



SIMULAÇÃO TÉRMICA DE SISTEMAS BIPV POR MEIO DO *ENERGYPLUS*

(1) Thiago T. Rodrigues; (2) Joyce C. Carlo

(1) Arquiteto e Urbanista, Mestrando em Arquitetura e Urbanismo, thiago.t.rodrigues@ufv.br

(2) Dr., Arquiteta e Urbanista, joycecarlo@ufv.br

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Avenida P. H. Rolfs, s/n, Campus UFV, 36570-900, Tel.: (31) 3899-2744.

RESUMO

Em países tropicais em que as temperaturas elevadas e a alta taxa de umidade induzem ao uso da ventilação mecânica e do condicionamento artificial, a simulação computacional surge como uma importante ferramenta de análise e previsão do desempenho das edificações. Porém, os *software* apresentam limitações relacionadas à modelagem de determinados parâmetros, como é o caso da simulação de sistemas fotovoltaicos integrados a construção (BIPV) por meio do *EnergyPlus*. Assim, este artigo tem como objetivo investigar os recursos e as limitações do *EnergyPlus* para a simulação de sistemas BIPV, buscando identificar a influência da temperatura operativa dos módulos FV (fotovoltaicos) sobre o desempenho térmico dos edifícios. O método utilizado incluiu uma revisão do manual do *EnergyPlus* e simulações computacionais, onde foram propostos sistemas FV integrados à superfície externa da zona voltada para o norte, composta por diferentes materiais (alvenaria e vidro). O modelo FV e o método de cálculo da temperatura operacional da célula FV também foram variados. As simulações indicaram que o *software* não considera a influência da variação da temperatura de funcionamento da célula FV sobre os cálculos térmicos da zona simulada. Tal fato pode superestimar ou subestimar a carga de consumo para aquecimento ou para arrefecimento, assim como influenciar no cálculo da geração de energia, por não representar a condição real nem fornecer dados precisos de temperatura.

Palavras-chave: simulação computacional, BIPV, desempenho térmico, *EnergyPlus*.

ABSTRACT

In tropical countries where high temperatures and high humidity rates induce the use of HVAC, the computational simulation has become an important tool of analysis and prediction of the performance of buildings. However, software present limitations regarding modeling some parameters, such as the simulation of building integrated photovoltaic systems (BIPV) by *EnergyPlus*. The software presents limitations for the modeling of certain parameters, such as the simulation of BIPV systems through *EnergyPlus*. Then, this paper aims to investigate the features and limitations of *EnergyPlus* to simulate BIPV systems, in order to identify the influence of adopted temperature of operation of PV (photovoltaic) modules on the thermal performance of buildings. The method included a review of the *EnergyPlus* manual and computer simulations, where integrated PV systems were modelled on the external surface of a North facing zone, composed of different materials (masonry and glass). The PV model and the method of calculating the temperature of operation of the PV cells were varied too. The simulations indicated that the software does not consider the influence of the temperature of operation of the PV cells on the thermal calculations of the simulated zone. The mentioned performance may overestimate or underestimate the consumption load for heating or cooling, as well as it may influence the calculation of energy generation because it does not represent the real condition, neither provide accurate temperature data.

Keywords: computer simulation, BIPV, thermal performance, *EnergyPlus*.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Jonsson e Roos (2010), os edifícios são responsáveis pelo dispêndio de 30% a 40% de toda a energia primária consumida no mundo. Para garantir o conforto térmico (arrefecimento ou aquecimento), os mesmos chegam a produzir mais emissões de carbono do que o setor de transportes (WBCSD, 2008). Nesse sentido, a simulação computacional surge como uma ferramenta de análise e previsão do comportamento e do desempenho das edificações, antes mesmo da sua construção ou reforma, consolidando-se como uma alternativa viável de auxílio ao projeto. Entretanto, um modelo simulado é uma representação de uma realidade mais ampla, e os *software* apresentam limitações para a modelagem que devem ser conhecidas, como é o caso da simulação térmica de sistemas BIPV por meio do *EnergyPlus* (PENG; YANG, 2016).

Uma célula FV é um dispositivo que converte a luz solar em eletricidade pelo efeito fotovoltaico. Entretanto, apenas uma pequena parte da radiação solar incidente é convertida em energia elétrica (5 a 25% em sistemas comerciais), o restante é refletido ou transformado em calor (TIWARI; MISHRA; SOLANKI, 2011). O calor gerado no sistema é parcialmente transferido de volta para o meio ambiente, enquanto a outra parte provoca o aumento da temperatura do próprio painel FV (KANT et al., 2016).

Os sistemas BIPV podem formar parte da fachada ou do telhado de uma construção, assim, o calor acumulado na parte posterior dos painéis pode ser dissipado por convecção ou radiação para o espaço interior, contribuindo para o aquecimento do ambiente (VUONG; KAMEL; FUNG, 2015). Jones e Underwood (2001), propuseram um modelo numérico que descreve o cálculo da temperatura do módulo FV de acordo com as condições climáticas. Os dados calculados foram comparados com a temperatura medida em um módulo FV real no Reino Unido, cujos resultados foram próximos e registraram temperaturas entre 27°C e 52°C, para uma temperatura do ar externo de 24,5°C. Porém, o estudo não avaliou a influência da temperatura do módulo FV na eficiência do sistema ou os efeitos térmicos sobre o ambiente interno.

Segundo Wong et al. (2008) a temperatura do painel FV integrado à construção afeta diretamente a geração de energia e a transferência de calor - por radiação ou por convecção - a partir do painel FV para dentro do edifício. Entretanto, devido à falta de estudos relacionados ao comportamento térmico dos sistemas BIPV, e principalmente de sistemas STPV (material fotovoltaico semi-transparente), os cálculos de consumo e de geração de energia para estes sistemas tem sido feitos por meio da utilização da temperatura de materiais envidraçados como sendo a temperatura dos painéis FV (WONG et al., 2005). Contudo, tal método pode gerar dados irreais para o consumo e para a geração de energia. As trocas térmicas entre o painel FV e as superfícies sobre as quais ele está instalado influenciam a temperatura interna do ambiente e, conseqüentemente, às cargas para aquecimento ou para arrefecimento do edifício. Além disso, estas interações térmicas também interferem na temperatura operacional do painel FV, diretamente relacionada com a eficiência do sistema (WONG et al., 2005). É possível encontrar diversos trabalhos na literatura sobre sistemas BIPV (SANTOS; RÜTHER, 2012; SALAMONI et al., 2014; FERREIRA; SCOMPARI; CARIGNANI, 2010), entretanto, a maioria das pesquisas não avalia a geração térmica deste tipo de sistema.

Peng e Yang (2016) demonstraram que os modelos de painéis FV utilizados no *EnergyPlus* não podem simular as interações térmicas dos sistemas BIPV com precisão. Alguns trabalhos foram propostos em resposta à limitação do *EnergyPlus* quanto à simulação de sistemas BIPV. Didoné e Wagner (2013) realizaram a simulação de um ambiente de escritório para obter o consumo de energia e o desempenho térmico por meio do *EnergyPlus*. Entretanto, a produção elétrica do sistema STPV, incorporado às janelas do ambiente, foi calculada sem auxílio do *software*, pois o mesmo não fornece as temperaturas dentro de uma esquadria. Assim, a estimativa da geração elétrica foi feita por meio da determinação da temperatura da célula FV, que considerou cálculos de transferência de calor entre os ambientes. Contudo, as análises não incluíram a influência térmica do STPV na temperatura interna do ambiente simulado.

Vuong, Kamel e Fung (2015) desenvolveram e implantaram um modelo BIPV (chamado BIPVSYSTEM) no código-fonte do *EnergyPlus*. O BIPVSYSTEM determina a temperatura da célula FV e o *EnergyPlus* usa esta temperatura para calcular a tensão e a corrente do painel fotovoltaico e, conseqüentemente, a eficiência da célula FV, que é encaminhada para o *EnergyPlus* prever a produção de energia. O estudo comparou a simulação de painéis FV por meio do *EnergyPlus* e do *software* TRNSYS, que usa das mesmas equações termo-fluidas do *EnergyPlus*. O modelo do *EnergyPlus* gerou 3,23% a mais de energia elétrica e 8,58% a menos de calor durante o ano, quando comparado ao modelo do TRNSYS, apesar de ambos terem utilizado o mesmo arquivo climático. As incongruências são explicadas devido às diferentes na temperatura da célula FV e nos modelos elétricos utilizados pelos programas.

WONG et al. (2008) através de medições de campo de um protótipo em escala, recolheram dados relativos à geração de energia e às características térmicas e óticas de painéis STPV. Os dados colhidos, após serem validados por modelos de cálculo, foram incorporados ao *EnergyPlus* sob a forma de modelos de geração de energia elétrica/térmica para se avaliar o efeito do FV semitransparente no consumo global de

energia de uma edificação residencial localizada em Osaka, no Japão (WONG et al., 2008). Como esperado, os painéis STPV influenciaram no ganho de calor durante o dia, o que contribuiu para reduzir a energia de aquecimento durante o inverno. No entanto, esse ganho de calor resultou em um aumento em torno de 3 a 5 vezes na demanda de arrefecimento durante o verão (WONG et al., 2008).

A partir dos trabalhos aqui discutidos percebe-se uma lacuna na avaliação de como os algoritmos de transferência de calor do *EnergyPlus* lidam com a temperatura operacional do módulo FV, que pode influenciar tanto na eficiência do sistema para a geração de energia, quando no desempenho térmico do edifício.

2. OBJETIVO

Investigar os recursos e as limitações do *EnergyPlus* para a simulação de sistemas BIPV, buscando identificar a influência da temperatura operativa dos módulos FV sobre a temperatura interna e superficial dos ambientes.

3. MÉTODO

Para alcançar o objetivo, o método foi dividido em duas etapas:

3.1. Revisão do Manual do *EnergyPlus*

Esta etapa, teve como objetivo aprofundar os conhecimentos sobre o *software* e buscar informações sobre os recursos fornecidos por ele para a simulação de sistemas BIPV, além de identificar possíveis limitações relacionadas, principalmente, com a influência da temperatura operativa do módulo FV sobre o desempenho térmico da edificação.

Os manuais do *EnergyPlus* disponibilizam uma série de informações sobre o *software*, entre os manuais mais utilizados no desenvolvimento deste trabalho, podemos citar: o manual de engenharia, que contém uma descrição sobre os cálculos e modelos matemáticos utilizados no processo de simulação; e um documento referente aos arquivos de dados de entrada e de saída do programa, usado para entender como modelar os sistemas BIPV e o que é fornecido pelo *software* como produto da simulação.

3.1.1. Modelos de painéis fotovoltaicos do *EnergyPlus*

O *EnergyPlus* dispõe de três modelos diferentes para prever a eletricidade produzida por painéis FV, chamados de: "*Simple*"; "*Equivalent One-Diode*"; e "*Sandia*". A diferença entre eles está relacionada aos algoritmos e aos dados de entrada usados para calcular a energia elétrica produzida. Todos os três compartilham os mesmos modelos para prever a radiação solar incidente, que também são utilizados para os cálculos térmicos (ENERGYPLUS, 2014-a).

Os dados de radiação solar incidente são obtidos a partir de arquivos climáticos, como o TMY2. O *software* associa os modelos FV às superfícies especificadas no arquivo de entrada a fim de definir a área, a localização, a inclinação e a orientação do painel solar para ter acesso aos resultados dos cálculos de insolação de acordo com o modelo de distribuição solar selecionado pelo simulador.

A radiação solar incidente é calculada para incluir os efeitos de sombreamento e reflexão de outras superfícies declaradas no arquivo de entrada (como edifícios e árvores próximas), para isso, o modelo geométrico completo é utilizado (ENERGYPLUS, 2014-b). Da mesma forma, o sombreamento decorrente da superfície do coletor solar em outras superfícies também é considerado de acordo com o modelo de distribuição solar (ENERGYPLUS, 2014-b).

Os três modelos de painéis FV do *EnergyPlus* são descritos abaixo:

- *Simple Model*: o gerador PV *Simple* é o modelo mais simples para a previsão da produção de energia fotovoltaica, podendo ser útil para a análise de projetos em fase inicial, para obter rapidamente uma estimativa dos níveis de produção anual e da potência de pico, sem ter que especificar (ou determinar) os coeficientes de desempenho detalhados de um módulo FV particular (ENERGYPLUS, 2014-a). Neste modelo, o usuário especifica uma eficiência com que as superfícies convertem a radiação solar incidente em eletricidade, podendo ser fixa ou variando segundo um padrão de uso. Os outros dois modelos utilizam relações empíricas para prever com mais precisão o desempenho operacional do sistema FV, com base nas variações da radiação incidente e da temperatura da célula (ENERGYPLUS, 2014-a);

- *Equivalent One-Diode Model*: este é um modelo empírico criado para prever o desempenho elétrico de painéis FV cristalinos (mono e policristalinos), também é conhecido como modelo "TRNSYS PV". Esta opção emprega equações para um modelo de circuito equivalente prevendo as características de corrente e tensão de um único módulo, e os resultados são extrapolados para obter o desempenho de uma matriz de multi-módulos (ENERGYPLUS, 2014-a). O desempenho do sistema FV sob condições operacionais é determinado tanto pela insolação quanto pela temperatura operacional da célula FV (ENERGYPLUS, 2014-a);

- *Sandia Photovoltaic Performance Model*: o terceiro modelo disponível no *EnergyPlus* é chamado de modelo *Sandia*, e é baseado em pesquisas do *Sandia National Laboratory*. O modelo consiste em uma série de relações empíricas com coeficientes que são derivados de medições reais e ensaios experimentais (ENERGYPLUS, 2014-a), diversos deles estão disponíveis na base de dados do *EnergyPlus*.

Assim como no modelo *Equivalent One-Diode*, o núcleo do modelo *Sandia* prediz o desempenho de um único módulo FV, que é extrapolado para obter o desempenho da matriz (ENERGYPLUS, 2014-a).

3.1.2. Métodos de cálculo da temperatura operacional da célula fotovoltaica

Os modelos FV permitem interações com as superfícies externas por meio de equações de balanço térmico. Entretanto, o modelo *Simple* não calcula a temperatura da célula, sendo especificadas eficiências fixas para o sistema, por isso, a influência da temperatura da superfície do edifício sobre a temperatura operacional da célula FV não tem utilidade para este modelo.

O aumento da temperatura da célula de um módulo FV é inversamente proporcional a sua potência elétrica (eficiência). O método de cálculo da temperatura da célula é escolhido pelo usuário no arquivo IDF do *EnergyPlus*. O *EnergyPlus* fornece cinco métodos¹ para a determinação dos dados de temperatura das células, sendo eles:

- "*Decoupled NOCT Conditions*", este método baseia-se nas medições NOCT padrão (*Nominal Operating Cell Temperature*) para calcular a temperatura do módulo em cada interação. A temperatura NOCT é a temperatura de funcionamento do módulo com uma velocidade do vento de 1 m/s, sem carga elétrica, e especificando a insolação e a temperatura ambiente. Os valores para a insolação e para a temperatura ambiente NOCT são geralmente de 800 W/m² e 20°C (ENERGYPLUS, 2014-a);

- "*Decoupled Ulleberg Dynamic*", este é um método dinâmico em que a temperatura operacional da célula é função de uma temperatura prévia da célula e da capacidade térmica do módulo FV (ENERGYPLUS, 2014-a). Este método é o único onde se faz necessária a especificação da capacidade térmica (J/m².K) e do coeficiente de perda de calor (W/m².K) do módulo como campo de entrada (ENERGYPLUS, 2014-b);

- "*Integrated Surface Outside Face*", a temperatura das superfícies externas modeladas no *EnergyPlus*, onde encontra-se o sistema FV, é adotada como a temperatura da célula (ENERGYPLUS, 2014-a);

- "*Integrated Transpired Collector*", a temperatura superficial do coletor solar é adotada como a temperatura da célula (ENERGYPLUS, 2014-a);

- "*Integrated Exterior Vented Cavity*", a temperatura superficial externa de uma cavidade naturalmente ventilada, como no caso de fachadas ventiladas, é utilizada como a temperatura da célula (ENERGYPLUS, 2014-a).

3.2. Simulações

As simulações foram realizadas por meio do *software EnergyPlus*, versão 8.4, com um arquivo TMY para a cidade de Viçosa-MG. A simulação gerou dados para o período de um ano completo, onde o dia 20 de março foi selecionado para análise, por ser uma condição de temperatura média do ar elevada e com boa disponibilidade de radiação na fachada norte. O mês de março apresentou temperatura média do ar de 21,92°C e a altura solar às 12h do dia 20 de março foi de aproximadamente 68°. Não foram consideradas as cargas térmicas de ocupação, de equipamentos e de iluminação artificial, para que a variação da temperatura fosse mais sensível a inserção dos sistemas BIPV sem a interferência de outras fontes de calor.

3.2.1. Caso base

Como mostrado na Figura 1, para o caso base (CB) foi modelado uma construção térrea com o auxílio do *software GoogleSketchUp2014*, de 3m² por 3m de altura, com apenas uma zona térmica e sem sistema FV. A área reduzida teve o intuito de tornar o modelo mais sensível à variação de temperatura interna da zona. Todos os quatro lados do edifício estavam expostos ao sol e ao vento.

A parede Norte foi dividida ao meio, onde em uma das partes foi inserida uma abertura envidraçada com dimensões 1,30m x 2,80m, nomeada JAN1. A outra metade da parede,

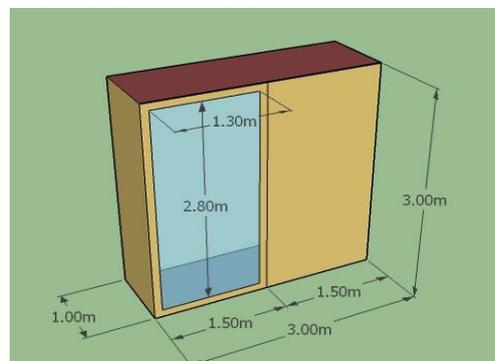


Figura 1 - modelo simulado

¹ O manual do *EnergyPlus* não deixou claro se os cinco métodos podem ser usados tanto para o modelo *Equivalent One-Diode* quanto para o modelo *Sandia*.

nomeada PAR1, manteve os mesmos materiais especificados para as outras paredes, que estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificação dos materiais construtivos utilizados

Componentes	Materiais	Espessura (cm)	Transmitância [W/(m²K)]	Capacidade térmica [kJ/m²K]	Absortância solar
Paredes	argamassa interna e externa	2,0 (cada)	2,46	150	0,3
	tijolo	9,0			
	pintura externa (cor clara)	-			
Cobertura	fibrocimento	0,7	2,06	233	0,7
	camada de ar 2	-			
	laje	10,0			
Janela	Vidro simples	0,3	5,70	-	-

Obs.: Fator solar do vidro = 0,87.

Fonte: ABNT (2005).

3.2.1. Simulação da zona térmica com sistemas BIPV

Durante as simulações, foram propostos sistemas FV integrados à superfície externa da zona voltada para o norte, o módulo FV foi especificado ora na PAR1, ora na JAN1. Assim, buscou-se observar o desempenho térmico dos sistemas BIPV quando estes são integrados a superfícies compostas por diferentes materiais (alvenaria e vidro). As simulações foram realizadas variando o modelo FV entre os modelos *Equivalent One-Diode* (EOD) e *Sandia* (SANDIA), que simulam placas FV de silício cristalino (Figura 2). O modelo *Simple* não fornece a temperatura operacional da célula FV, pois utiliza eficiências fixas para a conversão de energia solar em energia elétrica, logo, não foi usado nas simulações.

Os métodos de cálculo da temperatura operacional da célula FV “*Decoupled*” (DEC), “*Decoupled Ulleberg Dynamic*” (DEC_ULL) e “*Integrated Surface Outside Face*” (ISOF) foram avaliados para o modelo *Equivalent One-Diode*, por outro lado, para o modelo *Sandia*, o método DEC_ULL não pode ser simulado, pois este é um modelo empírico baseado em coeficientes de desempenho e não contém o coeficiente de perda de calor nem a capacidade térmica do módulo FV, necessários para o cálculo da temperatura operacional da célula nesse método. Os métodos “*Integrated Transpired Collector*” e “*Integrated Exterior Vented Cavity*” necessitam de uma modelagem específica, que não faz parte do escopo deste artigo.

O *EnergyPlus* não considera os materiais do painel FV nos cálculos térmicos do ambiente, assim, foi criado o caso Camadas (CAMADAS). Neste, a placa FV foi modelada em forma de camadas, onde cada camada representa um componente que juntos formam um painel FV opaco; as camadas foram sobrepostas aos materiais da parede (PAR1), descritos no item 3.2.1. Porém, este caso analisa apenas as características térmicas dos sistemas FV, não foram utilizados modelos BIPV para prever a produção de energia.

Dessa forma, as análises foram compostas por 1 caso base (CB), 10 casos com modelos BIPV e mais 1 caso simulando os materiais FV, somando 12 simulações no total. Na Figura 2 é apresentado um diagrama com as combinações que formam os casos simulados.

A absortância solar utilizada para o sistema FV foi de 0,9, e as propriedades térmicas dos componente da placa FV estão descritas na Tabela 2.

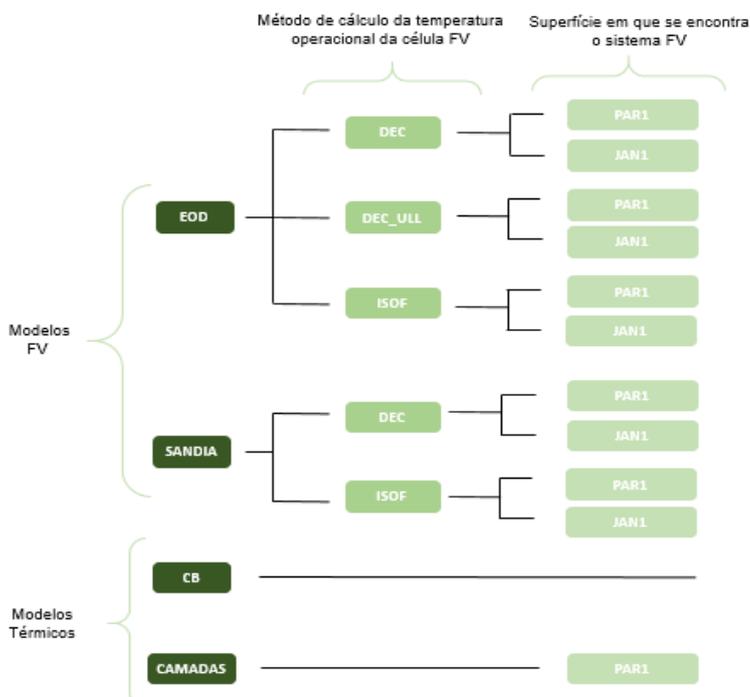


Figura 2 – Diagrama com os casos simulados

Tabela 2 – Propriedades térmicas dos componentes da placa FV

Componentes/camadas	Espessura equivalente (mm)	Condutividade (W/m.k)	Densidade (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.k)
Vidro	4,00	1,13	2300	600
Silício	0,37	148	2300	712
EVA Superior	1,00	0,15	1800	600
EVA Inferior	0,50	0,15	1800	600
Tedlar	0,20	0,24	2100	600
Alumínio	30,00	237	2700	903

Fonte: Andrade (2008).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Método “Decoupled” (DEC)

Para o método DEC, ambos os modelos BIPV (EOD e SANDIA), apresentaram desempenho semelhante (Figura 3). Comparados ao caso base, não houve variação na temperatura superficial externa da parede ou do vidro onde encontrava-se o sistema BIPV e nem variação na temperatura média do ar interno da Zona 1.

Foi observada uma diferença entre a temperatura da célula FV para os modelos BIPV, onde o modelo SANDIA apresentou uma temperatura operacional um pouco mais elevada, com a diferença chegando a aproximadamente 4°C a mais que o modelo EOD no pico de temperatura do gráfico às 13:00 hrs. Tal fato, pode ser explicado pois cada modelo adota uma placa FV específica, com possíveis variações nas propriedades térmicas de seus materiais.

A temperatura operacional da célula FV foi a mesma dentro de cada modelo BIPV, independentemente se a placa FV estava integrada à parede ou à janela, tanto para o modelo EOD quanto para o SANDIA, o que mostra que o tipo de material que recebe o BIPV não interfere no cálculo da temperatura operacional da célula.

O método DEC utilizou a temperatura externa do ar como temperatura da célula FV para o período em que não havia radiação solar suficiente² para a produção de energia elétrica (18:00 às 06:00). Já no período em que havia produção de energia elétrica, a temperatura da célula FV foi superior à temperatura externa do ar, o que pode ser explicado pelas propriedades térmicas da placa FV e pela incidência solar.

Como neste método a capacidade térmica da placa FV não é levada em consideração, a temperatura da célula se iguala à temperatura externa do ar logo após o encerramento do período de radiação solar.

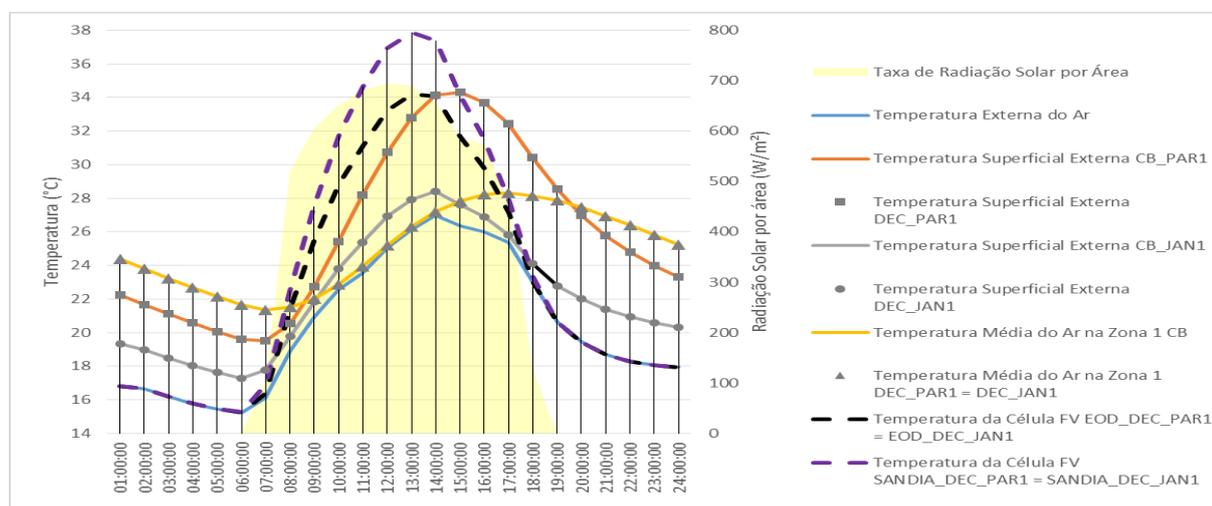


Figura 3 – Temperaturas do método DEC para os modelos EOD e Sandia

4.2. Método “Decoupled Ulleberg Dynamic” (DEC_ULL)

Assim como no método DEC, o método DEC_ULL, comparado ao caso base, não apresentou variações na temperatura superficial externa das superfícies onde encontrava-se o sistema BIPV e nem variação na temperatura média do ar interno da zona térmica (Figura 4). Como explicado no item 3.2.1, este método não pode ser aplicado para o modelo SANDIA.

² Os módulos fotovoltaicos produzem energia elétrica sempre que a energia solar incidente total é maior do que 0,3 Watts (ENERGYPLUS, 2014-a).

A temperatura operacional da célula FV foi a mesma independentemente se a placa FV estava integrada à PAR1 ou à JAN1, seu valor se aproximou da temperatura externa do ar em períodos sem produção de energia elétrica e se elevou nos períodos em que houve geração de energia elétrica, sendo o desempenho da temperatura operacional da célula FV semelhante ao do método DEC. Porém, o método DEC_ULL apresentou temperaturas um pouco mais elevadas que o método DEC.

Além disso, é possível notar um maior atraso térmico para o método DEC_ULL: enquanto no método DEC a temperatura da célula se iguala à temperatura externa do ar logo após o fim do período de produção de energia elétrica, no método DEC_ULL a temperatura da célula se mantém superior à temperatura externa do ar por mais algumas horas. A diferença pode ser explicada pois o método DEC_ULL leva em consideração tanto a capacidade térmica como o coeficiente de perda de calor dos materiais da placa FV, ao contrário do método DEC.

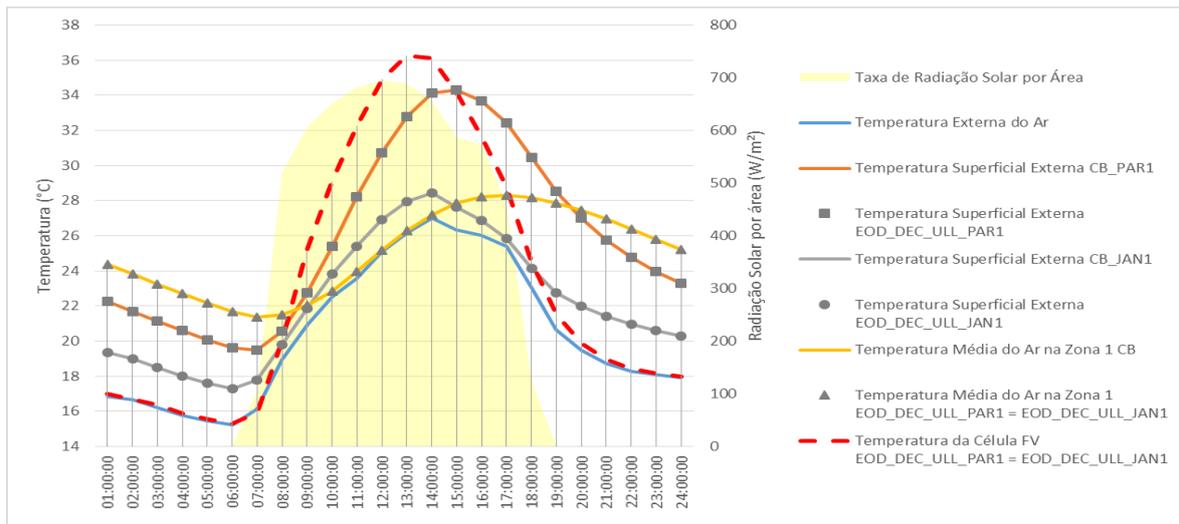


Figura 4 – Temperaturas do método DEC_ULL para o modelo EOD

4.3. Método “Integrated Surface Outside Face” (ISOF)

Como nos outros métodos, o método ISOF, comparado ao caso base, também não apresentou variações na temperatura superficial externa das superfícies onde encontrava-se o sistema BIPV e nem variação na temperatura média do ar interno da Zona 1. Entretanto, este método apresentou mudanças significativas entre os modelos BIPV EOD e SANDIA (Figuras 5 e 6).

Outro aspecto que mudou para este método é que a temperatura operacional da célula FV variou de acordo com a superfície em que a placa FV foi integrada (PAR1 ou JAN1), assim, o tipo de material da superfície interviu na temperatura operacional da célula. Para o modelo EOD, o método ISOF utilizou exatamente a mesma temperatura da superfície em que a placa FV estava localizada como temperatura da célula FV, independentemente da geração de energia elétrica do painel (Figura 5).

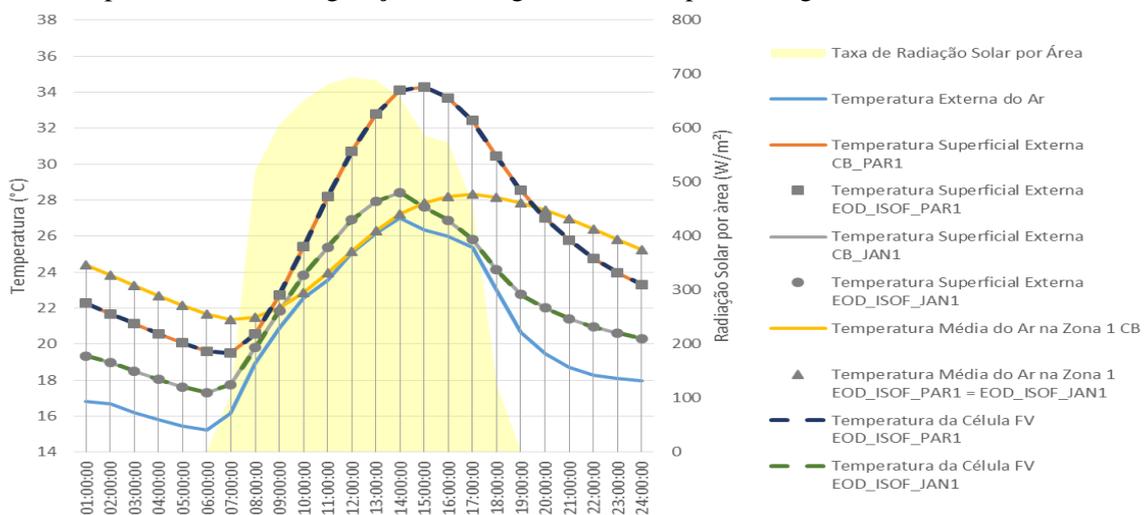


Figura 5 – Temperaturas do método ISOF para o modelo EOD

Já para o modelo SANDIA, no período de 19:00 às 05:00 hrs da manhã, que se aproxima do período sem radiação solar, o método ISOF considerou a temperatura da célula FV como sendo a mesma temperatura do ar externo. Já para o período de 05:00 às 19:00 hrs a temperatura da célula FV se aproximou da temperatura superficial externa da superfície à qual estava localizada (PAR1 OU JAN1), porém os valores não foram exatamente iguais como no modelo EOD (Figura 6).

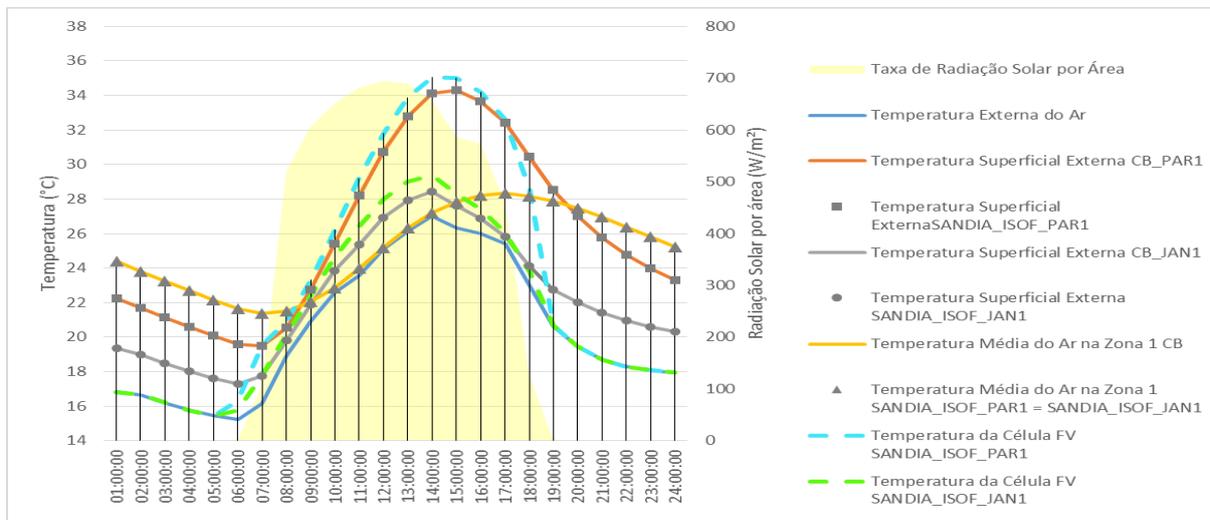


Figura 6 – Temperaturas do método ISOF para o modelo SANDIA

4.4. Caso Camadas (CAMADAS_FV_PAR1)

Para o caso CAMADAS_FV_PAR1, foi analisada a variação da temperatura superficial externa e interna da PAR1. Os materiais que juntos formam uma placa FV foram acoplados aos materiais da PAR1 formando um único componente.

Como esperado, os resultados mostraram uma diferença significativa na temperatura superficial externa da PAR1 em comparação ao caso base (Figura 7). Nos períodos de radiação solar a temperatura superficial do caso CAMADAS_FV_PAR1 chegou a superar o caso base em até 11°C, já em períodos sem radiação solar atingiu até 2°C a menos que o caso base.

Por outro lado, essa diferença na temperatura superficial externa não se refletiu de forma significativa na temperatura do ar interno na Zona1, a diferença entre o caso CAMADAS_FV_PAR1 e o caso base não ultrapassou 1°C. Entretanto vale ressaltar que a dimensão reduzida da PAR1, que não permite a integração de muitas placas FV, e a influência da JAN1, que representa uma área envidraçada significativa para um ambiente com dimensões tão reduzidas, podem ter mascarado os dados da temperatura do ar interno, principalmente, pelos ganhos térmicos através do vidro.

Além disso, o valor simulado para a placa FV neste caso representa apenas uma parte da temperatura da célula, referente às propriedades térmicas dos materiais da placa FV, vale lembrar que a produção de energia elétrica também gera energia térmica, que nessa simulação não foi representada, por isso, este caso não representa de fato a temperatura de operação da célula FV. Observando a variação da temperatura superficial interna da PAR1, para o dia em análise (Figura 8), houve um aumento de até cerca de 4°C, representando uma diferença significativa para a Zona1, que gera impactos na temperatura radiante a que os usuários podem estar submetidos.

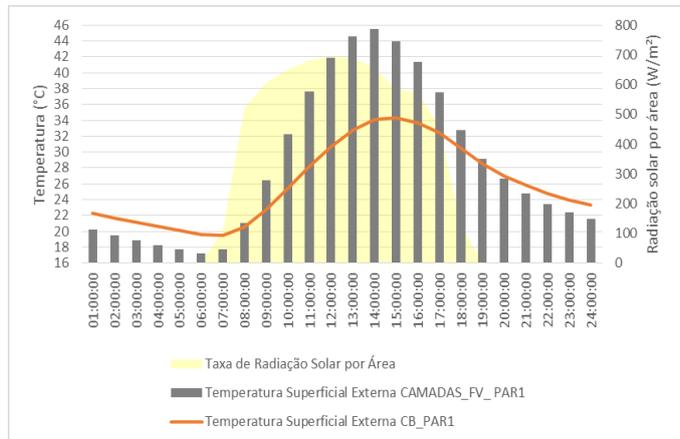


Figura 7 – Temperatura superficial externa da PAR1 para o caso CAMADAS_FV_PAR1

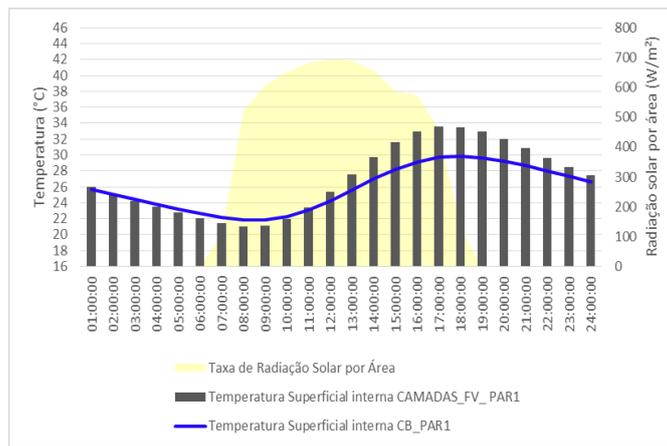


Figura 8 – Temperatura superficial interna da PAR1 para o caso CAMADAS_FV_PAR1

4.5. Análise final da temperatura operacional da célula FV

Na Figura 9 são apresentadas todas as temperaturas das células FV obtidas em cada método de cálculo e a temperatura superficial externa da PAR1 do caso CAMADAS_FV_PAR1.

Comparando todos os casos simulados, nota-se uma diferença muito grande entre os valores encontrados por cada método para a temperatura operacional da célula FV: a diferença entre os extremos de temperatura dos métodos de cálculo chegou a aproximadamente 10°C às 13:00 hrs; e ao incluir o modelo CAMADAS_FV_PAR1 na comparação, a diferença aumenta para aproximadamente 17°C às 14:00 hrs.

Entre os modelos FV (EOD e SANDIA) também houve diferenças para os valores da temperatura da célula, o que pode ser explicado por cada modelo adotar um tipo de placa FV específica (com propriedades térmicas diferentes), entretanto, dentro de cada método aplicado, eles apresentaram valores próximos para a temperatura operacional da célula FV.

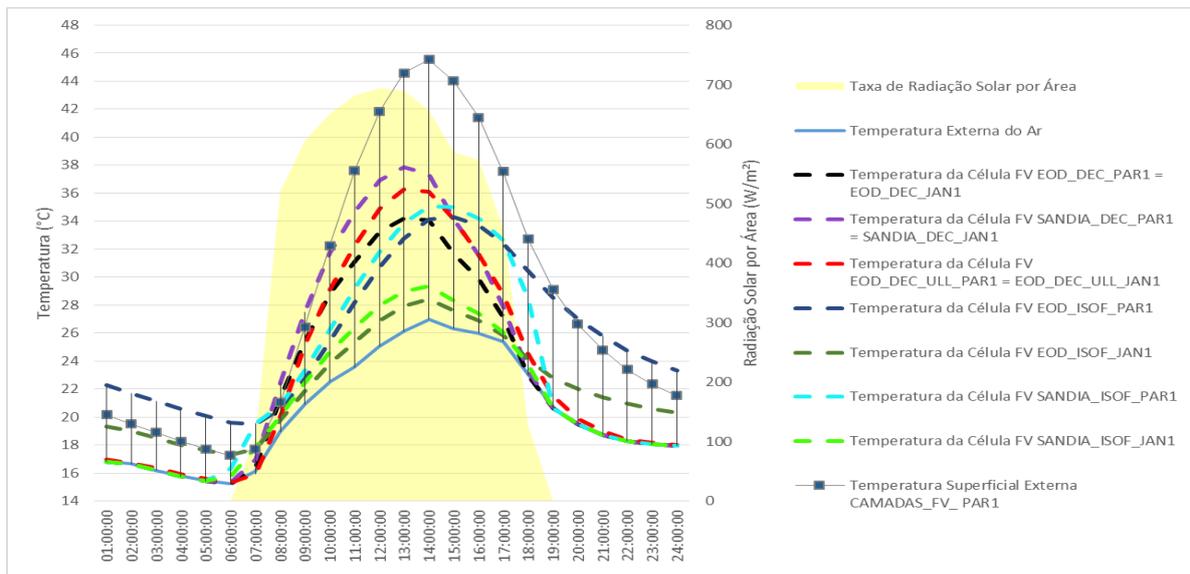


Figura 9 – Temperatura da célula FV para todos os casos simulados

Essas diferenças encontradas podem ser significativas para a previsão da geração de energia elétrica, já que a temperatura da célula FV influencia diretamente na eficiência do sistema. Por isso, um cálculo mais próximo das condições reais de temperatura da célula FV, que considere as propriedades térmicas dos materiais FV, os mecanismos de troca de calor entre o painel e o ambiente (interno e externo) e a produção de energia térmica pela placa durante a produção de energia elétrica são de suma importância para não superestimar a produção de energia elétrica.

5. CONCLUSÃO

As simulações realizadas não identificaram a influência da variação da temperatura de funcionamento da célula FV sobre os cálculos térmicos da Zona simulada, pois não houve variações na temperatura média do ar interno nem na temperatura superficial externa da superfície onde encontrava-se o painel FV, independentemente do material dessa superfície (alvenaria ou vidro).

O *software* fornece diferentes modelos de sistemas FV, entretanto, os testes realizados identificaram que o foco dos modelos está em prever a produção de energia, por meio do cálculo da temperatura de funcionamento da célula FV, que influencia diretamente na eficiência do sistema. Neste caso, um dos métodos do *EnergyPlus* (ISOF) considera a influência da temperatura da superfície do edifício a que o sistema FV é acoplado sobre a temperatura de funcionamento da célula. Entretanto, os modelos de cálculo térmico do *software* não consideram a influência da temperatura do módulo FV (que atingiu valores bem elevados) sobre o ambiente modelado, o que pode afetar a temperatura interna do edifício e, conseqüentemente, o consumo de energia.

O *software*, para calcular a variação de temperatura de funcionamento da célula FV, leva em consideração: a taxa de radiação solar que atinge a superfície do sistema; a tecnologia FV escolhida; o tipo de superfície a que o sistema é acoplado (método ISOF); e o modo como é acoplada. Entretanto, ainda é necessária uma abordagem mais dinâmica na modelagem de sistemas BIPV por meio do *EnergyPlus*, pois existe uma série de mecanismos de transmissão de energia térmica entre o painel e o ambiente, durante o processo de conversão de energia do painel FV, que não são considerados pelo *software*.

Assim, acredita-se que a eficiência simulada afasta-se da real, visto que a temperatura no painel é diferente da temperatura simulada no modelo térmico. Como a eficiência do sistema é função da temperatura de funcionamento da célula FV, a descrição da temperatura do painel traria maior confiabilidade à produção de energia com modelos que integrem os efeitos térmicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, A. C. de. Análise e simulação da distribuição de temperaturas em módulos fotovoltaicos. Porto Alegre, 2008. **Tese** (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- DIDONÉ, E. L.; WAGNER, A. Semi-transparent PV windows: A study for office buildings in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 67, n. 3, p. 136-142, dez. 2013.
- ENERGYPLUS. **Engineering Reference Manual**. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory; 2014-a.
- _____. **Input Output Reference Manual**. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory; 2014-b.
- FERREIRA, A. P.; SCOMPARIN, L. E. L.; CARIGNANI, G. Energia fotovoltaica em edifícios mato-grossenses: viabilidade econômica e energética de janelas fotovoltaicas. XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. ENTAC. **Anais do evento**. Canela, RS, out. 2010.
- JONES, A. D.; UNDERWOOD, C.P. A thermal model for photovoltaic systems. **Solar Energy**, v. 70, p. 349-359, 2001.
- JONSSON, A.; ROOS, A. Evaluation of Control Strategies for Different Smart Window Combinations Using Computer Simulations. **Solar Energy**, v. 84, n. 1, p. 1-9, 2010.
- KANT, K.; SHUKLA, A.; SHARMA, A.; BIWOLE, P. H. Thermal response of poly-crystalline silicon photovoltaic panels: Numerical simulation and experimental study. **Solar Energy**, v. 134, p. 147-155, Set. 2016.
- PENG, C.; YANG, J. The effect of photovoltaic panels on the rooftop temperature in the EnergyPlus simulation environment. **International Journal of Photoenergy**, v. 2016, Article ID 9020567, 2016.
- SALAMONI, I.; DOS SANTOS, I.; ZOMER, C.; RÜTHER, R. Estudo do potencial de contribuição da energia solar fotovoltaica integrada a prédios públicos e interligada à rede elétrica na região sul do Brasil em períodos quentes. XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. ENTAC. **Anais do evento**. Maceió, AL, nov. 2014.
- SANTOS, I. P.; RÜTHER, R. The potential of building-integrated (BIPV) and building-applied photovoltaics (BAPV) in single-family, urban residences at low latitudes in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 50, p. 290–297, jul. 2012.
- TIWARI, G. N.; MISHRA, R. K.; SOLANKI, S. C. Photovoltaic modules and their applications: A review on thermal modelling. **Applied Energy**, v. 88, p. 2287-2304, Fev. 2011.
- VUONG, E.; KAMEL, R. S.; FUNG, A. S. Modelling and simulation of BIPV/T in EnergyPlus and TRNSYS. **Energy Procedia**, v. 78, p. 1883-1888, Nov. 2015.
- WONG, W. P.; SHIMODA, Y.; NONAKA, M.; INOUE, M.; MIZUNO, M. Field study and modeling of semi-transparent PV in power, thermal and optical aspects. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, vol. 4, p. 549-556, Nov. 2005.
- _____. Semi-transparent PV: Thermal performance, power generation, daylight modelling and energy saving potential in a residential application. **Renewable Energy**, vol. 33, p. 1024-1036, Maio 2008.
- W.B.C.S.D. **Energy efficiency in buildings; Business realities and opportunities**. Switzerland (2008).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fapemig pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa.