª para a 2ª geração teve uma redução 350US\$/m², logo na transição da 2ª para a 3ª geração teve um leve aumento dos 150US\$/m² para os 200US\$/m², que pode ser explicado pelo grande aumento da eficiência de uma tecnologia para outra. Em relação aos custos US\$/W, a 3ª geração apresenta a melhor relação custo-benefício das tecnologias com variação entre US\$0.15/W e US\$0.30/W, reduzindo consideravelmente o valor de US\$3.5/W e US\$1.00/W da 1ª e 2ª geração PV. Por tanto, a tendência atual é a melhoria dos custos de US\$/m², US\$/W e eficiência da 3ª geração.

A. Sistemas Fotovoltaicos Incorporados à Construção - SFIC

As BIPVs tratam das tecnologias solares fotovoltaicas que podem ser instaladas na superfície da estrutura do prédio, permitindo a possibilidade de combinar a transformação de eletricidade com funções adicionais como: cobertura dos materiais de construção, proteção contra intempéries, isolamento térmico, proteção acústica, conforto térmico, sombreamento, etc. [23], [24]; transformado assim o edifício de consumidor de energia em um produtor de energia [25]. As BIPVs tornam-se verdadeiros elementos de construção, instalando-se em qualquer superfície exterior do edifício, oferecendo aplicações para telhados, paredes, fachadas ou janelas, entre outros [26]. As BIPVs podem ser caracterizadas conforme sua propriedade opaca ou semi-transparente e em função de suas aplicações, um esquema representativo desta divisão pode ser visto na Fig. 2.

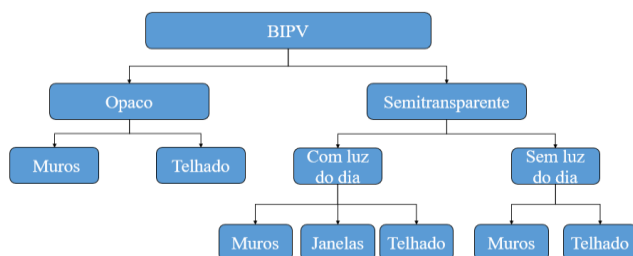


Fig. 2. Caracterização das BIPVs [27].

A instalação dos produtos BIPVs está em constante crescimento como tecnologia inovadora, por isso os fabricantes continuam criando novos produtos e designs para atender às exigências do mercado [25]; da mesma forma, a implementação de tarifas *feed-in* e o interesse por estabelecer metas específicas relacionadas aos edifícios de energia líquida zero (NZEBS) [27] e outros incentivos do governo para a energia solar causaram ampla aceitação em todo o mundo [28].

O desenvolvimento global da tecnologia BIPVs atingiu aproximadamente 2000 MW de instalação até o final de 2016 [29], sendo a Europa Ocidental o maior mercado de produtos BIPVs e recentemente teve um crescimento na Europa Oriental [30]. Com respeito às aplicações atuais do mercado das BIPVs, estas atingem cerca de 80% para a montagem de telhados e os 20% remanescentes em fachadas e outros componentes [25].

Estes produtos contam com a rede elétrica como sistema de *back-up* quando a demanda exceder a geração, prescindindo a necessidade de superdimensionamento do sistema, como ocorre nos sistemas isolados que se deve levar em consideração o pior caso da oferta solar e a sazonalidade na maioria das regiões [12].

Pelo conceito de sincronidade, em que geração e consumo ocorrem simultaneamente, as BIPVs auxiliam o sistema de distribuição da concessionária elétrica (alívio de carga), isto traz consigo uma economia de energia e aumento da vida útil dos equipamentos do sistema de distribuição [12].

Para que os sistemas BIPVs sejam multifuncionais na estrutura, tanto no formato de telha como de muro, fachada ou janela; existem vários fatores que devem ser considerados, dos quais destacam-se: (i) Temperatura de Operação da Célula e/ou Módulo; (ii) Manutenção, Sombreamento e Orientação Solar e (iii) Irradiância. Entre estes fatores, a irradiância e a temperatura do módulo devem ser considerados como os fatores mais relevantes, pois afetam tanto a eficiência elétrica do sistema, quanto o desempenho energético dos edifícios onde os sistemas BIPVs são instalados [31], [32].

É importante destacar, que os benefícios tanto econômicos quanto ambientais da aplicação da energia solar PV no entorno construído não estão completamente estabelecidos por ser uma tecnologia nova e pouco estudada. Desta forma, existe a necessidade de demonstrar que a integração de instalações solares fotovoltaicas integradas à construção é muito mais que simplesmente uma boa ideia, se não que também traz grandes benefícios ao usuário, ao sistema elétrico e à sociedade.

B. Comparação de Sistemas Fotovoltaicos Convencionais e Sistemas Fotovoltaicos Incorporados à Construção

Dentre os fatores a considerar para fins de comparação do desempenho entre as PV convencionais e as BIPVs destacam-se a: (i) eficiência; (ii) custo da inversão; (iii) rentabilidade econômica; (iv) confiabilidade; (v) custos evitados, entre outros. Estes fatores vão influenciar diretamente na escolha de uma ou outra tecnologia para uma determinada aplicação num dado local conforme as características da região e do local a ser instalado. Na Tab. I apresenta-se um quadro comparativo entre as PV convencionais e as BIPVs.

TABELA I

COMPARAÇÃO ENTRE PV CONVENCIONAL E PRODUTOS *BIPVs* [25], [33]–[35].

PV Convencional conectado à rede	<i>BIPVs</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologia amplamente conhecida e utilizada. • Abundante oferta de mercado, tecnologia presente no mundo inteiro. • Tempo médio de vida de 30 a 40 anos sem degradação de capacidade. • Facilidade de instalação, não precisa de suporte adicional no telhado. • Baixo custo de produção pela massificação da tecnologia. • Baixo custo de aquisição pela grande quantia no mercado. • Eficiência levemente superior, por ser uma tecnologia consagrada. • Limitado à parte superior do telhado ou montadas no solo. • Não é esteticamente agradável. • Padrão de montagem amplamente desenvolvido e conhecido, não requer conhecimento técnico diferenciado. • Requer instalação de sistema de T&D (custo adicional tarifário). 	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologia nova e ainda em desenvolvimento. • Mercado para América do Norte e Europa ocidental, menor oferta para Europa Oriental e Ásia. • Tempo médio de vida de 30 a 35 anos sem degradação de capacidade. • Dificuldade de instalação. Dependendo o tipo de <i>BIPVs</i>, requer troca ou substituição de estrutura. • Elevado custo de produção, poucos produtores. • Elevado custo de aquisição, poucos fornecedores e é restrito para uma classe econômica superior. • Eficiência levemente inferior, tecnologia nova e em desenvolvimento. • Amplia aplicação. Empregado em telhado, parede e/ou janela, entre outros. • Esteticamente elegante e moderno. • Conhecimento de montagem restrito, requer formação técnica diferenciada. • Não requer sistemas complexos de T&D (economia de custo).

Como mostra a comparação da Tab. I, as *BIPVs* oferecem melhor relação custo-benefício em relação aos sistemas fotovoltaicos centralizados por evitar o custo de aquisição de terrenos ou uso de área do terreno para estruturas de apoio, da mesma forma evita custos de cabeamento necessários para um sistema PV instalado numa localização remota [36].

Além disso, edifícios solares produzem eletricidade no ponto de uso ou perto dele, evitando custos de T&D e as perdas associadas, como por exemplo, em instalações comerciais onde a demanda de eletricidade (9h às 17h) normalmente coincide com o pico do fornecimento de eletricidade [37]. Bem como, em *BIPVs* em regiões que assoladas por ondas de calor no verão, acontecendo picos de demanda pelo excessivo uso de aparelhos de condicionamento de ar, podendo resultar numa diminuição do custo da fatura de energia elétrica da instalação predial e diminuição da ampacidade, ou seja se reduz a carga máxima de corrente que um equipamento pode carregar, evitando sobrecargas do sistema carregar por conta da sobrecarga do equipamento [38].

C. Estado da Arte

As complexas interações térmicas que se produz ao intercambiar calor entre um sistema fotovoltaico e o edifício na qual está integrado tem sido objeto de numerosas investigações

nos últimos anos, motivadas pela problemática do aumento de energia dos fótons que excedem o *bandgap* ou mais simplesmente chamado aumento da temperatura da célula, limitando sua eficiência principalmente devido ao aumento da resistência interna, gerando perdas de energia [22], [39], [40].

Entre os estudos mais citados de transferência de calor em *BIPVs* do tipo fachadas solares, propõem-se um método simplificado para o cálculo das cargas de refrigeração que chega ao ambiente interno através dos muros da edificação. O estudo demonstra que comparando as fachadas de tijolo com e sem sistemas PV integrados, a redução da carga de refrigeração consumida principalmente por equipamentos de ar condicionado é de aproximadamente 42%, já que o calor absorvido pela superfície PV é removido pela camada de ar externa mais próxima ao sistema PV [41].

Enquanto, M. Sandebergh realizou um estudo baseado em simulação e análise experimental de protótipos para caracterizar a transferência de calor das fachadas solares, mas com canais de ar; visando analisar o desempenho de uma fachada híbrida que além de gerar energia elétrica iria aproveitar a energia térmica, utilizando a dissipação de calor oriundas dos módulos fotovoltaicos como aquecedor ambiental em dias frios. No estudo, conclui-se que 40% do calor que incide na superfície da fachada solar é transferido à superfície da fachada por radiação, trabalhando o canal como uma superfície isolada e com regimes de abertura, resultando num comportamento ótimo para as funções de dissipador de calor e aquecimento ambiental interno [42].

Por outra parte, Krauter experimentou no Rio de Janeiro configurações de fachada solar, comparando tipos de ventilação, utilizando como isolante lã mineral e uma híbrida com água. O estudo comprovou que a produção de energia elétrica resulta num acréscimo de entre o 8% e 9,3% nos estudos realizados [43]. Apesar da melhoria do desempenho o estudo destaca o alto custo que inviabiliza economicamente a proposta.

Gutschker O. & Rogass H. deram continuidade a pesquisa de Krauter, simulando e caracterizando uma fachada híbrida com a mesma finalidade usando métodos numéricos. Os resultados obtidos são similares ao do Krauter, com temperaturas máximas de canal de ar entre os 45°C e 50°C para temperatura exterior de ar de 25°C concluindo-se que a quantidade de calor transmitida pelos dutos, é proporcional ao aumento da temperatura exterior [44].

Já em 2004, Yang monitorou o primeiro edifício em Hong Kong em ter sistema PV integrado, onde foram distribuídos 8 kWp em 250m² entre cobertas e fachadas, para muros de concreto de 100 mm de espessura [45]. No estudo, demonstrou-se que o impacto da ventilação nas câmaras de ar é insignificante para os parâmetros verticais nessa latitude nos módulos, mas é altamente eficiente para diminuir a carga de ventilação anual.

Na Espanha, umas das primeiras fachadas PV se realizou na Biblioteca Pompeu Fabra, em Mataró. Nesta estrutura, o problema da temperatura foi tratado em termos da transmitância térmica para calcular a energia transferida no interior do edifício [46]. Considerou-se que a biblioteca não apresenta boa integração térmica entre os materiais de construção e calor

dissipado pelos módulos, mas produto da ventilação natural, os módulos alcançam temperaturas máximas de 45 °C ainda em meses de verão [47].

Baseados na experiência acumulada dos projetos PV-Hybrid-PAS e IMPACT, a *Joint Research Center of Ispra* da Itália, desenvolveu uma célula experimental para ambientes exteriores denominada TRE (*Test Reference Environment*), que pretendia estabelecer estandartes europeus de provas para módulos *BIPVs* em regime de ventilação forçada [40]. Com base nesta célula, em 2012 Lodi et al, desenvolveu uma versão melhorada da célula, com o objetivo de utilizar o calor residual do módulo para climatização, evitando seu sobreaquecimento, e consequentemente a diminuição de eficiência [48]. Os resultados dos testes comprovaram que o uso de câmaras de ar de 115 mm, com velocidade forçada de 0.23m/s a 1.91m/s tem resultados favorável para a dupla função de ventilação e uso de ar para climatização, mas o estudo deve ser adaptado para uso comercial a grande escala e residencial de baixa potência.

Através do estudo paramétrico de distintos tipos de vidros de alta eficiência, Ng & Mithraratne, pesquisaram sobre a integração de células de capa fina em janelas de edifícios em Singapura (clima tropical) [49]. Os resultados revelaram que entre os efeitos mais significativos que influenciam na eficiência e geração de energia nas janelas PV são o sombreamento e o material da estrutura. O sombreamento não pode ser modificado, só previsto; mas o correto material da estrutura é fundamental para diminuição do efeito térmico sem o uso de refrigeração, que na maioria dos casos diminui a temperatura, mas é um consumidor de potência [50].

Um enfoque diferente para mitigar o aumento de temperatura nas células sem o uso de sistemas de refrigeração é o uso de materiais de mudança de fase (*Phase Change Materials - PCM*), materiais que armazenam energia em forma de calor latente e permitem escolher o ponto de mudança de fase [51]. Huang et al, estudaram a variação térmica destes materiais sobre diferentes condições de irradiância, com o objetivo de verificar o comportamento da temperatura. Os resultados comprovaram que com intensidade de irradiação de 750 W/m², a temperatura exterior da superfície da estrutura varia em menos de 1°C, sendo um perfeito absorvedor para ser utilizado como complemento a estruturas PV.

Ma et al, realizam uma revisão dos PCM para regular a eficiência em estruturas PV. Entre os métodos abarcados pelo estudo, uma solução prática para diminuir o efeito da temperatura é aumentar as propriedades tipicamente baixas de condutividade térmica do PCM [52]. Além disto, a inserção de aletas metálicas nos materiais melhora significativamente as características dos PCM, tornando mais uniforme a distribuição de temperatura e consequentemente a dissipação de calor no módulo [53]. Porém, com base na revisão das literaturas revisadas, o sistema PV-PCM simples pode não ser economicamente viável se usado apenas para melhorar a eficiência de conversão de PV, pois só os PCM não representam uma solução holística ao problema de temperatura-eficiência em estruturas PV.

No Brasil, a primeira proposta de sistema *BIPVs* interligada à rede elétrica foi posta em operação no campus da

Universidade Federal de Santa Catarina (Florianópolis) em 1997 [54], com um sistema dimensionado para atender em regime anual a demanda residencial urbana típica de quatro pessoas, com potência instalada de 2078 Wp [12]. Posterior a este primeiro empreendimento, foram instalados diversos *BIPVs* dentro do contexto de “sistemas de testes”, com a finalidade de verificar seu comportamento, sendo assim, uma grande porcentagem é instalada em faculdades e centros de investigação como: um sistema de fachada de 1,15 kWp na UFSC no 2000 [12], um sistema de 6,3 kWp instalado na Universidade de São Paulo (IEE/USP) no ano 2001, uma instalação de 10 kWp em 2003 na UFSC [55], e um sistema de módulos flexíveis, com potência de 44.4kWp, instalada no prédio frontal do Centro de Pesquisas da Petrobras em 2003 [12].

Decorrente das *BIPVs* instaladas na década do 2000, o mercado solar integrado e o seu uso foi se ampliando cada vez mais, chegando a ser incorporado à estrutura em grandes prédios, como o sistema solar incorporado na cobertura do estádio Governador Magalhães Pinto, em Belo Horizonte no 2014, convertendo-se no primeiro sistema *BIPVs* a grande escala [56]. Esta iniciativa foi replicada dentro do contexto da copa do mundo 2014, e foram instalados sistemas de cobertura PV em diversos centros esportivos, sendo as pioneiras no âmbito *BIPVs* em grande escala no Brasil (Maracanã - 400 kWp, Mané Garrincha - 2500 kWp, Pitaçu - 400 kWp) [57], [58].

Paralelamente, as *BIPVs* foram incorporadas em importantes projetos industriais, destacando-se a parceria da integração de células fotovoltaicas orgânicas (*Organic Photovoltaics Cells - OPV*) desenvolvidas pela CSEM Brasil, única empresa Brasileira que pode fornecer módulos fotovoltaicos orgânicos e adaptá-los para *BIPVs* por meio de telhas metálicas fabricadas pela empresa Medabil, produtos que são utilizados na construção de grandes galpões [59].

Porém, a inclusão das estruturas solares tanto no âmbito industrial, como a instalação a grande escala, tem sido desenvolvida por tecnologia estrangeira, portanto, ressaltasse o fato da escassa produção nacional. Isto tem impactado negativamente para a instalação de *BIPVs* para uso residencial e de baixa tensão, pois continua sendo uma tecnologia com elevado custo e poucos fornecedores. O fato dos limitados produtores de *BIPVs* no Brasil, fica evidenciado na busca no banco de patentes do Instituto Nacional da Propriedade Industrial, pois apresenta escassos empreendimentos específicos para edifícios solares, além de utilizar placas de silício da 2ª geração. Entre as últimas patentes registradas encontrasse a companhia ECO Solar Roof, que começou a operar em 2018 para a produção de telhado solar [60].

No que diz respeito ao mercado mundial, América do Norte e Europa Ocidental dominam tanto no desenvolvimento da tecnologia específica para *BIPVs*, como na quantidade de empresas que oferecem este serviço. No âmbito das telhas ou telhados solares, o mercado é dominado pela Companhia Tesla, que apresenta o maior desenvolvimento tecnológico em telhas unitárias adaptadas à estrutura para aplicação residencial e de baixa tensão. Onde o seu produto é baseado no painel solar Panasonic modelo N3300 HIT, com eficiência elétrica padrão

de 19,7% para módulos PV convencionais, mas tem uma redução até o 16% quando é instalado em telhas solares fotovoltaicas, conforme as perdas de eficiência desta tecnologia [61].

D. Normas, Regulamentações e Certificações

A legislação normativa e regulamentação que rege a produção, transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil não considera ainda como um caso específico os sistemas solares fotovoltaicos integrados a edificações urbanas e interligados à rede elétrica convencional. Inclusive, a inserção técnico-político-normativa desta tecnologia ainda é tema em debate em todo o mundo [12].

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), enquadra os sistemas *BIPVs* dentro dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) para potência abaixo de 10kW, sendo normados pelos mesmos decretos, leis e normativas. Neste sentido, os sistemas fotovoltaicos integrados a edificações urbanas que estejam interligadas à rede pública podem ser caracterizados como autoprodutores de energia elétrica (APs).

Mesmo com o pouco avanço do Brasil na introdução da microgeração das PV, onde as inversões maioritariamente são financiadas pelos próprios proprietários com tarifas e taxas muito altas, resultando em longo período de retorno, o que consequentemente desacelerar a microgeração local e a expansão do mercado, já existem alguns incentivos fiscais para determinados equipamentos fotovoltaicos [62].

Comparando o incentivo financeiro do Brasil com as políticas de incentivo do mercado dos Estados Unidos, estas fornecem incentivos nacionais e estaduais para a instalação de PV (incluindo as *BIPVs*) num valor médio aproximado do empréstimo de 30% do valor do empreendimento e com juros muito baixos. Isto resulto numa elevada taxa de crescimento das PV, o que por sua vez produziu um aumento no mercado, diminuição dos preços das tecnologias e maior desenvolvimento das PV e suas ramificações.

III. METODOLOGIA

Neste capítulo será abordada a metodologia proposta para a realização da pesquisa, que foi dividida em 7 tópicos, começando desde a pesquisa de mercado para eleição do formato de telha e os modelos escolhidos; passando pela simulação dos modelos, as condições de simulação e os materiais com suas respectivas propriedades; até a interpretação dos resultados. A metodologia proposta resume-se no diagrama da Fig. 3.

Na etapa A tem-se a pesquisa de mercado para eleição da telha, onde foi comparado os modelos comerciais tanto ao nível nacional como internacional, constatando grande diversidade de formatos para as telhas. Por facilidade de incorporação do arranjo fotovoltaico à telha, foi escolhido o formato retangular de telha plana.

Na etapa B tem-se a seleção de modelos fotovoltaicos escolhidos, foram propostos dois modelos de telha fotovoltaica: (i) um arranjo fotovoltaico integrado, tentando simular as características e condições das telhas solares presentes no mercado; (ii) um modelo com arranjo fotovoltaico sobreposto,

para verificar as condições de operação deste novo formato.

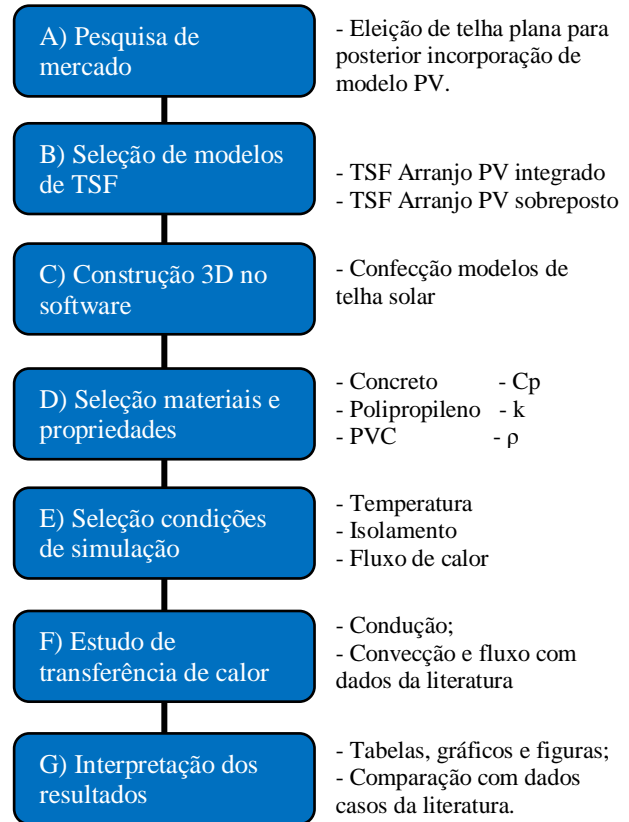


Fig. 3 Diagrama da metodologia utilizada.

Na etapa C realiza-se a construção 3D dos modelos sobreposto e integrado no software Comsol Multiphysics®, e a incorporação do arranjo fotovoltaica nos modelos.

Na etapa D tem-se a seleção de propriedades e materiais para a simulação. Como o estudo é de caráter térmico, são determinadas as propriedades específicas para simulação de transferência por condução. Foram propostos o Polipropileno e PVC como novos materiais para a confecção de telhas PV, ambos foram escolhidos para a comparação do Concreto como material base para as telhas convencionas.

Na etapa E são selecionadas as de condições de simulação de transferência de calor por condução e os dados da literatura para o análise de convecção e irradiação.

Na etapa F, implementasse o estudo de transferência de calor condução. Nas condições de simulação, são determinadas a temperatura, o fluxo de calor, as condições de isolamento da telha, entre outras propriedades.

Na etapa G tem-se a interpretação e validação dos resultados. Por médio das condições de simulação, a caracterização da eficiência é determinada e comparada com os sistemas convencionais.

IV. DIMENSIONAMENTO E MODELAGEM

Nesta secção apresenta-se o dimensionamento e modelagem dos modelos escolhidos de telha solar fotovoltaica, a geometria da telha solar objeto de estudo, detalhando os materiais e os constituintes do arranjo fotovoltaico avaliados. Em seguida,

apresentam-se as hipóteses adotadas para a transferência de calor por condução e os dados de convecção e fluxo da literatura.

A geometria base da telha escolhida é de formato plano com incorporação de arranjo PV superficial. Este formato é um dos mais comuns no mercado, sendo de fácil substituição caso aconteça falha ou ruptura do material. Além disso tem maior facilidade de construção que telhas com curvaturas, boa adequação ao telhado e fácil adaptação às células fotovoltaicas [63]–[69]. A partir do formato padrão de telha plana retangular, foram propostos dois modelos que são: Modelo 1 - telha com arranjo fotovoltaico sobreposto e Modelo 2 - telha com arranjo fotovoltaico integrado. Os modelos integrado e sobreposto são exibidos na Fig. 4(a) e Fig. 4(b) respectivamente.

O Modelo 1, pretende ser um produto diferente ao presente no mercado, com uma geometria de arranjo fotovoltaico sobressalente da telha. Este modelo pretende determinar se a sobreposição do arranjo PV por sobre a telha apresenta características distintas ao modelo comercial (sistema integrado), pois os efeitos da transferência de calor entre a telha e o arranjo PV acontecem de forma diferente ao ter menor área de contato. Por outra parte, com o intuito de determinar as características do modelo padrão e comercial para os materiais propostos de TSF no Modelo 2, avalia-se a inserção do arranjo PV na telha, já que ao ter maior área de contato entre as superfícies, os efeitos de transferência de calor acontecem de forma diferente, portanto atingem temperaturas diferentes ao modelo sobreposto, o que consequentemente afetara ou não no arranjo PV. Ao modelar e implementar ambos os modelos no ambiente de simulação estrutural 3D no software Comsol Multiphysics[®] tem-se que a sobreposição ou inserção do arranjo fotovoltaicos na cor azul, como mostra a Fig. 4.a) para o modelo integrado e Fig. 4.b) para o modelo sobreposto.

Para a modelagem da célula fotovoltaica, foram mantidos os mesmos materiais e dimensões nos dois modelos. Cabe destacar, que a principal diferença entre os dois modelos está na forma como a temperatura irá influenciar na telha e a sua vez na célula fotovoltaica, pois a superfície do modelo integrado experimenta transferência de calor por condução influenciada por todos os componentes do arranjo PV e a telha. Enquanto, no modelo sobreposto a troca de calor por condução, se dá apenas pela última camada do arranjo PV (Elvax) com a telha, até atingir o arranjo de células fotovoltaicas.

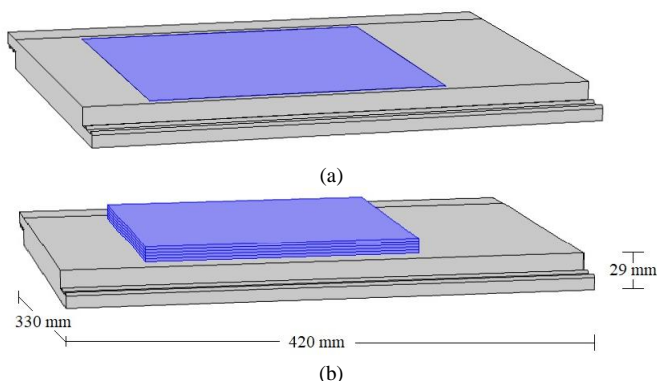


Fig. 4. Modelagem 3D da telha com o arranjo fotovoltaico: (a) Modelo integrado; (b) Modelo sobreposto [70].

Ao analisar a Fig. 5 percebe-se que a célula fotovoltaica foi aproximada pela geometria de cinco placas acopladas, com 220 mm de superfície quadrada e 2,5 mm de espessura cada uma, totalizando 12,5 mm de espessura do sistema. O arranjo PV foi desenhado de acordo com os componentes típicos de um sistema fotovoltaico, composto de uma camada de vidro, Acetato de Vinil Etileno (EVA) e uma camada de Polifluoreto de Vinilo (Tedlar). As propriedades térmicas utilizadas na simulação dos componentes do arranjo PV (N° 1 a N° 5) e da telha (N° 6 a N° 8) são listadas na Tab. II.

De acordo com a revisão bibliográfica e os estudos apresentados por: Radziemska sobre o efeito da temperatura em células de silício cristalino [13]; Barçante na influência da temperatura em células solares fotovoltaicas [14]; Omer et al sobre o mal desempenho das células PV no monitorio de um sistema BIPV no Reino Unido [63]; Agrawal & Tiwari no análise da energia e exergia num sistema BIPV [64], Portolan & Rüther ao caracterizar o potencial de BIPV e Building Applied Photovoltaics (BAPV) numa residência no Brasil, demonstrando que a temperatura afeta a potência das células [68], Essah et al na Avaliação do desempenho de um sistema PV integrado BP m-Si [67]; entre outros. Demonstraram que a temperatura tem forte influência na eficiência do modulo/célula e consequentemente na potência do sistema.

TABELA II
PROPRIEDADES TÉRMICAS COMPONENTES TELHA E MÓDULO [70]–[73].

N°	Material	k[W/m °C]	Cp[J/Kg °C]	ρ [kg/m ³]
1	Vidro	1,80	500	3000
2	EVA superior	0,35	2090	960
3	Célula	148	677	2330
4	EVA inferior	0,35	2090	960
5	Tedlar	0,20	1250	1200
6	Concreto	1,80	880	2300
7	PVC	0,10	850	1760
8	Polipropileno	0,25	1700	910

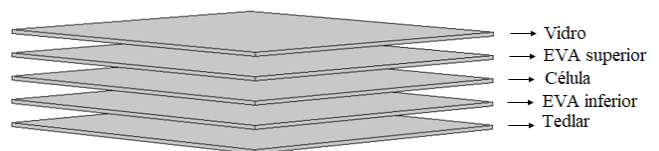


Fig. 5. Composição do sistema fotovoltaico [70], [71].

Visando analisar o arranjo técnico operando em condições médias, optou-se em realizar os testes para média das temperaturas mínima e máxima do verão de Foz do Iguaçu no período de 21/12/2017 a 20/03/2018. Segundo os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a média das temperaturas máximas e mínimas medidas para os meses de verão foi de 30,6 °C e 22,1 °C que corresponde ao horário das 17h e 6h respectivamente [74]. É importante destacar que o território em análise apresenta temperaturas extremas de máximos e mínimos divergentes à media. No universo amostral, os valores médios de temperaturas máximas e mínimas, representam 71% das amostras anuais [74], o 29% restante correspondem a valores amostrais extremos que acontecem em casos isolados de máximas ou mínimas temperaturas.

A. Dimensionamento por Método Analítico

Os testes foram realizados sobre o padrão STC (Standard Teste Conditions) de irradiação de 1000 W/m^2 , para um modelo de telha unitária, considerando os efeitos condução de calor simulados no software Comsol Multiphysics®, e a convecção e radiação especificadas com os dados da literatura. Para maior exatidão dos resultados, utilizou-se o valor médio das velocidades do vento de Foz do Iguaçu na época do verão, para determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção (h).

Para determinar o efeito da temperatura na eficiência da célula, utiliza-se a Eq. 1 desenvolvida por Yamaguchi et al [75]. Ainda que o equacionamento matemático da Eq. 1 e Eq. 2 sejam obtidos de maneira simples, através de ensaios de temperatura e verificando a mudança de eficiência em células PV de maneira prática, o método de ajuste da reta resulta prático e certo para estes fins. Os resultados obtidos utilizando estes equacionamentos em pesquisas como: Meral & Dinçer, sobre os fatores que afetam a operação e eficiência de células fotovoltaicas [76]; Nsengiyumva et. al, sobre os avanços e desafios em sistemas de rastreamento solar [77]; Silva, sobre o estudo e modelagem de uma usina solar fotovoltaica [78]; Bernal, com o desenvolvimento de um sistema de resfriamento fotovoltaico [79]; entre outros, tem sido útil para modelar a influência da temperatura na operação de células fotovoltaicas em certas condições, obtendo resultados certos.

$$\eta_{\text{datasheet}} = -0,05 * T_{\text{det}} + X \quad (1)$$

A Eq. 1 é desenvolvida especificamente para uma temperatura $T_{\text{det}} = 25^\circ\text{C}$ segundo os dados de STC e um ângulo azimutal entre 20° e 25° segundo as especificações geográficas de Foz do Iguaçu. A eficiência da célula é obtida a partir dos dados do *datasheet* para condições STC sendo a eficiência utilizada é $\eta_{\text{datasheet}} = 16\%$ para uma temperatura de $T_{\text{det}} = 25^\circ\text{C}$ [75]. Substituindo os valores de $\eta_{\text{datasheet}}$ e T_{det} na Eq. 1, determinamos que o valor da incógnita resulta em $X = 17,25$. Determinado o valor de X, pode-se reescrever a Eq. 1 obtendo-se Eq. 2.

$$\eta_{\text{cel}} = -0,05 * T_{\text{cel}} + 17,25 \quad (2)$$

A Eq. 2 é o equacionamento modificado de Yamaguchi et al para utilizar os dados específicos de eficiência e temperatura do caso de estudo desta pesquisa, onde T_{cel} é a temperatura média alcançada pelo arranjo PV nas condições da simulação e η_{cel} é a eficiência resultante para dita temperatura.

A transferência de calor por condução é modelada pela lei de condução de Fourier, que por princípio assume-se que a condutividade térmica do material (k) é uniforme, pois a diferença de temperatura entre os meios que transferem calor é muito pequena, e que o calor específico a pressão constante (C_p) e a massa específica (ρ) são independentes da temperatura [80]. Posteriormente, assumindo as hipóteses e os parâmetros de simulação se torna a equação de Difusão de calor para Regime permanente e sem geração descrita na e Eq. 3 [80].

$$\nabla^2 T = (1/\alpha)(\partial T/\partial t) \quad (3)$$

Como o comportamento da TSF e sistema PV são medidos

sobre STC. A massa específica do ar circundante foi determinada em função destas mesmas características pela relação de gás ideal, resultado em $\rho_{\text{ar}} = 1,1841 \text{ kg/m}^3$ [81]. O coeficiente de transferência de calor por convecção é determinado pela Eq. 4 [82], utilizando a velocidade do vento promedio para a época de verão em Foz do Iguaçu que é $2,42 \text{ m/s}$ [74].

$$h = 5,7 + 3,8v = 14,89 \text{ W/m}^2.\text{K} \quad (4)$$

Ao implementar o estudo, assume-se que a totalidade da geometria experimenta troca de calor por condução. Por outra parte, na transferência de calor por convecção utilizasse a velocidade do vento e o coeficiente de transferência de calor por convecção especificado na Eq. 4, com convecção livre e convecção forçada. No estudo de transferência de calor por radiação, é especificado um fluxo de calor de 1000 W/m^2 (STC); cabe destacar que no estudo por radiação não serão consideradas a emissividade e refletividade nas condições de irradiação.

A transferência de calor por convecção e radiação atuam só nas superfícies especificadas com a cor azul na Fig. 6 para os modelos integrados e sobrepostos.

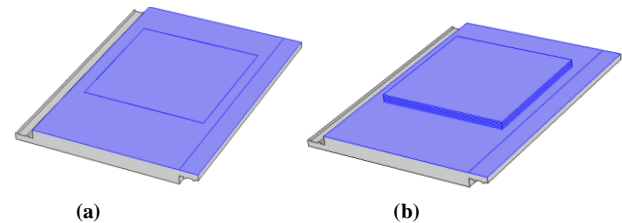


Fig. 6. Condições de contorno para transferência de calor em telha solar: (a) Modelo integrado e (b) Modelo sobreposto

As superfícies isoladas termicamente para transferência de calor por convecção e radiação mostram-se em cor azul na Fig. 7.

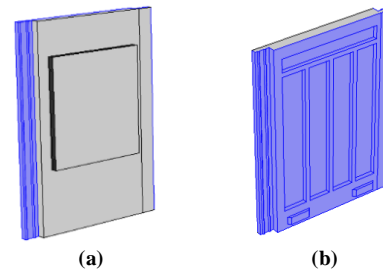


Fig. 7. Superfícies isoladas termicamente para transferência por convecção e radiação: (a) Vista da superfície superior e (b) Vista da superfície inferior.

As superfícies em azul da Fig. 7 são isoladas da transferência de calor por convecção e o fluxo de radiação, pois ao realizar a instalação do produto no telhado, as superfícies com a cor azul ficam dispostas na superfície interna da casa, portanto não estão em contato com o meio circundante exterior e só intercambiam calor pelo mecanismo de condução. Por outra parte, as superfícies de cor cinza estão em contato direto com o meio exterior no momento da instalação, por conseguinte o intercâmbio de calor se produz pelos três mecanismos combinados.

Para o melhor entendimento do processo de simulação implementado no software Comsol Multiphysics®, a Fig. 8

apresenta o processo simplificado.

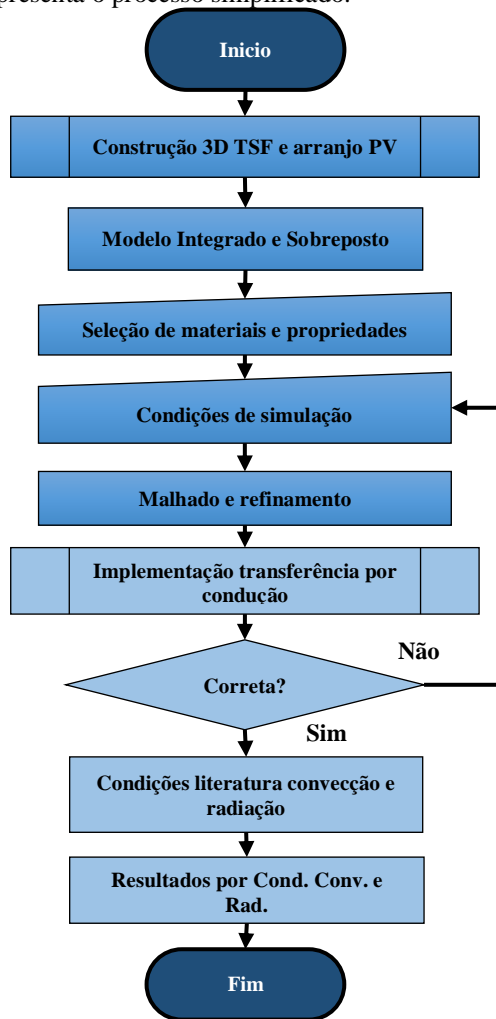


Fig. 8. Fluxograma da metodologia de simulação no Software Comsol Multiphysics®.

Ao implementar a simulação, foi realizada um refinamento da malha no arranjo PV, especificando 4 pontos de gradientes de temperatura para cada placa que compõe o arranjo PV, permitindo visualizar a mudança de coloração e consequentemente a variação de temperatura; da mesma forma, foi feito um refinamento da malha nas superfícies expostas à radiação e convecção. Para o estudo combinado de condução, convecção e radiação foi realizado o “acoplamento” das superfícies tanto no arranjo PV como na TSF.

B. Dimensionamento por Método Numérico

Nesta secção serão apresentados e discutidos os resultados da distribuição de temperatura nas telhas e no arranjo PV. Posteriormente é determinada a temperatura das células PV na telha para a determinação de eficiência nos modelos simulados

utilizando a Eq. 2.

Aplicadas as condições de estudo de transferência de calor por condução no Comsol Multiphysics® e os dados da literatura para convecção e radiação para o Concreto em modelo sobreposto (CS) e integrado (CI), o Polipropileno em arranjo PV sobreposto (PS) e integrado (PI), e o PVC com modelo sobreposto (PVCS) e integrado (PVCI) na média das temperaturas máximas, sendo de 30,6 °C e a média das temperaturas mínimas de 22,1°C [74], as Fig. 9 e Fig. 10 mostram o resultado da distribuição da temperatura da telha e o arranjo fotovoltaico para as configurações sobreposto e integrado para a simulação em condição de regime permanente.

Comparando os resultados dos modelos de TSF sobrepostos, demonstrasse que parte superior do arranjo PV é o componente que apresenta a maior exposição à irradiação que corresponde ao vidro, que tem coloração similar nos três materiais, variando a temperatura entre os 95°C e 82°C. Por outro lado, comparando a coloração atingida na superfície exposta ao fluxo de 1000 W/m² e convecção, o modelo/material que experimentou maior aumento de temperatura é o CS; opostamente o PS apresentara as menores temperaturas na superfície exposta, variando entre os 72,23°C e 80,67°C.

Comparando as superfícies isoladas, o PS atinge a menor temperatura na parte inferior (interna) da TSF com temperaturas que variam entre 72,23°C e 80,67°C para os estudos a 22,1°C e 30,6°C respetivamente.

No estudo do modelo integrado de TSF, é perceptível a diferença do CI comparado com o PI e PVCI, pois a telha de concreto é fortemente afetada pela temperatura, considerando sua condutividade elevada (1,80 W/m°C). Na superfície da telha exposta ao fluxo de 1000 W/m² e convecção, o PI e PVCI atuam como isolante térmico, atingindo temperaturas máximas de 75°C (teste a 30,6°C) em quase a totalidade da geometria da telha.

Posterior ao estudo térmico dos modelos em condições de transferência de calor por condução, e os dados de convecção e radiação da literatura, em conjunto com os dados fornecidos pela Eq. 4 e as condições de simulação especificadas para cada mecanismo, foi determinada a temperatura da célula fotovoltaica localizando o ponto central da estrutura que representa só a camada da “Célula solar” como mostrado na Fig. 5 e na Tab. II pelo “N°3”. Com isto determinasse a temperatura média na qual a célula foi submetida nas condições simuladas.

Com a temperatura da célula T_{cel} , determina-se a eficiência da célula para dita temperatura por meio da Eq. 2. Os resultados para cada modelo nas condições de temperatura máxima e mínima no verão de Foz do Iguaçu e sua respectiva redução da potência em função da eficiência, são exibidos na Tab III.

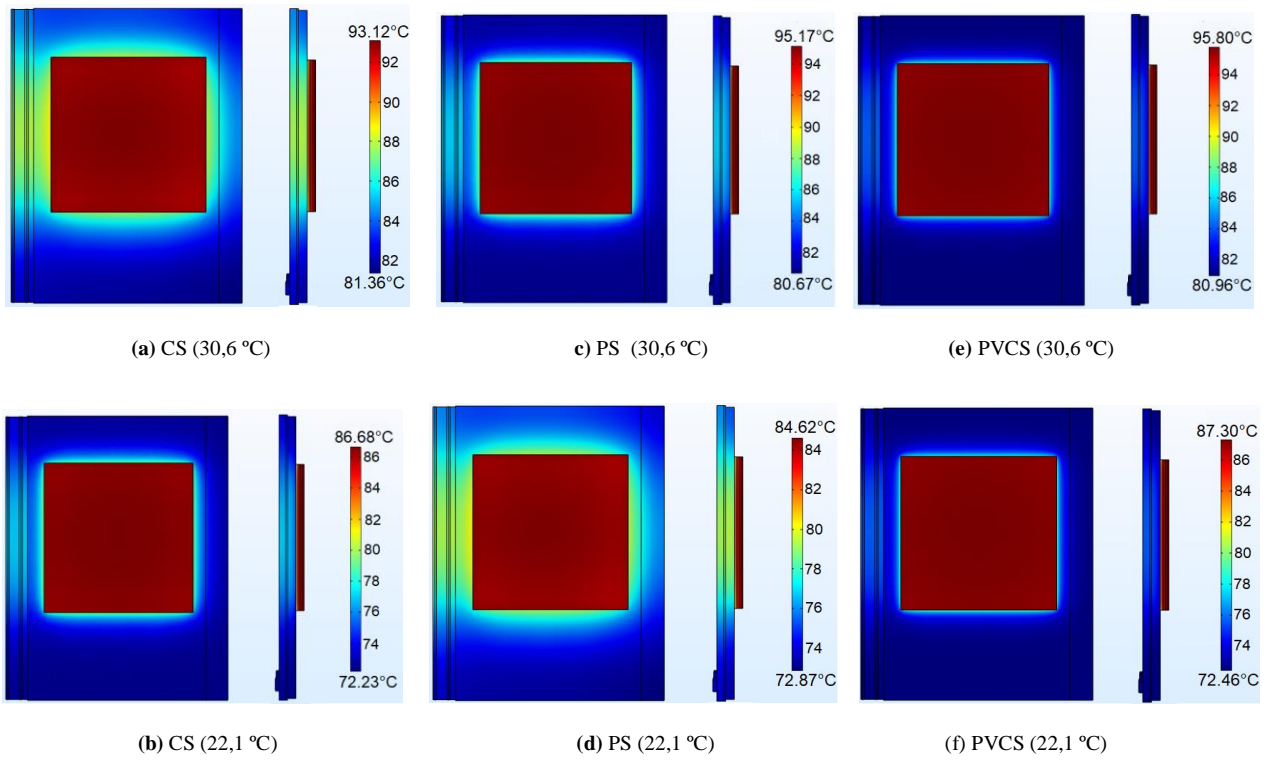


Fig. 9. Distribuição de temperatura para modelo sobreposto em condições de temperatura exterior máxima e mínima para: (a) CS a 30,6°C; (b) CS a 22,1°C; (c) PS a 30,6°C (d) PS a 22,1°C; (e) PVCS a 30,6°C; (f) PVCS a 22,1°C.

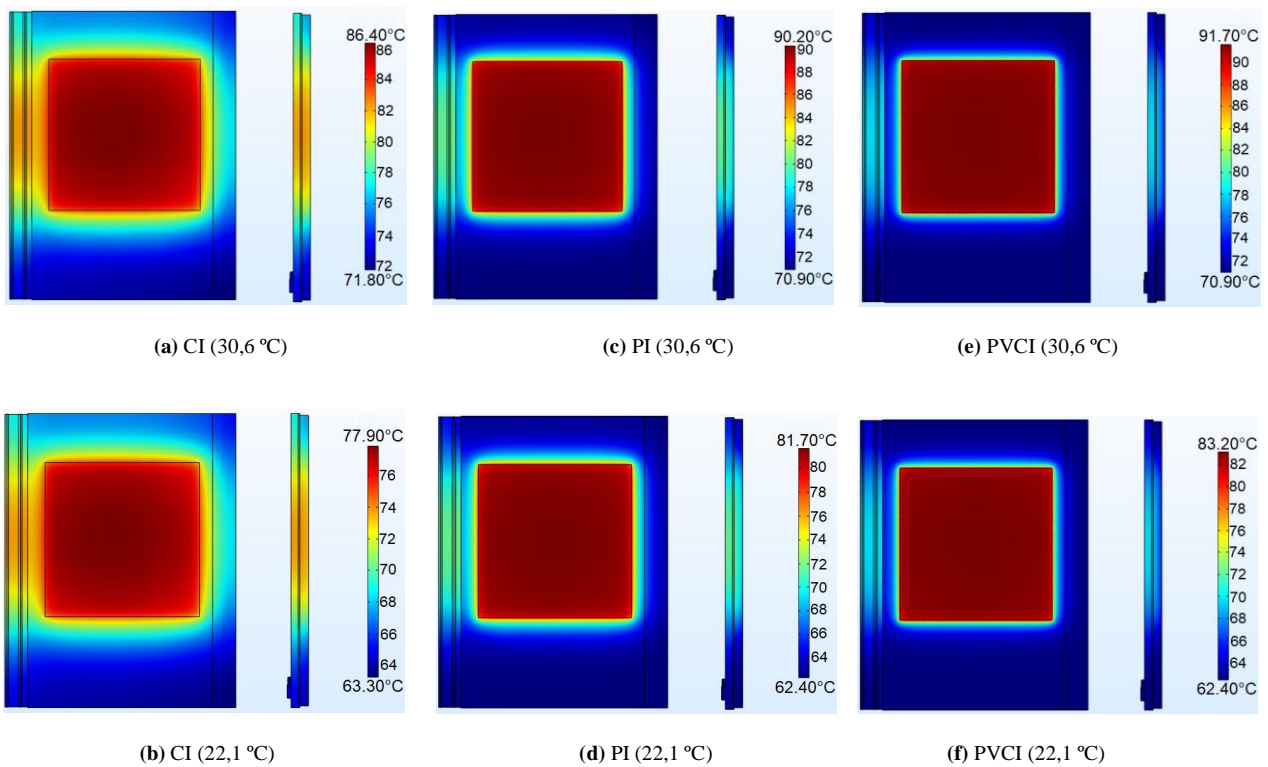


Fig. 10. Distribuição de temperatura para modelo integrado em condições de temperatura exterior máxima e mínima de: (a) CI a 30,6°C; (b) CI a 22,1°C; (c) PI a 30,6°C (d) PI a 22,1°C; (e) PVCI a 30,6°C; (f) PVCI a 22,1°C

TABELA III
EFICIÊNCIA DOS MODELOS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DA CÉLULA PARA
TEMPERATURA EXTERIOR DE 30,6°C E 22,1 °C.

N°	Modelo	T _{ext} [°C]	T _{cel} [°C]	η _{cel} [%]	η _{fab} - η _{cel} [%]
1	CS	30,6	92,09	12,65	3,35
2	CI	30,6	85,19	12,99	3,01
3	PS	30,6	94,42	12,53	3,47
4	PI	30,6	89,39	12,78	3,22
5	PVCS	30,6	94,31	12,53	3,47
6	PVCI	30,6	91,10	12,70	3,30
7	CS	22,1	83,61	13,07	2,93
8	CI	22,1	76,64	13,42	2,58
9	PS	22,1	85,91	12,95	3,05
10	PI	22,1	80,73	13,21	2,79
11	PVCS	22,1	86,83	12,91	3,09
12	PVCI	22,1	82,56	13,12	2,88

Na Tab. III, mostram-se as temperaturas achadas na célula (T_{cel}) para as condições de temperatura máxima e mínima do ambiente externo (T_{ext}), o componente η_{cel} é determinado utilizando a Eq. 2 e substituindo T_{cel} para cada estudo, a diferença de eficiências representado por η_{fab} - η_{cel} determinasse pela subtração da eficiência indicada pelo fabricante (η_{fab} = 16%) e a eficiência determinada no estudo (η_{cel}), que representa a porcentagem de diminuição da eficiências nas condições simuladas. A discussão mais específica dos resultados será abordada no capítulo 5.

V. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão abordados o análise e discussão dos resultados, correlacionando os resultados e comparando os modelos propostos com os materiais as temperaturas da célula e as eficiências determinadas. Posteriormente, serão abordados os resultados conforme as características civis-estruturais, caracterizando as propriedades térmicas dos materiais da telha e sua influência na estrutura do telhado. Finalmente será feita uma comparação dos resultados obtidos com alguns sistemas fotovoltaicos convencionais com diferentes eficiências, mas mantendo as mesmas condições de simulação.

A. Temperatura e Eficiência

Comparando os dados fornecidos pela Tab. III e as Fig. 9 e Fig. 10 para η_{cel}, pode-se determinar que tanto no modelo sobreposto como no integrado, para os três materiais, um aumento da temperatura da célula exposta a 30,6°C, ocasionara uma diminuição da eficiência entre o 12,53% e 12,99% para um máximo de 16% a STC; para o caso do estudo a 22,1°C, as eficiências para os três materiais variam entre 12,91% e 13,42%. Os dados mostram que a diminuição da eficiência η_{fab} - η_{cel} ocorre numa porcentagem máximo de 3,47%, que corresponde ao PS. Nos resultados de η_{cel} da Tab. III, todos os modelos apresentaram variação de eficiência entre 0,42% e 0,43% para η_{cel} (22,1°C) - η_{cel} (30,6°C), excetuando o PVCS que é de 0,38%.

Já quando se compara os efeitos da troca térmica entre os modelos integrados e sobrepostos da Tab. III, pudesse estabelecer que em todos os casos, que a temperatura da célula será menor em modelos integrados, com variação máxima de 6,97°C para o Concreto, 5,18°C para o Polipropileno e 4,27°C para o PVC.

Ao compara as eficiências nos estudos de temperatura externa a 30,6°C e 22,1°C, pode-se estabelecer que em dias frios a temperatura tem menor efeito sobre a eficiência, sendo menos prejudicada que em dias quentes, mas mantendo os valores de irradiação de STC (1000W/m²).

Com o objetivo de quantificar o desempenho da eficiência nos modelos simuladas para as temperaturas entre a faixa dos 22,1°C e 30,6°C, na Tab. IV e Fig. 11 exibem-se as interpolações das temperaturas, verificando a mudança de eficiência ao aumentar em 1°C a temperatura da célula.

Ao analisar os dados contidos na Tab. IV e Fig. 11, pode-se comprovar que a diminuição de eficiência ocorre de forma linear em aproximadamente 0,05%/°C para o Concreto, o Polipropileno e o PVC, tanto no modelo integrado como o sobreposto. Comparando os seis de teste, o CI é o modelo que apresenta maior desempenho, com eficiência de 13,42% mesurada a 22,1°C. Por outra parte, ao comprar o rendimento nos modelos sobrepostos, o CS apresentou o melhor desempenho, com uma eficiência de 12,93% na temperatura de 25°C (STC).

Avaliando os materiais em função dos modelos integrados e sobrepostos, constatasse que os modelos integrados apresentaram maior eficiência para as mesmas condições de teste; o que tem direta relação com o efeito convectivo presente nos modelos sobrepostos, influenciando negativamente no desempenho da célula e consequentemente no sistema. Os modelos mais prejudicados com o aumento da temperatura das células na condição de teste a 30,6°C foram o PS e PVCS, o que pode ser explicado pela ação do efeito convectivo do ar, com consequentemente aumenta a temperatura na célula.

Pela própria característica das BIPV e especificamente das telhas solares avaliadas na pesquisa, resulta interessante analisar comparativamente os materiais desde o ponto de vista da eficiência de maneira individual, além de caracterizar as vantagens civis-estruturais que estes materiais possam aportar à estrutura, pois o uso de um determinado material na estrutura do telhado aporta características individuais e específicas que serão determinantes ao especificar o local da instalação. Alguma das características são: conforto térmico, dureza do telhado, menor peso à estrutura, “amigável” ao médio ambiente, etc.

TABELA IV
INTERPOLAÇÃO DAS TEMPERATURAS DA CÉLULA PV EM FUNÇÃO
DA EFICIÊNCIA PARA ARRANJO FOTOVOLTAICO COM A CÉLULA
SOBREPOSTA E INTEGRADA

T _{cel} [°C]	η _{CS} [%]	η _{CI} [%]	η _{PS} [%]	η _{PI} [%]	η _{PVCS} [%]	η _{PVCI} [%]
22,1	13,07	13,42	12,95	13,21	12,91	13,12
23,0	13,03	13,37	12,91	13,16	12,87	13,08
24,0	12,98	13,32	12,86	13,11	12,83	13,03
25,0	12,93	13,27	12,81	13,06	12,78	12,98
26,0	12,88	13,22	12,76	13,01	12,74	12,93
27,0	12,83	13,17	12,71	12,96	12,69	12,88
28,0	12,78	13,12	12,66	12,91	12,65	12,83
29,0	12,73	13,07	12,61	12,86	12,60	12,78
30,0	12,68	13,02	12,56	12,81	12,56	12,73
30,6	12,65	12,99	12,53	12,78	12,53	12,70

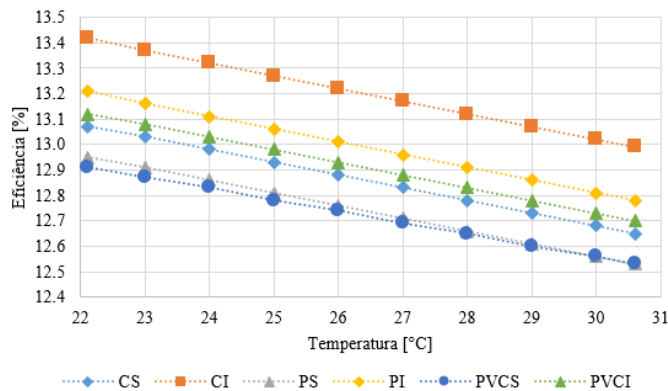


Fig. 11. Interpolação das temperaturas da célula PV em função da eficiência para os modelos sobrepostos e integrados.

Com a implementação do refinamento da malha para quatro pontos de gradiente em cada placa, é possível ver o gradiente de temperatura no arranjo PV representado pela mudança de coloração nos resultados das Fig. 9 e Fig. 10, que tem variação de até 10°C ao comparar nos estudos simulados a 22,1°C e 30,6°C, refletido a importância de uma correta simulação.

B. Civil-Estrutural

Do ponto de vista civil-estrutural, os materiais da TSF apresentam diversas características que influenciam na estrutura, por exemplo, o Polipropileno de alta massa específica (910 kg/m³) apresenta vantagem em menor peso à estrutura [85], porém apresenta menor dureza com valor de 67-74 Shore D [86], quando comparado com a dureza do PVC de 80-83 Shore D [86]; para o concreto a dureza Shore D não apresenta valor mensurável ao ser um material completamente rígido. Enquanto que termicamente o polipropileno atua como isolante entre o ambiente externo e interno pelo baixo valor de condutividade térmica de 0,25 W/m °C, também apresenta uma temperatura de fusão superior aos 140°C e temperatura de transição vítrea entre os -30°C e 0°C, pelo qual não tem riscos de fusão ou “congelamento” do material atuando em condições normais de operação, sendo assim este material é recomendado para climas onde a temperatura não diminua menos de 0°C ou com granizos que possam danificar a estrutura [87], [88].

Por outra parte, o concreto apresenta alta resistência à compressão (aprox. 23 MPa) [89] e baixa resistência à flexão (aprox. 2,4 MPa) [90], o que faz deste material ótimo resistor de impactos externos [91]. Destaca-se também, que o mesmo tem a vantagem de ser impermeável ou permeável dependendo do caso, impedindo a entrada de água ou absorvendo-a para refrigeração do material e consequentemente o arranjo PV células [90]. Porém, o elevado peso à estrutura e o calor que absorve o concreto impermeável, pode esquentar em excesso o ambiente interno da estrutura, portanto é recomendável evitar as telhas de concreto em locais de alta temperatura [92].

Enquanto que o PVC tem entre suas vantagens ser um material que pode ser reaproveitado 100 % por ser reciclável [93]. Assim como o Polipropileno, o PVC destacasse por ser um produto leve considerando as massas específicas de 910 kg/m³ para o Polipropileno e 1760 kg/m³ para o PVC, dispensando de uma base resistente, o que deixa o processo de construção mais rápido e diminui custos do investimento [94].

A exposição do PVC a as altas temperaturas ocasionam o ressecamento do material, diminuindo sua resistência [94]. Em quanto ao conforto térmico é um material isolante com valor de 0,10 W/m °C, diminuindo o efeito de troca térmica com o ambiente externo.

C. Comparação Sistema Convencional

Ao comparar o efeito de diminuição da eficiência em função da temperatura para sistemas PV convencionais e as TSF estudadas, são exibidos os dados coletados na Tab. V e visualizados na Fig. 12 para diferentes tecnologias. A comparação é realizada em condições de irradiação de 1000 W/m² para as tecnologias fotovoltaicas convencionais Policristalinas (PC), Monocristalinas (MC) e CIS.

Como mostram os dados da Tab. V e Fig. 12, dependendo da tecnologia PV e a presença de silício como material base na composição dos módulos, o comportamento da eficiência em função do aumento da temperatura experimental muda consideravelmente, tal e como acontece nas células CIS, que utilizam o Diseleniuro de Cobre e Índio (CuInSe₂) como material semicondutor ativo nas células e não o Silício em grande porcentagem [95].

Nos estudos das TSF avaliadas e o PC, a diminuição da eficiência acontece valor de 0,05%/°C [96], por outra parte para a tecnologia MC e CIS, a diminuição acontece na ordem dos 0,09%/°C e 0,24%/°C respectivamente, refletindo importante diferença nos comportamentos.

TABELA V
INTERPOLAÇÃO DAS TEMPERATURAS EM FUNÇÃO DA DIMINUIÇÃO DA EFICIÊNCIA ELÉTRICA PARA DIFERENTES TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS [97]–[99].

T _{ed} [°C]	η _{CS} [%]	η _{CI} [%]	η _{PS} [%]	η _{PI} [%]	η _{PVCS} [%]	η _{PVCI} [%]	η _{PC} [%]	η _{MC} [%]	η _{CIS} [%]
22,1	13,07	13,42	12,95	13,21	12,91	13,12	11,75	14,99	11,95
23,0	13,03	13,37	12,91	13,16	12,87	13,08	11,65	14,90	11,80
24,0	12,98	13,32	12,86	13,11	12,83	13,03	11,60	14,84	11,50
25,0	12,93	13,27	12,81	13,06	12,78	12,98	11,55	14,78	11,31
26,0	12,88	13,22	12,76	13,01	12,74	12,93	11,50	14,71	11,18
27,0	12,83	13,17	12,71	12,96	12,69	12,88	11,45	14,64	11,04
28,0	12,78	13,12	12,66	12,91	12,65	12,83	11,40	14,59	10,86
29,0	12,73	13,07	12,61	12,86	12,60	12,78	11,35	14,51	10,55
30,0	12,68	13,02	12,56	12,81	12,56	12,73	11,30	14,42	10,28
30,6	12,65	12,99	12,53	12,78	12,53	12,70	11,25	14,30	9,89

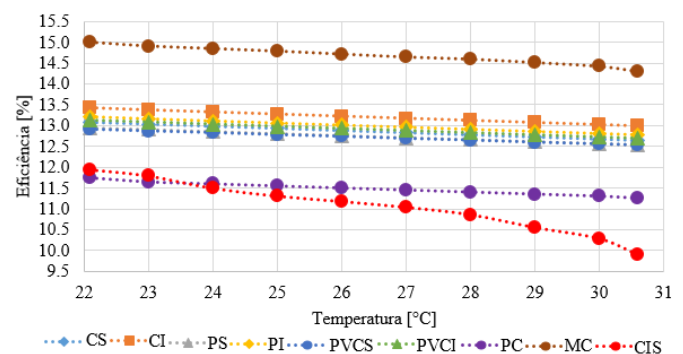


Fig. 12. Comparação das temperaturas do módulo/célula em função da eficiência para diferentes tecnologias fotovoltaicas [97]–[99].

Como comprovasse no estudo comparativo das tecnologias PV, as células com maior rendimento são as células com presença de silício como componente maioritário, neste sentido quando se tenha maior espaço disponível para a instalação das

TSF, estas tecnologias terão a vantagem de dispor maior rendimento por metro quadrado. Porém, as células de película delgada como no caso das CIS, precisarão um menos aporte de material e energia para a confecção do arranjo PV, fator que será refletido no preço final destas células [95].

VI. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

As tecnologias *Building Integrated Photovoltaics (BIPVs)* tem uma perspectiva promissória num futuro próximo. Uma vez que o custo de manufatura deve reduzir, irá aumentar a competitividade e consequentemente terá um acréscimo de novos modelos e fabricantes de TSF, tornando assim esta tecnologia extremamente competitivas com os sistemas PV convencionais aplicados a sistemas prediais. Porém, para que possa afirmar com propriedade seu uso, inserção no mercado e a competitividade com sistemas PV convencionais, destaca-se a necessidade, como foi comprovado na pesquisa, tem que levar em consideração diversos fatores como: (i) os materiais em função das propriedades térmicas que estes possam aportar tanto no arranjo PV influenciando na a temperatura das células, refrigerando o sistema PV, aportando características de conforto térmico, entre outras; (ii) vantagens civis e estruturais como menor peso, maior resistência do telhado a impactos e climas extremos; (iii) características do local de instalação, fator diretamente relacionado à temperatura, velocidade do vento, humidade relativa do ar e irradiação; (iv) Diminuição do custo da tecnologia integrada a edificação pela combinação fatores/vantagens além da função de fornecimento elétrico.

Esperasse, que nas próximas décadas as tecnologias fotovoltaicas convencionais e não convencionais, possam contribuir substancialmente para a produção de energia de forma global e centralizada, embora atualmente seu custo seja até cinco vezes mais caro que a rede elétrica convencional devido aos baixos custos de produção das fontes não renováveis.

De acordo com análise das simulações realizadas nos modelos integrado e sobreposto de arranjo PV, para os materiais de Concreto, Polipropileno e PVC, por médio da transferência de calor por condução simulado no software Comsol Multiphysics®, os dados da literatura de convecção e radiação, exibidos nas Fig. 9 e Fig. 10, para determinar a influência da temperatura de operação das células por médio do cálculo de eficiência utilizando a Eq. 2, e os resultados exibidos nas Tab. III e Tab. IV, foi comprovado que os modelos integrados e sobrepostos, para o Concreto, o Polipropileno e o PVC apresentam desempenhos de célula claramente diferenciados, com variações de eficiência entre o 12,53% e 13,42% para os modelos analisados. Termicamente, os modelos simulados de PVC e Polipropileno, comparando as configurações sobreposto e integrado de arranjo PV, experimentaram resultados similares na temperatura atingida nas telhas, com diferença de aproximadamente 3°C a mais para o polipropileno, o que é razoável pelo maior valor de condutividade térmica material. Por outra parte, o concreto apresentou valores diferenciados ao PVC e Polipropileno, atingido as maiores temperaturas na geometria da telha

Tendo em consideração, o uso de TSF utilizando como material base da telha o Concreto, Polipropileno e PVC com as características térmicas citadas na Tab. II tem comportamentos diferenciados, é fundamental verificar o aporte das características civis e estruturais que aportam estes produtos.

Como foi verificado no estudo, a variação de eficiência para todos os modelos e materiais estudados apresentada na, acontece em 0,05%/°C. Ainda que este valor seja considerado como mínimo e desprezível, é fundamental verificar quanto representa economicamente este dado nas TSF, pois em termos de comparação de consumo anual e economia em função da eficiência de um dado modelo e material com um sistema PV convencional, poderia significar uma real economia no consumo, além de considerar as vantagens civis e estruturais que aportam os materiais.

Portanto, de acordo com análise dos resultados obtido nesta pesquisa pode-se afirmar que: Para o Concreto, Polipropileno e PVC estudados, tanto para o modelo integrado como sobreposto de arranjo PV para as TSF, ao simular o produto em STC, a diminuição de eficiência com o aumento da temperatura acontece num valor de 0,05%/°C. O efeito de diminuição 0,05%/°C acontece para as propriedades térmicas dos materiais de telha com variação de condutividade térmica dos materiais de 0,1W/m°C a 1,80W/m°C, calor específico a pressão constante de 850J/kg°C e 1700J/kg°C e massa específica entre 910 kg/m³ e 2300 kg/m³. Por tanto, para estudos de TSF em condições de STC para as características de Foz do Iguaçu e variando as condições térmicas de condutividade térmica, calor específico a pressão constante e massa específica de qualquer material de telha, dentro da faixa dos valores especificados e mantendo as características do arranjo PV, resultaram em comportamentos de eficiência entre os 12,53% e 13,42%.

Tendo em consideração, que o efeito de diminuição de eficiência em 0,05%/°C tanto no modelo integrado como no sobreposto para Concreto, Polipropileno e PVC acontece de maneira diferenciada, justificasse que é relevante verificar o aporte dos materiais da perspectiva civil e estrutural que estes possam aportar no telhado, pois os mesmos materiais simulados, mas com modelos diferentes apresentam comportamentos térmicos da TSF diferenciados em relação à temperatura atingida pela telha, já que no CS e CI simulados a 30,6°C, a temperatura mínima atingida pela telha é de 81,36°C e 71,80°C respetivamente, evidenciando, que o modelo de CS aportara maior temperatura ao ambiente interno da casa, influenciado diretamente no conforto térmico. O mesmo efeito acontece com o estudo do PS e PI simulados a 30,6°C, onde a temperatura mínima atingida é de 80,67°C e 70,90°C respetivamente; por conseguinte o PI apontará as melhores características de conforto térmico que o PS. Tal e como acontece nos casos anteriores, o PVCI apresenta melhores características de conforto térmico quando compactado com o PVCS, pois tem diferenças de temperaturas de até 10°C ao analisar o mesmo ponto da geometria.

Por fim como continuidade desta pesquisa sugere-se, ampliar a abrangência da simulação incluindo novos materiais, diferentes formatos geométricos de telhas, variedade de condições de irradiação e os fatores econômicos que possam

influenciar na comercialização e substituição da tecnologia fotovoltaica convencional para a gama das *Building Integrated Photovoltaics*.

REFERÊNCIAS

- [1] REN21, “Renewables 2017: Global Status Report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.” 2017.
- [2] J. Marcovitch, “A redução de emissões de gases de efeito estufa e a legislação brasileira,” *FEA/USP*. [Online]. Available: <http://www.usp.br/mudarfuturo/cms>.
- [3] BRASIL, *Lei Nº 10.438*. Brasil, 2010, pp. 2100–2125.
- [4] J. Marcovitch, *Para Mudar o Futuro: Mudanças Climáticas, Políticas Públicas e Estratégias Empresariais*, 1a edição. São Paulo, 2006.
- [5] F. Energia, “Uma Análise Comparativa da Transição Energética na América Latina e Europa,” *FGV Energia*, 2016.
- [6] E. Bueno, *Atlas Brasileiro de Energia Solar*, 2a Edição. São José dos Campos - Brasil, 2017.
- [7] E. De Nys, N. L. Engle, and A. R. Magalhães, *Secas no Brasil: Políticas e gestão proativas*. 2016.
- [8] E. S. P. R. Martins, E. De Nys, C. Molejón, B. Biazeto, R. F. V. Silva, and N. Engle, *Série Água Brasil: Monitor de Secas do Nordeste, em busca de um novo paradigma para a gestão de secas*, no. January. Brasília, DF: Banco Mundial, 2015.
- [9] ANEEL, *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*, 1a Edição. 2002.
- [10] S. Rastogi, A. Singh, and M. P. Upadhyay, “Study of Different Issues and Challenges of Wind Energy Generation,” *Int. J. Adv. Res. Sci. Eng.*, vol. No.5, pp. 380–384, 2016.
- [11] J. Benemann, O. Chehab, and E. Schaar-Gabriel, “Building-integrated PV modules,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 67, no. 1–4, pp. 345–354, 2001.
- [12] R. Rüther, *Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil*. 2004.
- [13] E. Radziemska, “The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells,” *Renew. Energy*, vol. 28, pp. 1–12, 2003.
- [14] T. Barçante, “Influência da Temperatura em Aglomerados Auto-Reconfiguráveis de Células Solares Fotovoltaicas,” Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- [15] Q. A. H. Al-naser, N. M. A. Al-barghoothi, and N. A. S. Al-ali, “The Effect of Temperature Variations on Solar Cell Efficiency,” *Int. J. Eng. , Bus. Enterp. Appl.*, pp. 108–112, 2013.
- [16] M. Green, *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion*, 1a ed. Sydney: Springer, 2003.
- [17] M. Boreland and D. Bagnall, “Current and future photovoltaics,” *Commissioned Report for Office of Science and Innovation – Foresight and Horizon Scanning Centre – Energy Project*, pp. 1–17, 2015.
- [18] V. Fthenakis, *Third Generation Photovoltaics*, 1a ed. Rijeka: InTech, 2012.
- [19] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, and E. D. Dunlop, “Solar cell efficiency tables (Version 45),” *Prog. PHOTOVOLTAICS Res. Appl.*, vol. 45, no. Version 45, pp. 1–9, 2015.
- [20] M. A. Green *et al.*, “Crystalline silicon on glass (CSG) thin-film solar cell modules,” *Sol. Energy*, vol. 77, pp. 857–863, 2004.
- [21] F. Ely and J. Swart, “Energia solar fotovoltaica de terceira geração,” *IEEE*, pp. 138–139, 2014.
- [22] G. Conibeer, “Third-generation photovoltaics,” *Materials today*, vol. 10, pp. 42–50, 2007.
- [23] H. Spanggaard and F. C. Krebs, “A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 83, no. 2–3, pp. 125–146, 2004.
- [24] A. K. Shukla, K. Sudhakar, P. Baredar, and R. Mamat, “Solar PV and BIPV system: Barrier, challenges and policy recommendation in India,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. October, pp. 3314–3322, 2018.
- [25] A. K. Shukla, K. Sudhakar, and P. Baredar, “Recent advancement in BIPV product technologies: A review,” *Energy Build.*, vol. 140, pp. 188–195, 2017.
- [26] E. Guerrero-Gutiérrez, “Communication From the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions,” Europe 2020 Flagship Initiative, Brussels, 2010.
- [27] M. Debbarma, K. Sudhakar, and P. Baredar, “Comparison of BIPV and BIPVT: A review,” *Resour. Technol.*, vol. 3, pp. 263–271, 2016.
- [28] K. N. Shukla, S. Rangnekar, and K. Sudhakar, “Mathematical modelling of solar radiation incident on tilted surface for photovoltaic application at Bhopal, M.P., India,” *Int. J. Ambient Energy*, vol. 37, no. 6, pp. 579–588, 2016.
- [29] G. P. Hammond, H. A. Harajli, C. I. Jones, and A. B. Winnett, “Whole systems appraisal of a UK Building Integrated Photovoltaic (BIPV) system : Energy , environmental , and economic evaluations,” *Energy Policy*, vol. 40, pp. 219–230, 2012.
- [30] J. Peng, L. Lu, and H. Yang, “Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 255–274, 2013.
- [31] C. Peng, Y. Huang, and Z. Wu, “Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 12, pp. 3592–3598, 2011.
- [32] J. J. Bloem, C. Lodi, J. Cipriano, and D. Chemisana, “An outdoor Test Reference Environment for double skin applications of Building Integrated PhotoVoltaic Systems,” *Energy Build.*, vol. 50, pp. 63–73, 2012.
- [33] K. N. Shukla, S. Rangnekar, and K. Sudhakar, “Comparative study of isotropic and anisotropic sky models to estimate solar radiation incident on tilted surface : A case study for Bhopal , India,” *Energy Reports*, vol. 1, pp. 96–103, 2015.

- [34] A. K. Shukla, K. Sudhakar, and P. Baredar, "Simulation and performance analysis of 110 kW p grid-connected photovoltaic system for residential building in India : A comparative analysis of various PV technology," *Energy Reports*, vol. 2, pp. 82–88, 2016.
- [35] E. Biyik *et al.*, "A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 20, no. 3, pp. 833–858, 2017.
- [36] M. Oliver and T. Jackson, "Energy and economic evaluation of building-integrated photovoltaics," *Pergamon*, vol. 26, pp. 431–439, 2001.
- [37] M. Oliver and T. Jackson, "The evolution of economic and environmental cost for crystalline silicon photovoltaics," *Energy Policy*, vol. 28, pp. 1011–1021, 2000.
- [38] C. Herig, "Using photovoltaics to preserve California's electricity capacity reserves." National Renewable Energy Laboratory, 2001.
- [39] B. M. Zilli *et al.*, "Performance and effect of water-cooling on a microgeneration system of photovoltaic solar energy in Paraná, Brazil," *Clean. Prod.*, vol. 192, pp. 477–485, 2018.
- [40] J. Cronemberger, "Integración de sistemas fotovoltaicos en edificios de oficinas en bajas latitudes: estudio del balance energético aplicado a Brasil," Universidad Politécnica de Madrid, 2015.
- [41] H. Yang, J. Burnett, and J. Ji, "Simple approach to cooling load component calculation through PV walls," *Energy Build.*, vol. 31, pp. 285–290, 2000.
- [42] M. Sandberg and B. Moshfegh, "Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer in a Vertical Chnnel Heat From One Side by PV Elements," *Spec. Issue World Renew. Energy Congr.*, vol. 8, pp. 254–258, 1996.
- [43] S. Krauter, R. G. Araujo, S. Schroer, R. Hanitsch, M. J. Salhi, and C. Triebel, "Combined Photovoltaic and Solar Thermal Systems for Facade Integration and Building Insularion," *Sol. Energy*, vol. 67, pp. 239–248, 2000.
- [44] O. Gutschker and H. Rogass, "Simulation of A Photovoltaic Hybrid Facade," in *International Building Performance Simulation Association*, 1997.
- [45] H. Yang, G. Zheng, C. Lou, D. An, and J. Burnett, "Grid-connected building-integrated photovoltaics : a Hong Kong case study," *Sol. Energy*, vol. 76, pp. 55–59, 2004.
- [46] D. Infield, U. Eicker, V. Fux, and L. Mei, "A simplified approach to thermal performance calculation for building integrated mechanically ventilated PV facades," *Build. Environ.*, vol. 41, pp. 893–901, 2006.
- [47] U. Eicker, V. Fux, U. Bauer, L. Mei, and D. Infield, "Façades and summer performance of buildings," *Energy Build.*, vol. 40, pp. 600–611, 2008.
- [48] C. Lodi, P. Bacher, J. Cipriano, and H. Madsen, "Modelling the heat dynamics of a monitored Test Reference Environment for Building Integrated Photovoltaic systems using stochastic differential equations," *Energy Build.*, vol. 50, pp. 273–281, 2012.
- [49] P. Ng, N. Mithraratne, and H. Wei, "Energy analysis of semi-transparent BIPV in Singapore buildings," *Energy Build.*, vol. 66, pp. 274–281, 2013.
- [50] P. Khai and N. Mithraratne, "Lifetime performance of semi-transparent building-integrated photovoltaic (BIPV) glazing systems in the tropics," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 736–745, 2014.
- [51] M. J. Huang, P. C. Eames, and B. Norton, "Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 47, pp. 2715–2733, 2004.
- [52] T. Ma, H. Yang, Y. Zhang, L. Lu, and X. Wang, "Using phase change materials in photovoltaic systems for thermal regulation and electrical efficiency improvement : A review and outlook," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 1273–1284, 2015.
- [53] M. C. Browne, B. Norton, and S. J. McCormack, "Phase change materials for photovoltaic thermal management," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 762–782, 2015.
- [54] R. Rütther, *The first grid-connected, building-integrated, thin film solar photovoltaic installation in Brazil*. 1996.
- [55] R. Zilles and S. Oliveira, "6.3kWp photovoltaic building integration at São Paulo University," in *17th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2001.
- [56] "Inaugurada a primeira central fotovoltaica num estadio do Mundial de Brasil," *PV Magazine: Photovoltaik, Markete & Technologie*, 22-May-2013.
- [57] T. Van del Linden and M. Szabolcs, "Los estadios más solares del mundo," *Suplemento Energías renovables*, pp. 42–48, 2018.
- [58] "A Energia Solar nos Estádios de Futebol do Brasil," *Green Bras: Energia limpa para todos*, 2015. [Online]. Available: <http://greenbras.com/energia-solar/energia-fotovoltaica-no-brasil/a-energia-solar-nos-estadios-brasileiros/>.
- [59] "Ladrilhos Metálicos que Geram Eletricidade," *Csem Brasil*, 2018. [Online]. Available: <http://csembrasil.com.br/en/project/medabil/>. [Accessed: 14-Mar-2019].
- [60] ECOSolarroof, "Solar roof tile," 2017.
- [61] "N330 (VBHN330SJ47)," *solar panel Panasonic Electric Works Europe AG*, 2018. [Online]. Available: <https://eu-solar.panasonic.net/en/solar-panel-vbhn325sj47-vbhn330sj47.htm#>.
- [62] F. P. Marafao, A. M. D. S. Alonso, F. A. S. Goncalves, D. I. Brandao, A. C. G. Martins, and H. K. Morales Paredes, "Trends and Constraints on Brazilian Photovoltaic Industry: Energy Policies, Interconnection Codes and Equipment Certification," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 5, pp. 4017–4027, 2018.
- [63] S. A. Omer, R. Wilson, and S. B. Riffat, "Monitoring results of two examples of building integrated PV (BIPV) systems in the UK," *Renew. Energy*, vol. 28, pp. 1387–1399, 2003.
- [64] B. Agrawal and G. Tiwari, "An Energy and Exergy Analysis of Building Integrated Photovoltaic Thermal Systems," *Energy Sources, Part A Recover. Util.*

- Environ. Eff.*, vol. 33, pp. 649–664, 2010.
- [65] Y. Chen, A. K. Athienitis, and K. Galal, “Modeling , design and thermal performance of a BIPV / T system thermally coupled with a ventilated concrete slab in a low energy solar house : Part 1 , BIPV / T system and house energy concept,” *Sol. Energy*, vol. 84, no. 11, pp. 1892–1907, 2010.
- [66] Y. Chen, K. Galal, and A. K. Athienitis, “Modeling , design and thermal performance of a BIPV / T system thermally coupled with a ventilated concrete slab in a low energy solar house : Part 2 , ventilated concrete slab,” *Sol. Energy*, vol. 84, no. 11, pp. 1908–1919, 2010.
- [67] E. Essah, A. Rodriguez, and N. Glover, “Assessing the performance of a building integrated BP c-Si PV system,” *Renew. Energy*, pp. 1–10, 2014.
- [68] Í. Portolan and R. Rüther, “The potential of building-integrated (BIPV) and building-applied photovoltaics (BAPV) in single-family , urban residences at low latitudes in Brazil,” *Energy Build.*, vol. 50, pp. 290–297, 2012.
- [69] K. Vats and G. N. Tiwari, “Performance evaluation of a building integrated semitransparent photovoltaic thermal system for roof and fac,” *Energy Build.*, vol. 45, pp. 211–218, 2012.
- [70] “Comsol Multiphysics®.” 2014.
- [71] W. Z. Leow *et al.*, “Investigation of solar panel performance based on different wind velocity using ANSYS,” *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 1, no. 3, pp. 456–463, 2016.
- [72] BRASKEM, “Propriedades de Referência dos Compostos de PVC. Boletim Técnico N   3 PVC,” *BRASKEM*, 2012. [Online]. Available: https://www.braskem.com.br/Portal/Principal/Arquivos/html/boletm_tecnico/Tabela_de_Propriedades_de_Referencia_dos_Compostos_de_PVC.pdf.
- [73] IMCPLAS, “Polipropileno (PP),” *IMCPLAS*, 2018. [Online]. Available: <http://incomplast.com.br/polipropilenopp/>.
- [74] INMET, “Consulta Dados da Esta  o Autom  tica: Foz do Iguaçu (PR), 21/12/2017 a 20/03/2018,” *INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA*, 2018. [Online]. Available: http://www.inmet.gov.br/sonabra/pg_dspDadosCodigo_sim.php?QTg0Ng==.
- [75] T. Yamaguchi *et al.*, “Data Analysis on Performance of Pv System Installed in South North Directions,” in *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 2003, pp. 2239–2242.
- [76] M. E. Meral and F. Din  er, “A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 5, pp. 2176–2184, 2011.
- [77] W. Nsengiyumva, S. G. Chen, L. Hu, and X. Chen, “Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): A review,” Elsevier Ltd, 2018.
- [78] V. O. da Silva, “Estudo e modelagem da arquitetura modular de uma usina solar fotovoltaica arrefecida com protótipo de verifica  o,” Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.
- [79] J. L. Bernal *et al.*, “Experimental development of cooling system addressing to photovoltaic power plant in real scale,” *Espacios*, vol. 39 (N   4), p. 33, 2018.
- [80] Y.   ngel and A. Ghaiar, *Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática*, 4ta edi  o. MC Grau Hill, 2012.
- [81] Y.   ngel, J. Cimbala, F. Saltara, K. Burr, and J. Bali  o, *Mec  nica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*, 3ra Edici  . Mc Graw Hill, 2015.
- [82] A. Razak, Y. . Irwan, W. Z. Leow, M. Irwanto, I. Safwati, and M. Zhafarina, “Investigation of the Effect Temperature on Photovoltaic (PV) Panel Output Performance,” *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 6, no. 5, p. 682, 2016.
- [83] T. Bergman, A. Lavine, F. Incropera, and D. Dewitt, *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*, 7ta edi  o. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. (LTC), 2007.
- [84] F. Kreith and M. Bohn, *Princípios de Transferência de Calor*, 6ta edi  o. Learning, CENGAGE, 2003.
- [85] M. M. Salvador, V. Amigo, A. Nuez, O. Sahuquillo, R. Llorens, F., “Caracterización De Fibras Vegetales Utilizadas Como Refuerzo En Matrices Termoplásticos,” *Aimplas*, p. 4, 2008.
- [86] VampTech, “Polipropileno,” *VampTech-Ibérica*, 2018. [Online]. Available: <http://www.vamptech-iberica.com/pp.php>.
- [87]   . N. Caicedo, C., Crespo, L., De La Cruz H., “Propiedades termo-mecánicas del Polipropileno: efectos durante el reprocesamiento,” *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. XVIII, no. 3, pp. 245–252, 2017.
- [88] Essentia, “Información sobre el Polipropileno y Generalidades.” 2017.
- [89] NRMCA, “CIP 35 - Prueba de Resistencia a la Compresión del Concreto,” *El Concreto en la Práctica    Qué, Por qué y cómo?*, 2019. .
- [90] C. Aire, “Concreto permeable: alternativas sustentables,” *Construcción y Tecnología en Concreto*, 2018. [Online]. Available: <http://www.imcyc.com/revistacyt/jun11/arttecnologia.htm>. [Accessed: 31-May-2019].
- [91] L. M. Pinheiro, C. D. Muzardo, and S. P. Santos, “Capítulo 2: Características do Concreto,” in *Estruturas De Concreto*, USP and EESC, Eds. 2004, pp. 2.1-2.10.
- [92] EMONO, “Vantagens e desvantagens da telha de concreto,” *EMONO*, 2019. [Online]. Available: <http://www.emono.com.br/vantagens-desvantagens-telha-de-concreto/>. [Accessed: 04-Feb-2019].
- [93] V. J. R. R. Pita, E. E. M. Sampaio, and E. E. C. Monteiro, “Mechanical properties evaluation of PVC / plasticizers and PVC / thermoplastic polyurethane blends from extrusion processing,” *Polym. Test.*, vol. 21, pp. 545–550, 2002.
- [94] S. Canevarolo, *Ciência dos Pol  meros: Um Texto B  sico Para Tecn  logos e Engenheiros*, 2a edi  o. 2006.
- [95] Influencia de la Tecnología Fotovoltaica en la Producción Energética, “Células fotovoltaicas,”

- Sevilla, 2018.
- [96] J. J. Bloem, “Evaluation of a PV-integrated building application in a well-controlled outdoor test environment,” *Build. Environ.*, vol. 43, pp. 205–216, 2008.
- [97] E. Gedik, “Experimental Investigation of Module Temperature Effect on Photovoltaic Panels Efficiency Modül Sıcaklığının Fotovoltaik Panellerin Verimine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi,” *J. Polytech.*, vol. 19, no. 194, pp. 569–576, 2016.
- [98] K. L. Ray, “Photovoltaic Cell Efficiency at Elevated Temperatures by Photovoltaic Cell Efficiency at Elevated Temperatures,” *Mech. Eng.*, 2010.
- [99] V. J. Fesharaki, M. Deghani, J. J. Fesharaki, and H. Tavasoli, “The Effect of Temperature on Photovoltaic Cell Efficiency,” *Emerg. Trends Energy Conserv. - ETEC*, no. November, pp. 20–21, 2011.



Cristóbal Becerra Díaz Engenheiro de Energia pela Universidade Federal da Integração Latino-Americana, UNILA. Tem experiência nas áreas de síntese de eletrocatalisadores, modelagem de sistemas térmicos e sistemas elétricos, atuando nas áreas: caracterização de grafeno e óxido de grafeno, refrigeração de células de níquel-sódio e modelagem de centrais termelétricas.



Oswaldo Hideo Ando Junior graduado em Engenharia Elétrica e Especialização em Gestão Empresarial pela ULBRA com Mestrado e Doutorado em Engenharia pela UFRGS. Professor da UNILA. Atualmente é consultor ad hoc do CNPq, Revisor de diversas Revistas e Editor Associado da IEEE Latin American Transactions. Atuando nas áreas: Captação de Energia, Conversão de Energia, Qualidade da Energia Elétrica e Sistemas de Potência.