

THIAGO TOLEDO VIANA RODRIGUES

**A INFLUÊNCIA TÉRMICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS A  
FACHADAS NO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Arquitetura e  
Urbanismo, para a obtenção do título  
de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

R696i  
2018  
Rodrigues, Thiago Toledo Viana, 1990-  
A influência térmica de sistemas fotovoltaicos integrados a  
fachadas no desempenho energético de edificações / Thiago  
Toledo Viana Rodrigues. – Viçosa, MG, 2018.  
xiii, 70 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Joyce Correna Carlo.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Sistemas de energia fotovoltaica. 2. Análise térmica -  
Simulação por computador. 3. Balanço energético (Geofísica).  
4. EnergyPlus (Software). I. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Programa de  
Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. II. Título.

CDD 22. ed. 621.3191

THIAGO TOLEDO VIANA RODRIGUES

**A INFLUÊNCIA TÉRMICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS A  
FACHADAS NO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

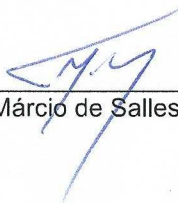
APROVADA: 21 de março de 2018.



Delly Oliveira Filho  
(Coorientador)



Martin Ordenes Mizgier



Túlio Márcio de Salles Tibúrcio



Joyce Correna Carlo  
(Orientadora)

*Aos meus pais.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram na elaboração deste trabalho:

Aos meus pais, por todo apoio ao longo dos anos e por acreditarem, apesar de toda dificuldade que enfrentamos, que este seria o melhor caminho a seguir;

À professora e orientadora Joyce, por despertar em mim o gosto pelo meio científico, pelo incentivo de sempre e, principalmente, para ingressar no mestrado, por estar presente e contribuindo continuamente para o desenvolvimento do trabalho, pelo exemplo de profissionalismo e por todos os ensinamentos ao longo desses anos de parceria;

Ao professor e coorientador Delly, pela oportunidade de participar de uma pesquisa cujo tema me despertou tanto interesse, pelas orientações e contribuições para a elaboração deste trabalho;

Ao professor Heverton, pela disponibilidade e esclarecimentos concedidos;

Aos amigos de Viçosa, que me receberam em suas casas durante o último ano do mestrado, aos quais sempre serei grato (Lara, Júlia, Iris e Tiago);

Aos familiares e amigos de Rio Pomba e Viçosa, por toda paciência, ouvidos, e momentos de descontração proporcionados, que ajudaram a aliviar a pressão e a angústia desses últimos dois anos;

Ao Latecae, PPG.au/UFV, DAU/UFV, funcionários, professores e colegas que fizeram parte dessa jornada, por todas as oportunidades e ensinamentos que me foram concedidos.

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| LISTA DE FIGURAS.....   | viii      |
| LISTA DE TABELAS.....   | x         |
| LISTA DE QUADROS.....   | xi        |
| RESUMO.....   | xii       |
| ABSTRACT.....   | xiii      |
| <br>  |           |
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>1.1 Contextualização.....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1.1 Questão Energética no Brasil.....   | 1         |
| 1.1.2 Energia Solar no Brasil.....  | 2         |
| 1.1.3 Sistemas Fotovoltaicos Integrados à Construção ( <i>BIPV</i> ) .....                  | 4         |
| 1.1.4 Direcionamento da Pesquisa.....   | 6         |
| <b>1.2 Objetivos.....</b>   | <b>6</b>  |
| 1.2.1 Objetivo Geral.....   | 6         |
| 1.2.2 Objetivos Específicos.....  | 7         |
| <b>1.3 Estrutura da Dissertação.....</b>  | <b>7</b>  |
| Referências.....  | 8         |
| <br>  |           |
| <b>2 SIMULAÇÃO TÉRMICA DE SISTEMAS <i>BIPV</i> POR MEIO DO <i>ENERGYPLUS</i>.....</b>       | <b>10</b> |
| RESUMO.....   | 10        |
| <b>2.1 Introdução.....</b>  | <b>10</b> |
| <b>2.2 Objetivo.....</b>  | <b>12</b> |
| <b>2.3 Método.....</b>  | <b>13</b> |
| 2.3.1 Levantamento das características dos modelos fotovoltaicos do <i>EnergyPlus</i> ..... | 13        |
| Modelos de Painéis Fotovoltaicos do <i>EnergyPlus</i> .....                                 | 13        |
| Métodos de Cálculo da Temperatura Operacional da Célula Fotovoltaica.....                   | 14        |
| 2.3.2 Simulações.....   | 15        |

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Caso Base</i> .....   | 16        |
| <i>Simulação da Zona Térmica com Sistemas BIPV</i> .....   | 16        |
| <b>2.4 Resultados e Discussões</b> .....   | <b>18</b> |
| 2.4.1 Método “ <i>Decoupled</i> ” ( <i>DEC</i> ) .....   | 18        |
| 2.4.2 Método “ <i>Decoupled Ulleberg Dynamic</i> ” ( <i>DEC_ULL</i> ) .....  | 19        |
| 2.4.3 Método “ <i>Integrated Surface Outside Face</i> ” ( <i>ISOF</i> ) .....  | 20        |
| 2.4.4 Caso Camadas ( <i>CAMADAS_FV_PAR1</i> ) .....  | 22        |
| 2.4.5 Análise Final da Temperatura Operacional da Célula FV.....   | 23        |
| <b>2.5 Conclusão</b> .....   | <b>24</b> |
| <b>Referências</b> .....   | <b>25</b> |
| <br>   |           |
| <b>3 MODELAGEM TÉRMICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS SEMI-TRANSPARENTES: IMPACTOS NO AMBIENTE INTERNO E NA EFICIÊNCIA DA CÉLULA FOTOVOLTAICA</b> ..... | <b>27</b> |
| RESUMO.....  | 27        |
| <b>3.1 Introdução</b> .....  | <b>27</b> |
| <b>3.2 Objetivo</b> .....  | <b>30</b> |
| <b>3.3 Revisão dos Recursos do <i>Energyplus</i>: Dispositivos de Sombreamento</b> .....   | <b>30</b> |
| <b>3.4 Método</b> .....  | <b>32</b> |
| 3.4.1 <i>Caso Base</i> .....   | 33        |
| 3.4.2 Modelos Térmicos.....  | 34        |
| <i>Caso 1 - Vidro Simples</i> .....  | 34        |
| <i>Caso 2 - Vidro Duplo Air Gap 1mm</i> .....  | 35        |
| <i>Caso 3 – Vidro Duplo Air Gap 6mm</i> .....  | 35        |
| <i>Caso 4 – Vidro Duplo Air Gap 1mm e 12mm</i> .....   | 35        |
| <i>Caso 5 – Vidro Duplo Low Iron e Low-E Air Gap 1mm e 12mm</i> .....  | 36        |
| <i>Zoneamento Térmico do Caso 4 e do Caso 5</i> .....  | 36        |
| 3.4.3 Limitações do Método.....  | 37        |
| <b>3.5 Resultados e Discussões</b> .....   | <b>37</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.5.1 Temperatura Média do Ar na Zona 1.....  | 37        |
| 3.5.2 Temperatura Superficial Interna da Janela.....  | 38        |
| 3.5.3 Temperatura Superficial Externa da Janela.....  | 39        |
| 3.5.4 Eficiência do Sistema FV.....   | 40        |
| <b>3.6 Conclusão.....</b>   | <b>42</b> |
| <b>Referências.....</b>   | <b>43</b> |
| <br>  |           |
| <b>4 INFLUÊNCIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS À CONSTRUÇÃO<br/>NO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS NO<br/>BRASIL.....</b> | <b>45</b> |
| RESUMO.....   | 45        |
| <b>4.1 Introdução.....</b>  | <b>45</b> |
| <b>4.2 Objetivo.....</b>  | <b>47</b> |
| <b>4.3 Trabalhos Correlatos.....</b>  | <b>47</b> |
| <b>4.4 Método.....</b>  | <b>49</b> |
| 4.4.1 Modelo Simulado.....  | 50        |
| 4.4.2 Modelo Fotovoltaico.....  | 54        |
| <b>4.5 Resultados e Discussões.....</b>   | <b>55</b> |
| 4.5.1 Análise do Desempenho Energético.....   | 55        |
| 4.5.2 Influência do <i>BIPV</i> .....   | 57        |
| <i>Florianópolis</i> .....  | 57        |
| <i>Belo Horizonte</i> .....   | 58        |
| <i>Vitória</i> .....  | 58        |
| <i>Fortaleza</i> .....  | 59        |
| 4.5.3 Energia Radiante.....   | 61        |
| 4.5.4 Geração de Energia.....   | 63        |
| <b>4.6 Conclusão.....</b>   | <b>64</b> |
| <b>Referências.....</b>   | <b>65</b> |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSÃO GERAL.....</b>                  | <b>68</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Limitações do Trabalho.....</b>           | <b>69</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Sugestões para Trabalhos Futuros.....</b> | <b>70</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 - Modelo simulado.....  | 16 |
| Figura 2.2 – Diagrama com os casos simulados.....  | 17 |
| Figura 2.3 – Temperaturas simuladas do método <i>DEC</i> para os modelos <i>EOD</i> e <i>Sandia</i> para o dia 20 de março, Viçosa, MG, latitude 20°S..... | 19 |
| Figura 2.4 – Temperaturas simuladas do método <i>DEC_ULL</i> para o modelo <i>EOD</i> para o dia 20 de março, Viçosa, MG, latitude 20°S.....               | 20 |
| Figura 2.5 – Temperaturas simuladas do método <i>ISOF</i> para o modelo <i>EOD</i> para o dia 20 de março, Viçosa, MG, latitude 20°S.....                  | 21 |
| Figura 2.6 – Temperaturas simuladas do método <i>ISOF</i> para o modelo <i>SANDIA</i> para o dia 20 de março, Viçosa, MG, latitude 20°S.....               | 21 |
| Figura 2.7 – Temperatura superficial externa da PAR1 para o caso <i>CAMADAS_FV_PAR1</i> simulada para o dia 20 de março, Viçosa, MG, latitude 20°S.....    | 22 |
| Figura 2.8 – Temperatura superficial interna da PAR1 para o caso <i>CAMADAS_FV_PAR1</i> simulada para o dia 20 de março, Viçosa, MG, latitude 20°S.....    | 23 |
| Figura 2.9 – Temperatura da célula FV de todos os casos simuladas para o dia 20 de março, Viçosa, MG, latitude 20°S.....                                   | 24 |
| Figura 3.1 – Zona térmica 1.....   | 33 |
| Figura 3.2 – Caso Base.....  | 33 |
| Figura 3.3 – Caso 1.....   | 34 |
| Figura 3.4 – Caso 2.....   | 35 |
| Figura 3.5 – Caso 3.....   | 35 |
| Figura 3.6 – Caso 4.....   | 35 |
| Figura 3.7 – Caso 5.....   | 36 |
| Figura 3.8 – Zonas térmicas dos casos 4 e 5.....   | 36 |
| Figura 3.9 – Temperatura Média do Ar na Zona 1 simulada para o dia 20 de março, São Paulo, SP, latitude 23°S.....  | 38 |

|   |           |
|---|-----------|
| Figura 3.10 – Temperatura Superficial Interna da Janela simulada para o dia 20 de março, São Paulo, SP, latitude 23°S.....                                  | <b>39</b> |
| Figura 3.11 – Temperatura Superficial Externa da Janela = Temperatura da Célula FV simulada para o dia 20 de março, São Paulo, SP, latitude 23°S.....       | <b>40</b> |
| Figura 3.12 – Eficiência do Sistema FV simulada para o dia 20 de março, São Paulo, SP, latitude 23°S.....   | <b>41</b> |
| Figura 4.1 – (a) Perspectiva da fachada norte e (b) perspectiva da fachada sul.....   | <b>51</b> |
| Figura 4.2 – Zoneamento térmico dos pavimentos inferiores.....  | <b>51</b> |
| Figura 4.3 – Zoneamento térmico dos pavimentos superiores.....  | <b>51</b> |
| Figura 4.4 – Teto das zonas do décimo quinto pavimento.....   | <b>52</b> |
| Figura 4.5 – (a) Perspectiva da fachada norte e (b) pavimentos simulados.....   | <b>52</b> |
| Figura 4.6 – Modelo de esquadria adotado.....   | <b>55</b> |
| Figura 4.7 – Usos finais do consumo anual de energia do Caso Base para cada cidade.....   | <b>56</b> |
| Figura 4.8 – <i>Benchmarking</i> do consumo anual do Caso Base para as 4 cidades:<br>(a) Florianópolis; (b) Belo Horizonte; (c) Vitória; (d) Fortaleza..... | <b>57</b> |
| Figura 4.9 – Diferença entre a temperatura radiante média do Caso FV e do Caso Base na Zona 7 do pavimento 8 de 8h às 18h para o período de um ano.....     | <b>62</b> |
| Figura 4.10 – Balanço anual de energia com a concessionária para Belo Horizonte.....  | <b>64</b> |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Especificação dos materiais construtivos utilizados.....  | 16 |
| Tabela 2.2 – Propriedades térmicas dos componentes da placa FV.....  | 18 |
| Tabela 3.1 – Especificação dos materiais construtivos utilizados.....  | 33 |
| Tabela 3.2 – Propriedades térmicas dos vidros e do sistema <i>STPV</i> utilizados nas simulações.....                                  | 34 |
| Tabela 4.1 – Especificação dos materiais construtivos utilizados.....  | 53 |
| Tabela 4.2 – Cargas térmicas adotadas nos modelos simulados.....   | 54 |
| Tabela 4.3 – Propriedades térmicas e óticas dos vidros e do sistema <i>STPV</i> utilizados nas simulações.....                         | 54 |
| Tabela 4.4 – Comparação do consumo anual de energia entre o Caso Base e o Caso FV de Florianópolis.....                                | 58 |
| Tabela 4.5 – Comparação do consumo anual de energia entre o Caso Base e o Caso FV de Belo Horizonte.....                               | 58 |
| Tabela 4.6 – Comparação do consumo anual de energia entre o Caso Base e o Caso FV de Vitória.....                                      | 59 |
| Tabela 4.7 – Comparação do consumo anual de energia entre o Caso Base e o Caso FV de Fortaleza.....                                    | 59 |
| Tabela 4.8 – Ganhos e perdas pelas janelas da Zona 7/ pavimento 8 para o mês mais frio e mais quente de Florianópolis e Fortaleza..... | 61 |
| Tabela 4.9 – Temperaturas radiantes mínimas e máximas anuais do Caso Base e do Caso FV na Zona 7 do pavimento 8 de 8h às 18h.....      | 62 |
| Tabela 4.10 – Comparação da energia FV gerada com a energia elétrica consumida para um ano.....  | 63 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 4.1 – Características das cidades simuladas..... | 50 |
|---|----|

## RESUMO

RODRIGUES, Thiago Toledo Viana, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2018. **A influência térmica de sistemas fotovoltaicos integrados a fachadas no desempenho energético de edificações.** Orientadora: Joyce Correna Carlo. Coorientador: Delly Oliveira Filho.

Os sistemas fotovoltaicos integrados a construção (*BIPV*, do inglês *Building Integrated Photovoltaic*) podem formar parte da fachada ou da cobertura de uma edificação, assim, o calor acumulado na parte posterior dos painéis pode ser dissipado para o espaço interno da zona. Esta troca de calor pode contribuir para o aquecimento do ambiente interno, ou ainda, provocar o aumento da temperatura de funcionamento da célula fotovoltaica, que afeta negativamente a eficiência de conversão/geração de energia do próprio sistema fotovoltaico (FV). Neste sentido, este trabalho teve como objetivo investigar a influência de sistemas *BIPV* integrados a fachadas no desempenho energético de edificações comerciais para o clima brasileiro, ao avaliar a influência do calor gerado pelo material FV na temperatura interna do ambiente simulado e na eficiência do próprio sistema FV. O método utilizado é baseado em simulações computacionais por meio do *software EnergyPlus*. Porém, outros estudos já demonstraram que os modelos de painéis FV disponíveis no *software* não podem simular com precisão as interações térmicas entre os sistemas *BIPV* e o ambiente simulado. Assim, este trabalho propôs um método para a simulação de sistemas *BIPV* por meio do *EnergyPlus*, levando em consideração as propriedades térmicas dos materiais FV. Foram desenvolvidos dois métodos de simulação para sistemas *BIPV*, um para sistemas opacos e outro para sistemas fotovoltaico semi-transparentes (*STPV*, do inglês *Semi-Transparent Photovoltaic*). As simulações comprovaram que os sistemas *BIPV* influenciam as condições de conforto térmico do ambiente, tanto pelo acréscimo na temperatura média do ar interno, quanto pelo aumento da própria temperatura superficial interna dos ambientes, que neste chegou a superar o Caso Base em até 17,4°C. A eficiência do sistema apresentou perdas de até 7% devido ao acréscimo de temperatura da célula FV, porém, acredita-se que esta redução será sentida apenas em sistemas de geração em larga escala. Ao avaliar as diferenças entre o consumo de um edifício condicionado artificialmente com e sem material fotovoltaico, houve variação de acordo com a Zona Bioclimática (ZB) devido aos materiais construtivos adicionais adotados na tipologia *STPV*, em especial o modelo de janelas com vidro duplo. Na ZB3, Florianópolis e Belo Horizonte, o uso de sistemas *STPV* aumentou o consumo de energia com Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) em cerca de 8% e 3%, respectivamente, enquanto na ZB8, Vitória e Fortaleza, o sistema *STPV* reduziu este consumo em cerca de 1%. No entanto, o saldo entre o aumento do consumo por ar condicionado e a geração de energia foi positivo em todas as cidades, representando 7% do consumo anual da torre de escritórios no pior caso (Florianópolis) e 10% no melhor (Belo Horizonte).

## ABSTRACT

RODRIGUES, Thiago Toledo Viana, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2018. **The thermal influence of integrated photovoltaic systems on facades in the energy performance of buildings**. Adviser: Joyce Correna Carlo. Co-adviser: Delly Oliveira Filho.

Building Integrated Photovoltaic systems (BIPV) may be part of facade or building roof, so, the accumulated heat at the back of the panels can be dissipated to the internal space of the zone. This heat exchange may contribute to increase the temperature of interior rooms or, even more, to increase the operating temperature of the photovoltaic cell, which affects negatively the conversion/ power generation efficiency of the photovoltaic (PV) system itself. Then, this work aimed investigate the BIPV systems' influence integrated to facades in the energy performance of commercial buildings under Brazilian climates, by evaluating the influence of the heat generated by the PV material on the interior temperature of the simulated area and on the efficiency of the system PV itself. The applied method is based on computational simulations using the EnergyPlus software. However, as already pointed in other studies, PV panel models available in the software can not accurately simulate the thermal interactions between the BIPV systems and the simulated environment. Thus, this work proposes a method for the simulation of BIPV systems through EnergyPlus according to PV materials thermal properties. Two simulation methods were developed for BIPV systems, one for opaque system and other for Semi-Transparent Photovoltaic systems (STPV). After the simulations, it has been proven that BIPV systems influence the interior rooms thermal comfort conditions, through the mean air temperature or the surface temperature increase, which was up to 17.4°C higher than the Base Case. The system efficiency had losses up to 7% due to the PV cells temperature increase, however, it is believed that this reduction will only be effective in large-scale generation systems. When evaluating the differences between the consumption of an artificially conditioned building with and without photovoltaic material, there was a variation according to the bioclimatic zone (ZB) due to the other building materials adopted in STPV typology, especially because of double glazed windows. In ZB3, Florianópolis and Belo Horizonte, the use of STPV systems enhanced in 8% and 3%, respectively, the energy consumption with Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC), while in ZB8, Vitória and Fortaleza, the STPV system reduced this consumption in about 1%. Nevertheless, the balance between increased air conditioning consumption and power generation was positive in all cities, representing 7% of the annual consumption of the offices tower in the worst case (Florianópolis) and 10% in the best (Belo Horizonte).

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

### 1.1.1 Questão Energética no Brasil

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN, 2017), no ano de 2016 no Brasil, os setores residencial e serviços juntos foram responsáveis por 14,6% do consumo final de energia e 51,0% do consumo total de eletricidade no país. No Brasil, as energias renováveis contribuem com 43,5% da matriz energética, um valor elevado em comparação aos 13,5% da média mundial. Entretanto, 82% dessa energia são provenientes das usinas hidroelétricas centralizadas (BEN, 2017). Estas, apesar de serem uma fonte renovável de energia, apresentam uma capacidade de crescimento limitada, por causarem uma série de impactos econômicos, ambientais e sociais.

A geração de energia elétrica no Brasil nos últimos anos tem sido comprometida pelo aumento do consumo e pelo baixo nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas causado por uma redução significativa no volume de chuvas. No ano de 2001, a escassez de chuvas combinada com a falta de planejamento levou o Brasil ao racionamento de energia elétrica (XAVIER, 2015).

Uma década depois, devido à falta de chuvas regulares, a partir do fim de 2012 e início de 2013, e que se estendem até o momento de redação desta dissertação (2017), os níveis dos reservatórios das hidroelétricas encontram-se baixos novamente, cenário este que tende a se repetir (XAVIER, 2015). Esse fato, aliado às restrições cada vez maiores à construção de novas usinas hidrelétricas e ao rápido crescimento da demanda, levou ao acionamento de usinas térmicas que antes eram utilizadas somente em situações emergenciais, além da construção de novas usinas movidas a carvão, a gás natural, a óleo diesel e a óleo combustível, gerando um enorme custo extra, que se reflete no aumento do valor das tarifas de energia, e lançando na atmosfera toneladas de gases poluentes que intensificam o efeito estufa (BEN, 2017).

Assim, é fundamental reestruturar o setor energético e buscar uma maior diversificação da matriz nacional. Uma estratégia baseada em dois eixos - geração distribuída<sup>1</sup> e eficiência energética (desde a geração até o uso final) - seria uma alternativa face às dificuldades futuras no suprimento energético do país (RUTHER; SALAMONI, 2011).

---

<sup>1</sup> A geração distribuída consiste na geração elétrica próxima do(s) consumidor(es), sem necessidade de centralização em usinas geradoras distantes do meio urbano.

### 1.1.2 Energia Solar no Brasil

O aproveitamento direto da radiação solar se apresenta dentre todas as Fontes Renováveis de Energia (FRE), como a mais abundante, inesgotável e limpa (JELLE; BREIVIKB; ROKENESB, 2012). Durante o período de um dia, a radiação solar sobre a terra fornece cerca de 10.000 vezes mais energia do que a necessidade diária global (JELLE; BREIVIKB; ROKENESB, 2012), tendo ainda a possibilidade de ser gerada próxima ao ponto de consumo, eliminando-se uma série de problemas relativos aos sistemas tradicionais de geração e distribuição de energia elétrica (PAIXÃO, 2013). O potencial de uso real da tecnologia deve ser desmistificado: “Cobrindo-se o lago de Itaipu com módulo solares de filmes finos comercialmente disponíveis, (...) seria possível gerar o dobro de energia gerada por Itaipu, ou o equivalente a 50% da eletricidade consumida no Brasil.” (RUTHER, 2004). Além disso, os módulos fotovoltaicos não emitem qualquer tipo de poluente ou ruído para geração de energia, sendo a poluição a eles associada presente apenas na fabricação e descarte, em níveis muito menores que a poluição proveniente de usinas térmicas (KANG et al., 2012).

O desafio está em utilizar esta energia disponível a um custo razoável. Porém, os custos atuais da produção de painéis solares fotovoltaicos atingiram mínimos históricos desde sua invenção em 1950. Tal fato reflete os avanços em diferentes vertentes, como a eficiência, a durabilidade, os custos e as tecnologias de produção (NOGUEIRA; PAIVA; RESENDE, 2013). A diminuição dos custos da tecnologia FV (Fotovoltaica), associada ao aumento dos preços da eletricidade em geral, têm ajudado na sua disseminação, o que poderá ser intensificado a partir da paridade tarifária – momento em que a energia elétrica FV atinge o mesmo custo da geração convencional – esperada para a presente década (ZOMER et al., 2011).

O Brasil ainda não apresenta muitas ferramentas de incentivo ao uso de energia FV. Dentre os programas do governo relacionados à energia elétrica tem-se o Procel<sup>2</sup> (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica). O Procel promove por meio do Programa Brasileiro de Etiquetagem<sup>3</sup> (PBE Edifica) do Inmetro, os procedimentos para a avaliação da eficiência energética de edificações residenciais, comerciais, de serviços e públicas, que confere a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) para as edificações. Desenvolveram-se os Requisitos Técnicos da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de

---

<sup>2</sup> O programa é coordenado pelo Ministério de Minas e Energia – MME, e executado pela Eletrobrás. O Procel foi instituído em 1985 para promover o uso eficiente da energia elétrica e combater o seu desperdício.

<sup>3</sup> PBE é um amplo programa de conservação de energia, coordenado pelo Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial), que utiliza a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) para informar a eficiência energética dos produtos consumidores de energia comercializados no país. O PBE Edifica se apresenta como um subprograma dentro do PBE.

Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), em 2009, e o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), em 2010. Estes fornecem requisitos técnicos e métodos para a classificação das edificações, além de critérios de bonificação, que são possibilidades para aumentar a eficiência energética da edificação. A geração de energia FV se apresenta como uma das possibilidades de bonificação para o RTQ-C.

Desde agosto de 2014, tornou-se obrigatória – por meio da Instrução Normativa SLTI n.º 2/2014<sup>4</sup> - a obtenção da ENCE Geral de Projeto classe “A”, assim como a obtenção da ENCE Geral da Edificação Construída classe “A” para edificações públicas federais. Embora não seja obrigatória para todos os edifícios, a etiquetagem fornece informações importantes aos consumidores, empreendedores e proprietários, como o nível de eficiência do produto, e passa a ser um diferencial competitivo para as construtoras. Além da disponibilidade de linhas de financiamento especiais para edifícios etiquetados, como por exemplo a “Linha de Apoio ao Comércio e Serviços”, fornecida pelo BNDES.

Entretanto, são necessários mais incentivos para que a energia FV possa conseguir espaço significativo no mercado energético brasileiro. Nesse sentido, duas resoluções normativas da ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica – podem criar novas expectativas para o mercado FV no Brasil, a Resolução Normativa Nº 482 (ANEEL, 2012), que determina que as concessionárias de energia elétrica devem se adequar à possibilidade de microgeração<sup>5</sup> e minigeração<sup>6</sup> distribuída pelos consumidores, bem como introduzir e regulamentar o sistema de compensação<sup>7</sup> de energia elétrica; e a Resolução Normativa Nº 687 (ANEEL, 2015) que atualizou a RN 482, aumentando o potencial de uso da energia FV no país ao ampliar o escopo da mini e microgeração distribuída e permitir a geração compartilhada de energia elétrica.

No meio urbano, as tecnologias mais apropriadas para a geração elétrica são as fontes renováveis como a solar e a eólica. Considerando as condições brasileiras de ventilação e insolação, o Brasil dispõe de grande potencial para o aproveitamento da energia solar, dada sua localização geográfica. O país é, particularmente, privilegiado por ter alto nível de radiação

---

<sup>4</sup> A Instrução Normativa SLTI n.º 2/2014 dispõe sobre as regras para a aquisição ou locação de máquinas e aparelhos consumidores de energia e o uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) nos projetos e respectivas edificações públicas federais novas ou que recebam *retrofit*.

<sup>5</sup> Central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2015).

<sup>6</sup> Central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2015).

<sup>7</sup> Sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa (ANEEL, 2015).

solar: sua região menos ensolarada recebe aproximadamente 25% mais irradiação solar do que a região mais ensolarada da Alemanha (REN21, 2008).

Uma característica peculiar da tecnologia fotovoltaica é o fato de o módulo FV, devido sua área e peso reduzido, poder estar integrado à envoltória da edificação, gerando energia no próprio local de consumo e evitando perdas durante o processo de transmissão e distribuição (ZOMER et al., 2011). Dessa forma, o custo da energia FV pode ser comparado com tarifas de consumidor final, ao invés de ser comparado com custos de energia na planta de geração (ZOMER et al., 2011). Tal fato, por si só, justificaria a utilização da energia solar FV de forma distribuída em um país de dimensões continentais como o Brasil (RUTHER; SALAMONI, 2011).

Os sistemas FV apresentam duas configurações principais: isolados (ou autônomos) e conectados à rede elétrica. A diferença fundamental entre eles é a existência de um sistema acumulador de energia, onde a energia gerada pelos módulos solares é armazenada e distribuída aos pontos de consumo (sistemas isolados). Os sistemas FV interligados à rede elétrica atuam como usinas geradoras de energia elétrica em paralelo às grandes centrais, fornecendo o excedente de eletricidade gerada para a rede em horários de pouca demanda interna. Tal arranjo torna desnecessário o armazenamento da energia em acumuladores (baterias), diminuindo significativamente os custos totais, minimizando a manutenção e aumentando a vida útil dos sistemas.

Do ponto de vista da concessionária, a geração distribuída utilizando sistemas fotovoltaicos pode contribuir para aliviar a carga no sistema de distribuição de energia, prolongar a vida útil dos componentes da rede e adiar investimentos para ampliação e expansão dos sistemas elétricos. Além disso, existem também benefícios técnicos para as redes de energia como melhoria do perfil de tensão, redução das perdas e aumento da confiabilidade (XAVIER, 2015).

### 1.1.3 Sistemas Fotovoltaicos Integrados à Construção (*BIPV*)

A incorporação de células FV em produtos tais como telhas, janelas, toldos e fechamentos transparentes (panos de vidro), ou integradas à arquitetura em substituição a elementos construtivos da edificação, como coberturas, fachadas e elementos de sombreamento, tem-se mostrado solução versátil e econômica, além de fornecer uma resposta ao espaço necessário para a instalação de painéis fotovoltaicos em áreas urbanas já consolidadas (JELLE; BREIVIKB; ROKENESB, 2012). Dessa forma, o material fotovoltaico deixa de ser instalado apenas sobre superfícies existentes e passa a constituir parte funcional do envelope, servindo como elemento construtivo e gerador de energia simultaneamente. Esse sistema de geração de energia é conhecido como *Building Integrated Photovoltaic (BIPV)*, ou Sistemas Fotovoltaicos Integrados a Construção.

Essa abordagem pode proporcionar economias em materiais e mão de obra, em que o custo do material de construção substituído pelos módulos fotovoltaicos é descontado do valor do módulo, além de reduzir os gastos com eletricidade (JELLE; BREIVIKB; ROKENESB, 2012).

A inserção da energia FV no ambiente urbano não ocorre somente para uso residencial mas, também, em edificações comerciais e industriais. Muitas vezes, os picos de consumo desses setores ocorrem nos períodos mais quentes do dia, devido ao aumento do consumo para climatização de ambientes. Sendo assim, a energia solar FV se torna extremamente favorável, pois são também nesses períodos que ocorre a maior incidência de radiação solar, auxiliando na redução da sobrecarga da rede e suprimindo a demanda extra (RUTHER; SALAMONI, 2011).

O problema é que as tipologias comerciais tendem a apresentar uma área de cobertura mais reduzida para a instalação de sistemas solares FV e, dificilmente, conseguiriam suprir todo o consumo energético da edificação (SALAMONI, 2004). Entretanto, existe a possibilidade dos sistemas fotovoltaicos virem associados a mecanismos de proteção solar (brises), vidros<sup>8</sup> e como parte constituinte da fachada, sistemas *BIPV*.

Em seu estudo, Redweik et al. (2013) mostrou que, embora a irradiação anual em fachadas verticais seja menor do que a de superfícies mais favoráveis (telhados), devido a suas áreas muito grandes, o potencial de energia solar das fachadas é relevante para o potencial de geração de energia solar de um edifício.

O sistema *BIPV*, integrado às edificações comerciais e interligado à rede elétrica, é um exemplo ideal de fonte geradora de energia (RUTHER; SALAMONI, 2011). O desenvolvimento de sistemas *BIPV* tem ocorrido nos últimos 30 anos, mas suas aplicações práticas têm sido lentas em comparação com sistemas de energia solar fotovoltaica montados em *rack* convencional. Uma das principais razões é que as barreiras técnicas, que abrangem desde a fase de concepção até à fase de comissionamento e manutenção, não foram inteiramente compreendidas pelas partes interessadas (AZADIAN; RADZI, 2013).

Além da geração de energia elétrica, o uso de sistema *BIPV* influencia a demanda de energia para aquecimento, arrefecimento e iluminação, bem como o conforto térmico e visual no interior do edifício. Entretanto, essas influências ainda foram pouco estudadas para locais de clima quente (baixas latitudes), como é o caso do Brasil.

---

<sup>8</sup> Sistemas fotovoltaicos semitransparentes (*STPV*) integrados aos vidros podem ser usados para reduzir os ganhos de calor solar e gerar eletricidade, enquanto continuam a permitir iluminação natural adequada e vista para o exterior. Isso é possível, devido ao maior ou menor grau de transparência conseguido através do distanciamento entre as células fotovoltaicas (opacas), normalmente entre 3 e 50mm (JELLE; BREIVIKB; ROKENESB, 2012).

#### 1.1.4 Direcionamento da Pesquisa

Os sistemas fotovoltaicos se apresentam como uma tecnologia de uso promissor no país diante dos problemas relacionados com a crise energética desde a década de 2010, da tendência mundial de utilização de fontes renováveis de energia mais sustentáveis, dos apontamentos do mercado para sua maior competitividade econômica e das vantagens tanto para o consumidor quanto para as agências de fornecimento de energia elétrica, além dos incentivos advindos das resoluções normativas da ANEEL.

Entretanto, o uso de sistemas fotovoltaicos, especialmente sistemas *BIPV*, ainda não é muito difundido no país e pouco se sabe a respeito de suas influências sobre as edificações localizadas em climas quentes como o do Brasil, principalmente, com relação ao desempenho energético. Assim, torna-se necessário o desenvolvimento de pesquisas na área, objetivando a análise dessas influências para identificar vantagens e desvantagens na utilização desta tecnologia, para estabelecer bases e recomendações para a sua inserção na realidade construtiva brasileira.

Além disso, nos centros urbanos, onde se encontra as maiores densidades construídas, há uma predominância de edificações de múltiplos pavimentos. Nesses casos, devido à reduzida disponibilidade de superfícies horizontais para a instalação de painéis fotovoltaicos, é necessária a avaliação do potencial das superfícies verticais como local de instalação de sistemas fotovoltaicos.

A principal contribuição deste estudo consiste em identificar orientações básicas a se considerar na elaboração de projetos de edifícios que explorem as fachadas para a geração de eletricidade através de sistemas *BIPV*. O mesmo é um subprojeto do projeto *Análise da Viabilidade da Energia Fotovoltaica no Brasil em Face do Marco Regulatório da Geração Distribuída no Setor Elétrico Brasileiro - Aneel RN 482/12*, aprovado pela Cemig – Companhia Energética de Minas Gerais e pela FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais. O projeto é uma parceria entre a empresa Cemig Distribuição, a PUC-Minas Gerais e sob coordenação da UFV, cujos departamentos de Engenharia Agrícola e de Arquitetura e Urbanismo estão envolvidos, e tem como objetivo geral estudar a influência das externalidades na análise da viabilidade da energia fotovoltaica no Brasil.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Investigar a influência de sistemas fotovoltaicos integrados à fachada no desempenho energético de um edifício de escritórios para o clima brasileiro.

## 1.2.2 Objetivos Específicos

- O.E.1 - Investigar os recursos e as limitações do *software EnergyPlus* para a simulação de sistemas *BIPV*, buscando identificar a relação entre a temperatura operativa dos módulos fotovoltaicos e a temperatura interna e superficial do ambiente simulado;

- O.E.2 - Investigar a modelagem térmica de sistemas fotovoltaicos semi-transparentes, para avaliar os impactos gerados no desempenho térmico do ambiente interno e na eficiência da célula fotovoltaica;

- O.E.3 - Investigar a influência de sistemas *BIPV* no desempenho energético de um edifício de escritórios para diferentes latitudes brasileiras.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

Este trabalho foi estruturado na forma de capítulos, além da capa e de elementos pré-textuais que compõem uma dissertação (folha de rosto, página de aprovação, dedicatória, agradecimentos, sumário, lista de figuras, lista de quadros, resumo e *abstract*).

Foram elaborados cinco capítulos:

(1) o primeiro capítulo contém a introdução ao tema e os objetivos;

(2) o segundo capítulo consiste em um artigo que investiga o primeiro objetivo específico (O.E.1), que está relacionado aos recursos e as limitações do *EnergyPlus* quanto à simulação de sistemas *BIPV*. Neste capítulo foram realizadas simulações para a cidade de Viçosa-MG, por esta ser a sede da instituição onde a pesquisa foi desenvolvida, mesmo sendo uma cidade de pequeno porte e pouco conhecida. Neste capítulo foi comprovado que o *EnergyPlus* não considera a influência da variação da temperatura de funcionamento da célula FV sobre os cálculos térmicos da zona simulada, assim, os próximos passos foram desenvolver métodos para a simulação de sistemas *BIPV* por meio do *EnergyPlus*. Ainda no segundo capítulo foi proposto e testado um método para a simulação de sistemas FV opacos.

(3) o terceiro capítulo é um artigo que investiga o segundo objetivo específico (O.E.2), referente aos sistemas fotovoltaicos semitransparentes. Neste capítulo as simulações foram realizadas para a cidade de São Paulo, que tem impacto mais relevante no cenário nacional e apresenta um dos maiores centros comerciais do país, sendo compatível com a tipologia de edifícios corporativos definidos para a investigação final desta pesquisa. Além disso, o clima da cidade de São Paulo é muito semelhante ao da cidade de Viçosa, seus arquivos climáticos apresentam variações pouco relevantes entre si. Neste capítulo foi desenvolvido um método de simulação para sistemas fotovoltaicos semitransparentes, levando em consideração a propriedades térmicas do material FV.

(4) o quarto capítulo também está em formato de artigo e investiga o terceiro objetivo específico (O.E.3), que se refere a influência de sistemas *BIPV* no desempenho energético de um edifício de escritórios. O método desenvolvido e testado no capítulo 3 para um protótipo virtual com dimensões reduzidas foi replicado no capítulo 4, porém agora para um modelo que representa um edifício completo. Foi proposto a simulação de um mesmo modelo de edifício para diferentes cidades brasileiras (Florianópolis-SC, Belo Horizonte-MG, Vitória-ES e Fortaleza-CE), variando: a Zona Bioclimática, relacionada com a temperatura e a umidade do ar, que influenciam as trocas térmicas com o edifício; e a latitude, relacionada com a altitude solar. Foi desnecessário simular São Paulo após a seleção de um edifício localizado em Belo Horizonte. As duas cidade estão inseridas na Zona Bioclimática 3 com latitudes próximas, e optou-se por simular Belo Horizonte por ser a cidade onde o edifício - que serviu de exemplo para a construção do modelo - está localizado.

(5) o quinto capítulo é destinado às considerações finais, explicitando os resultados obtidos por meio dos artigos e os apontamentos sobre limitações da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

## Referências

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução normativa Nº 482**, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.

\_\_\_\_\_. **Resolução normativa Nº 687**, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST.

AZADIAN, F.; RADZI, M. A. M. A general approach toward building integrated photovoltaic systems and its implementation barriers: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 527–538, 2013.

BEN. **Balanco Energético Nacional 2017: Ano Base 2016**. Ministério de Minas e Energia. Disponível em < <https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal.aspx?anoColeta=2017&anoFimColeta=2016>>. Acesso em: jan. 2018.

JELLE, B. P.; BREIVIKB, C.; ROKENESB, H. D. Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. Elsevier, 2012. v. 100, 2012, p. 69–96.

KANG, S.; YOO, S.; LEE, J.; BOO, B.; RYU, H. Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules. **Renewable Energy**, v. 47, p. 152-159, 2012.

NOGUEIRA, F.; PAIVA, D.; RESENDE, C. A tecnologia fotovoltaica de película fina. Afinal como estamos? Instituto Superior de Engenharia do Porto. **EUTRO à Terra- Revista técnico-científica**. v. 12, p. 11-16, ano 6, dezembro de 2013.

PAIXÃO, A. C. C. S. Caracterização tipológica de agências bancárias e seu potencial de economia de energia elétrica e etiquetagem com a implantação de sistemas fotovoltaicos. **Dissertação** (mestrado). 2013. Programa de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Viçosa.

REDWEIK, P.; CATITA, C.; BRITO, M. Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. **Solar Energy**, v. 97, p. 332–341, 2013.

REN21 – **Renewable Energy Policy Network 2008**. *Global Status Report*, 2008. Disponível em: <[http://www.ren21.net/pdf/RE2008\\_Global\\_Status\\_Report.pdf](http://www.ren21.net/pdf/RE2008_Global_Status_Report.pdf)>. Acesso em: maio de 2016.

RUTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos**. Florianópolis: Editora UFSC/LABSOLAR, 2004.

RUTHER, R.; SALAMONI, I. O potencial dos setores urbanos brasileiros para a geração de energia solar fotovoltaica de forma integrada às edificações. **Fórum Patrimônio: mudanças climáticas e o impacto das cidades**, v.4, n.1, 2011.

SALAMONI, I. T. Metodologia para cálculo de geração fotovoltaica em áreas urbanas aplicada a Florianópolis e Belo Horizonte. 2004. **Dissertação** (Mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

XAVIER, G. A. Análise de externalidades da geração fotovoltaica distribuída no Brasil. 2015. **Tese** (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa.

ZOMER, C. D.; URBANETZ JÚNIOR, J.; MONTENEGRO, A.; PFITSCHER P. H.; RÜTHER R. Compromissos entre forma e função de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações e conectados à rede em baixas latitudes. **Anais... XI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**. Armação dos Búzios: ANTAC, 2011.

## 2 SIMULAÇÃO TÉRMICA DE SISTEMAS *BIPV* POR MEIO DO *ENERGYPLUS*

### 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 à construção (*BIPV*) por meio do *EnergyPlus*. Assim, este capítulo 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*.

### 2.1 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, 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; SCOMPARIN; 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 geração elétrica do sistema *STPV*, incorporado às janelas do ambiente, foi calculada sem auxílio do *software*, pois o mesmo não estima 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 geração de energia. O estudo comparou a simulação de painéis FV por meio do *EnergyPlus* e do software TRNSYS, que usa das mesmas equações do *EnergyPlus*. O modelo do *EnergyPlus* estimou cerca de 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 FV utilizados pelos programas.

WONG et al. (2008) por meio 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.

## **2.2 Objetivo**

Investigar os recursos e as limitações do *EnergyPlus* para a simulação de sistemas *BIPV*, buscando identificar a relação entre a temperatura operativa dos módulos fotovoltaicos e a temperatura interna e superficial do ambiente simulado.

## 2.3 Método

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

### 2.3.1. Levantamento das características dos modelos fotovoltaicos 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, pode-se 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.

#### *Modelos de Painéis Fotovoltaicos do EnergyPlus*

O *EnergyPlus* dispõe de três modelos diferentes para prever a geração de energia elétrica 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 gerada. 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 geração de energia fotovoltaica, podendo ser útil para a análise de projetos em fase inicial,

para obter rapidamente uma estimativa dos níveis de geração 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).

#### *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 métodos<sup>9</sup> 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/m<sup>2</sup> 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/m<sup>2</sup>.K) e do coeficiente de perda de calor (W/m<sup>2</sup>.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).

### 2.3.2 Simulações

As simulações foram realizadas por meio do *software EnergyPlus*, versão 8.4, com um arquivo TMY (*Typical Meteorological Year*) 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.

---

<sup>9</sup> 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*.

## Caso Base

Para o Caso Base (CB) foi modelado uma única zona térmica sem sistema FV, que consiste em um protótipo virtual representando um ambiente de ensaio de 3m<sup>2</sup> por 3m de altura (Figura 2.1). 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.

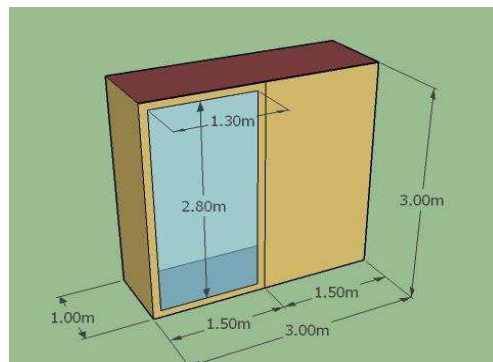


Figura 2.1 - Modelo simulado

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, nomeada PAR1, manteve os mesmos materiais especificados para as outras paredes (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Especificação dos materiais construtivos utilizados

| Componentes | Materiais                   | Espessura (cm) | Transmitância [W/(m <sup>2</sup> K)] | Capacidade térmica [kJ/m <sup>2</sup> K] | Absortância solar |
|-------------|-----------------------------|----------------|--------------------------------------|--|-------------------|
| Paredes     | Argamassa interna e externa | 2,0 (cada)     |                                      |  |                   |
|             | Bloco cerâmico vazado       | 9,0            | 2,46                                 | 150                                      | 0,3               |
|             | Pintura externa (cor clara) | -              |                                      |  |                   |
| Cobertura   | Fibrocimento                | 0,7            |                                      |  |                   |
|             | Camada de ar 2              | -              | 2,06                                 | 233                                      | 0,7               |
|             | Laje                        | 10,0           |                                      |  |                   |
| Janela      | Vidro simples               | 0,3            | 5,70                                 | -  | -                 |

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

Fonte: ABNT (2005).

## 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 *Equivalente One-Diode (EOD)* e *Sandia (SANDIA)*, que simulam placas FV de silício cristalino (Figura 2.2). 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 desta dissertação.

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 anterior. Porém, este caso analisa apenas as características térmicas dos sistemas FV, não foram utilizados modelos *BIPV* para prever a geração 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 (Figura 2.2).

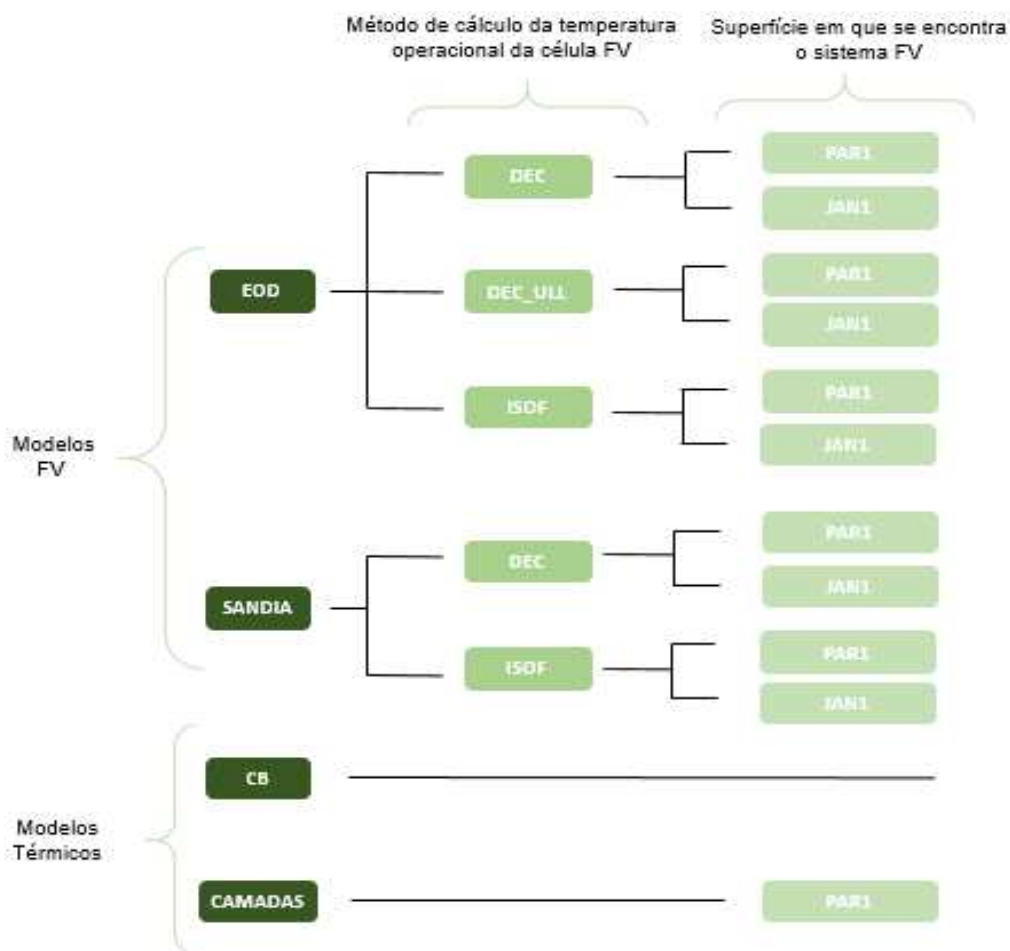


Figura 2.2 – Diagrama com os casos simulados

As propriedades térmicas dos componentes da placa FV foram baseadas em Andrade (2008), e a absorptância solar utilizada para o sistema FV foi de 0,9 (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Propriedades térmicas dos componentes da placa FV

| Componentes/<br>camadas | Espessura<br>equivalente (mm) | Condutividade<br>(W/m.K) | Massa específica<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) | Calor específico<br>(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).

## 2.4 Resultados e Discussões

### 2.4.1 Método “Decoupled” (DEC)

Para o método *DEC*, ambos os modelos *BIPV* (*EOD* e *SANDIA*), apresentaram desempenho semelhante (Figura 2.3). 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 13:00h. 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 suficiente<sup>10</sup> para a geração de energia elétrica (18:00 às 06:00h). Já no período em que havia geração 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.

<sup>10</sup> Os módulos fotovoltaicos geram energia elétrica sempre que a energia solar incidente total é maior do que 0,3 Watts (ENERGYPLUS, 2014-a).

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.

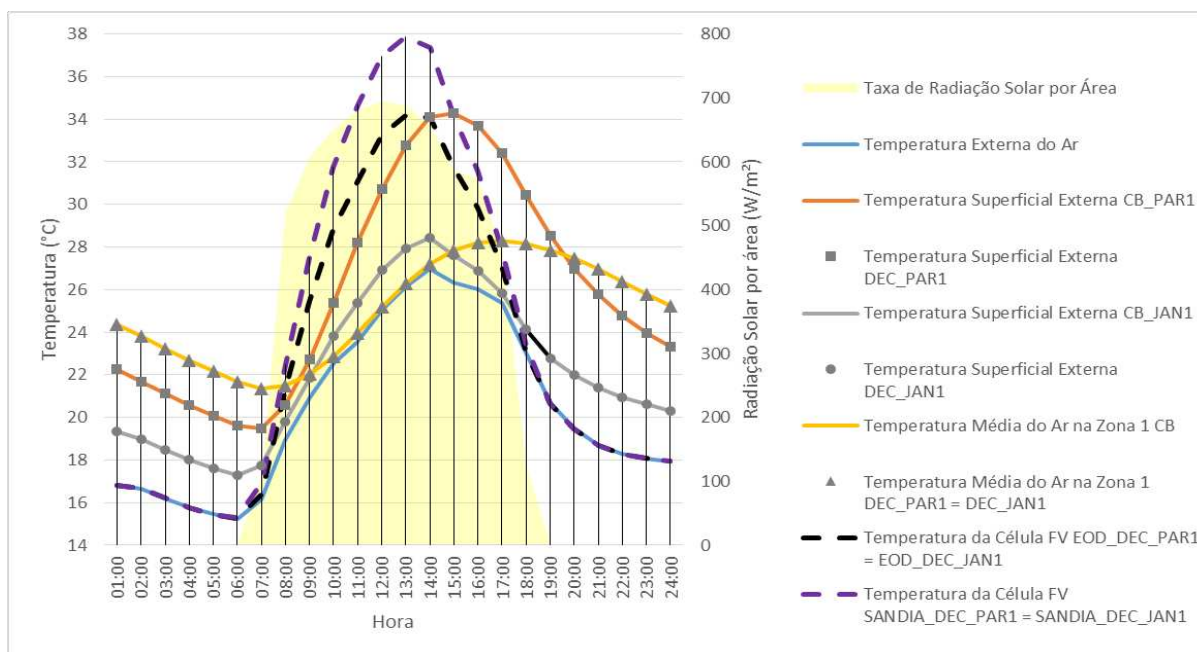


Figura 2.3 – Temperaturas simuladas do método *DEC* para os modelos *EOD* e *Sandia* para o dia 20 de março, Viçosa, MG, latitude 20°S

#### 2.4.2 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 2.4). Como explicado em item anterior, este método não pode ser aplicado para o modelo *SANDIA*.

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 geração 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 geração 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*.

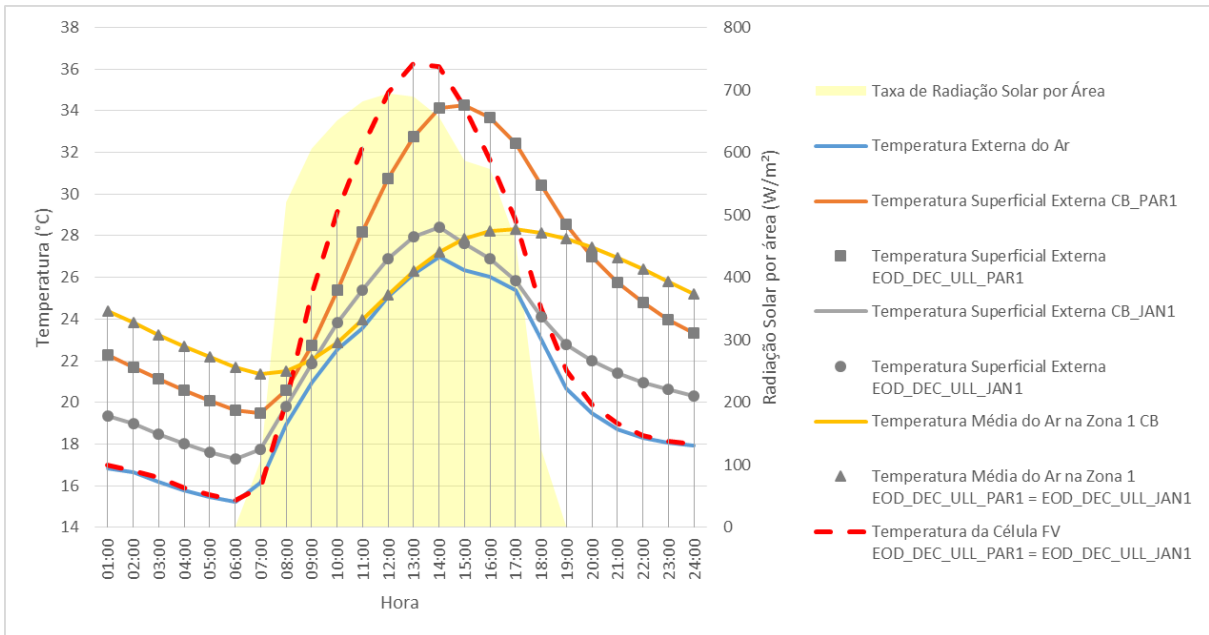


Figura 2.4 – Temperaturas simuladas do método *DEC\_ULL* para o modelo *EOD* para o dia 20 de março, Viçosa, MG, latitude 20°S

### 2.4.3 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 2.5 e 2.6).

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 2.5).

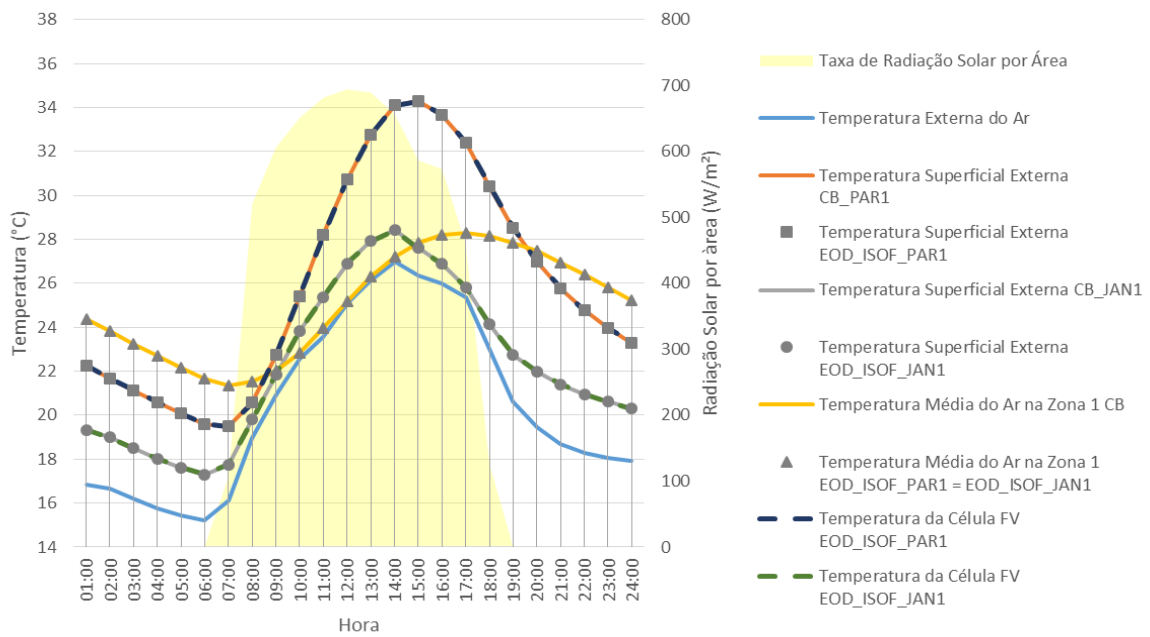


Figura 2.5 – Temperaturas simuladas do método *ISOF* para o modelo *EOD* para o dia 20 de março, Viçosa, MG, latitude 20°S

Já para o modelo *SANDIA*, no período de 19:00 às 05:00h 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 19:00h 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 2.6).

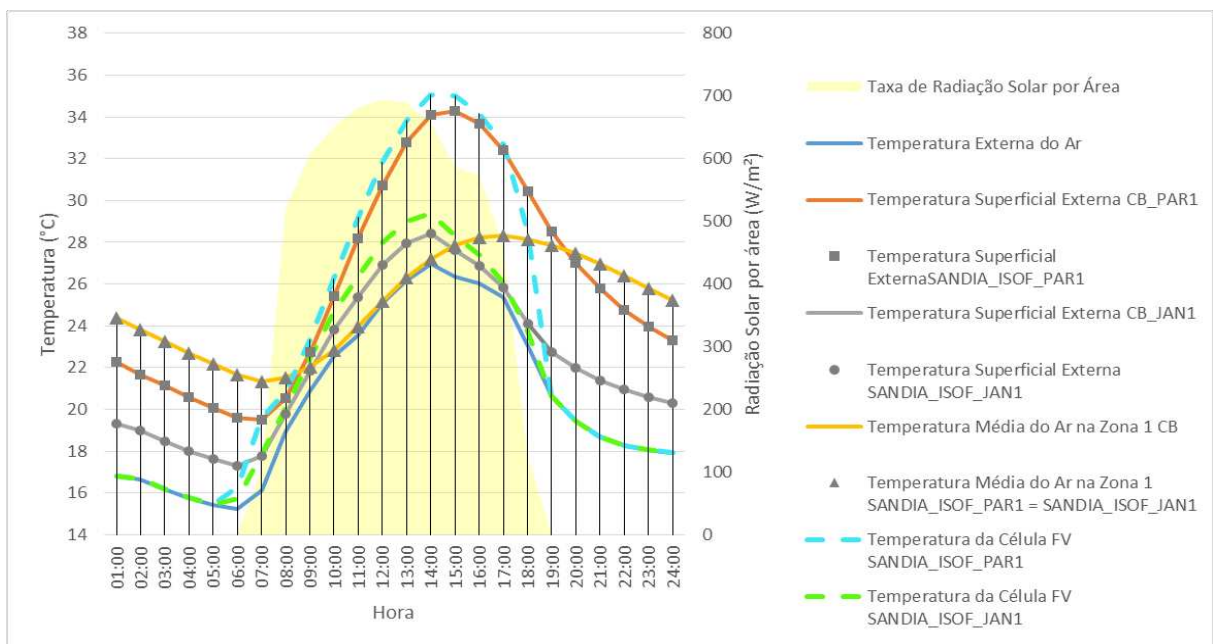


Figura 2.6 – Temperaturas simuladas do método *ISOF* para o modelo *SANDIA* para o dia 20 de março, Viçosa, MG, latitude 20°S

#### 2.4.4 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 2.7). Nos períodos de radiação solar a temperatura superficial externa 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.

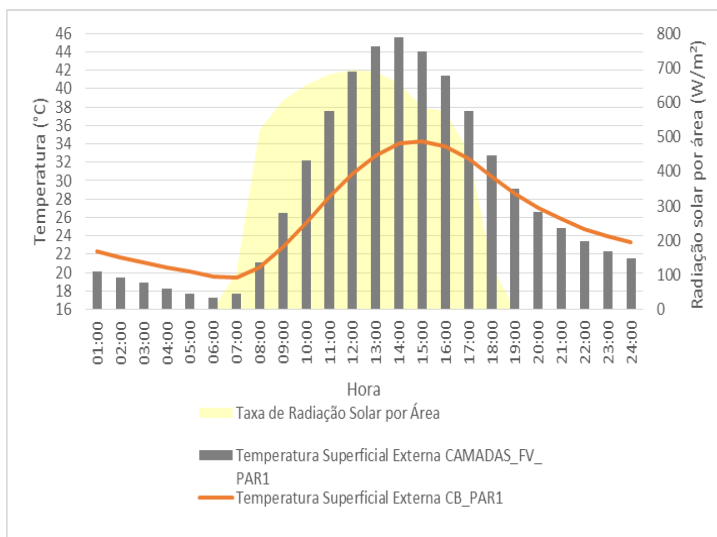


Figura 2.7 – Temperatura superficial externa simulada da PAR1 para o caso CAMADAS\_FV\_PAR1 para o dia 20 de março, Viçosa, MG, latitude 20°S

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 temperatura da placa FV, neste caso, é referente às propriedades térmicas dos materiais da placa FV, vale lembrar que a geração de energia elétrica também produz 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 2.8), 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.

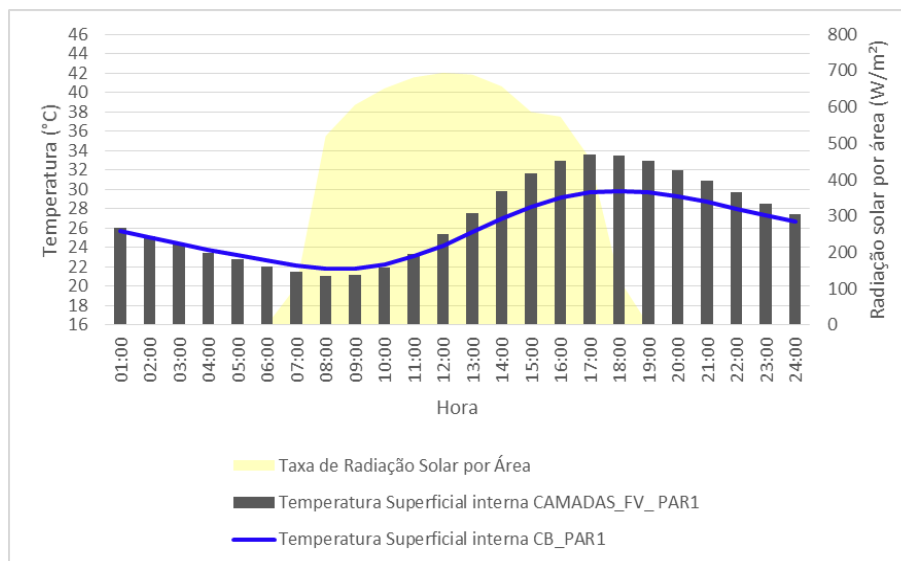


Figura 2.8 – Temperatura superficial interna da PAR1 simulada para o caso CAMADAS\_FV\_PAR1 para o dia 20 de março, Viçosa, MG, latitude 20°S

#### 2.4.5 Análise Final da Temperatura Operacional da Célula FV

Na Figura 2.9 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 13:00h; e ao incluir o modelo CAMADAS\_FV\_PAR1 na comparação, a diferença aumenta para aproximadamente 17°C às 14:00h.

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.

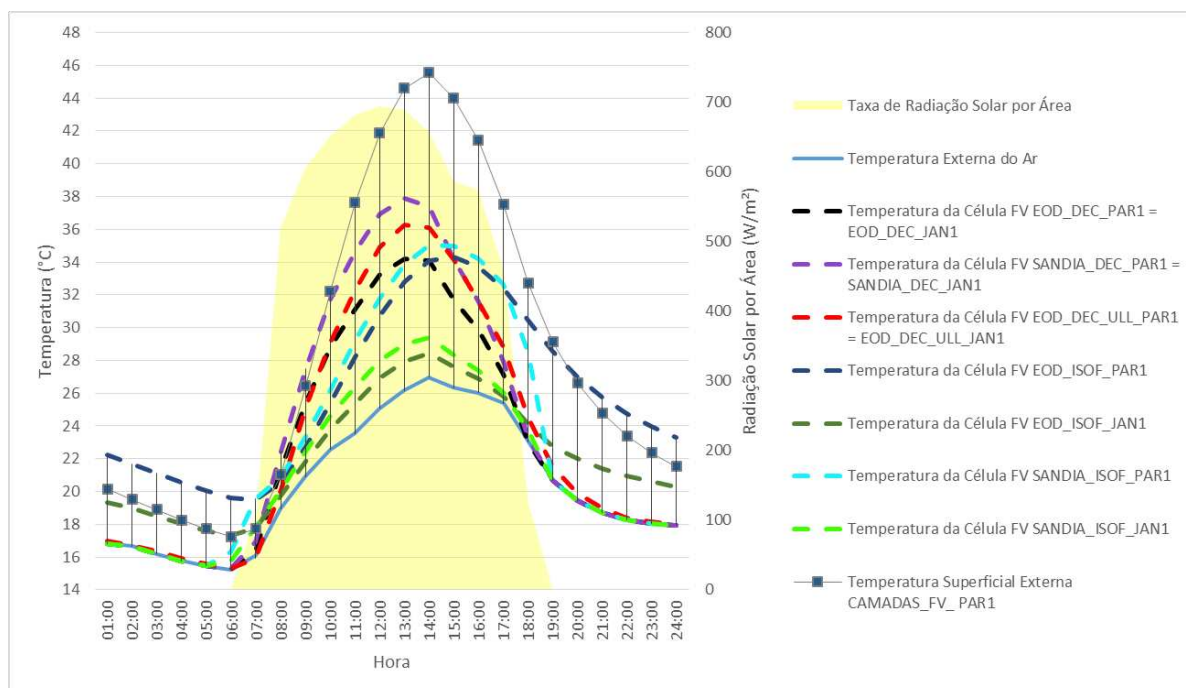


Figura 2.9 – Temperatura da célula FV de todos os casos simuladas para o dia 20 de março, Viçosa, MG, latitude 20°S

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 geração de energia elétrica, são de suma importância para não superestimar a geração de energia elétrica.

## 2.5 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 estimar a geração 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 e, portanto, é mais recomendado. 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 *ISO*F); 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, com base na literatura e nos resultados encontrados, é possível afirmar 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 geração de energia com modelos que integrem os efeitos térmicos.

## Referências

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **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.

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.

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 matogrossenses: viabilidade econômica e energética de janelas fotovoltaicas. XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. ENTAC. **Anais ...** 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.; 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.

WBCSD – World Business Council for Sustainable Development. **Energy efficiency in buildings; Business realities and opportunities**. Switzerland (2008).

### 3 MODELAGEM TÉRMICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS SEMI-TRANSPARENTES: IMPACTOS NO AMBIENTE INTERNO E NA EFICIÊNCIA DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

#### RESUMO

Em sistemas fotovoltaicos semi-transparentes (*STPV*), o calor acumulado na parte posterior dos painéis pode ser transmitido para o espaço interno da zona, e contribuir para o aquecimento do ambiente, ou ainda, provocar o aumento da temperatura da célula fotovoltaica (FV), o que reduz a eficiência do sistema. Assim, este artigo teve como objetivo investigar a modelagem das propriedades térmicas de um sistema *STPV*, além de avaliar a influência do calor gerado na temperatura interna do ambiente simulado e na eficiência do próprio sistema FV. O método incluiu simulações computacionais, onde foram propostos sistemas *STPV* integrados a diferentes configurações de esquadrias: vidros simples e duplos; espessuras diferentes para a camada de ar entre vidros; e vidros com propriedades térmicas especiais (*Low Iron e Low-E*). As propriedades térmicas do material FV foram representadas por dispositivos de sombreamento do tipo *shade*. As simulações demonstraram que os materiais *STPV* influenciam sim as condições térmicas do ambiente, tanto pelo acréscimo na temperatura média do ar interno, que chegou a aumentar até 3,3°C com sistemas *STPV*, quanto pelo aumento da própria temperatura superficial interna das janelas, que superou o Caso Base em até 17,4°C. A eficiência do sistema apresentou perdas devido ao acréscimo de temperatura da célula FV, porém, acredita-se que esta redução será sentida apenas em sistemas de geração em larga escala. As diferenças nos modelos de esquadrias foram mais significativas nas questões relacionadas ao conforto térmico do que nas variações de eficiência do sistema FV.

Palavras-chave: Energia Solar, Simulação Computacional, Desempenho Térmico, *EnergyPlus*.

#### 3.1 Introdução

A simulação computacional destaca-se como ferramenta para a quantificação do desempenho de edificações por integrar diversos modelos numéricos em regime transiente para auxílio ao projeto, antes mesmo da sua construção ou reforma. Porém, os *software* ainda apresentam limitações para a modelagem de determinados parâmetros, por serem uma simplificação da realidade, como é o caso da simulação de sistemas fotovoltaicos integrados à construção (*BIPV*), por meio do *EnergyPlus*. Identificar tais limitações e corrigi-las diminui o grau de incerteza dos dados obtidos. Peng e Yang (2016) mostraram que os modelos de

painéis FV utilizados no *EnergyPlus* não podem simular com a precisão necessária as interações térmicas entre os sistemas *BIPV* e o ambiente.

Os sistemas *BIPV* podem formar parte da fachada ou do telhado de uma construção, assim, o desempenho termo-fluido do sistema está intrinsecamente ligado à envoltória do edifício (VUONG; KAMEL; FUNG, 2015). Quando a interação entre o sistema *BIPV* ocorre de forma direta com o ambiente interno, mais comum em sistemas *STPV*, o calor acumulado na parte posterior dos painéis pode ser dissipado por convecção ou por radiação para o espaço interno da zona, contribuindo para o aquecimento do ambiente (WONG et al., 2008).

O *EnergyPlus* disponibiliza modelos FV para a simulação, entretanto, sua análise é mais focada em prever a geração de energia elétrica. A parte térmica da simulação ainda ignora algumas questões relacionadas com os mecanismos de transmissão de calor entre os materiais que compõem uma placa FV e os ambientes externo e interno, o que pode influenciar no desempenho termoenergético das edificações simuladas (RODRIGUES; CARLO, 2017).

A célula FV é um dispositivo que converte a luz solar em eletricidade. Entretanto, em sistemas comerciais, apenas 5 a 25% da radiação solar incidente é convertida em energia elétrica, o restante é refletido ou absorvido como calor (TIWARI; MISHRA; SOLANKI, 2011). Parte deste calor é transferido de volta para o ambiente, enquanto o restante provoca o aumento da temperatura do próprio painel FV (KANT et al., 2016), que afeta negativamente a eficiência de conversão de energia, principalmente, se essa se eleva acima da temperatura estabelecida nas condições padrão de ensaio, que é 25°C (KANT et al., 2016).

Suwapaet e Boonla (2014) comprovaram a influência de temperaturas elevadas de funcionamento do módulo FV sobre sua potência de saída. O experimento foi executado em Kamrieng, província de Maha Sarakham, Tailândia. Os resultados mostraram que a temperatura de operação dos painéis variou entre 46°C e 57°C, o que significa um aumento de 84 a 128% em comparação às condições padrão de ensaio. Com o aumento de temperatura, o painel de silício monocristalino gerou de 23 a 33% menos potência de saída, enquanto a redução do painel de silício amorfo foi de 3 e 20%. Assim, pode ser que a tecnologia de silício amorfo seja mais indicada para um país tropical como o Brasil, que apresenta temperaturas elevadas, principalmente, no período de verão.

O *EnergyPlus* permite utilizar a temperatura superficial externa do componente da edificação onde localiza-se o sistema FV como temperatura de funcionamento da própria célula solar, representando a influência térmica do edifício sobre a temperatura do sistema. Entretanto, as propriedades térmicas dos materiais que compõem um painel FV não são as mesmas dos materiais comumente utilizados em uma edificação, assim, caso não sejam

especificados os componentes do painel sobre essas superfícies, serão utilizados valores irreais para a temperatura de funcionamento da célula (RODRIGUES; CARLO, 2017).

Além disso, o *software* não considera o sistema FV como um conjunto de materiais do ambiente construído, e ignora a influência da variação da temperatura de funcionamento da célula sobre os cálculos térmicos da zona simulada (RODRIGUES; CARLO, 2017). 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 e fornecer dados imprecisos de temperatura, além de ignorar mecanismos de transmissão de energia térmica entre o painel e o ambiente (WONG et al., 2005).

Alguns trabalhos foram propostos em resposta a essa limitação do *software*. Didoné e Wagner (2013) realizaram a simulação térmica de um ambiente de escritório e obtiveram o consumo de energia deste por meio do *EnergyPlus*, já a geração FV foi calculada separadamente, pois o *software* não permite modelar diretamente uma janela FV semitransparente. Eles precisaram calcular a transferência de calor para determinar a temperatura da célula FV, pois o programa não estima as temperaturas dentro de uma janela.

Vuong, Kamel e Fung (2015) desenvolveram e implantaram um modelo *BIPV* (chamado *BIPVSYSTEM*) no código-fonte do *EnergyPlus*. Este modelo baseou-se nas mesmas equações de um *software* adicional, o *TRNSYS* Tipo 567, mas com algumas modificações no que diz respeito às relações termo-fluidas. O *BIPVSYSTEM* usa o modelo elétrico *Sandia* do *EnergyPlus*, e calcula a temperatura da célula FV. Em seguida, o modelo *Sandia* usa esta temperatura para calcular a tensão e a corrente do painel FV e, conseqüentemente, a eficiência da célula solar, que é encaminhada para o *EnergyPlus* realizar os cálculos de geração de energia (VUONG; KAMEL; FUNG, 2015).

WONG et al. (2008) utilizaram um método semelhante em sua pesquisa. Os autores, por meio 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 previsto, os painéis *STPV* influenciaram no ganho de calor durante o dia, o que pode contribuir para reduzir a energia de aquecimento durante o inverno (para o clima em questão). No entanto, isso pode resultar em um aumento em torno de 3 a 5 vezes na demanda de refrigeração durante o verão (WONG et al., 2008).

Em uma pesquisa anterior, WONG et al. (2005) utilizaram o mesmo método de simulação, porém, o objetivo foi avaliar o efeito de diferentes materiais *STPV* no consumo global de energia da edificação. Três tipos de tecnologia *STPV* foram simuladas: policristalino

de silício em vidro único; policristalino de silício em vidro duplo; e silício amorfo em vidro único. Foi comprovado o caráter de isolamento para o painel de vidro duplo, pelo seu baixo coeficiente de transferência de calor, que é cerca da metade do valor do painel de vidro único (WONG et al., 2005).

Embora várias pesquisas tenham como tema a geração de energia fotovoltaica, foram encontrados poucos estudos que caracterizam o comportamento térmico dos painéis *STPV*. Portanto, há a necessidade de se desenvolver pesquisas que tenham como objetivo investigar a relação térmica entre os sistemas *STPV* e o edifício. Outra necessidade, se configura na busca por ferramentas de simulação capazes de modelar o desempenho termo-fluido de sistemas *STPV* e sua geração de energia elétrica ao mesmo tempo.

### **3.2 Objetivo**

Este capítulo tem como objetivo investigar a modelagem térmica de sistemas fotovoltaicos semi-transparentes, para avaliar os impactos gerados no desempenho térmico do ambiente interno e na eficiência da célula fotovoltaica.

### **3.3 Revisão dos Recursos do *EnergyPlus*: Dispositivos de Sombreamento**

Os dispositivos de sombreamento do *EnergyPlus* variam em termos da configuração de sua geometria e podem ter suas propriedades, tais como transmitância e absorptância, especificadas de acordo com o tipo de material que compõe a proteção solar. Eles afetam a transmitância do sistema janela+proteção e a absorptância da camada de vidro para radiação de onda curta e para radiação de onda longa (ENERGYPLUS, 2016-a). A influência exercida depende da posição do dispositivo de sombreamento em relação à camada de vidro (interior, exterior ou entre camadas de vidro), da sua transmitância, da quantidade de inter-reflexão entre o dispositivo e o vidro e também da quantidade de radiação absorvida por esse (ENERGYPLUS, 2016-a).

O sistema janela+proteção apresenta como componentes: a transmitância do sistema; a absorptância efetiva da camada de vidro; e a absorptância do próprio dispositivo de sombreamento. As propriedades térmicas do sistema são dadas em termos das propriedades da proteção solar isolada (isto é, propriedades do dispositivo de sombreamento na ausência do vidro) e as propriedades do vidro isolado (ENERGYPLUS, 2016-a).

O modelo térmico dos dispositivos de sombreamento descreve as interações térmicas entre a camada de sombreamento e: o(s) vidro(s) adjacente(s), para todos os casos; o ambiente interno, para sombreamento interno; o ambiente externo, para sombreamento

externo; e o ar na abertura, para sombreamento intermediário, entre camadas de vidro (ENERGYPLUS, 2016-a).

Outra característica importante do modelo térmico do dispositivo de sombreamento é o cálculo do fluxo de ar por convecção natural entre o dispositivo de sombreamento e o vidro. Este fluxo afeta a temperatura do dispositivo de sombreamento e dos vidros e, para sombreamento interior, é um determinante do ganho de calor convectivo a partir da camada de sombreamento e dos vidros para o ar da zona (ENERGYPLUS, 2016-a). O modelo de fluxo de ar é baseado na Norma ISO 15099, "*Thermal Performance of Windows, Doors and Shading Devices-Detailed Calculations*" (ISO 15099, 2003).

O *EnergyPlus* disponibiliza quatro categorias de dispositivos de sombreamento: "shades" (painéis de proteção solar), "blinds" (persianas), "screens" (telas) e "switchable glazing" (vidros de escurecimento gradativo). Para a categoria de interesse nesse trabalho, o *shade*, é assumido que o painel de sombreamento cobre toda a parte envidraçada da janela, incluindo divisores e excluindo os caixilhos. Além disso, o programa considera que o plano do painel de sombreamento é paralelo ao vidro (ENERGYPLUS, 2016-b). As outras categorias de dispositivos de sombreamento não se enquadram no escopo deste trabalho e não serão discutidas.

O *EnergyPlus* estabelece algumas regras para a modelagem de janelas compostas por camadas múltiplas (camadas de vidro e dispositivos de proteção solar) que, no caso da categoria *shade* são:

- a primeira e a última camada devem ser camadas sólidas;
- as camadas de vidro adjacentes devem ser separadas por uma e apenas uma camada de gás;
- as camadas adjacentes não devem ser do mesmo tipo;
- somente um único painel de sombreamento é permitido;
- um painel exterior deve ser a primeira camada;
- um painel interior deve ser a última camada;
- para um painel interior ou um exterior, não deve haver camada de gás entre estes e a camada de vidro adjacente;
- para um painel intermediário deve haver camadas de gás do mesmo tipo e com mesma espessura adjacentes ao dispositivo de sombreamento;
- para vidros triplos o painel de sombreamento deve estar entre as duas camadas de vidro interiores;
- a menor distância permitida<sup>11</sup> entre a camada de vidro e o painel é de 1mm.

---

<sup>11</sup> Esta regra acaba por impedir que o material *STPV* seja referenciado em contato direto com a camada de vidro mais externa (situação mais comum em casos reais para este tipo de sistema), o que gera

Após observar as informações fornecidas pelo manual do *EnergyPlus* sobre o modelo térmico dos dispositivos de sombreamento, descritas neste item, foi selecionado o dispositivo do tipo *shade* para representar as propriedades térmicas dos sistemas *STPV*.

### 3.4 Método

As simulações foram realizadas por meio do *software EnergyPlus*, versão 8.4, com uso de arquivo climático do Inmet para a cidade de São Paulo-SP (RORIZ, 2012). As análises foram feitas para o dia 20 de março, apesar de estar próximo ao fim do verão este dia foi escolhido por ainda apresentar uma temperatura média do ar elevada e, devido à proximidade com o equinócio de outono, a inclinação do sol já está mais baixa, o que gera uma boa disponibilidade de radiação na fachada norte, onde localiza-se o sistema FV semi-transparente. O mês de março apresentou temperatura média do ar de 21,7°C. A altura solar com o plano horizontal é, aproximadamente, 65° às 12h do dia 20, enquanto a temperatura máxima do dia foi 29,6°C às 15:00h. Não foram incluídas cargas térmicas de ocupação, de equipamentos e de iluminação artificial, para que a variação da temperatura fosse mais sensível às respostas térmicas dos sistemas *STPV*, sem a interferência de outras fontes de calor. Este tipo de sistema de esquadria com material FV semi-transparente integrado, geralmente, não permite a ventilação natural, assim, esta não foi considerada nas simulações.

O modelo elétrico do painel FV foi especificado sempre na camada de vidro mais externa da janela voltada para o norte. O modelo *EOD (Equivalent One-Diode)* foi escolhido para calcular a geração de energia elétrica, e o método *ISOF (Integrated Surface Outside Face)* foi adotado para a determinação da temperatura da célula FV, conforme Rodrigues e Carlo (2017). Uma das características deste método é que a temperatura superficial é assumida como temperatura de funcionamento da célula FV, sendo assim, a camada de vidro mais externa influenciará a eficiência do painel.

As propriedades elétricas do sistema FV foram obtidas por meio do *software PVSyst* (PVSYST, 2017), uma ferramenta que permite ao usuário analisar diferentes configurações de modelos FV para identificar a melhor solução possível. O *software* possui uma base de dados onde é possível obter as propriedades técnicas de centenas de sistemas FV catalogados. O modelo escolhido foi o *ASI THRU-1-IO 10%*, um painel FV semitransparente de silício amorfo do fabricante Schott Solar AG, com eficiência de 5,04% para as condições padrão de ensaio (*STC*, do inglês *Standart Test Conditions*).

---

uma limitação na pesquisa por não representar as trocas térmicas por condução entre a camada de vidro mais externa e o material *STPV*.

### 3.4.1. Caso Base

Para o Caso Base foi modelada apenas uma zona térmica, que consiste em um protótipo virtual representando um ambiente de ensaio de 3m<sup>2</sup> por 3m de altura, para que cada metro linear de fachada corresponda a 1m<sup>2</sup> do ambiente construído (Figura 3.1). Além disso, a área de piso reduzida teve o intuito de tornar o modelo mais sensível à variação de temperatura interna da zona. Todos os quatro lados do edifício foram considerados expostos ao sol e ao vento.

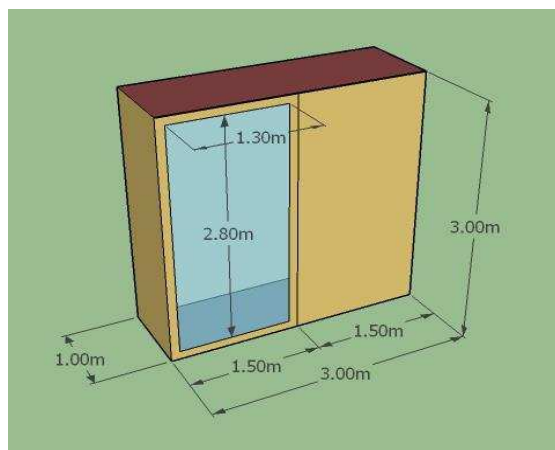


Figura 3.1 – Zona térmica 1

Na parede Norte foi modelada uma abertura envidraçada com dimensões 1,30m x 2,80m, onde foi especificado o modelo elétrico do sistema *STPV*. Os materiais da envoltória foram especificados conforme a Tabela 3.1.

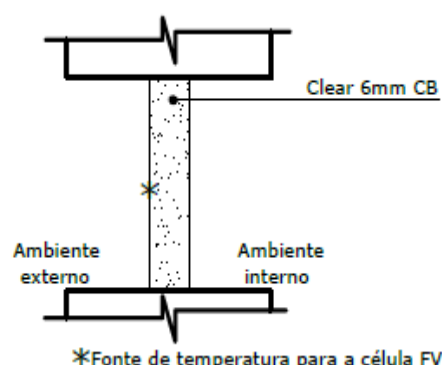
Tabela 3.1 – Especificação dos materiais construtivos utilizados

| Componentes | Materiais                   | Espessura (cm) | Transmitância [W/(m <sup>2</sup> K)] | Capacidade térmica [kJ/m <sup>2</sup> K] | Absortância solar |
|-------------|-----------------------------|----------------|--------------------------------------|--|-------------------|
| Paredes     | Argamassa interna e externa | 2,0 (cada)     | 2,46                                 | 150                                      | 0,3               |
|             | Bloco cerâmico              | 9,0            |                                      |  |                   |
|             | Pintura externa (cor clara) | -              |                                      |  |                   |
| Cobertura   | Fibrocimento                | 0,7            | 2,06                                 | 233                                      | 0,7               |
|             | Camada de ar                | > 5,0          |                                      |  |                   |
|             | Laje                        | 10,0           |                                      |  |                   |

Fonte: baseada em ABNT (2005).

O Caso Base consiste em uma janela composta por uma única folha de vidro com espessura de 6mm (Figura 3.2), chamado de Clear 6mm CB (Tabela 3.2).

A transmitância do sistema *STPV* é bem reduzida se comparada ao vidro comum (Clear 6mm), assim, optou-se por utilizar um vidro de mesma transmitância solar do material *STPV* para o vidro do Caso Base (Clear 6mm CB), para evitar que os ganhos térmicos por radiação direta fossem elevados e desproporcionais aos Casos com *STPV*.



\*Fonte de temperatura para a célula FV  
Figura 3.2 – Caso Base

Tabela 3.2 – Propriedades térmicas dos vidros e do sistema STPV utilizados nas simulações

| Propriedades térmicas        | Clear CB 6mm | Clear 6mm | Clear 3mm | Low Iron 5mm | Low-E 3mm | A-SI Thru PV 2mm |
|------------------------------|--------------|-----------|-----------|--------------|-----------|------------------|
| Transmitância solar          | 0,08         | 0,775     | 0,837     | 0,899        | 0,630     | 0,080            |
| Refletância solar            | 0,766        | 0,071     | 0,075     | 0,079        | 0,190     | 0,125            |
| Absortância Solar            | 0,154        | 0,154     | 0,088     | 0,022        | 0,180     | 0,795            |
| Emissividade anterior        | 0,840        | 0,840     | 0,840     | 0,840        | 0,840     | 0,900            |
| Emissividade posterior       | 0,840        | 0,840     | 0,840     | 0,840        | 0,100     | 0,900            |
| Condutividade térmica (W/mK) | 0,900        | 0,900     | 0,900     | 0,900        | 0,900     | 0,190            |

Fonte: baseada em Didoné e Wagner (2013) e *EnergyPlus* (2016).

### 3.4.2 Modelos Térmicos

As propriedades térmicas dos sistemas STPV e os mecanismos de transmissão de calor entre o material FV e o edifício foram representados pelos dispositivos de sombreamento (categoria *shade*) que são parte integrante dos sistemas de abertura.

Em busca das propriedades térmicas do material FV foram avaliados diversos trabalhos: Jones e Underwood (2001); Elsayed (2016); Wong et al. (2005); Wong et al. (2008); Didoné e Wagner (2013). A partir deste levantamento, as propriedades térmicas do material STPV especificadas para o dispositivo de sombreamento foram baseadas em Didoné e Wagner (2013), o sistema utilizado por eles é chamado “A-SI Thru PV” e corresponde ao modelo ASI THRU-1-IO 10% do fabricante Schott Solar AG, composto por células solares de silício amorfo e transmitância de 8%, a espessura do material FV é de 2mm. As propriedades térmicas do sistema STPV estão descritas na Tabela 3.2.

Com base nas regras estabelecidas pelo *EnergyPlus*, apresentadas no item 3.0, para a modelagem de janelas compostas por camadas múltiplas, foram propostos seis configurações de janelas com sistemas STPV integrados, onde os dispositivos de sombreamento representam as propriedades térmicas do material STPV.

#### Caso 1 - Vidro Simples

O Caso 1 consiste em uma única folha de vidro (Clear 6mm) e um *shade* voltado ao ambiente interno (A-SI Thru PV 2mm), com afastamento de 1mm entre a camada de vidro e o dispositivo de sombreamento (Figura 3.3).

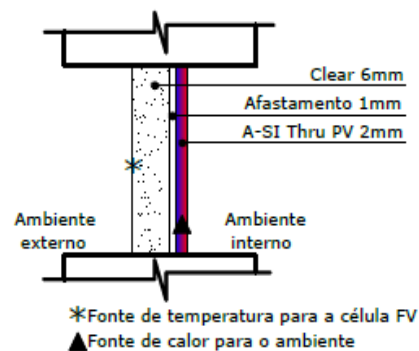


Figura 3.3 – Caso 1

### Caso 2 - Vidro Duplo Air Gap 1mm

O Caso 2 é composto por uma folha de vidro externa (Clear 6mm), uma folha de vidro em contato com o ambiente interno da Z1 (Clear 3mm), um *shade* intermediário (A-SI Thru PV 2mm), por estar entre as folhas de vidro, e separado destas por duas camadas de ar com 1mm de espessura cada (Figura 3.4).

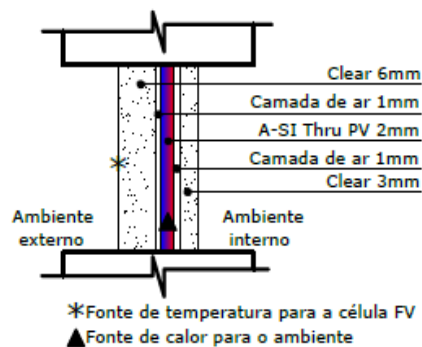


Figura 3.4 – Caso 2

### Caso 3 – Vidro Duplo Air Gap 6mm

O Caso 3 é composto por uma camada de vidro externa (Clear 6mm), uma folha de vidro em contato com o ambiente interno da Z1 (Clear 3mm), um *shade* intermediário (A-SI Thru PV 2mm), envolto em duas camadas de ar adjacentes com 6mm de espessura cada (Figura 3.5).

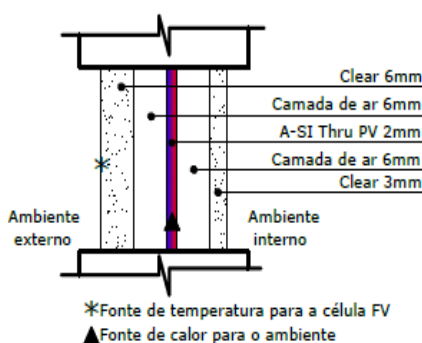


Figura 3.5 – Caso 3

### Caso 4 – Vidro Duplo Air Gap 1mm e 12mm

O Caso 4 representa uma aproximação<sup>12</sup> da disposição mais comum das camadas que compõe uma janela com sistema *STPV* integrado (disponíveis para comercialização). Este Caso consiste em uma folha de vidro externa (Clear 6mm), uma folha de vidro interna (Clear 3mm), um *shade* intermediário (A-SI Thru PV 2mm), um afastamento de 1mm entre o vidro externo e o dispositivo de sombreamento e uma camada de ar de 12mm entre o dispositivo de sombreamento e o vidro interno (Figura 3.6). Neste Caso a janela foi modelada como uma zona térmica.

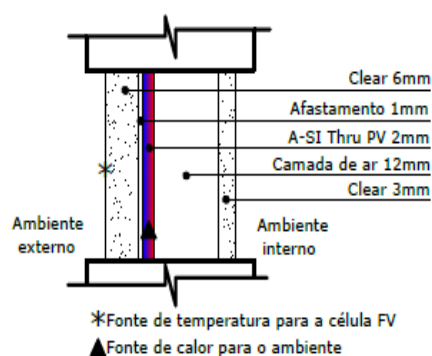


Figura 3.6 – Caso 4

<sup>12</sup> Como apresentado no item 3.3, o *EnergyPlus* exige um afastamento mínimo de 1mm entre a camada de vidro e o dispositivo de sombreamento. Entretanto, em sistemas *STPV* reais o material FV semitransparente fica aderido à parte posterior da camada de vidro mais externa. Portanto, esta foi a melhor aproximação em termos de posicionamento obtidas nos modelos térmicos, embora continue a evitar as trocas por condução existentes em um caso real.

### Caso 5 – Vidro Duplo Low Iron e Low-E Air Gap 1mm e 12mm

O Caso 5 é uma variação do Caso 4 e foi baseado em Didoné e Wagner (2013), que utilizaram vidros especiais na composição do sistema STPV, porém, para a presente pesquisa foram adotadas espessuras diferentes para as camadas de vidro. Assim, este Caso é composto por uma folha de vidro externa (*Low Iron* 5mm), uma folha

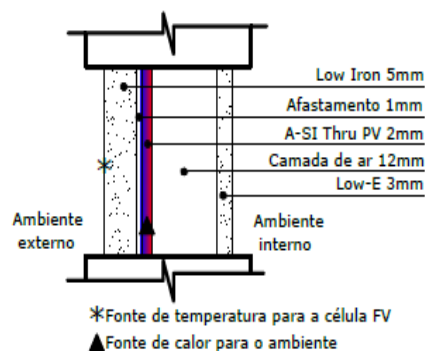


Figura 3.7 – Caso 5

de vidro interna (*Low-E* 3mm), um *shade* intermediário (A-SI Thru PV 2mm), um afastamento de 1mm entre o vidro mais externo e o dispositivo de sombreamento e uma camada de ar de 12mm entre o dispositivo de sombreamento e o vidro mais interno (Figura 3.7). Assim como o Caso anterior, a janela também foi modelada como uma zona térmica.

### Zoneamento Térmico do Caso 4 e do Caso 5

Os Casos 4 e 5 necessitaram de uma modelagem especial, pois como dito no Item 3.3, o *EnergyPlus* exige que para um *shade* entre vidros existam camadas de gás adjacentes ao dispositivo de sombreamento do mesmo tipo e com a mesma espessura. Entretanto, na busca de representar modelos mais próximos da realidade foram propostos esses casos que apresentam uma camada de ar mais espessa (12mm) entre o material STPV e o vidro mais interno.



Figura 3.8 – Zonas térmicas dos Casos 4 e 5

Para que a modelagem destes Casos (4 e 5) fosse possível, o modelo foi dividido em duas zonas térmicas (Figura 3.8). A Zona 1 representa o ambiente simulado, igual aos outros Casos, e a Zona 2 foi criada para representar o espaço interno da própria janela, que compõe o sistema janela+proteção.

A Zona 2 é composta por uma camada de vidro externa (face norte) e um *shade* interno, com um afastamento de 1mm entre o vidro externo e o dispositivo de sombreamento. A espessura da Zona 2 é de 24mm para o Caso 4, e de 23mm para o Caso 5, que são as somas das espessuras de cada camada que compõe as esquadrias (Figuras 3.6 e 3.7), incluindo a camada de ar que separa o material STPV do vidro interno (12mm). A camada de vidro da face sul da Zona 2 está em contato com a camada de vidro da face norte da Zona 1. Portanto, estes casos permitem que o programa forneça a temperatura da Zona 2, que é a temperatura da câmara de ar da janela de vidro duplo.

Por fim, as superfícies que representam as paredes norte, leste e oeste, assim como o teto e o piso da Zona 2 foram especificadas como superfícies adiabáticas, para não influenciarem nos cálculos térmicos da esquadria.

### 3.4.3 Limitações do Método

Como especificado no Item 3.4, o modelo elétrico está referenciado na superfície externa do vidro mais externo e, como o método de cálculo é o *Integrated Surface Outside Face*, a temperatura superficial externa do vidro foi usada como temperatura de funcionamento da célula FV. Apesar de não representar a situação real, o *EnergyPlus* não permite localizar o modelo elétrico em um painel de sombreamento, configurando uma limitação dessa simulação.

Assim, a temperatura do dispositivo de sombreamento irá influenciar a camada de vidro mais externa por meio de trocas por radiação e convecção, aproximando a temperatura do vidro do que seria a temperatura real da célula FV. Apesar deste método não representar a temperatura real de funcionamento da célula FV, ele já fornece uma aproximação maior da realidade do que a simples especificação do modelo elétrico em uma superfície que não apresenta as mesmas propriedades térmicas do material FV, representada aqui pelo Caso Base.

## 3.5 Resultados e Discussões

### 3.5.1 Temperatura Média do Ar na Zona 1

Para a temperatura média do ar na Zona 1, a diferença entre o Caso Base e o Caso 1 - que foi o caso que apresentou as maiores temperaturas durante o período de incidência solar -, chegou a atingir cerca de  $3,3^{\circ}\text{C}$ , às 14:00h (Figura 3.9). A diferença encontrada, como esperado, é significativa para esta zona térmica de pequenas dimensões.

No Caso 1, o material FV está em contato direto com o ar interno da Zona 1 devido ao sistema janela+proteção ser composto por uma única camada de vidro, o que gerou um ganho maior de temperatura para este ambiente. Já nos Casos 4 e 5, por exemplo, a dupla camada de vidro que compõe a janela e o vidro *Low-E* utilizado na camada interna do Caso 5, garantiram que os ganhos térmicos pela esquadria fossem menores que os registrados pelo Caso 1.

O Caso 2 e o Caso 3, que se diferenciam apenas pela espessura da camada de ar, apresentaram desempenho semelhante: a maior diferença entre eles foi de  $0,3^{\circ}\text{C}$  às 08:00h. Durante o período da manhã, até as 13:00h, o Caso 4 apresentou as menores temperaturas, entretanto, durante o período em que não havia insolação, este passou a registrar as

temperaturas mais elevadas. O Caso 4 e o Caso 5 apresentaram temperaturas semelhantes, apenas com um atraso térmico maior para o Caso 4, devido ao vidro simples em comparação ao *Low-e* do Caso 5.

A configuração do Caso 5 foi encontrada na literatura como modo de aumentar a incidência de radiação no material FV, devido à alta transmitância do vidro *Low Iron* o que, em teoria, aumentaria a eficiência do sistema. Porém, a maior radiação solar incidente acarretou em um aumento nos ganhos térmicos da zona, comprovado pelo melhor desempenho térmico do Caso 4, que é composto por vidros simples.

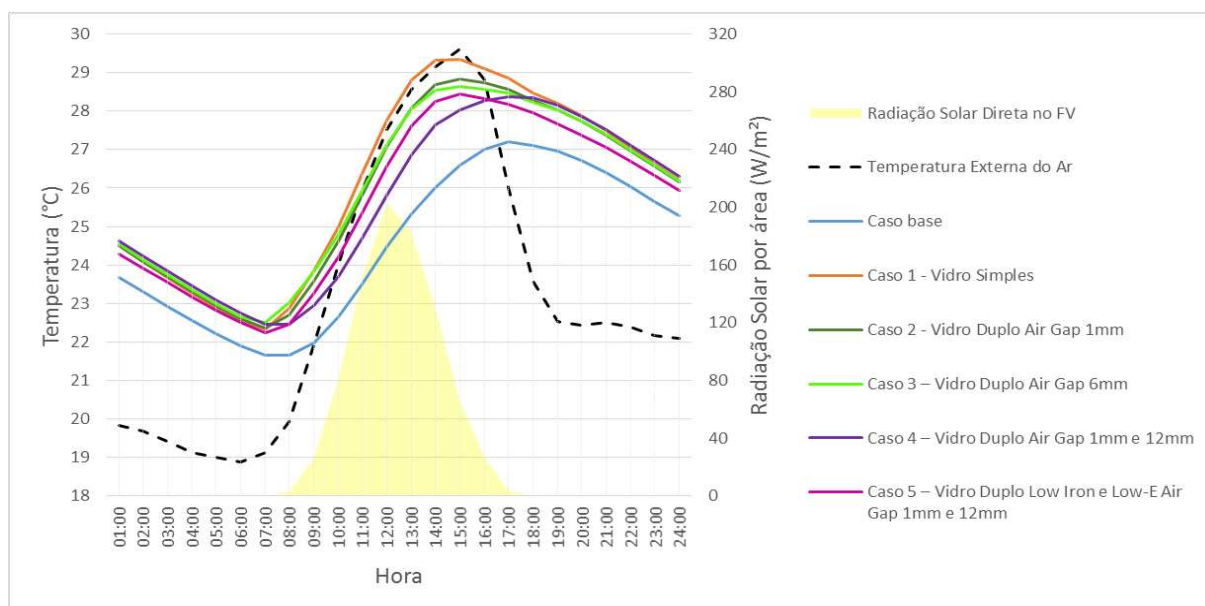


Figura 3.9 – Temperatura Média do Ar na Zona 1 simulada para o dia 20 de março, São Paulo, SP, latitude 23°S

### 3.5.2 Temperatura Superficial Interna da Janela

Para a temperatura superficial interna da janela a diferença entre o Caso Base e o Caso 5, que foi o caso que apresentou o maior pico de temperatura durante o período de insolação (cerca de 47°C), foi de aproximadamente 17,4°C, às 13:00h (Figura 3.10). No mesmo horário, o Caso 4 foi aquele que apresentou as menores diferenças em comparação ao Caso Base, porém, ainda assim significativas: cerca de 8,6°C. É importante destacar que o aumento da temperatura superficial interna da janela impacta a temperatura radiante a que os usuários podem estar submetidos.

A configuração do Caso 4 contribui para os menores valores registrados neste Caso, visto que o material FV se encontra mais distante do vidro interno do que nos outros Casos. O Caso 5, apesar de apresentar o mesmo afastamento que o Caso 4, possui vidros com propriedades diferentes.

O vidro voltado ao ambiente interno do Caso 5 é um vidro de baixa emissividade (*Low-E*), o que evita que o calor gerado pelo material FV penetre no ambiente. Porém, isto eleva a temperatura interna da janela e, conseqüentemente, a temperatura superficial dos vidros. Além disso, o vidro externo do Caso 5 é um vidro de alta transmitância o que potencializa os ganhos térmicos do FV intermediário e, conseqüentemente, a emissão térmica para o vidro voltado para o ambiente interno. Por isso, o Caso 5 apresentou os maiores valores para a temperatura superficial interna da janela.

Excluindo o Caso Base, a maior diferença durante o período de insolação foi cerca de 8,7°C (às 13:00h), ocorrida entre o Caso 4 e o Caso 5. O Caso 1 apresentou o segundo maior pico durante o período de insolação, cerca de 44,8°C (às 13:00h), por conter uma única camada de vidro. Assim, a temperatura superficial interna deste caso é medida no vidro que está recebendo radiação solar direta, ao contrário dos casos que apresentam vidro duplo, em que a temperatura é obtida da camada de vidro mais interna, e que não está em contato direto com o ar externo. O Caso 2 e o Caso 3 apresentaram, novamente, pouca diferença: cerca de 1,4°C no ponto com maior variação (às 08:00h).

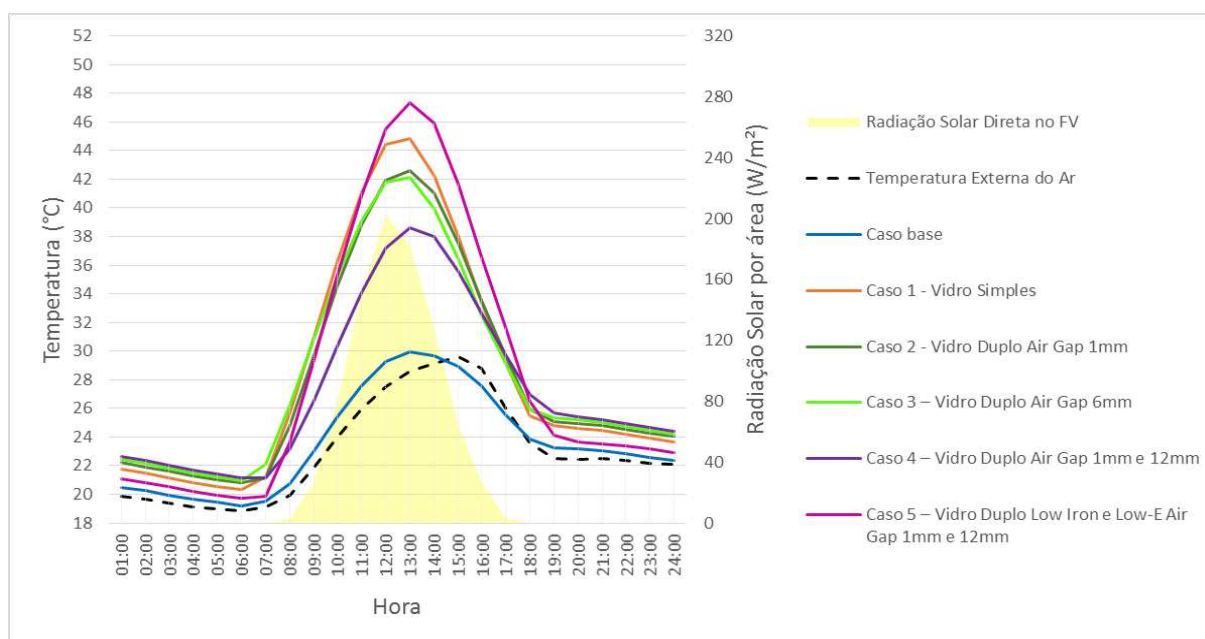


Figura 3.10 – Temperatura Superficial Interna da Janela simulada para o dia 20 de março, São Paulo, SP, latitude 23°S

### 3.5.3 Temperatura Superficial Externa da Janela

As simulações apresentaram variações muito significativas no valor da temperatura superficial externa da janela (Figura 3.11), o que pode influenciar na eficiência do sistema FV, visto que essa é utilizada como a temperatura da própria célula FV. A diferença chegou a atingir cerca de 20°C entre o Caso Base e o Caso 5. O pico da temperatura superficial externa

do Caso Base aproximou-se de 30°C às 13:00h, enquanto no Caso 5 foi registrado cerca de 50°C.

Dentre os Casos que contém o modelo térmico, a maior variação foi cerca de 7,3°C, entre o Caso 1 e o Caso 5 (às 13:00h). O Caso 1 apresentou os menores valores de temperatura durante o período de insolação, pelas perdas do *shade* diretamente para o ambiente interno. Nos outros casos, o vidro duplo retém parte do calor no interior da janela.

O Caso 2 e o Caso 3, apresentaram pouca diferença entre si, cerca de 1°C no ponto com maior variação (às 10:00h). O que indica que as trocas por convecção não se diferem, pois sabe-se que as trocas por radiação não dependem dos afastamentos e os modelos têm a limitação previamente comentada de não prover as trocas por condução.

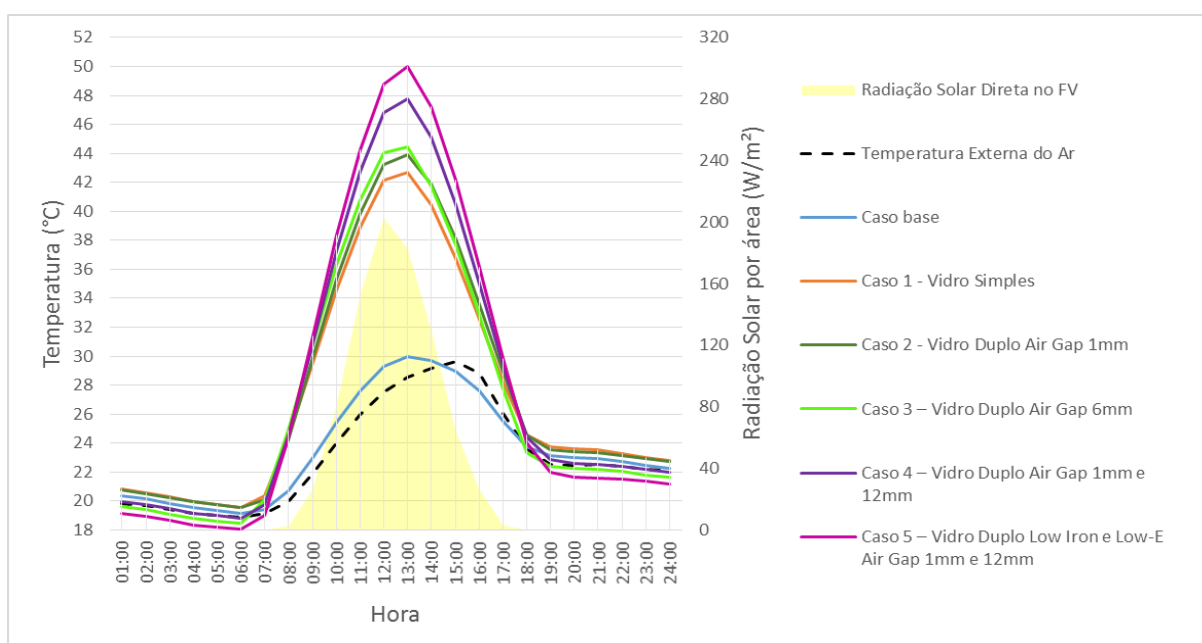


Figura 3.11 – Temperatura Superficial Externa da Janela = Temperatura da Célula FV simulada para o dia 20 de março, São Paulo, SP, latitude 23°S

### 3.5.4 Eficiência do Sistema FV

A eficiência do sistema se manteve abaixo da obtida nas condições padrão de ensaio<sup>13</sup> (*STC*), o que já era esperado devido às alterações nas variáveis condicionantes em uma situação real de funcionamento. Além disso, foi adotada uma eficiência de 95% para o inversor de frequência, que representa uma eficiência típica disponível para comercialização.

A eficiência obtida no banco de dados do *PVsyst* nas *STC* foi de 5,04% para o modelo escolhido, enquanto a máxima eficiência encontrada nas simulações foi de 3,42% para o Caso

<sup>13</sup> A norma ASTM E-1036 (1985) define os seguintes valores como condições padrão de ensaio (*STC*) para se obter a eficiência de um módulo fotovoltaico: 1000W/m<sup>2</sup> para irradiação; 25°C para temperatura do módulo; atmosfera média de 1.5 para espectro solar; 20°C para temperatura do ar externo; e velocidade do ar de 1m/s.

Base às 12:00h (Figura 3.12), que ainda não considera as propriedades térmicas do material FV, o que pode aumentar as perdas do sistema com o aumento de temperatura da célula. Assim, no pico de eficiência do Caso Base há uma redução de, aproximadamente, 32,14% na eficiência do sistema comparado à eficiência nas *STC*. A eficiência ainda é menor em outros horários do dia onde, devido as variações de radiação e temperatura, o sistema chega a apresentar 0,4% de eficiência (às 07:00h).

Foram contabilizadas perdas na eficiência do sistema na comparação entre o Caso Base e os outros casos, que representam as propriedades térmicas do sistema FV. No pico de eficiência do sistema (às 12:00h), a maior diferença foi entre o Caso Base que apresentou eficiência de 3,42% e o Caso 5 que apresentou 3,18% de eficiência. Considerando o valor da eficiência do Caso Base como máximo, o Caso 5, em comparação, apresentou uma redução de 7% na eficiência. Comparando os modelos térmicos entre si, sem considerar o Caso Base, a variação encontrada na eficiência do sistema não foi muito significativa (Figura 3.13).

Ao contrário do que se esperava, o Caso 5 apresentou os menores índices de eficiência. O uso do vidro *Low Iron* (alta transmitância) que, à princípio, foi utilizado no intuito de permitir uma maior radiação solar direta no sistema FV, ao acreditar que assim a geração de energia seria maior, acabou por elevar a temperatura da célula FV e reduzir a eficiência do sistema. Desta forma, o Caso 4 apresentou um desempenho melhor do que o Caso 5, tanto para a eficiência do sistema quanto para as questões referentes ao desempenho térmico.

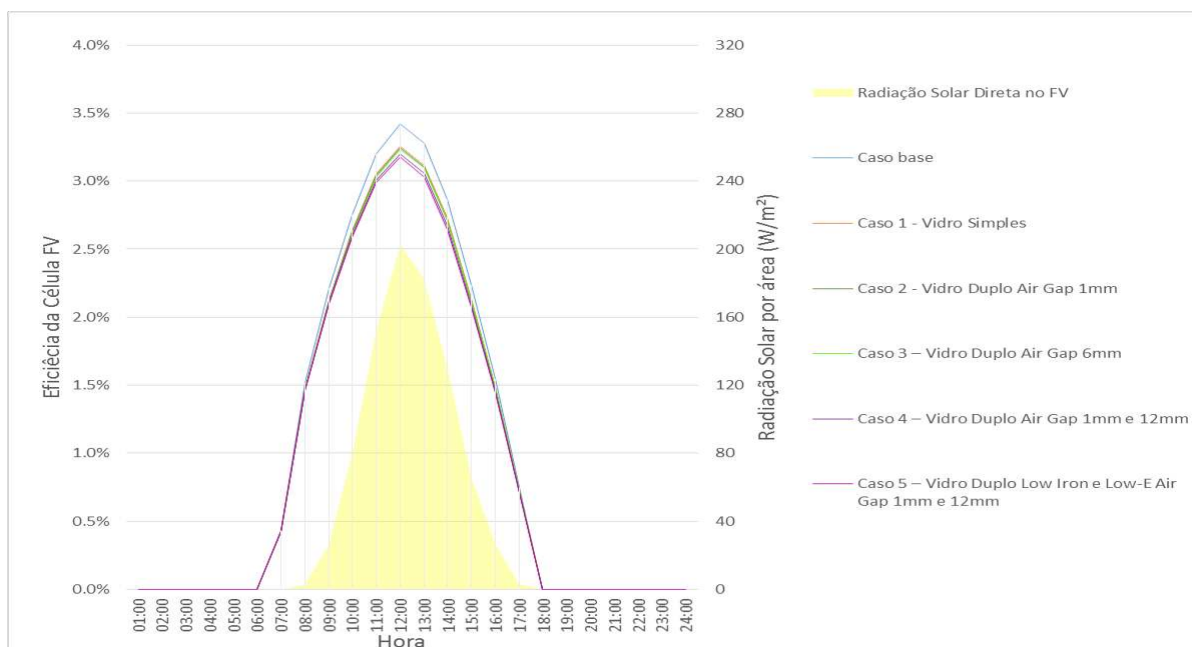


Figura 3.12 – Eficiência do Sistema FV simulada para o dia 20 de março, São Paulo, SP, latitude 23°S.

As simulações também foram realizadas para um dia de inverno. Foi selecionado o dia 17 de junho, este foi escolhido entre os dias de inverno por apresentar temperaturas baixas,

porém, ao mesmo tempo, boa disponibilidade de radiação solar, evitando dias nebulosos ou chuvosos. A variação entre os casos simulados foi bem semelhante aos resultados encontrados para o dia de verão (20 de março). As diferenças encontradas entre as duas estações, como esperado, se concentraram nos patamares de temperatura atingidos, o verão com temperaturas mais elevadas e o inverno com temperaturas mais baixas, contudo, as diferenças entre os casos simulados mantiveram um padrão.

A eficiência do sistema foi um pouco maior para o dia de inverno, devido a maior incidência de radiação solar direta no FV, pois este encontra-se em uma superfície vertical e durante o inverno a altura do sol é menor. Durante o dia de inverno a máxima incidência solar direta no FV foi de  $248\text{W/m}^2$  às 12:00h e a eficiência registrada para o Caso Base foi de 3,6%, enquanto no dia de verão, para o mesmo horário, o valor foi de  $202\text{W/m}^2$  e a eficiência foi 3,4%.

Além disso, no dia de inverno, a temperatura da célula FV foi menor, pois a temperatura do ar externo também se manteve mais baixa, estes fatores contribuíram para uma maior eficiência do sistema FV. No dia de inverno, para o Caso Base, a máxima temperatura da célula registrada foi de cerca de  $19^\circ\text{C}$  às 13:00 e a temperatura do ar externo marcava cerca de  $16^\circ\text{C}$ . No dia de verão, para o mesmo horário, a temperatura da célula foi cerca de  $30^\circ\text{C}$  e a temperatura do ar externo  $28^\circ\text{C}$ . O dia de verão apresentou uma redução de cerca de 5% no valor absoluto do pico de eficiência do sistema se comparado ao dia de inverno.

### **3.6 Conclusão**

As simulações mostraram que as trocas térmicas, devido ao acréscimo de temperatura ao considerar as propriedades termo fluidas do material FV, impactam o desempenho do ambiente e dos sistemas FV, como encontrado na literatura. O fato é comprovado pelo aumento na temperatura média do ar interno e, em especial, pelo aumento da temperatura superficial interna das janelas, onde todos os casos podem impactar a temperatura radiante a que os usuários podem estar submetidos.

Foi observado também uma grande variação na temperatura superficial externa dos Casos simulados em comparação ao Caso Base, que é utilizada pelo modelo como temperatura da célula FV e, portanto, diretamente relacionada com a eficiência do sistema. As simulações mostraram que a utilização de eficiências fixas para o sistema FV, principalmente, quando obtidas em condições padrão de ensaio, influenciam na estimativa da geração de energia ao superestimar a geração do sistema, pois existe uma grande variação da eficiência ao longo do dia em uma situação real de funcionamento, que se deve às perdas quando o sistema está exposto a condições que fogem às *STC*.

Apesar de, em um primeiro momento, as variações nas eficiências dos modelos térmicos em comparação ao Caso Base parecerem pouco expressivas, o que pode ser devido à baixa eficiência do material FV - silício amorfo semitransparente -, as perdas, em porcentagem, podem ser significativas em um sistema de geração em larga escala que disponha de grandes áreas para a instalação dos sistemas FV, ou ainda, para outras tecnologias FV que apresentem maior eficiência, diferentes da utilizada neste artigo.

Além disso, é importante destacar que os diferentes modelos de esquadrias adotados influenciaram mais nas questões do desempenho térmico, relacionado aos ganhos térmicos para o ambiente simulado, do que nas variações de eficiência do sistema FV. O Caso 5, que foi adotado por ser a configuração mais recorrente na literatura, e que utiliza vidro *Low Iron* na folha mais externa como modo de aumentar a incidência de radiação solar no material FV, mostrou-se menos eficiente, ao contrário do que se esperava. A maior radiação solar incidente acarretou em um aumento nos ganhos térmicos da zona, além de elevar a temperatura da célula solar e, conseqüentemente, reduzir a eficiência do sistema FV.

## Referências

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **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.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM E-1036**: Standard Methods of Testing Electrical Performance of Nonconcentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells. USA, 1985.

CRESESB. **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito**. 2017. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2018.

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.

ELSAIED, M. S. Optimizing thermal performance of building-integrated photovoltaics for upgrading informal urbanization. **Energy and Buildings**, v. 116, p. 232-248, 2016.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus Documentation**. Versão 8.4. U. S. Department of Energy, Jan. 2016. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>. Acesso em: 19 Set. 2017.

ENERGYPLUS. **Engineering Reference Manual**. Versão 8.4. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory; 2016-a.

\_\_\_\_\_. **Input Output Reference Manual**. Versão 8.4. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory; 2016-b.

ISO 15099: 2003. **Thermal performance of windows, doors, and shading devices – Detailed calculations**. International Standards Organization, Nov. 2003.

JONES, A. D.; UNDERWOOD, C.P. A thermal model for photovoltaic systems. **Solar Energy**, v. 70, p. 349-359, 2001.

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.

PVSYST. **Pvsyst Software Photovoltaic**. 2017. Disponível em: <<http://www.pvsyst.com/en/>>. Acesso em: 15 de agosto de 2017.

RODRIGUES, T. T.; CARLO, J. C. Simulação Térmica de Sistemas BIPV por meio do EnergyPlus. XIV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. ENCAC. **Anais...** Balneário Camboriú, SC, Set. 2017.

RORIZ, M. **Correções nas Irradiâncias e Iluminâncias dos Arquivos EPW da Base Antac**. 2012. Disponível em: <[http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos\\_climaticos/correcao\\_epw\\_antac.pdf](http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos_climaticos/correcao_epw_antac.pdf)>. Acesso em: 15 de maio de 2017.

SUWAPAET, N.; BOONLA, P. The Investigation of Produced Power Output During High Operating Temperature Occurrences of Monocrystalline and Amorphous Photovoltaic Modules. **Energy Procedia**, v. 52, p. 459-465, 2014.

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.

WONG, W. P.; SHIMODA, Y.; NONAKA, M.; INOUE, M.; MIZUNO, M. Semi-transparent PV: Thermal performance, power generation, daylight modelling and energy saving potential in a residential application. **Renewable Energy**, vol. 33, p. 1024-1036, Mai. 2008.

## 4 INFLUÊNCIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS A JANELAS NO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS NO BRASIL

### RESUMO

Sistemas fotovoltaicos integrados à construção (*Building-Integrated Photovoltaic - BIPV*) podem ser utilizados como parte integrante de um edifício e substituir componentes da envoltória. Porém, sua utilização pode influenciar a demanda de energia para aquecimento e para resfriamento, devido às trocas de calor entre o sistema FV (fotovoltaico) e o ambiente interno. Em países tropicais como o Brasil, este aumento na temperatura interna pode contribuir, significativamente, no consumo de energia com sistemas de resfriamento, principalmente, durante os meses de verão. Este artigo teve como objetivo avaliar a influência de sistemas *BIPV* no desempenho energético de um edifício de escritórios em diferentes latitudes brasileiras, levando em consideração as propriedades térmicas deste tipo de tecnologia. O método incluiu simulações computacionais no *EnergyPlus 8.4*, onde foram propostos sistemas *BIPV* integrados às janelas. O mesmo edifício foi simulado para quatro cidades brasileiras, com variação de 3 latitudes e duas zonas bioclimáticas: Florianópolis-SC e Belo Horizonte-MG, ambos ZB3, e Vitória-ES e Fortaleza-CE, ZB8. A análise foi realizada por meio do balanço entre a geração de energia FV e a demanda de consumo de energia com sistemas de ar condicionado, de iluminação artificial e de equipamentos, comparando com um Caso Base sem sistema FV. Na ZB3, Florianópolis e Belo Horizonte, o uso de sistemas *STPV* aumentou o consumo de energia com AVAC em cerca de 8% e 3%, respectivamente, enquanto na ZB8, Vitória e Fortaleza, o sistema *STPV* reduziu este consumo em cerca de 1%.

Palavras-chave: Energia Solar, *BIPV*, Simulação Computacional, *EnergyPlus*.

### 4.1 Introdução

No Brasil, um país de grande extensão territorial, a utilização de sistemas FV (fotovoltaicos) conectados à rede auxilia na redução de perdas por distribuição, comuns à geração hidrelétrica, uma vez que a energia pode ser gerada no próprio local de consumo. Além disso, a geração FV pode minimizar os impactos sobre o meio ambiente, causados pela eliminação de poluentes advindos da queima de combustíveis fósseis em termoelétricas e do descarte inapropriado de resíduos de usinas nucleares, que dão suporte para atender ao aumento da demanda de energia no país (FERREIRA; SCOMPARIN; CARRIGNANI, 2010).

Quando os sistemas FV estão localizados na própria edificação, eles podem ser instalados na envoltória de duas maneiras: adicionados/aplicados ao edifício (*Building-Added/Attached Photovoltaic - BAPV*); e integrados ao edifício (*Building-Integrated Photovoltaic - BIPV*). Os produtos *BAPV* requerem sistemas de montagem adicionais e são,

normalmente, utilizados em *retrofit*. Por outro lado, os produtos *BIPV*, devido a sua área e seu peso reduzido, tornam-se parte integrante do edifício e podem substituir completamente componentes da envoltória, como: coberturas; revestimento de paredes; elementos de sombreamento; e, até mesmo, fechamentos transparentes como janelas e panos de vidro (DIDONÉ; WAGNER; PEREIRA, 2014). Desta forma, além da geração de energia, o sistema FV adquire função estrutural, de proteção solar e de revestimento e, assim, é possível reduzir os gastos de sua implementação por meio do método de custos substituídos<sup>14</sup>.

Como exemplo, a substituição de um painel de vidro transparente por um vidro FV semi-transparente (*STPV*) requer um investimento extra com um período de reembolso de 13 anos (CANNAVALE et al., 2017). No entanto, esse tempo pode baixar para 5 anos quando a janela a ser substituída é composta de vidros de elevado desempenho, que são mais onerosos que vidros comuns (CANNAVALE et al., 2017).

O uso de sistemas *BIPV* pode influenciar a demanda de energia para aquecimento, para resfriamento e para iluminação artificial, bem como o conforto térmico e visual dentro do edifício. As janelas *STPV*, por exemplo, podem ser usadas para reduzir os ganhos de calor solar e gerar eletricidade, enquanto continuam a fornecer iluminação natural adequada e vista para o exterior, além de influenciar a estética da edificação (KAPSIS; ATHIENITIS, 2015).

Em sistemas FV, apenas uma pequena parte da radiação solar incidente é convertida em energia elétrica (5 a 25% em sistemas comerciais), o restante é refletido ou absorvido como calor (TIWARI; MISHRA; SOLANKI, 2011). Além disso, os painéis FV produzem uma quantidade substancial de calor enquanto geram energia. Consequentemente, os sistemas *BIPV* tem uma influência significativa na quantidade de calor transferido da envoltória e podem afetar a temperatura do ar interior e o conforto dos ocupantes. Akata, Njomo e Mempoou (2015) identificaram um aumento da temperatura do ar interior de cerca de 4°C para um edifício com sistema *BIPV* em Yaoundé, Camarões, tanto para o caso onde o sistema *BIPV* foi integrado ao telhado, quanto para o caso em que o sistema estava integrado às paredes de uma das fachadas.

O calor gerado/absorvido durante a conversão de energia solar em energia elétrica causa, também, o aumento da temperatura de funcionamento do módulo FV, que afeta tanto a corrente elétrica gerada quanto a sua tensão, diretamente relacionadas com a eficiência do sistema FV (WANG et al., 2006). Assim, é necessário precisão ao prever a temperatura do

---

<sup>14</sup> Neste método o valor do material de construção substituído pelo painel FV é descontado do custo do próprio painel. Tal artifício se aplica a edifícios em fase anterior à construção, etapa em que ainda não foram adquiridos ou instalados os materiais a serem substituídos (FERREIRA; SCOMPARIN; CARIGNANI, 2010).

módulo FV, principalmente em países tropicais como o Brasil onde a temperatura do painel sobe acima da temperatura de funcionamento ideal de 25°C (KANT et al., 2016).

Os dados de desempenho relatados pelos fabricantes são, normalmente, estabelecidos em condições padrão de ensaio (*Standart Test Conditions - STC*<sup>15</sup>) que podem não vir a ocorrer na prática, superestimando ou subestimando a geração de energia segundo o desempenho previsto (NG; MITHRARATNE; KUA, 2013). Olivieri et al. (2014) mostraram que os valores médios de eficiência de conversão dos sistemas *STPV* ao ar livre em Madri, Espanha, variam entre 2,1% e 3,2% em condições reais de operação. Estes valores se afastam das eficiências apresentadas pelos fabricantes nas *STC* que, geralmente, variam entre 5% e 9%, em sistemas disponíveis para comercialização.

Park et al. (2010) avaliaram os efeitos das características térmicas do módulo FV sobre o desempenho de geração elétrica. O experimento foi realizado nas *STC* e em condições externas. Os resultados mostraram que a potência diminuiu cerca de 0,48% (em *STC*, variando apenas a condição de temperatura) e 0,52% (em condições externas, abaixo de 500W/m<sup>2</sup>) para cada 1°C acima da temperatura de funcionamento normal do módulo FV.

Assim, para uma correta previsão da influência destes sistemas no desempenho energético de edifícios é necessário levar em conta a sua influência térmica nos ambientes internos e as perdas de eficiência devido às condições ambientais, principalmente, em países tropicais como o Brasil, onde as temperaturas externas são elevadas e o acréscimo na temperatura interna pode gerar um aumento no consumo por sistemas de resfriamento.

## 4.2 Objetivo

Este artigo tem como objetivo avaliar a influência de sistemas *BIPV* no desempenho energético de um edifício de escritórios em diferentes latitudes brasileiras, levando em consideração as propriedades térmicas deste tipo de sistema.

## 4.3 Trabalhos Correlatos

Apesar das vantagens da geração FV, um dos grandes entraves para a sua popularização é o alto custo de implementação destes sistemas. Assim, alguns estudos

---

<sup>15</sup> A norma ASTM E-1036 (1985) define os seguintes valores como condições padrão de ensaio (*STC*) para se obter a eficiência de um módulo fotovoltaico: 1000W/m<sup>2</sup> para irradiação; 25°C para temperatura do módulo; atmosfera média de 1.5 para espectro solar; 20°C para temperatura do ar externo; e velocidade do ar de 1m/s.

buscam quantificar a influência no desempenho energético de edifícios que integrem este tipo de tecnologia, para verificar a viabilidade econômica de sua implementação<sup>16</sup>.

Dentre os trabalhos que abordam a integração de sistemas FV em fachadas, é possível citar Cannavale et al. (2017), que avaliaram o consumo global de energia para aquecimento, ar condicionado e iluminação artificial, em relação ao rendimento global de energia gerado por sistemas *BIPV* integrados a um edifício localizado em Bari, Itália. Os resultados mostraram que em condições ideais (sem obstrução do entorno) poderiam ser obtidas economias acumuladas de até 18%. Do mesmo modo, Zhang et al. (2016) também chegaram a um percentual de 18% de economia no consumo de eletricidade para sistemas *STPV* integrados às janelas de um edifício localizado em Hong Kong.

Miyazaki, Akisawa e Kashiwagi (2005) encontraram uma economia de 55% no consumo de eletricidade ao utilizar uma janela *STPV* otimizada em um edifício de escritórios localizado em Tóquio, Japão. Para alcançar este percentual de economia o estudo considerou a utilização de controles de iluminação e levou em conta condições ideais para o percentual de área envidraçada da fachada e para a transmitância do sistema *STPV*.

Kapsis, Dermardiros e Athienitis (2015) afirmam que para um edifício em Toronto, Canadá, um módulo *STPV* com transmissão efetiva visível de 30% oferece luz diurna suficiente para o ambiente ao longo do ano.

Chae et al. (2014) avaliaram a influência de sistemas *STPV* no desempenho energético de um edifício para seis condições climáticas diferentes nos EUA e concluíram que as propriedades térmicas e óticas apropriadas das janelas *STPV* são diferentes para cada localidade. Em baixas e médias latitudes as janelas *STPV* podem economizar até 30% do consumo anual de energia com *HVAC* (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*).

Kapsis e Athienitis (2015) identificaram que, para um edifício comercial com sistemas *BIPV* localizado em Toronto, Canadá, os fatores que mais influenciam no rendimento anual de eletricidade, nos ganhos de calor solar e na disponibilidade luz do dia, foram a orientação da fachada e a porcentagem de área envidraçada.

Didoné e Wagner (2013) demonstraram que para o Brasil, que apresenta grande disponibilidade de radiação solar, o uso de janelas *STPV* pode economizar até 43% da eletricidade consumida em um edifício, apesar da pouca eficiência deste tipo de tecnologia (cerca de 3% em condições reais de operação). Esta economia pode ser alcançada por meio da geração de energia FV e da redução no consumo por sistemas *HVAC*, uma vez que a janela possui uma transmitância solar reduzida, diminuindo a carga de energia necessária

---

<sup>16</sup> O incremento no grau de sustentabilidade ambiental alcançado através do emprego da geração FV não é representado nos custos da maioria dos estudos e, se fossem, seria irrisório o custo do sistema FV em comparação ao sistema convencional utilizado no Brasil (FERREIRA; SCOMPARIN; CARIGNANI, 2010).

para resfriamento. No entanto, esta redução na transmissão visível pode aumentar o consumo de energia com iluminação artificial, o que pode ser contornado pelo uso de sistema de controle de iluminação.

Ferreira, Scomparin e Carignani (2010) propuseram a substituição dos vidros de janelas de um edifício público na cidade de Cuiabá (Brasil) por um sistema FV interligado à rede com módulos semi-transparentes e opacos. Os sistemas FV permitiram gerar aproximadamente 3,5% da energia consumida anualmente no edifício em estudo. A instalação dos módulos opacos representou um acréscimo de apenas 7,43% do custo de instalação em substituição a janelas de vidro laminado refletivo (embora essa seja uma condição teórica pois elimina a transparência que proporciona vista e iluminação natural para o ambiente interno), já para os módulos *STPV* o acréscimo foi de 182,38%.

#### 4.4 Método

Foi simulado o desempenho energético de um edifício de escritórios com sistemas *BIPV* integrados a fachada, e variando sua localização para cidades brasileiras em diferentes latitudes e zonas bioclimáticas. A análise foi realizada por meio do balanço entre a geração de energia FV e a demanda de consumo de energia com sistemas de ar condicionado, de iluminação artificial e de equipamentos, com a comparação entre um Caso Base (CB), sem sistema FV, e um Caso com sistema *STPV*.

As simulações foram realizadas para um ano completo, por meio do *software EnergyPlus*<sup>17</sup>, versão 8.4, com uso de arquivo climático *Inmet* para as cidades selecionadas (RORIZ, 2012). Destaca-se que os arquivos climáticos representam o clima da cidade e não o microclima da área de projeto, o que pode gerar diferenças nos resultados.

As localidades selecionadas foram Florianópolis-SC, Belo Horizonte-MG, Vitória-ES e Fortaleza-CE, representando cidades brasileiras com variações na disponibilidade de radiação solar, influenciada pela latitude. Florianópolis é uma das cidades com maior nebulosidade do país e, por isso, apresenta os menores índices de irradiação, com média anual dos totais diários de 4,24 kWh/m<sup>2</sup> (Quadro 4.1), no inverno pode apresentar temperaturas tão baixas quanto 5°C. Fortaleza foi selecionada por sua baixa latitude, pelo clima quente e por apresentar uma das maiores médias diárias de irradiação solar no país, 5,69 kWh/m<sup>2</sup> (Quadro 4.1). Vitória e Belo Horizonte, apesar de estarem localizadas em latitudes muito próximas, se encontram em diferentes zonas bioclimáticas, assim, a escolha

---

<sup>17</sup> O *EnergyPlus* possibilita análises de cargas térmicas e consumo de energia em sistemas de aquecimento e resfriamento, de ventilação e de iluminação das edificações, levando em consideração ainda, as cargas internas e as propriedades dos materiais e de outros elementos que participam das trocas térmicas, sendo integrados numa avaliação interativa (CARLO, 2008).

buscou identificar o peso das características climáticas da localidade onde o sistema FV se encontra.

Quadro 4.1 – Características das cidades simuladas

| Cidade         | ZB | Clima             | Latitude | Temperatura média anual (°C) | Média anual dos totais diários de irradiação solar (kWh/m <sup>2</sup> ) | Altura solar às 12h do solstício de inverno (21/06) |
|----------------|----|-------------------|----------|------------------------------|--|---|
| Florianópolis  | 3  | Subtropical       | 27°67'S  | 20                           | 4,24   | 37,0°   |
| Belo Horizonte | 3  | Subtropical úmido | 19°55'S  | 21                           | 4,35   | 46,3°   |
| Vitória        | 8  | Tropical          | 20°19'S  | 24                           | 4,96   | 46,0°   |
| Fortaleza      | 8  | Tropical          | 3°78'S   | 25                           | 5,69   | 62,4°   |

Fonte: CRESESB (2017).

#### 4.4.1 Modelo Simulado

Para a escolha do modelo de estudo foi realizado um levantamento entre os edifícios comerciais, de serviços e públicos etiquetados (ENCE PBE Edifica) no Brasil (INMETRO, 2017). A escolha por tipologias comerciais é devido à coincidência entre o pico de consumo de energia elétrica destes edifícios com os horários de maior insolação e, conseqüentemente, maior geração de energia por sistemas FV. Além disso, o perfil de edifícios etiquetados é compatível com a inserção de sistemas FV que, por ser uma tecnologia nova e de valor ainda alto, empreendimentos que já demonstram certa preocupação com o desempenho termoenergético e o uso de tecnologias mais sustentáveis, estarão mais dispostos a serem pioneiros e investir recursos para que o setor se desenvolva (ALMEIDA, 2017).

O edifício Prime Savassi, localizado em Belo Horizonte, foi selecionado dentre as construções etiquetadas para servir de base para a criação do protótipo simulado. A edificação possui ENCE nível A na etapa de projeto, para envoltória e iluminação. A escolha levou em consideração a forma do edifício, o número de pavimentos e a grande área envidraçada presente em sua fachada (Figura 4.1) que é compatível com a concepção de um edifício BIPV, com grande potencial para a geração de energia solar, principalmente, por sistemas *STPV*. O edifício apresenta as maiores áreas de fachada voltadas para Norte e Sul.

A edificação de atividade corporativa apresenta uma área de 9.600m<sup>2</sup>, divididos em 18 pavimentos, que podem ser desmembrados em uma base e uma torre de escritórios (Figura 4.1). Na base estão localizadas: garagens; entradas; e uma área de convívio, com salas multiuso em pilotis.

A torre de escritórios apresenta planta livre, destinada a salas comerciais, e está subdividida em dois grupos de pavimentos tipo com dimensões diferentes: os pavimentos inferiores, com cerca de 410m<sup>2</sup>; e os pavimentos superiores, com cerca de 385m<sup>2</sup>.

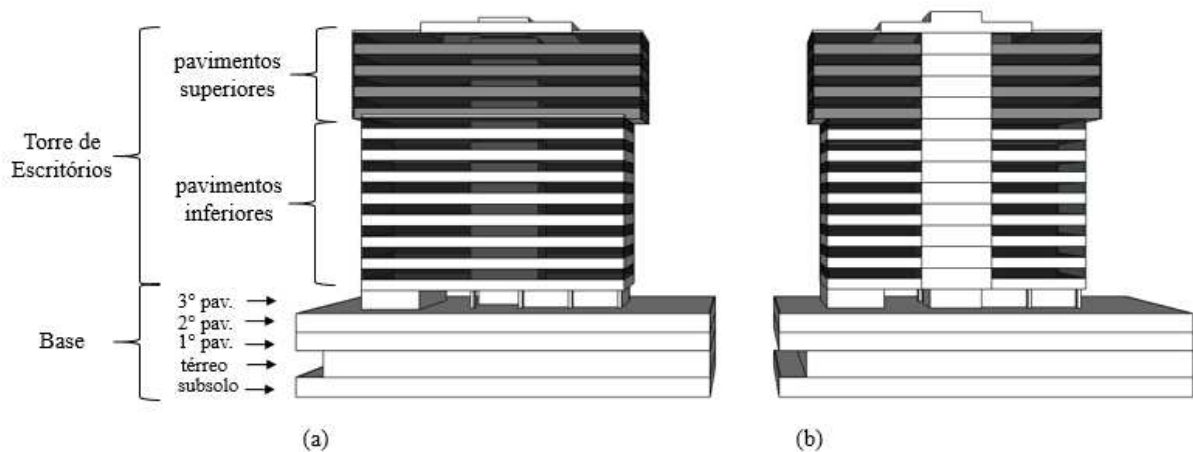


Figura 4.1 – (a) Perspectiva da fachada norte e (b) perspectiva da fachada sul

A planta tipo dos pavimentos inferiores se repete do quarto ao décimo primeiro pavimento, com proposta de ocupação elaborada pelos projetistas via *layout*, que para as simulações é representada por 9 zonas térmicas (Figura 4.2).

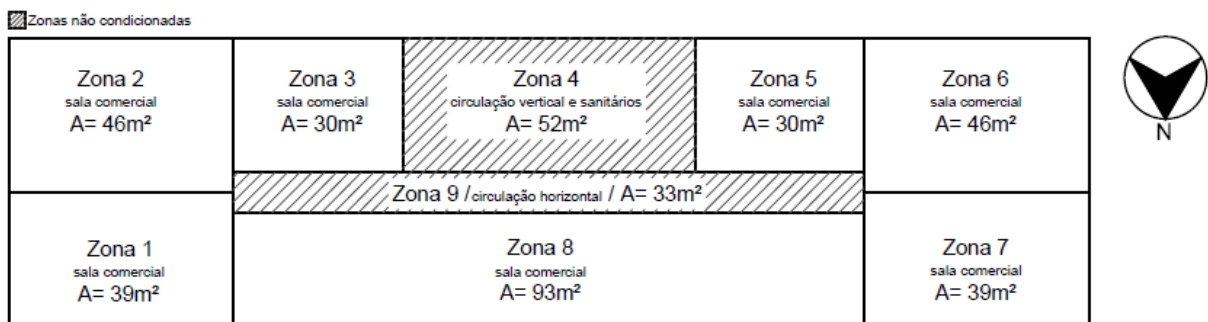


Figura 4.2 –Zoneamento térmico dos pavimentos inferiores

A planta tipo dos pavimentos superiores se repete do décimo segundo ao décimo quinto pavimento, e está dividida em duas grandes salas com planta livre, representada por 3 zonas térmicas (Figura 4.3).

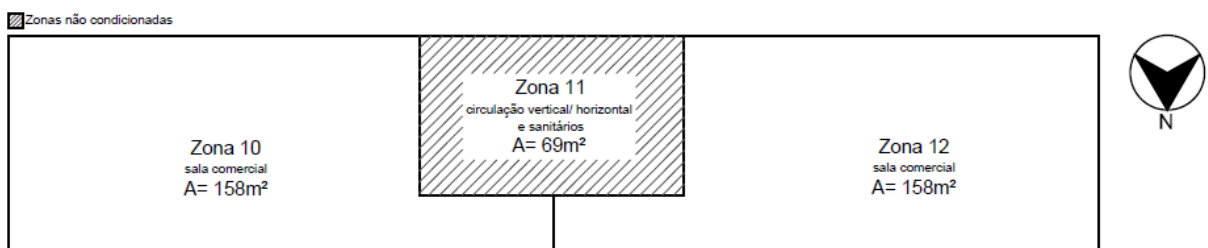


Figura 4.3 –Zoneamento térmico dos pavimentos superiores

A cobertura possui cômodos destinados à caixa d'água e à sala de máquinas, o restante são terraços, o que levou o fechamento superior do décimo quinto pavimento ser configurado conforme a Figura 4.4.

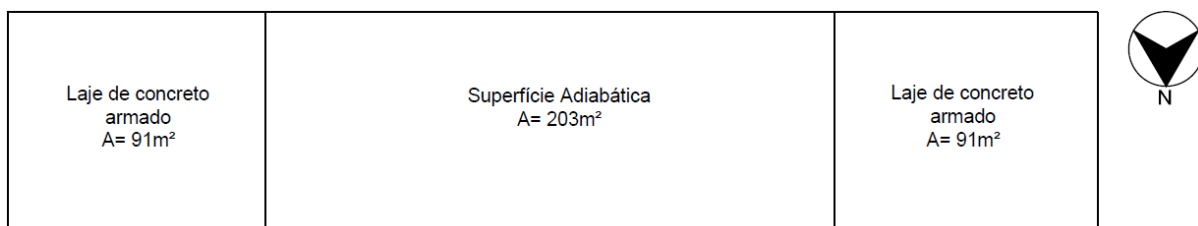


Figura 4.4 –Teto das zonas do décimo quinto pavimento

As simulações foram realizadas apenas para a torre de escritórios, pois são onde se concentram os ambientes de permanência prolongada. Desta forma, foram simulados 3 pisos de cada grupo de pavimentos (superiores e inferiores), que apresentam condições distintas: os dois extremos e um intermediário (Figura 4.5), com uso de multiplicadores para os demais (método usual em simulações por meio do *EnergyPlus*), e sem a base<sup>18</sup>. O sombreamento do entorno foi desconsiderado.

Apesar da base não ser simulada, a altura dos pavimentos foi configurada conforme a realidade devido à ação dos ventos, iniciando a modelagem da torre de escritórios pelo quarto pavimento e levando em conta sua distância real até o solo (Figura 4.5).

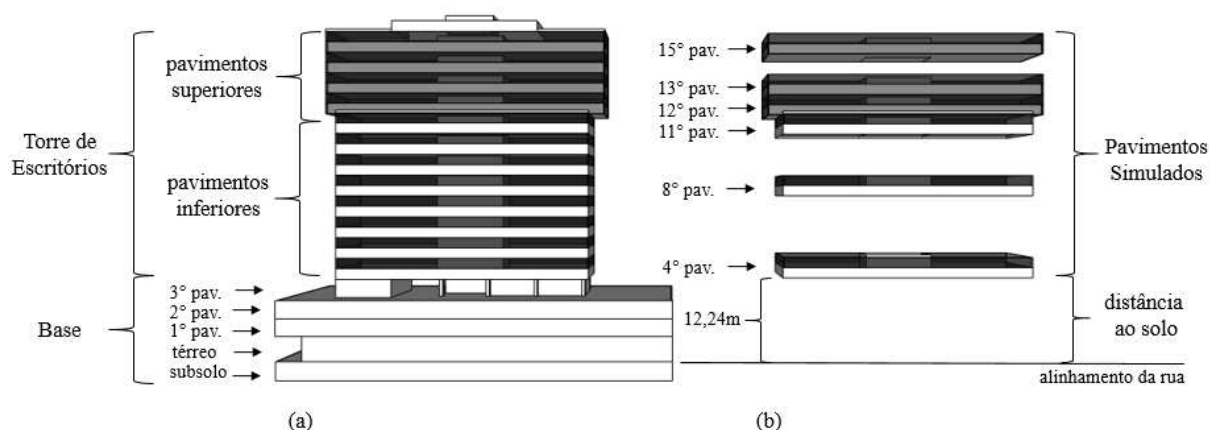


Figura 4.5 – (a) Perspectiva da fachada norte e (b) pavimentos simulados

Para as paredes internas foram especificadas divisórias de gesso segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005), já para as paredes externas e para a laje foram adotadas as tipologias de parede n°36 e de cobertura n°1, respectivamente, do Anexo Geral V da Portaria de n° 50/2013 do Inmetro (INSTITUTO..., 2013). Para a caixa de elevadores e circulação vertical

<sup>18</sup> De acordo com Hachem, Athienitis e Fazio (2014) a aplicação de sistemas FV nos três primeiros pavimentos de edificações localizadas em grandes centros urbanos deve ser evitada (mediante avaliação prévia), pois, estes pavimentos apresentam alto índice de sombreamento e baixa disponibilidade de radiação solar direta. Esse fato deve ser levado em conta, principalmente, quando se trata de janelas com sistema *STPV*, os quais podem ser substituídas por janelas com vidros claros, para aproveitar mais a pouca luz natural disponível. Neste caso, outro fator relevante é a necessidade de ventilação natural para os pavimentos de garagem, para a retirada dos gases tóxicos provenientes da queima de combustível, que poderia ser inviabilizada pela presença de sistemas *STPV* que, geralmente, impedem a ventilação natural.

foram adotadas paredes de concreto (Tabela 4.1). Os materiais utilizados atendem aos requisitos de nível A para ZB3 e ZB8 do RTQ-C (INSTITUTO..., 2010).

Tabela 4.1 – Especificação dos materiais construtivos utilizados

| Componentes                        | Materiais        | Espessura (cm) | Transmitância [W/(m <sup>2</sup> K)] | Capacidade térmica [kJ/m <sup>2</sup> K] | Absortância solar |
|------------------------------------|------------------|----------------|--------------------------------------|--|-------------------|
| <b>Paredes Internas</b>            | Gesso            | 1,25           | 2,66                                 | 26,00                                    | 0,20              |
|                                    | Câmara de ar     | > 5,00         |                                      |  |                   |
|                                    | Gesso            | 1,25           |                                      |  |                   |
| <b>Paredes Externas</b>            | Placa Cimentícia | 1,00           | 0,90                                 | 29,00                                    | 0,40              |
|                                    | Lã de Rocha      | 4,00           |                                      |  |                   |
|                                    | Gesso            | 1,25           |                                      |  |                   |
| <b>Paredes Circulação Vertical</b> | Concreto         | 10,00          | 4,40                                 | 240,00                                   | 0,50              |
| <b>Laje</b>                        | Concreto         | 10,00          | 3,73                                 | 220,00                                   | 0,50              |

Fonte: Anexo Geral V - Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros da Portaria de nº 50/2013 do Inmetro (INSTITUTO..., 2013).

A tipologia de edifício adotada, empresarial de escritórios, apresenta ambientes condicionados artificialmente, com um sistema central composto de resfriador de líquido a água por torre de resfriamento e *fan-coils* para distribuição do ar. O sistema tem auto dimensionamento pelo arquivo climático e temperatura de *setpoint* de resfriamento de 26°C e de aquecimento de 18°C. As condições de conforto térmico não foram analisadas pois estas são atendidas pelo sistema, já que os ambientes são condicionados artificialmente, as horas não atendidas pelo sistema foram utilizadas como indicador de controle.

O sistema de esquadria com material *STPV* integrado tende a ser fixo, assim, a ventilação natural não foi considerada nas simulações, mas adotou-se uma taxa de infiltração de 0,5 trocas de ar por hora nos ambientes simulados, usado para ambientes condicionados artificialmente e sem ventilação natural (BAVARESCO; GHISI, 2017).

Por se tratar de um edifício de escritório, os horários de ocupação foram definidos entre 8h e 18h, com horário de intervalo das 12h às 14h, com exceção dos finais de semana, quando o edifício não é ocupado. Para ocupação foi adotado 14,7m<sup>2</sup>/pessoa conforme definido por Santana (2006) para edifícios de escritórios, a iluminação foi especificada para atender aos limites de densidade de potência para nível A estabelecidos pelo RTQ-C (INSTITUTO..., 2010) e a carga térmica de equipamentos foi definida conforme Carlo (2008), Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Cargas térmicas adotadas nos modelos simulados

|                     | <b>Cargas internas<br/>(W/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Referência</b>                  |
|---------------------|--|------------------------------------|
| <b>Equipamentos</b> | 9,6  | (CARLO, 2008)                      |
| <b>Iluminação</b>   | 9,7  | Nível A RTQ-C (INSTITUTO..., 2010) |
| <b>Ocupação</b>     | 8,84   | (SANTANA, 2006)                    |

Após obtidos os consumos dos casos base para cada cidade, eles foram comparados a *benchmarks* de energia de edifícios corporativos por meio da plataforma de cálculo do Centro Brasileiro de Construção Sustentável, cuja validação é baseada em Borgstein e Lamberts (2014).

#### 4.4.2 Modelo Fotovoltaico

O edifício selecionado apresenta janelas em fita que ocupam aproximadamente 50% da área da fachada, assim, foram propostos sistemas *STPV* integrados às janelas.

A simulação dos sistemas FV teve duas abordagens: uma elétrica e outra térmica. Como o *EnergyPlus* não considera os materiais do painel FV nos cálculos térmicos do ambiente simulado (RODRIGUES; CARLO, 2017), foram utilizados painéis de sombreamento (categoria *shade*) para a simulação térmica dos sistemas *STPV*. Assume-se que cada sistema de abertura possui um painel de sombreamento, e este painel foi configurado com as propriedades térmicas do material FV, *A-SI Thru PV 2mm* (Tabela 4.3), cuja modelagem foi feita conforme o método desenvolvido no Capítulo 3 (Figura 4.6). O modelo FV elétrico para o cálculo da geração de energia foi locado na superfície externa do vidro mais externo.

A esquadria com sistema *STPV* é composta por uma folha de vidro externa (*Clear 6mm*), uma folha de vidro interna (*Clear 3mm*), um *shade* intermediário (*A-SI Thru PV 2mm*), envolto em duas camadas de ar adjacentes com 6mm de espessura cada (Figura 4.6).

Para a simulação do CB foi adotado um vidro de alto desempenho composto por uma única folha de vidro com espessura de 8mm, o vidro de n°31 chamado *Reflecta Cinza* do Anexo Geral V do RAC (INSTITUTO..., 2013).

Tabela 4.3 – Propriedades térmicas e óticas dos vidros e do sistema *STPV* utilizados nas simulações

| <b>Propriedades térmicas</b>            | <b>Reflecta<br/>Cinza 8mm</b> | <b>Clear 6mm</b> | <b>Clear 3mm</b> | <b>A-SI Thru PV 2mm</b> |
|---|-------------------------------|------------------|------------------|-------------------------|
| <b>Transmitância solar</b>              | 0,240                         | 0,775            | 0,837            | 0,080                   |
| <b>Refletância solar</b>                | 0,170                         | 0,071            | 0,075            | 0,125                   |
| <b>Absortância Solar</b>                | 0,590                         | 0,154            | 0,088            | 0,795                   |
| <b>Emissividade anterior</b>            | 0,840                         | 0,840            | 0,840            | 0,900                   |
| <b>Emissividade posterior</b>           | 0,840                         | 0,840            | 0,840            | 0,900                   |
| <b>Condutividade térmica<br/>(W/mK)</b> | 0,900                         | 0,900            | 0,900            | 0,190                   |

Fonte: baseada em Didoné e Wagner (2013) e *EnergyPlus* (2016).

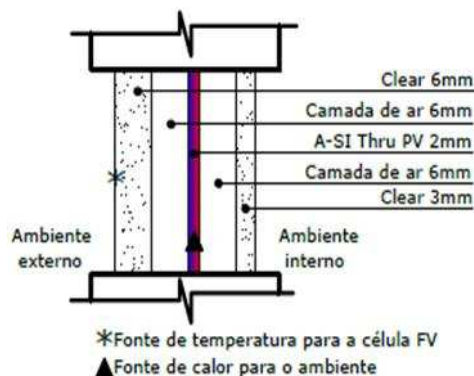


Figura 4.6 – Modelo de esquadria adotado

As características elétricas do sistema FV foram obtidas por meio do *software PVsyst* (PVSYST, 2017), uma ferramenta que permite ao usuário analisar diferentes configurações de modelos FV para identificar a melhor solução possível. O *software* conta com uma base de dados onde é possível obter as propriedades elétricas de centenas de sistemas FV catalogados. O modelo escolhido para os sistemas STPV foi o *ASI THRU-1-IO 10%*, um painel FV semitransparente de silício amorfo do fabricante *Schott Solar AG*, com eficiência de 5,04% para as condições de teste padrão (*STC - Standart Test Conditions*).

O *software* apresentou limitações para a utilização do modelo *EOD (Equivalent One-Diode)* no cálculo da geração de energia FV para o edifício todo, assim, foi necessário adotar o modelo *Simple* que utiliza uma eficiência fixa. Foi adotada a eficiência fornecida pelo fabricante nas *STC*, mas a utilização desse valor superestima a geração de energia FV (Capítulo 3).

## 4.5 Resultados e Discussões

### 4.5.1 Análise do Desempenho Energético

A Figura 4.7 apresenta o consumo por usos finais pelos sistemas de iluminação, de equipamentos e de AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) do Caso Base (CB) que, como esperado, variou de acordo com cada cidade: 64 kWh/m<sup>2</sup> para Florianópolis; 68 kWh/m<sup>2</sup> para Belo Horizonte; 84 kWh/m<sup>2</sup> para Vitória; e 92 kWh/m<sup>2</sup> para Fortaleza. A principal diferença foi decorrente do consumo por resfriamento. Enquanto em Florianópolis este foi de 16 kWh/m<sup>2</sup>, ou 25,5% do consumo total da torre de escritórios, em Fortaleza o consumo por resfriamento foi de 40 kWh/m<sup>2</sup>, que corresponde a 44,1% do consumo total da torre de escritórios.

As horas de resfriamento não atendidas pelo sistema, no CB, foram de: 82,50h para Florianópolis; 68,50h para Belo Horizonte; 170,25h para Vitória; e 308,25h para Fortaleza.

Este último ultrapassou o limite de 300 horas/ano exigidas pela Standard 90.1 (ASHRAE, 2013), porém, optou-se por manter o auto dimensionamento em todos os casos para fins de comparação, visto que somente nesta cidade o sistema de condicionamento não atendeu ao limite prescrito pela norma internacional.

Em Vitória e Fortaleza, por estarem localizadas na ZB8, não houve consumo por aquecimento. Em Florianópolis e em Belo Horizonte este consumo foi registrado, por apresentarem temperaturas mais amenas, principalmente, durante os meses de inverno. Entretanto, o aquecimento participa com uma porcentagem mínima em relação ao consumo total da torre de escritórios, 0,117% e 0,003%, respectivamente.

O consumo por iluminação e equipamentos foi o mesmo para todas as cidades, pois foram inseridos como constantes.

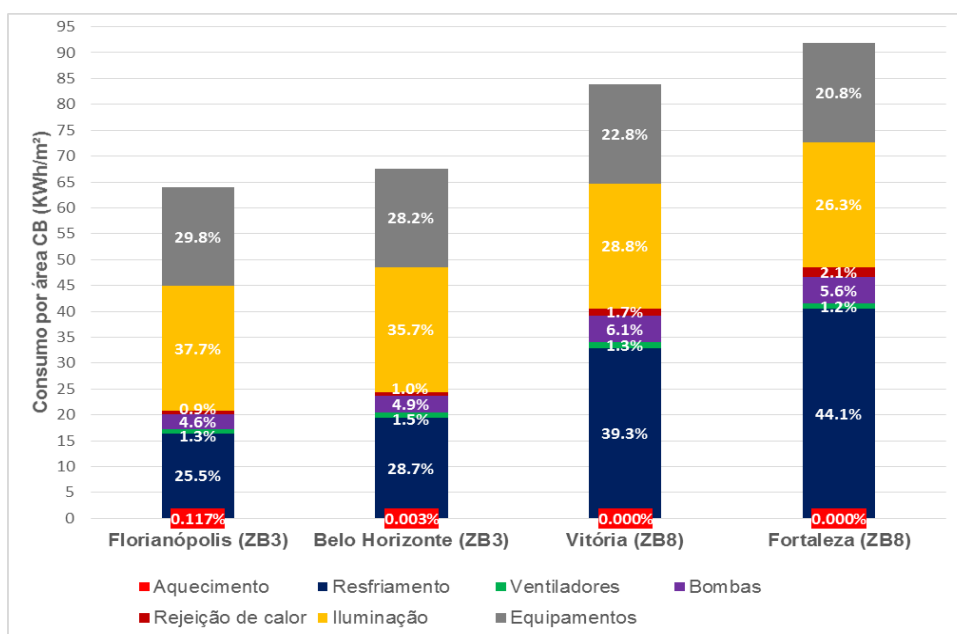


Figura 4.7 – Usos finais do consumo anual de energia do Caso Base para cada cidade

Também foi realizada a avaliação comparativa (*benchmarking*) do consumo anual do Caso Base para as 4 cidades e os gráficos da Figura 4.8 indicam o nível de eficiência atingido pelo protótipo simulado em comparação a edifícios semelhantes no mercado brasileiro, neste caso, edifícios corporativos. O protótipo simulado ficou classificado como muito eficiente para todas as cidades, mostrando que a tipologia escolhida e os materiais especificados foram compatíveis com o clima das cidades simuladas.

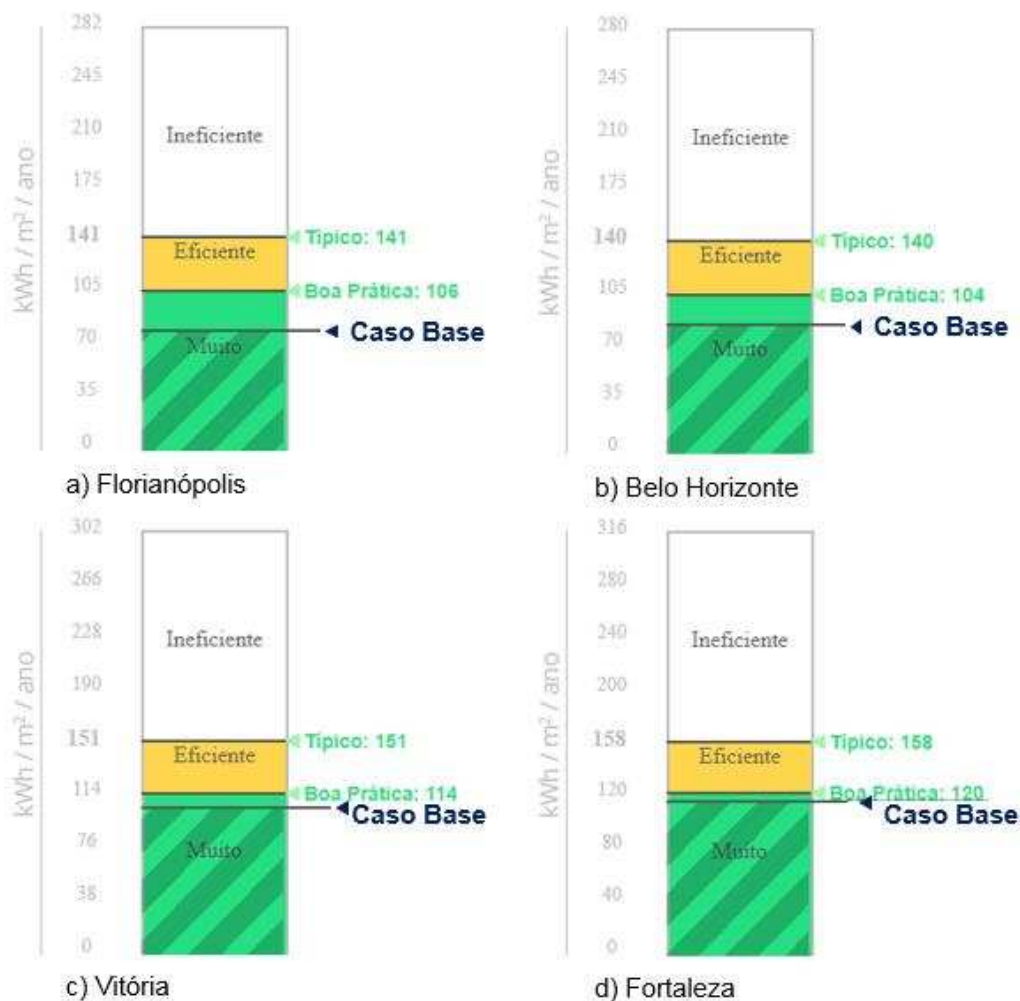


Figura 4.8 – *Benchmarking* do consumo anual do Caso Base para as 4 cidades: (a) Florianópolis; (b) Belo Horizonte; (c) Vitória; (d) Fortaleza

#### 4.5.2 Influência do BIPV

##### *Florianópolis:*

Em Florianópolis, o consumo do sistema de AVAC que mais variou do Caso FV em comparação ao CB, foi o consumo por resfriamento (Tabela 4.4), que aumentou 7230,65 kWh (9,19% de aumento). Embora o consumo por aquecimento no Caso FV tenha apresentado uma redução de 65,74% em comparação ao CB, isto representa uma parcela pequena do consumo total da torre de escritórios (item 4.5.1), de apenas 236,47 kWh. As horas de resfriamento não atendidas pelo sistema, no Caso FV, foram de 104h.

Em Florianópolis, a utilização do sistema STPV gerou um aumento de 8,19% no consumo total de energia por AVAC e, o consumo total da torre de escritórios se elevou em 2,66% devido aos efeitos térmicos.

Tabela 4.4 – Comparação do consumo anual de energia entre o Caso Base e o Caso FV de Florianópolis

|                               | <b>CASO BASE</b> | <b>CASO FV</b> | <b>FV – CB*</b> | <b>(FV – CB)/CB*</b> |
|-------------------------------|------------------|----------------|-----------------|----------------------|
|                               | (kWh)            | (kWh)          | (kWh)           | (%)                  |
| <b>Aquecimento</b>            | 359,70           | 123,23         | -236,47         | -65,74               |
| <b>Resfriamento</b>           | 78681,33         | 85911,98       | 7230,65         | 9,19                 |
| <b>Ventiladores</b>           | 3929,24          | 3898,47        | -30,77          | -0,78                |
| <b>Bombas</b>                 | 14136,92         | 15136,40       | 999,48          | 7,07                 |
| <b>Rejeição de calor</b>      | 2815,50          | 3033,83        | 218,33          | 7,75                 |
| <b>Consumo total com AVAC</b> | 99922,69         | 108103,91      | 8181,22         | 8,19                 |
| <b>Iluminação</b>             | 116261,20        | 116261,20      | 0,00            | 0,00                 |
| <b>Equipamentos</b>           | 91881,00         | 91881,00       | 0,00            | 0,00                 |
| <b>Consumo total da Torre</b> | 308064,89        | 316246,11      | 8181,22         | 2,66                 |

\*Valores positivos representam aumento no consumo de energia e valores negativos economia.

#### *Belo Horizonte:*

Belo Horizonte, por estar na mesma ZB que Florianópolis, apresentou desempenho semelhante. Houve um aumento de 4,13% no consumo por resfriamento (3869,47 kWh) e, uma redução de 85,45% no consumo por aquecimento (porém apenas 8,75 kWh) do Caso FV em comparação ao CB (Tabela 4.5). A utilização do sistema *STPV* gerou uma carga térmica que aumentou em 3,25% o consumo total por AVAC, e em 1,17% o consumo da torre. As horas de resfriamento não atendidas pelo sistema, no Caso FV, foram de 104,5h.

Tabela 4.5 – Comparação do consumo anual de energia entre o Caso Base e o Caso FV de Belo Horizonte

|                               | <b>CASO BASE</b> | <b>CASO FV</b> | <b>FV- CB*</b> | <b>(FV – CB)/CB*</b> |
|-------------------------------|------------------|----------------|----------------|----------------------|
|                               | (kWh)            | (kWh)          | (kWh)          | (%)                  |
| <b>Aquecimento</b>            | 10,24            | 1,49           | -8,75          | -85,45               |
| <b>Resfriamento</b>           | 93593,01         | 97462,48       | 3869,47        | 4,13                 |
| <b>Ventiladores</b>           | 4856,13          | 4620,18        | -235,95        | -4,86                |
| <b>Bombas</b>                 | 16010,98         | 16062,61       | 51,63          | 0,32                 |
| <b>Rejeição de calor</b>      | 3152,27          | 3294,37        | 142,10         | 4,51                 |
| <b>Consumo total com AVAC</b> | 117622,63        | 121441,13      | 3818,50        | 3,25                 |
| <b>Iluminação</b>             | 116261,20        | 116261,20      | 0,00           | 0,00                 |
| <b>Equipamentos</b>           | 91881,00         | 91881,00       | 0,00           | 0,00                 |
| <b>Consumo total da Torre</b> | 325764,83        | 329583,33      | 3818,50        | 1,17                 |

\*Valores positivos representam aumento no consumo de energia e valores negativos economia.

#### *Vitória:*

Em Vitória, com a utilização do sistema *STPV*, houve uma redução no consumo de energia em todos os componentes ativos do sistema de AVAC (Tabela 4.6), visto que o consumo por aquecimento se manteve inexistente, assim como no CB. A maior redução foi no consumo para resfriamento, de 794,93 kWh (0,50% em relação ao CB). Assim, o Caso FV

proporcionou uma economia de 0,87% no consumo total por AVAC, e 0,42% no consumo total da torre. As horas de resfriamento não atendidas pelo sistema, no Caso FV, foram de 189,25h.

Tabela 4.6 – Comparação do consumo anual de energia entre o Caso Base e o Caso FV de Vitória

|                               | <b>CASO BASE</b> | <b>CASO FV</b> | <b>FV – CB*</b> | <b>(FV – CB)/CB*</b> |
|-------------------------------|------------------|----------------|-----------------|----------------------|
|                               | (kWh)            | (kWh)          | (kWh)           | (%)                  |
| <b>Aquecimento</b>            | 0,00             | 0,00           | 0,00            | 0,00                 |
| <b>Resfriamento</b>           | 158657,24        | 157862,31      | -794,93         | -0,50                |
| <b>Ventiladores</b>           | 5395,55          | 5121,05        | -274,50         | -5,09                |
| <b>Bombas</b>                 | 24668,40         | 24085,88       | -582,52         | -2,36                |
| <b>Rejeição de calor</b>      | 6859,81          | 6809,71        | -50,10          | -0,73                |
| <b>Consumo total com AVAC</b> | 195581,00        | 193878,95      | -1702,05        | -0,87                |
| <b>Iluminação</b>             | 116261,20        | 116261,20      | 0,00            | 0,00                 |
| <b>Equipamentos</b>           | 91881,00         | 91881,00       | 0,00            | 0,00                 |
| <b>Consumo total da Torre</b> | 403723,20        | 402021,15      | -1702,05        | -0,42                |

\*Valores positivos representam aumento no consumo de energia e valores negativos economia.

#### *Fortaleza:*

O Caso FV em Fortaleza, assim como em Vitória, também contribuiu para que houvesse uma redução no consumo de energia comparado ao CB. O consumo para resfriamento também representou a maior economia (Tabela 4.7), diminuiu 1240,42 kWh (0,64% em relação ao CB). Assim, houve uma economia de 0,94% no consumo total por AVAC, e de 0,50% no consumo da torre.

Em Fortaleza as horas de resfriamento não atendidas pelo sistema, no Caso FV, foram de 321,25h, ultrapassando as 300 horas limite da Standard 90.1 (ASHRAE, 2013), porém, assim como no caso base, o auto dimensionamento do ar condicionado foi mantido, pois o objetivo da análise foi manter as mesmas condições de cálculo para todos os Casos.

Tabela 4.7 – Comparação do consumo anual de energia entre o Caso Base e o Caso FV de Fortaleza

|                               | <b>CASO BASE</b> | <b>CASO FV</b> | <b>FV – CB*</b> | <b>(FV – CB)/CB*</b> |
|-------------------------------|------------------|----------------|-----------------|----------------------|
|                               | (kWh)            | (kWh)          | (kWh)           | (%)                  |
| <b>Aquecimento</b>            | 0,00             | 0,00           | 0,00            | 0,00                 |
| <b>Resfriamento</b>           | 194833,59        | 193593,17      | -1240,42        | -0,64                |
| <b>Ventiladores</b>           | 5177,97          | 4995,12        | -182,85         | -3,53                |
| <b>Bombas</b>                 | 24654,70         | 23941,15       | -713,55         | -2,89                |
| <b>Rejeição de calor</b>      | 9414,18          | 9345,73        | -68,45          | -0,73                |
| <b>Consumo total com AVAC</b> | 234080,44        | 231875,17      | -2205,27        | -0,94                |
| <b>Iluminação</b>             | 116261,20        | 116261,20      | 0,00            | 0,00                 |
| <b>Equipamentos</b>           | 91881,00         | 91881,00       | 0,00            | 0,00                 |
| <b>Consumo total da Torre</b> | 442222,64        | 440017,37      | -2205,27        | -0,50                |

\*Valores positivos representam aumento no consumo de energia e valores negativos economia.

Foi possível perceber que a influência que o sistema *STPV* pode apresentar no consumo de energia com sistemas de AVAC está diretamente relacionada ao clima onde o edifício se localiza, e pode significar aumento ou diminuição no consumo de acordo com a zona bioclimática.

Para a ZB8 (Vitória e Fortaleza) o Caso FV apresentou um consumo de energia menor comparado ao CB, enquanto na ZB3 (Florianópolis e Belo Horizonte) o Caso FV apresentou aumento no consumo por AVAC.

Como esperado, com o uso do sistema *STPV* houve uma redução da radiação solar transmitida pelas janelas de cerca de 20% em todas as cidades (Tabela 4.8), devido à transmitância reduzida do material FV (0,08), mesmo em comparação ao vidro de alto desempenho utilizado no Caso Base (0,24).

Apesar da redução na transmitância, o sistema de esquadrias *STPV* é composto por vidros duplos, enquanto no CB foi utilizado uma única folha de vidro, de transmitâncias térmicas 2,18 e 5,71 W/m<sup>2</sup>Km respectivamente. O vidro duplo possui a propriedade de reduzir as trocas térmicas por condução com o meio externo.

Para Florianópolis, que apresenta temperaturas mais amenas, o vidro único potencializa as perdas de calor para o ambiente externo, principalmente, durante o inverno e no período da noite, devido à amplitude térmica, o que resfria naturalmente o edifício e reduz a sua carga térmica. Durante o mês de julho, mês mais frio para Florianópolis, o uso do vidro único fez com que as perdas pelas janelas (251W) fossem maiores do que os ganhos (240W), enquanto no Caso FV o vidro duplo fez com que a situação se invertesse (Tabela 4.8), deixando as perdas (151W) menores do que os ganhos (194W). Apesar do clima mais ameno, o maior consumo para Florianópolis ainda é por resfriamento, por isso, o uso de vidros duplos no Caso FV e, conseqüente diminuição nas perdas de calor, contribuíram para o aumento no consumo de AVAC.

Em Fortaleza, pelo seu clima muito quente com temperatura elevada durante todos os meses do ano, o isolamento proporcionado pelo vidro duplo não prejudica o saldo entre ganhos e perdas, pois os ganhos são muito maiores que as perdas. Em junho, mês menos quente, as perdas do CB são de 203W e os ganhos são de 563W. Com o uso do vidro duplo no Caso FV, tanto perdas quanto ganhos diminuem, passando para 107W e 437W, respectivamente (Tabela 4.8). Como o vidro duplo não modificou a proporção entre ganhos e perdas térmicas, a redução na radiação solar transmitida pelas janelas no Caso FV em Fortaleza tem peso maior do que em Florianópolis, também devido a maior disponibilidade de radiação na primeira cidade.

Em Fortaleza, a soma de ganhos por radiação do mês mais frio e do mês mais quente no ambiente do CB foi de 543W e em Florianópolis foi de 418W (Tabela 4.8). Portanto, o

aumento do isolamento das janelas duplas e redução da transmissão solar com o *STPV* do caso FV em Fortaleza isolou o edifício de maiores ganhos térmicos e, portanto, ele apresentou consumo menor que o CB.

Tabela 4.8 – Ganhos e perdas pelas janelas da Zona 7/ pavimento 8 para o mês mais frio e mais quente de Florianópolis e Fortaleza

| Período*                | Radiação solar transmitida pelas janelas [W] |          | Ganho de calor da zona pelas janelas [W] |          | Perda de calor da zona pelas janelas [W] |          |
|-------------------------|--|----------|--|----------|--|----------|
|                         | Julho  | Janeiro  | Julho                                    | Janeiro  | Julho                                    | Janeiro  |
| <b>Florianópolis CB</b> | 167,81                                       | 250,32   | 240,55                                   | 403,64   | 251,43                                   | 210,84   |
| <b>Florianópolis FV</b> | 34,15  | 50,54    | 194,46                                   | 333,08   | 151,36                                   | 114,63   |
| Período*                | Junho  | Dezembro | Junho                                    | Dezembro | Junho                                    | Dezembro |
| <b>Fortaleza CB</b>     | 306,21                                       | 237,10   | 563,44                                   | 427,91   | 203,01                                   | 150,92   |
| <b>Fortaleza FV</b>     | 61,89  | 48,06    | 437,51                                   | 343,80   | 107,31                                   | 80,06    |

\* Os meses escolhidos representam os meses mais quentes e mais frios para cada cidade.

#### 4.5.3 Energia Radiante

Além da influência do material *STPV* no consumo dos sistemas de AVAC, este pode influenciar também as variáveis relacionadas ao conforto do ambiente interno, como a temperatura radiante emitida pelo vidro a que os usuários podem estar submetidos, independente da temperatura do ar.

As temperaturas radiantes anuais, mínimas e máximas, tiveram variações tanto entre o Caso Base e o Caso FV, quanto entre as cidades simuladas (Tabela 4.9). Os dados representam as temperaturas radiantes obtidas para a zona 7 do pavimento 8, no período de 8h às 18h. As maiores diferenças foram observadas entre as temperaturas mínimas, onde Florianópolis registrou 15,58°C para o Caso Base e 17,09°C no Caso FV, enquanto Fortaleza apresentou mínimas de 25,22°C para o Caso Base e 26,23°C para o Caso FV. Portanto, qualquer acréscimo na temperatura do ambiente interno de Fortaleza já pode significar um aumento no desconforto do usuário, visto que a cidade apresenta temperaturas mais elevadas durante todo o ano.

Tabela 4.9 – Temperaturas radiantes mínimas e máximas anuais do Caso Base e do Caso FV na Zona 7 do pavimento 8 de 8h às 18h

| Cidade                | Temperatura radiante mínima<br>(°C) |       | Temperatura radiante máxima<br>(°C) |       |
|-----------------------|-------------------------------------|-------|-------------------------------------|-------|
|                       | CB                                  | FV    | CB                                  | FV    |
| <b>Florianópolis</b>  | 15,58                               | 17,09 | 33,71                               | 33,67 |
| <b>Belo Horizonte</b> | 19,01                               | 20,82 | 34,88                               | 34,44 |
| <b>Vitória</b>        | 22,14                               | 23,44 | 37,11                               | 36,42 |
| <b>Fortaleza</b>      | 25,22                               | 26,23 | 34,94                               | 34,71 |

Ao avaliar as condições de radiação térmica na Zona 7 do pavimento 8, mais de 50% dos valores entre a diferença da temperatura radiante média no Caso FV e no CB foram positivos (Figura 4.9). Isto indica que, durante o período de ocupação (8h às 18h), os usuários dos casos com sistema FV podem estar submetidos a condições de conforto mais prejudiciais, mesmo que a diferença na temperatura radiante tenha se mantido abaixo de 2°C.

Entre as cidades avaliadas houve, novamente, uma diferença entre as zonas bioclimáticas. A ZB3 apresentou diferenças maiores entre o Caso FV e o CB. Florianópolis, por exemplo, teve cerca de 25% dos valores acima de 0,5°C. Nas cidades da ZB8, por outro lado, mais de 50% das diferenças foram menores que 0,5°C. Fortaleza apresentou as menores diferenças, o que pode ser explicado devido à sua baixa latitude, pois a instalação dos sistemas STPV é vertical (nas janelas) e o sol permanece mais tempo do ano próximo ao zênite que nas outras cidades.

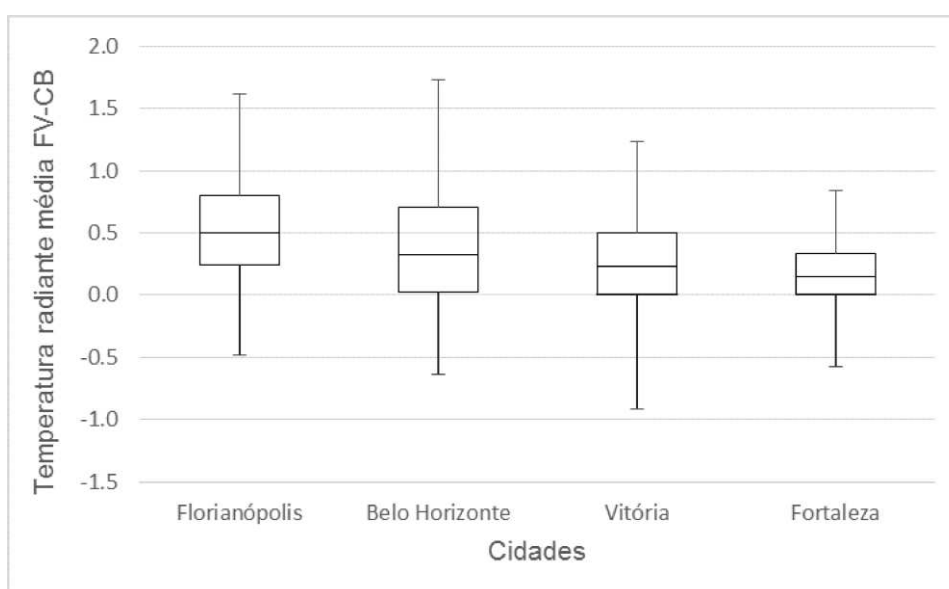


Figura 4.9 – Diferença entre a temperatura radiante média do Caso FV e do Caso Base na Zona 7 do pavimento 8 de 8h às 18h para o período de um ano

#### 4.5.4 Geração de Energia

Apesar da geração de energia FV ter sido estimada segundo uma eficiência fixa (5,04%, fornecida pelo fabricante nas STC), ela foi adotada como uma referência para estimar a contribuição dos sistemas FV no balanço energético do edifício para cada localidade. Porém, é importante destacar que a quantidade de energia gerada irá variar segundo a temperatura dos painéis FV e as condições locais (temperatura externa, disponibilidade de radiação, velocidade do ar, entre outras) que influenciam a eficiência da célula FV (Capítulo 3).

Como foi utilizada a mesma eficiência para todos os casos, a geração FV reflete a intensidade da radiação na fachada para cada cidade e a maior quantidade de horas com disponibilidade de radiação acima da necessária para que o *software* considere o sistema em geração (0,3W).

A geração de energia variou entre 15,2% e 30,6% do consumo do AVAC, ou 7,92% a 11,28% do consumo da torre, para Fortaleza e Belo Horizonte, respectivamente (Tabela 4.10). As maiores proporções entre geração e consumo são dos modelos nas cidades da ZB3, cujo consumo do sistema AVAC aumentou entre 3% e 8%, com a instalação do sistema fotovoltaico, enquanto as menores proporções foram na ZB8, cujo consumo do sistema AVAC se reduziu em até de 0,94% com o sistema fotovoltaico.

Belo Horizonte é a cidade em que o edifício apresentou melhor balanço de energia: a geração FV representa uma parcela de 11,28% do consumo total da torre de escritórios, e o sistema FV proporcionou um aumento de 1,17% no consumo comparado ao CB; assim, o saldo final é positivo, cerca de 10% do total consumido na torre.

Tabela 4.10 – Comparação da energia FV gerada com a energia elétrica consumida para um ano

|                       | Geração FV<br>(kWh) | Geração FV/<br>consumo<br>total com<br>AVAC (Caso<br>FV)<br>(%) | Diferença<br>no consumo<br>de energia<br>por AVAC<br>(FV-CB)/CB*<br>(%) | Geração FV/<br>consumo<br>total da<br>Torre (Caso<br>FV)<br>(%) | Diferença no<br>consumo de<br>energia Total<br>da Torre (FV-<br>CB)/CB*<br>(%) | Saldo de<br>Energia<br>(%) |
|-----------------------|---------------------|---|---|---|--|----------------------------|
| <b>Florianópolis</b>  | 30910,88            | 28,59   | 8,19  | 9,77  | 2,66   | 7,11                       |
| <b>Belo Horizonte</b> | 37165,23            | 30,6  | 3,25  | 11,28   | 1,17   | 10,11                      |
| <b>Vitória</b>        | 35349,15            | 18,23   | -0,87   | 8,79  | -0,42  | 9,21                       |
| <b>Fortaleza</b>      | 34835,14            | 15,02   | -0,94   | 7,92  | -0,50  | 8,42                       |

\*Valores positivos representam aumento no consumo de energia e valores negativos economia.

Para este caso, do total de energia FV gerada (30911kwh), 91% foi consumido pelo próprio edifício, o restante foi fornecido para a concessionária para ser utilizado como crédito (Figura 4.10), conforme a Resolução Normativa N° 482 (ANNEE, 2012).

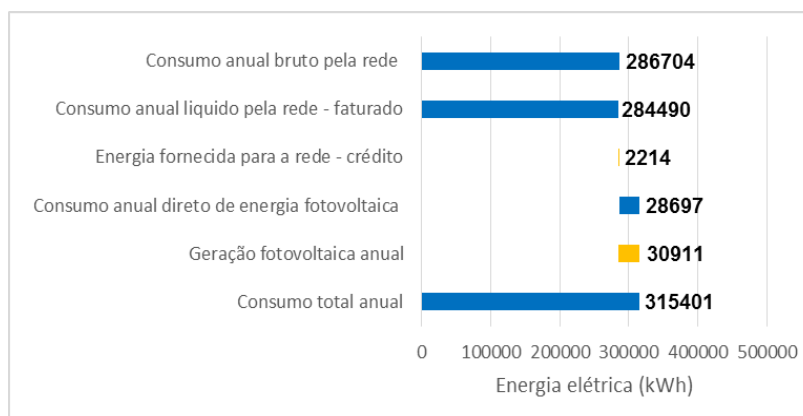


Figura 4.10 – Balanço anual de energia com a concessionária para Belo Horizonte

#### 4.6 Conclusão

A principal influência do sistema *STPV* no consumo de energia do edifício simulado foi referente às cargas de resfriamento e variou para cada zona bioclimática. Na ZB3, Florianópolis e Belo Horizonte, o uso de sistemas *STPV* aumentou o consumo de energia com AVAC em cerca de 8% e 3%, respectivamente, enquanto na ZB8, Vitória e Fortaleza, o sistema *STPV* reduziu este consumo em cerca de 1%, porém, com a participação do sistema construtivo de aberturas ao qual o fotovoltaico deve ser instalado.

A influência ocorreu tanto pela transmitância solar do material FV, que reduziu a radiação transmitida pelas janelas em cerca de 20%, quanto pela transmitância térmica do vidro duplo no sistema *STPV*, que alterou a dinâmica das trocas de calor com o meio exterior. O vidro duplo colaborou com o aumento do consumo por resfriamento na ZB3, pois reduziu as perdas térmicas proporcionadas pelo vidro de folha única do Caso Base no período mais frio do ano. Já na ZB8, essas perdas não eram significativas pela ausência de estação fria e o vidro duplo não alterou a dinâmica das trocas térmicas do edifício. Nestas localidades, houve ligeira redução do consumo de AVAC com a instalação do sistema fotovoltaico sobre o vidro duplo, cerca de 1%.

Além disso, os Casos FV apresentaram aumento na temperatura radiante do ambiente interno, durante o período de ocupação (8h às 18h). No entanto, este aumento se manteve abaixo de 2°C em todas as cidades, sendo mais significativo em locais de alta latitude.

Com relação à geração de energia, nas cidades da ZB3, descontado o gasto extra no consumo com AVAC, a energia gerada representou cerca de 7% e 10% do consumo total da torre de escritórios, enquanto na ZB8, a geração FV mais a energia economizada com AVAC representou cerca de 9% e 8% deste consumo. Deve-se destacar, no entanto, que foi utilizada uma eficiência fixa para o sistema FV e, portanto, as condições climáticas que alteram a temperatura superficial do *STPV* e sua provável eficiência não foram analisadas.

## Referências

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **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.
- AKATA, M. A. E.; NJOMO, D.; MEMPOUO, B. The effect of building integrated photovoltaic system (Bipvs) on indoor air temperatures and humidity (lath) in the tropical region of Cameroon. **Future Cities and Environment**, ago. 2015.
- ALMEIDA, P.C. Influência da Instalação de Sistemas Fotovoltaicos no Valor de Edificações. Viçosa, 2017. **Dissertação** (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, abril de 2017.
- ANDRADE, A. C. 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.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução normativa Nº 482**, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.
- ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. **ASHRAE Standard 90.1–2013**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, 2013.
- ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM E-1036**: Standard Methods of Testing Electrical Performance of Nonconcentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells. USA, 1985.
- BAVARESCO, M. V.; GHISI, E. Influência da Interação dos Usuários com Elementos Internos de Sombreamento no Consumo Energético de Edificações Comerciais. XIV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. ENCAC. **Anais ...** Balneário Camboriú, SC, Set. 2017.
- BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS, R. Developing energy consumption benchmarks for buildings: Bank branches in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 82-91, oct. 2014.
- CANNAVALE, A.; IERARDI, L.; HÖRANTNER, M.; EPERON, G. E.; SNAITH, H. J.; AYR, U.; MARTELOTTA, F. Improving energy and visual performance in offices using building integrated perovskite-based solar cells: A case study in Southern Italy. **Applied Energy**, v. 205, p. 834-846, aug. 2017.
- CARLO, J. C. Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética da Envoltória de Edificações Não Residenciais. Florianópolis, 2008. **Tese** (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- CHAE, Y. T.; KIM, J.; PARK, H.; BYUNGHA SHIN, B. Building energy performance evaluation of building integrated photovoltaic (BIPV) window with semi-transparent solar cells. **Applied Energy**, v. 129, p. 217-227, may 2014.
- CRESESB. **Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 19 Jan. 2018.

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.

DIDONÉ, E. L.; WAGNER, A.; PEREIRA, F. O. R. Estratégias para edifícios de escritórios energia zero no Brasil com ênfase em *BIPV*. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 3, p. 27-42, jul./set. 2014.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus Documentation**. Versão 8.4. U. S. Department of Energy, Jan. 2016. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>. Acesso em: 19 Set. 2017.

FERREIRA, A. P.; SCOMPARI, L. E. L.; CARIGNANI, G. Energia fotovoltaica em edifícios mato-grossenses: viabilidade econômica e energética de janelas fotovoltaicas. **Anais... XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Canela, RS: ENTAC, 2010.

HACHEM, C.; ATHIENITIS, A.; FAZIO, P. Energy performance enhancement in multistory residential buildings. **Applied Energy**, v. 116, p. 9-19, Mar. 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Portaria nº 372, de 17 de setembro de 2010. Aprova a revisão dos Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 22 set. 2010. Seção 1, p. 68. Disponível em: <[http://www.inmetro.gov.br/legislacao/detalhe.asp?seq\\_classe=1&seq\\_ato=1599](http://www.inmetro.gov.br/legislacao/detalhe.asp?seq_classe=1&seq_ato=1599)>. Acesso em: 04 jan. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Portaria nº 50, de 01 de fevereiro de 2010. Aprova o aperfeiçoamento dos Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética de Edificações. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 06 fev. 2010. Seção 1, p. 87. Disponível em: <[http://www.inmetro.gov.br/legislacao/detalhe.asp?seq\\_classe=1&seq\\_ato=1961](http://www.inmetro.gov.br/legislacao/detalhe.asp?seq_classe=1&seq_ato=1961)>. Acesso em: 04 jan. 2018.

INMETRO. Tabela de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicos. **Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia**, Ago. 2017. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/tabelas-comerciais.pdf>>. Acesso em: setembro de 2017.

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.

KAPSIS, K.; DERMARDIROS, V.; ATHIENITIS, A. K. Daylight performance of perimeter office façades utilizing semi-transparent photovoltaic windows: a simulation study. **Energy Procedia**, v. 78, p. 334-339, nov. 2015.

KAPSIS, K.; ATHIENITIS, A. K. A study of the potential benefits of semi-transparent photovoltaics in commercial buildings. **Solar Energy**, v. 115, p. 120-132, may. 2015.

MIYAZAKI, T.; AKISAWA, A.; KASHIWAGI, T. Energy savings of office buildings by the use of semi-transparent solar cells for windows. **Renewable Energy**, v. 30, p. 281-304, 2005.

NG, P. K.; MITHRARATNE, N.; KUA, H. W. Energy analysis of semi-transparent BIPV in Singapore buildings. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 274-281, jul. 2013.

OLIVIERI, L.; CAAMAÑO-MARTIN, E.; OLIVIERI, F.; NEILA, J. Integral energy performance characterization of semi-transparent photovoltaic elements for building integration under real operation conditions. **Energy and Buildings**, v. 68, p. 280-291, 2014.

PARK, K. E.; KANG, G. H.; KIM, H. I.; YU, G. J.; KIM, J. T. Analysis of thermal and electrical performance of semi-transparent photovoltaic (PV) module. **Energy**, v. 35, p. 2681-2687, 2010.

PVSYST. **Pvsyst Software Photovoltaic**. 2017. Disponível em: <<http://www.pvsyst.com/en/>>. Acesso em: 15 de agosto de 2017.

RODRIGUES, T. T.; CARLO, J. C. Simulação Térmica de Sistemas *BIPV* por meio do EnergyPlus. XIV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. ENCAC. **Anais do evento**. Balneário Camboriú, SC, Set. 2017.

RORIZ, M. **Correções nas Irradiâncias e Iluminâncias dos Arquivos EPW da Base Antac**. 2012. Disponível em: <[http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos\\_climaticos/correcao\\_epw\\_antac.pdf](http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos_climaticos/correcao_epw_antac.pdf)>. Acesso em: 15 de maio de 2017.

SANTANA, M. V. Influência de Parâmetros Construtivos no Consumo de Energia de Edifícios de Escritório Localizados em Florianópolis-SC. Florianópolis, 2006. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

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.

WANG, Y.; TIAN, W.; REN, J.; ZHU, L.; WANG, Q. Influence of a building s integrated-photovoltaics on heating and cooling loads. **Applied Energy**, v. 83, p. 989-1003, 2006.

ZHANG, W.; LU, L.; PENG, J.; SONG, A. Comparison of the overall energy performance of semi-transparent photovoltaic windows and common energy-efficient windows in Hong Kong. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 511-518, jul. 2016.

## 5 CONCLUSÃO GERAL

Esta dissertação teve como objetivo investigar a influência de sistemas *BIPV* integrados a fachadas no desempenho energético de edificações comerciais para o clima brasileiro, ao avaliar a influência do calor gerado pelo material FV na temperatura interna do ambiente simulado e consequente influência no consumo de sistemas AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado).

No Capítulo 2, foi comprovado por meio de testes o que já havia sido encontrado na literatura, que os modelos de painéis FV utilizados pelo *software* não podem simular com precisão as interações térmicas entre os sistemas *BIPV* e o ambiente simulado, pois o *EnergyPlus* não considera a influência da variação da temperatura de funcionamento da célula FV sobre os cálculos térmicos da zona simulada. Assim, no Capítulo 2 e 3 foram desenvolvidos métodos para a simulação de sistemas *BIPV* por meio do *EnergyPlus*, levando em consideração as propriedades térmicas dos materiais FV.

No Capítulo 3, foi desenvolvido um método para a simulação térmica de sistemas *STPV* com uso de dispositivos de proteção solar cujas propriedades térmicas de materiais são entradas editáveis pelo simulador. Os resultados indicaram que os sistemas *BIPV* influenciam as condições térmicas do ambiente, tanto pelo acréscimo na temperatura média do ar interno de um espaço de 3 m<sup>3</sup>, que chegou a aumentar até 3,3°C com sistemas *STPV*, quanto pelo aumento da própria temperatura superficial interna dos ambientes, que superou o Caso Base em até 17,4°C. A eficiência máxima alcançada pelo sistema FV variou de 3,42% no Caso Base a 3,18% no Caso 5, que representa uma redução de mais de 30% na eficiência obtida nas *STC*.

O Capítulo 4, teve como objetivo replicar o método desenvolvido no Capítulo 3 (testado em uma única zona com dimensões reduzidas) para um edifício empresarial existente, com nível de eficiência A para envoltória e iluminação na etapa de projeto pelo PBE Edifica, que foi simulado para representar uma situação real de uso. Suas entradas foram baseadas em parâmetros representativos desta tipologia. O mesmo edifício foi simulado para quatro cidades brasileiras, com variação de 3 latitudes e duas zonas bioclimáticas. Os resultados mostraram que para a ZB3, Florianópolis e Belo Horizonte, o uso de sistemas *STPV* aumentou o consumo de energia com AVAC em cerca de 8% e 3%, respectivamente, enquanto para ZB8, Vitória e Fortaleza, o sistema *STPV* reduziu este consumo em cerca de 1%. A influência ocorreu tanto pela transmitância solar do material FV, que reduziu a radiação transmitida pelas janelas em cerca de 20%, quanto pela transmitância térmica do vidro duplo no sistema *STPV*, que alterou a dinâmica das trocas de calor com o meio exterior.

O vidro duplo colaborou com o aumento do consumo por resfriamento na ZB3, pois reduziu as perdas térmicas proporcionadas pelo vidro de folha única do Caso Base no período

mais frio do ano. Já na ZB8, essas perdas não foram significativas pela ausência de estação fria e, o vidro duplo, não alterou a dinâmica das trocas térmicas do edifício. Nas cidades da ZB3, descontado o gasto extra no consumo com AVAC, a energia gerada representou cerca de 7% e 10% do consumo total da torre de escritórios, enquanto na ZB8, a geração FV mais a energia economizada com AVAC representou cerca de 9% e 8% deste consumo.

### 5.1 Limitações do Trabalho

O ganho de calor durante o dia pelos sistemas FV é composto pela absorção da radiação solar direta, pela convecção do ar entre o sistema FV e o meio externo e pela transferência de calor por radiação, além do calor gerado durante a conversão da radiação solar em energia elétrica. Porém, neste trabalho, tanto no sistema FV opaco quanto no sistema *STPV* não foi considerado o calor gerado durante a conversão de energia, visto que o *EnergyPlus* não quantifica essa geração de calor.

No método desenvolvido para representar os sistemas *STPV*, o *software* não permite que os dispositivos de proteção solar, que representam as propriedades térmicas do material FV, sejam referenciados em contato direto com a camada de vidro mais externa (situação mais comum em casos reais para este tipo de sistema), desconsiderando as trocas térmicas por condução entre a camada de vidro mais externa e o material *STPV*.

Além disso, o *EnergyPlus* também não permite que o sistema FV seja referenciado no dispositivo de sombreamento, assim, o mesmo foi especificado na superfície externa do vidro mais externo e, como o método de cálculo é o *Integrated Surface Outside Face*, a temperatura superficial externa do vidro foi usada como temperatura de funcionamento da célula FV. Desta forma, a temperatura do dispositivo de sombreamento irá influenciar a camada de vidro mais externa através de trocas por radiação e convecção, aproximando a temperatura do vidro do que seria a temperatura real da célula FV. Porém, o ideal seria usar a temperatura do dispositivo de sombreamento como temperatura da célula FV.

Nas simulações não foi considerado o entorno nem as obstruções causadas por edificações vizinhas, para manter as mesmas condições e sombreamento nas quatro cidades.

O *software* apresentou limitações para a utilização do modelo *EOD (Equivalent One-Diode)* no cálculo da geração de energia FV para o edifício todo. Assim, foi necessário adotar o modelo Simple que utiliza uma eficiência fixa. Foi adotada a eficiência fornecida pelo fabricante nas *STC*, mas sabe-se que a utilização desse valor superestima a geração de energia FV.

## 5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Sugere-se a investigação e o desenvolvimento de novos métodos para calcular: a geração de calor durante o processo de conversão de energia; a condução entre a camada de vidro e o sistema FV; e a utilização da temperatura do dispositivo de sombreamento como temperatura da célula FV.

Sugere-se também, a investigação da influência dos sistemas *STPV* no desempenho luminoso de ambientes internos e o consequente consumo do sistema de iluminação, além da qualidade da luz natural que passa pelo *STPV*.

Sugere-se ainda, a medição térmica e de eficiência em edifícios ou sistemas reais que apresentem sistemas *BIPV* para comparar os dados medidos com os dados simulados, para validar o método desenvolvido neste trabalho.