

**DESIGN DE UM PROTÓTIPO BIPVT E ANÁLISE POR MEIO DE COMPUTAÇÃO DINÂMICA DE FLUÍDOS****Bot K.\*, Aelenei L.\*, Gonçalves H.\***

\*Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P., Estrada do Paço do Lumiar, 22,  
1649-038 Lisboa, Portugal, [laura.aelenei@lneg.pt](mailto:laura.aelenei@lneg.pt)

<https://doi.org/10.34637/cies2020.2.2140>

## RESUMO

O presente trabalho apresenta uma componente dos resultados obtidos pelo Projeto NZEB\_LAB, do Laboratório Nacional de Energia e Geologia, para o design de novos sistemas solares integrados a edifícios. O trabalho reporta o design e a simulação numérica via computação dinâmica de fluídos de um protótipo de sistema fotovoltaico térmico integrado a edifício (BIPVT – *Building Integrated Photovoltaic Thermal system*), desenvolvido e futuramente instalado na fachada do edifício Solar XXI, Lisboa, Portugal. O objetivo é detalhar o design do protótipo e caracterizar o comportamento térmico do sistema em suas partes fluida e sólida dada uma condição de fronteira, através da análise do perfil de temperatura, velocidade do ar e turbulência, levando em consideração a secção transversal do elemento em uma análise bidimensional. Foi possível visualizar um gradiente de temperatura no interior da cavidade de ar na ordem de 17,5°C.

PALAVRAS-CHAVE: BIPVT, protótipo, modelação

## ABSTRACT

This work presents a component of the results obtained by the NZEB\_LAB Project, from the National Energy and Geology Laboratory, for the design of new solar systems integrated into buildings. The work reports the design and numerical simulation via dynamic fluid computation of a prototype of a building integrated photovoltaic thermal system (BIPVT - *Building Integrated Photovoltaic Thermal system*), developed and future installed on the facade of the Solar XXI building, Lisbon, Portugal. The objective is to detail the design of the prototype and characterize the thermal behavior of the system in its fluid and solid parts given a boundary condition, through the analysis of the temperature profile, air speed and turbulence, taking into account the cross section of the element in a two-dimensional analysis. It was possible to visualize a temperature gradient inside the air cavity in the order of 17.5°C.

KEYWORDS: BIPVT, prototype, modelling

## INTRODUÇÃO

O setor da construção civil impacta consideravelmente na utilização de energia, e respetivamente no consumo dos recursos ambientais não renováveis quando fontes da energia. Por este motivo, a concepção de novos sistemas de energias renováveis integrados a fachadas de edifícios é uma necessidade urgente, de forma a alcançar edifícios sustentáveis e com balanço energético quase nulo, como descrito por (Aelenei *et al.*, 2016). Nas últimas décadas, esforços tem sido feito neste sentido, porém ainda há um longo caminho a percorrer (Chwieduk, 2003; Maurer, Cappel e Kuhn, 2015). Entre estes sistemas, destacam-se os sistemas fotovoltaicos térmicos integrados em edifícios (*Building Integrated Photovoltaic Thermal Systems – BIPVT*), sistemas que não só visam gerar energia elétrica, mas também atuar como um sistema natural de recuperação de calor. A recuperação de calor ocorre recuperação de calor quando o sistema aumenta a temperatura de saída em relação à temperatura de entrada do ducto de ar, tendo como fonte de ar o volume de ar da zona térmica adjacente. Revisões extensas dos sistemas BIPVT quanto a sua tecnologia, modo de operação e inovações recentes podem ser encontradas em (Lamnatou *et al.*, 2015; Yang e Athienitis, 2016). Em uma amostra das publicações mais recentes sobre novos sistemas BIPVT, a principal forma de análise de performance e caracterização do sistema é através de simulação numérica via computação dinâmica de fluidos (*computational fluid dynamics – CFD*) (Peng *et al.*, 2016; Dehra, 2017; Lee *et al.*, 2017), ao passo que a análise da integração destes sistemas e seu impacto nos consumos de energia são usualmente realizados via simulação dinâmica de energia em edifícios (Bot *et al.*, 2020). Os parâmetros analisados são, em sua maioria, velocidade do ar no interior, gradiente de temperatura e respetivo impacto da geometria (largura do ducto, altura, espessura) nestes fatores.

No contexto dos edifícios, habitualmente há mais de um parâmetro que deve ser otimizado ao mesmo tempo – como aliar a redução do consumo de energia ao aumento do conforto dos ocupantes -, o que torna o processo de design de novos sistemas solares complexo, pois é necessário focar em mais de um objetivo. Um dos aspetos mais fundamentais é projetar os sistemas BIPVT em fachadas em relação à geometria e materiais dos elementos. Em um fase posterior, o controle dos modos de operação é também fundamental para o desempenho energético (Jaluria, 2007), pois é demonstrado que os sistemas BIPVT em fachadas apresentam melhor rendimento quando adaptáveis, tendo seu funcionamento tanto passivo quanto ativo (Bot *et al.*, 2020).

Neste sentido, o presente trabalho apresenta uma componente dos resultados obtidos pelo Projeto NZEB\_LAB, do Laboratório Nacional de Energia e Geologia, para o design de novos sistemas solares integrados a edifícios. O trabalho reporta o design e a simulação numérica via computação dinâmica de fluidos de um protótipo de sistema BIPVT, desenvolvido e futuramente instalado na fachada do edifício Solar XXI, Lisboa, Portugal. O objetivo é caracterizar o comportamento térmico do sistema em suas partes fluida (cavidade de ar formada entre os módulos fotovoltaicos e o módulo interior) e sólida (módulo interior) dada uma condição de fronteira, através da análise do perfil de temperatura, velocidade do ar e turbulência, levando em consideração a secção transversal do elemento em uma análise bidimensional. O desenvolvimento do novo protótipo BIPVT foi motivado, principalmente, pela necessidade de adaptar os sistemas BIPVT (conhecidos por ocupar a altura total de uma parede - como é o caso dos sistemas BIPVT pré-existentes no edifício Solar XXI) (Bot *et al.*, 2020) ao espaço disponível em fachadas, dando modularidade ao BIPVT e avaliando se os resultados em termos de desempenho foram adequados e benéficos ao aproveitamento energético do edifício.

## METODOLOGIA

A metodologia do trabalho é segmentada no design do protótipo, e na análise por meio de CFD da sua secção transversal. A conceção do novo protótipo BIPVT baseia-se na utilização de conceitos, métodos e técnicas de engenharia de forma a fornecer uma solução que contribua para responder às necessidades identificadas na análise energética de todo o edifício. Uma descrição muito detalhada do método de design de sistemas térmicos pode ser encontrada em (Jaluria, 2007). Neste sentido, o objetivo do Projeto NZEB\_LAB está em conceber, produzir e testar novos elementos que venham a melhorar as condições energéticas do edifício, conjugando elementos presentes no mercado com novas configurações e funcionamento.

De forma geral, o protótipo BIPVT proposto é composto por uma estrutura metálica, com um módulo fotovoltaico em sua face externa (voltado para o exterior do edifício), um entreferro com espessura variável para permitir diferentes disposições e testes, e um módulo interno (que pode ser posteriormente substituído por outros módulos internos diferentes). Mais especificamente, é composto por um caixilho, um módulo fotovoltaico que possui área efetiva de 0,96 m<sup>2</sup>, eficiência de 15% e 120 Wp, inversor e outros acessórios necessários para o efeito de geração de energia elétrica. O caixilho é em alumínio cortado termicamente de acordo com as dimensões detalhadas nas especificações. A estrutura suporta os módulos e inclui trilhos de encaixe. Os trilhos de encaixe devem proporcionar posicionamento flexível para permitir mudanças futuras na espessura da cavidade de ar (dependendo dos resultados futuros dos processos de otimização do projeto do componente). Nos lados internos da estrutura, deve haver calhas experimentais para cabos e suas tampas de isolamento para isolar a caixa de possível infiltração marginal de ar. O módulo interno é composto por um módulo de poliestireno expandido (EPS), todavia é um módulo amovível que pode ser futuramente substituído por módulos de outros materiais. O protótipo também possui quatro comportas para promover a circulação do ar no ducto de ar presente entre o módulo fotovoltaico e o módulo interno: dois externos

(na parte inferior e superior do módulo PV) e dois internos (na parte superior e parte inferior do módulo interno). A configuração do protótipo composto é apresentada na Fig. 1-a, e os caixilhos são apresentados na Fig. 1-b.

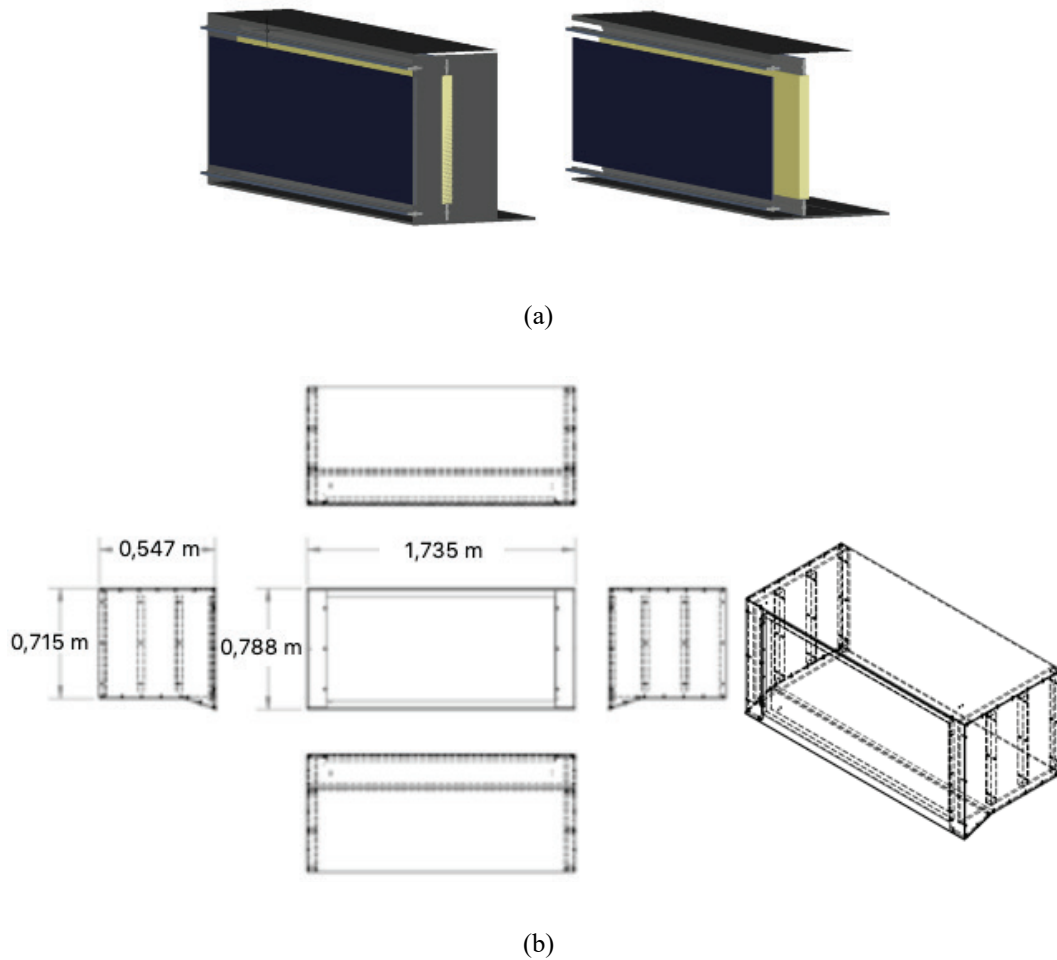


Fig. 1. a) configuração composta do protótipo e detalhamento do módulo interior; b) caixilhos e dimensões.

A seguir ao design do protótipo, seguiu-se a modelação CFD do mesmo. O esquema geral da análise CFD é apresentado pela Fig. 2. As equações que governam o fluxo de fluido e os processos de transferência de calor do sistema são as equações de conservação de massa (Eq. 1), conservação de momento (Eq. 2) e conservação de energia, detalhadamente descritas por (Lax e Wendroff, 1960). A conservação da massa afirma que a massa do sistema deve permanecer constante ao longo do tempo para todo sistema fechado para todas as transferências de matéria e energia. Em um sistema fechado, o momento total é constante. A equação da conservação do momento é conhecida como a segunda lei de Newton aplicada ao fluxo de fluido. A energia total em um sistema fechado permanece constante (teorema de Noether). A transferência de calor conjugado também é um termo importante no que diz respeito à transferência de calor em elementos de fachada. Refere-se ao cálculo de conduções de calor através de sólidos, juntamente com a transferência de calor por convecção em um fluido. A transferência de calor conjugado é aplicável sempre que houver dois domínios adjacentes, e o objetivo é analisar a transferência de calor entre essas esferas - sólida ou fluida.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad \text{Eq. (1)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = - \nabla p + \nabla \cdot (\tau) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad \text{Eq. (2)}$$

Os fundamentos da técnica CFD são amplamente discutidos na literatura e não serão descritos em detalhe, além dos fundamentos relativos à configuração da simulação utilizada. No entanto, uma descrição detalhada do método de dinâmica de fluidos computacional pode ser encontrada em (Versteeg e Malalasekara, 2007; Ansys, 2011).

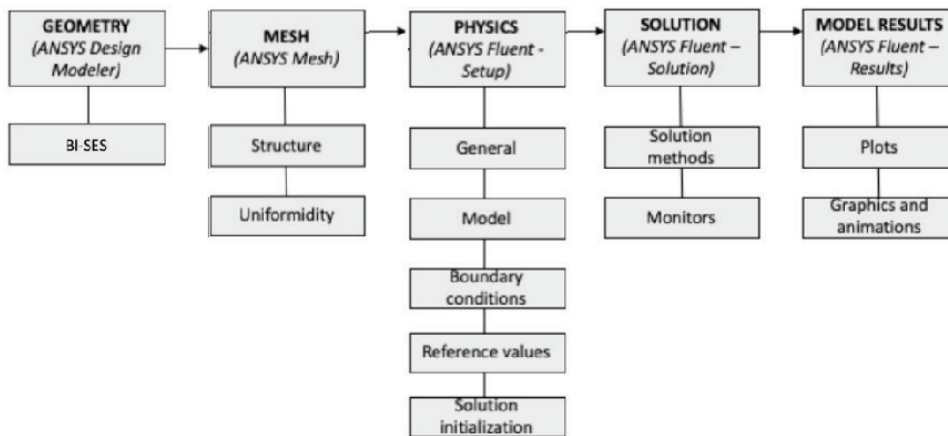


Fig. 2. Esquema da análise CFD.

Para esse tipo de cálculo, é fundamental selecionar condições de contorno apropriadas que melhor representem o sistema. A configuração da simulação é feita através da consideração de recursos gerais (como equações, modo de estado estacionário, entre outros), definição de modelo, condições de contorno do sistema, valores de referência, configurações de solução e inicialização. Na guia solução, é possível definir os métodos, monitores a serem exibidos, variáveis a serem calculadas e variáveis de relatório. Os resultados do modelo são observados através das plotagens e gráficos selecionados.

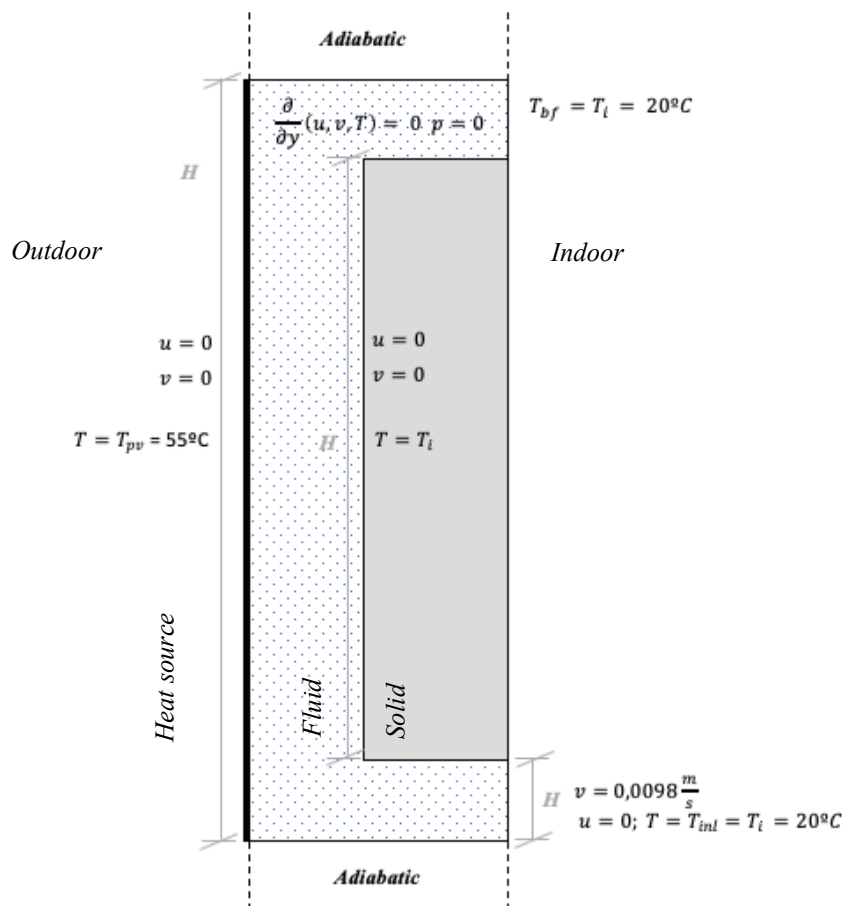


Fig. 3. Condições de fronteira e domínios do sistema.

O comportamento térmico do sistema é estudado em simulação em estado estacionário. A configuração da simulação é descrita brevemente aqui. O movimento turbulento, descrito pelas equações de Navier-Stokes e caracterizado como uma condição irregular do fluxo com variação aleatória com coordenadas de tempo e espaço, foi considerado usando o modelo  $k-\epsilon$  com funções padrão da parede. Essas equações são resolvidas pelo uso do algoritmo SIMPLE. O acrônimo SIMPLE significa Método Semi-Implícito para Equações Vinculadas à Pressão. É essencialmente um procedimento de iteração e correção para o cálculo da pressão no arranjo escalonado da malha.

O método é ilustrado considerando as equações laminar bidimensionais de fluxo constante em coordenadas cartesianas. Nesta análise CFD, o módulo fotovoltaico foi considerado uma superfície de fonte de calor para todos os sistemas BIPVT, com uma temperatura associada. Em um determinado momento (condição de estado estacionário), as temperaturas associadas são baseadas na campanha experimental desenvolvida anteriormente e brevemente relatadas em (Bot *et al.*, 2020), para o módulo fotovoltaico na mesma fachada do edifício Solar XXI. A velocidade de entrada é assumida como sendo a mesma registrada na campanha experimental para o sistema BIPVT (observação instantânea através do uso de um anemômetro não fixo), correspondendo a 0,0098 m / s normal ao limite.

A superfície fotovoltaica é considerada a 55°C, e a temperatura de entrada é 20°C. É importante destacar que a temperatura real do sistema apresenta mais perdas de calor, uma vez que na simulação CFD, a superfície superior e inferior da cavidade do ar é considerada adiabática devido à falta de controle em campanha experimental para determinar os fluxos de calor através dessas superfícies. As condições de fronteira e domínios do sistema são apresentados pela Fig. 3.

## RESULTADOS

Os resultados são apresentados nas Fig. 4, Figura 5 e Figura 6. Como é conhecido, a temperatura aumenta devido à fonte de calor do módulo PV. O ar entra na cavidade de admissão a uma temperatura definida de 20 °C e sai da cavidade de ar a uma temperatura de cerca de 37,5 °C. A temperatura do sólido apresenta gradiente que varia de 20 °C a 30 °C e, à semelhança da cavidade de ar, atinge temperaturas mais elevadas na parte superior de sua geometria. A temperatura é mais alta próximo à superfície do módulo fotovoltaico, por ser a fonte de calor da simulação. A velocidade da cavidade aérea atinge um valor de 0,017 m / s em alguns pontos (semelhante ao sistema BIPVT), apresentando um aumento de 0,008 m / s em relação à velocidade de entrada.

Essa análise através do software CFD, mesmo não sendo extensa, é fundamental de diferentes maneiras. Primeiro, o perfil detalhado dos resultados da modelagem de seção transversal é útil devido aos impactos da localização do sensor nos resultados da análise experimental. Por exemplo, e levando em consideração os resultados obtidos e mostrados, quando os resultados obtidos de um sensor localizado na parte inferior da cavidade do ar mais próxima do módulo interno e de outro sensor localizado na parte superior da cavidade do ar mais próxima do módulo fotovoltaico, resultaria em um gradiente de temperatura mais alto no duto de ar, refletindo em um valor de eficiência mais alto do que a eficiência real do sistema (mantendo os outros parâmetros constantes).

Ele destaca a importância da disposição precisa da configuração experimental dentro do sistema, a fim de obter resultados mais precisos. Além disso, aumenta a importância de ter mais de um sensor para caracterizar o perfil de temperatura, em termos de campanha experimental, a cavidade do ar. Também mostra a importância máxima da disposição precisa da configuração experimental dentro do sistema, a fim de obter resultados mais precisos. Além disso, destaca a importância de ter mais de um sensor para caracterizar o perfil de temperatura, em termos de campanha experimental, a cavidade do ar.

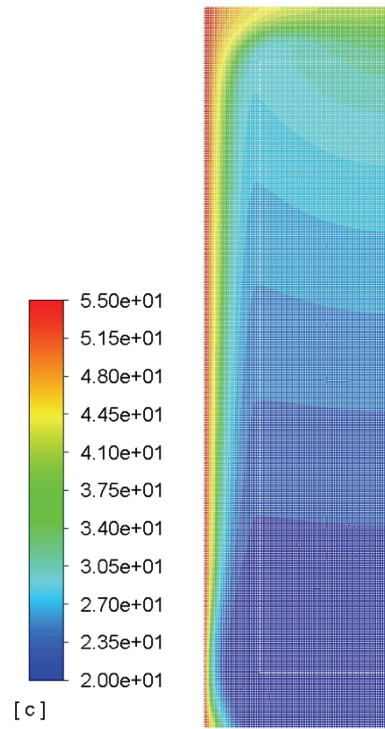


Figura 4. Contorno de temperature do protótipo ( °C).

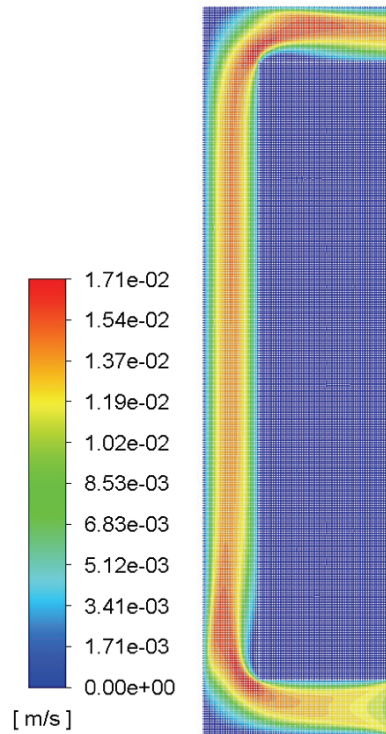


Figura 5. Contorno de velocidade do protótipo (m/s).

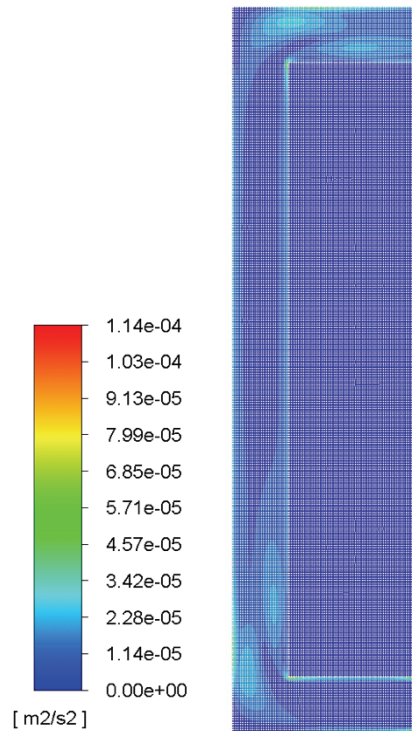


Figura 6. Contorno de turbulência do protótipo ( $m^2/s^2$ ).

No entanto, é importante referir que os elementos são muito dinâmicos em termos de transferência de calor, e a análise CFD realizada no escopo deste trabalho é uma simulação em estado estacionário, representando os resultados do cálculo (até atingir a convergência) para um determinado conjunto de entradas que, em outras palavras, representa uma hora específica do dia e a condição da sala em termos de temperatura de entrada, temperatura da parede / módulo interior e refluxo na tomada. Para uma representação adicional durante o ano, os sistemas BIPVT devem ser testados em uma análise CFD para mais de uma condição, em diferentes horas do dia e, de preferência, em diferentes estações meteorológicas. A análise CFD também é mostrada muito útil em análises preliminares, pré-fabricação do projeto final do protótipo, para acessar os melhores materiais e geometria de uma maneira mais econômica antes da produção.

## CONCLUSÕES

A análise CFD focou na obtenção da estratificação das temperaturas, velocidades e turbulência na cavidade de ar. A análise dos elementos utilizou como condições de contorno os valores dos parâmetros observados na campanha experimental, com o objetivo de descrever o comportamento do ar do sistema em seu estado atual (nenhuma análise paramétrica foi desenvolvida através do uso de software CFD). Como resultados mais importantes, foi possível visualizar o gradiente de temperatura no interior da cavidade de ar e no elemento sólido (módulo EPS), para as condições de fronteiras definidas para a simulação estacionária – entrando o ar entra na cavidade (inlet) a uma temperatura definida de 20 °C e saindo da cavidade de ar (outlet) a uma de cerca de 37,5 °C. A temperatura do sólido apresenta gradiente que varia de 20 °C a 30 °C e, à semelhança da cavidade de ar, atinge temperaturas mais elevadas na parte superior de sua geometria. A simulação CFD do protótipo proposto mostra-se útil, principalmente, para a obtenção do perfil da seção transversal, para que a localização futura dos sensores não sejam tendenciosas e reflitam da melhor maneira possível a temperatura média da localidade em que o sensor se encontra. No estágio do design do sistema, este tipo de análise é benéfico não somente para uma futura caracterização experimental da performance com maior exatidão, mas também para a implementação futura de sistema de automação para a gestão de energia. Este trabalho reflete os resultados preliminares do estágio de design do protótipo, servindo assim de base para os resultados futuros de campanhas experimentais e análise numérica detalhada.

## AGRADECIMENTOS

O Projeto NZEB\_LAB—Research Infrastructure on Integration of Solar Energy Systems in Buildings” (Ref. LISBOA-01-0145-FEDER-022075)” é financiado pelos fundos nacionais FCT/MCTES (PIDDAC) e Europeus FEDER - Regional Operation Program of Lisbon.

## REFERENCIAS

Aelenei, L. et al. (2016) ‘Zero Energy Homes’, in ZEMCH: Toward the Delivery of Zero Energy Mass Custom Homes. Springer, pp. 275–309.

Ansys, I. (2011) ‘ANSYS FLUENT theory guide’, Canonsburg, Pa, p. 794.

Bot, K. et al. (2020) ‘Performance Assessment of a Building Integrated Photovoltaic Thermal System in Mediterranean Climate—A Numerical Simulation Approach’, Energies. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 13(11).

Chwieduk, D. (2003) ‘Towards sustainable-energy buildings’, Applied energy. Elsevier, 76(1–3), pp. 211–217.

Dehra, H. (2017) ‘An investigation on energy performance assessment of a photovoltaic solar wall under buoyancy-induced and fan-assisted ventilation system’, APPLIED ENERGY, 191, pp. 55–74. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.01.038.

Jaluria, Y. (2007) Design and optimization of thermal systems. CRC press.

Lamnatou, C. et al. (2015) ‘Modelling and simulation of Building-Integrated solar thermal systems: Behaviour of the system’, Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier, 45, pp. 36–51. doi: 10.1016/j.rser.2015.01.024.

Lax, P. and Wendroff, B. (1960) ‘Systems of conservation laws’, Communications on Pure and Applied mathematics. Wiley Online Library, 13(2), pp. 217–237.

Lee, J. et al. (2017) ‘Renewable Energy Potential by the Application of a Building Integrated Photovoltaic and Wind Turbine System in Global Urban Areas’, ENERGIES, 10(12). doi: 10.3390/en10122158.

Maurer, C., Cappel, C. and Kuhn, T. E. (2015) ‘Simple models for building-integrated solar thermal systems’, Energy and Buildings. Elsevier B.V., 103, pp. 118–123. doi: 10.1016/j.enbuild.2015.05.047.

Peng, J. et al. (2016) ‘Numerical investigation of the energy saving potential of a semi-transparent photovoltaic double-skin facade in a cool-summer Mediterranean climate’, APPLIED ENERGY, 165, pp. 345–356. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.12.074.

Versteeg, H. K. and Malalasekara, W. (2007) An introduction to computational fluid dynamics - The finite volume method. Pearson Education Limited.

Yang, T. and Athienitis, A. K. (2016) ‘A review of research and developments of building-integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) systems’, Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier, 66, pp. 886–912. doi: 10.1016/j.rser.2016.07.011.