

ESTUDO DE MODELAÇÃO NUMÉRICA DE UM SISTEMA SOLAR COM TANQUE DE ÁGUA INTEGRADO EM FACHADA**Sousa M.A.C.*, Aelenei L.*, Gonçalves H.*, Joyce A.***

* Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG),
Estrada Paço do Lumiar 22, Lisboa, 1600-545, laura.aelenei@lneg.pt

<https://doi.org/10.34637/cies2020.2.2132>

RESUMO

Os edifícios desempenham um papel ativo no consumo global de energia, e são obrigados não só a minimizar o seu consumo de energia, mas também a gerar energia de forma sustentável. A integração de energias renováveis nos elementos de construção pode substituir materiais de construção comuns, enquanto que geram energia elétrica e térmica. Este artigo apresenta uma análise numérica de um módulo fotovoltaico integrado no edifício e combinado com um tanque de armazenamento de água (BIPV-WS). Recorrendo a ferramenta MatLab – Simulink, foi possível desenvolver um modelo uni-dimensional que representa o comportamento térmico do protótipo em estudo, analisando duas configurações de operação: fechado e ventilado. Os resultados foram validados, com os dados experimentais recolhidos e apresentados noutra publicação. Este modelo será utilizado como a base para o estudo seguinte de otimização do protótipo.

PALAVRAS-CHAVE: BIPV, nZEB, Armazemaneto de água, fachadas integradas

ABSTRACT

Buildings play an active role in global energy consumption, and are required not only to minimize their energy consumption, but also to generate energy in a sustainable manner. The integration of renewable energies in the building elements can replace common building materials, while generating electrical and thermal energy. This article presents the validation of a numerical campaign for a photovoltaic module integrated in the building and combined with a water storage tank (BIPV-WS). Using MatLab - Simulink, it was possible to develop an one-dimensional model that represents the thermal behavior of the prototype, analyzing two different configurations: closed and ventilated. The results were validated, with the experimental data recovered and presented in another publication. This model will be used in future projects to optimize the BIPV-WS prototype.

KEYWORDS: BIPV, nZEB, Water Storage, Integrated Facades

INTRODUÇÃO

Os estudos e as tendências políticas atuais sobre as mudanças climáticas tornaram imperativo reduzir a dependência humana de fontes convencionais de energia, emissoras de gases de efeito estufa (GEE). Desenvolver soluções integradas com baixo custo e eficiência energética para edifícios que lidam com os desafios climáticos de verão e inverno representa uma meta muito ambiciosa. Além disso, o aumento do consumo de energia, a redução de recursos e o aumento dos custos de energia têm um impacto significativo em nosso padrão de vida para as gerações futuras. Nesta situação, o desenvolvimento e adoção de sistemas e tecnologias de energias renováveis integradas em edifícios residenciais e não residenciais devem ser uma prioridade. Sistemas fotovoltaicos integrados em fachadas podem ser utilizados para gerar eletricidade e calor útil (Lloret, Andrew y Merten, 2003), com possíveis eficiências de 70% (Charron y Athienitis, 2003). Além disso, o armazenamento térmico integrado a este tipo de sistemas pode ser uma solução eficaz de reduzir os picos de carga e controlar as flutuações de temperatura associadas (Athienitis, Zhang y Feldman, 2005) (Aelenei et al, 2014). No entanto, o estudo de soluções que combinam sistema fotovoltaicos com armazenamemto é reduzido.

Este artigo apresenta a modelação numérica de um módulo fotovoltaico integrado num edifício (BIPV) combinado com um tanque de armazenamento de água (BIPV-WS), integrado na fachada do Edifício Solar XXI e a ser testado em condições reais. O protótipo tem o objetivo de tirar proveito das características de um BIPV: geração de energia renovável para o edifício, e gestão da energia térmica gerada pela conversão fotovoltaica, de modo a melhorar o conforto térmico interior, reduzir o consumo energético do edifício e melhorar a eficiência do sistema fotovoltaico, através da limitação do aumento da sua temperatura, com recurso a ventilação da cavidade de ar. Através da modelação numérica e validação deste protótipo, é possível avaliar o seu comportamento térmico com base apenas nas condições envolventes: temperatura exterior; interior e radiação incidente. Esta ferramenta permitirá, em trabalhos futuros, otimizar o protótipo em termos de eficiência, através da alteração das suas características – como a sua geometria, ventilação e materiais/componentes. Este estudo apresenta os primeiros resultados da análise numérica desenvolvida: construção do modelo e validação do mesmo recorrendo a utilização de dados experimentais recolhidos no período de verão e para duas configurações distintas: ventilado e não ventilado. O segundo passo será a validação do mesmo modelo para as condições de inverno. Após o processo de validação em varias condições, a terceira fase será a implementação de um algoritmo de otimização para simular vários cenários e parâmetros (geometria, taxa de ventilação, matérias, custos).

Este estudo insere-se no âmbito do projeto de investigação NZEB_LAB, cujo objetivo é promover a o desenvolvimento de todas as aplicações da energia solar em edifícios, estando este trabalho inserido na Atividade de Investigação 2.1 “Investigação Experimental de novas aplicações, sistemas inovadores de energia solar (laboratório e edifício real), e flexibilidade energética de edifícios e sistemas solares integrados”.

MÓDULO FOTOVOLTAICO COMBINADO COM ARMAZENAMENTO DE ÁGUA (BIPV-WS)

O protótipo BIPV-WS foi instalado na fachada principal do SolarXXI (Fig.1) no final do inverno de 2019 e desde então é testado em condições reais. Os módulos são compostos por uma camada externa (painel fotovoltaico) e uma camada interna (tanque de água), separadas por uma cavidade de ar ventilada.



Fig.1 Edifício SolarXXI, integração protótipo BIPV-WS

Os objetivos da utilização deste sistema são: por um lado, durante o dia, o calor convertido pelos painéis fotovoltaicos é recuperado naturalmente através da caixa de ar de ventilação natural para o interior do edifício; e, durante a noite, quando as aberturas de ventilação estão fechadas, o calor armazenado no reservatório de água permite manter a temperatura do ambiente interno quente e evitar as perdas de calor. As principais características e componentes do protótipo estão descritas na Tabela 1 e ilustradas na Figura 2. O protótipo foi ensaiado, sendo completamente monitorizado, os respetivos parâmetros estão identificados na Tabela 2.

Tabela 1. Propriedades do protótipo

Camada do protótipo	Propriedades
PV	Módulo fotovoltaico policristalino de dimensões de 1.50mx0.65mx0.035m, com capacidade pico, P_{max} , de 120 W_p , Corrente de Curto-Circuito (I_{sc}) de 7,7 A e voltagem de circuito-aberto (V_{oc}) de 21,8 V.
Cavidade de ar	Cavidade de ar de dimensões 1.50mx0.69mx0.1m
Tanque de água	Tanque de água de dimensões 1.50mx0.5mx0.1m, com paredes de policarbonato compacto de 0.01m de espessura e condutibilidade térmica de 0.2 W/m^2 . Capacidade de 55 L.

Durante o dia, devido à exposição solar, o painel fotovoltaico absorve a radiação solar, gerando calor durante o processo de conversão, o qual se acumula dentro do tanque de água. A ventilação natural é utilizada para aquecimento do interior do edifício durante a estação de aquecimento – inverno - onde também é esperado que o tanque de água acumule o calor e o mantenha aquecido por um período prolongado de tempo. Durante o verão, a ventilação é feita para o ambiente exterior, reduzindo a temperatura do PV, enquanto que o tanque de água mantém a temperatura da parede interior no mínimo.

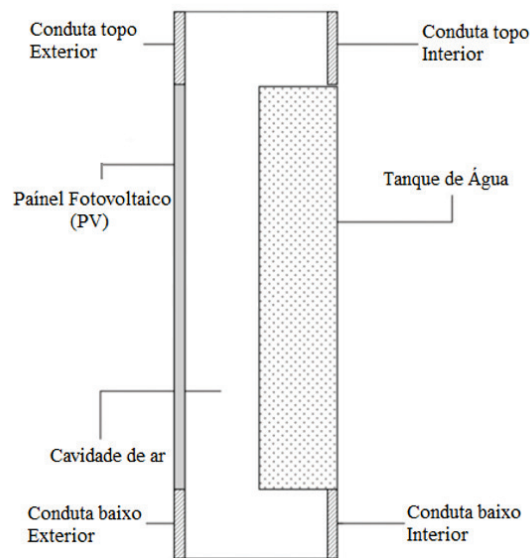


Fig.2 Estrutura e componentes do protótipo BIPV-WS

Tabela 2. Parâmetros de monitorização

Nomenclatura	Descrição
GHI	Irradiação Global Horizontal (W/m^2)
T_{out}	Temperatura do ambiente exterior ($^{\circ}C$)
T_{PV}	Temperatura do PV ($^{\circ}C$)
T_{air}	Temperatura da cavidade de ar ($^{\circ}C$)
T_{WS-int}	Temperatura de superfície da parede interior do tanque de água ($^{\circ}C$)
T_{int}	Temperatura interior da sala ($^{\circ}C$)

DESCRIÇÃO DO MODELO TÉRMICO

Para simular o comportamento térmico do protótipo, foi criado um modelo que calcula o balanço energético existente em cada camada do sistema. O modelo requer, como *input*, os dados das condições envolventes: radiação incidente no PV, temperatura exterior e temperatura interior, sendo utilizados valores experimentais incluindo e estação meteorológica do local para temperatura exterior e Radiação Global Horizontal (GHI). A radiação incidente no PV foi calculada a partir do modelo de Homer, o qual tem como base os trabalhos de Duffie y Beckham (Duffie y Beckham, 1991). O modelo calcula a radiação incidente numa superfície num determinado instante de tempo a partir da posição do sol, nas relações trigonométricas entre o sol e a superfície irradiada, e na GHI existente. Assim, é possível calcular a radiação incidente utilizando apenas os dados de GHI registados e com a indicação do dia do ano e da localização para o caso simulado.

Devido á existência de fatores dinâmicos complexos de simular (e.g. influência do vento) e ao fator da temperatura normal de funcionamento do PV (NOCT) não ser precisa para casos de BIPV (Neises,2011), a temperatura do PV foi calculada com base no trabalho dos laboratórios SANDIA (King, Boyson y Kratochvill, 2004) utilizando para o cálculo da temperatura de BIPV a seguinte Equação 1.

$$T_{PV} = T_{out} + G_{inc} \exp(a + b V_{wind}) \quad (1)$$

onde G_{inc} representa a irradiação incidente no PV, V_{wind} a velocidade do vento – para este modelo, na retaguarda do PV – e onde a e b representam constantes que dependem do tipo de PV e configuração. Para um PV policristalino, estes tomam valores de -2.81 e -0.0455, se a retaguarda do PV estiver integrada e fechada numa fachada; e valores de -3.56 e -0.075, caso a retaguarda do PV tenha exposição ao ambiente exterior. O resto do modelo consiste num circuito equivalente de resistências térmicas, no qual cada troca térmica existente desde a cavidade de ar até ao interior do quarto é representada através de uma resistência cujo valor é dependente do tipo de troca térmica – condução, convecção e radiação. A Fig. 3 apresenta a visão geral de todo o modelo, nos quais as siglas rodeadas por um retângulo representam o *input* necessário para o cálculo do comportamento térmico.

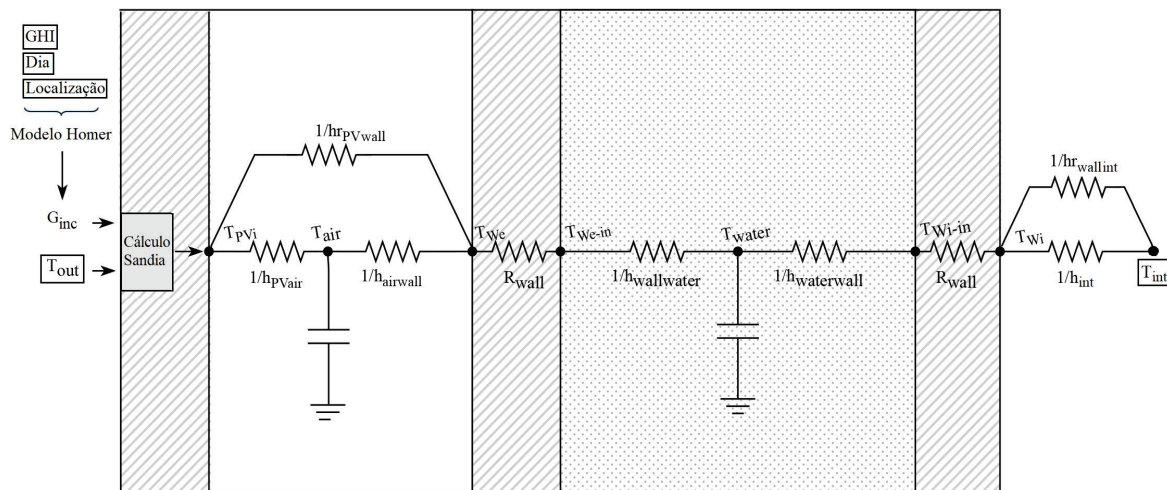


Fig 3. Esquema do modelo térmico para o protótipo BIPV-WS (sem ventilação)

Os coeficientes de trocas térmicas por condução e radiação apresentam valores relativamente constantes para a gama de temperaturas envolvida no protótipo (5°C a 70°C), sendo estes obtidos com base nas propriedades dos materiais envolvidos. No entanto, o coeficiente de trocas térmicas por convecção é função das temperaturas dos elementos envolvidos, variando ao longo do dia. Este foi calculado com base na Equação 2 (Incropera y Dewitt, 2004), utilizando os números de Nusselt representados na Equação 3 para casos de fluido estagnado (tanque de água e cavidade de ar) e Equação 4 em casos de fluxo natural do fluido sobre uma placa vertical (superfície interior da parede), respetivamente.

$$h = \frac{Nu k}{D} \quad (2)$$

$$Nu = 0.22 \left(\frac{Ra Pr}{0.2 + Pr} \right)^{0.28} \left(\frac{H}{L} \right)^{-0.25} \quad (3)$$

$$Nu = 0.68 + \left(0.67 Ra^{1/4} \right) / \left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{4/5} \quad (4)$$

onde h é o coeficiente de convecção, Nu o número Nusselt, k a condutividade térmica do fluido, D o diâmetro hidráulico, Ra o número de Rayleigh, Pr o número de Prandtl, H a altura da superfície de contacto, e L o distanciamento entre as placas verticais que contêm o fluido. Caso o espaço de ar seja ventilado, o modelo será alterado, para este espaço, para um balanço energético, o qual toma em consideração as trocas de ar com o PV, parede e caudal existentes. Este balanço é demonstrado na Equação 5, sendo que os coeficientes de convecção serão adequados ao tipo de fluxo existente.

$$M_{ar} C_{p_{ar}} \frac{dT_{ar}}{dt} = h_{PV-ar} A_{PV} (T_{PV} - T_{ar}) + h_{ar-WS} A_{WS} (T_{ar} - T_{WS-ext}) - \dot{m} C_{p_{ar}} (T_{saída} - T_{entrada}) \quad (5)$$

onde M_{ar} é a massa de ar (kg), $C_{p_{ar}}$ o calor específico do ar (J/kg.K), h_{PV-ar} e h_{ar-WS} os coeficientes de transferência de calor por convecção entre, respetivamente, o PV com a cavidade de ar; e a cavidade de ar com o tanque de água, A a área da superfície, \dot{m} o fluxo de ar na cavidade de ar (kg/s), $T_{entrada}$ a temperatura de entrada do ar e $T_{saída}$ a temperatura de saída do ar.

Desenvolvimento do modelo numérico

O modelo foi implementado usando o MatLab-Simulink, uma ferramenta que modela e simula sistemas dinâmicos a partir da diagramação gráfica por blocos e bibliotecas customáveis. Uma destas bibliotecas – e a usada neste artigo – encontra-se associada à linguagem SimScape, mais concretamente em blocos que representam as trocas térmicas mencionadas a partir da conexão de propriedades físicas dinâmicas (e.g. temperatura) e a introdução de propriedades do elemento envolvente (e.g., condutibilidade térmica). Com estas ferramentas, é possível modelar o circuito térmico no programa, atribuindo a cada resistência térmica equivalente o seu bloco de SimScape correspondente, e introduzir as fórmulas para o cálculo das restantes temperaturas a partir do MatLab. A Fig. 4 mostra o exemplo do modelo do tanque de água implementado no Matlab – Simulink.

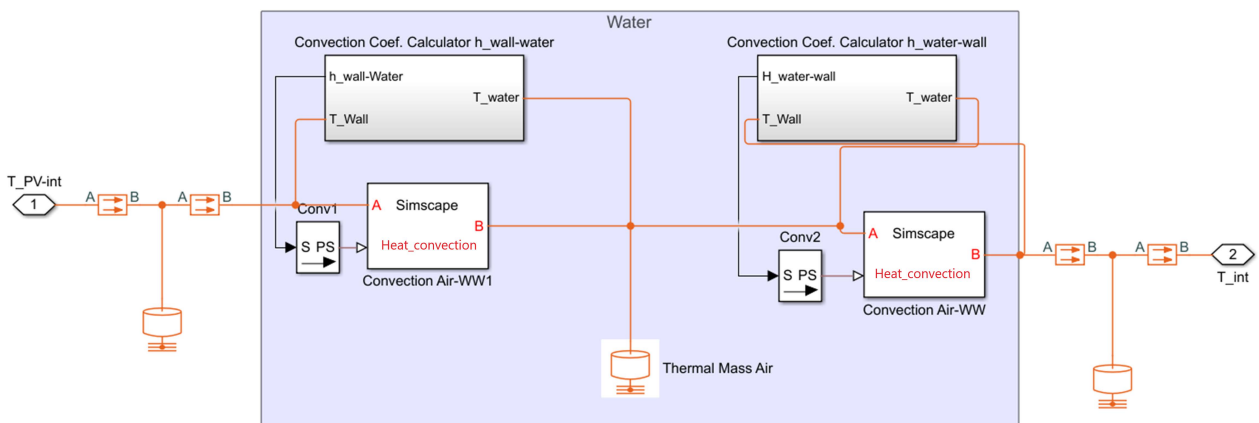


Fig 4. Modelação numérica do tanque de água

Para trocas térmicas por condução e radiação, as resistências térmicas são programadas pelos blocos de “Conductive Heat Transfer” e “Radiative Heat Transfer” do SimScape. Estes blocos contêm a informação necessária para o cálculo das trocas térmicas (área; valores dos coeficientes de transferência de calor e, no caso de condução, espessura), e possuem conexões com as temperaturas dos elementos envolvidos. No caso das trocas térmicas por convecção, onde o coeficiente de transferência de calor apresenta variações significantes ao longo do dia, foi utilizado um bloco customizado de modo a contabilizar com esta variação, e com base nas Equações 2, 3 e 4 previamente mencionadas.

Este bloco foi utilizado em trabalhos anteriores semelhantes a este protótipo, onde se procedeu à modelação de um protótipo BIPV com um material de mudança de fase – PCM (Pereira, 2020). Por último, como o programa funciona em passos de tempo de segundo a segundo, foi necessário converter os dados de *input* para este formato. Tomando, como exemplo, os sensores de temperatura utilizados, que registam a média da temperatura intervalos de 10 em 10 minutos, o modelo numérico irá considerar que, para cada intervalo, a temperatura de *input* mantém-se constante e igual ao valor medido.

VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico será validado em para duas configurações diferentes: BIPV-WS com cavidade de ar fechada e BIPV-WS com cavidade de ar ventilada. A partir de campanhas experimentais efetuadas no Verão de 2020, foram obtidos dados experimentais para cada configuração do protótipo mencionada. A Figura 5 e Figura 6 representam, respetivamente, a validação dos casos-estudo fechado e ventilado. Em cada figura, são comparados os dados experimentais da temperatura do PV, cavidade de ar e superfície de parede interior com os dados obtidos pelo modelo numérico descrito neste artigo.

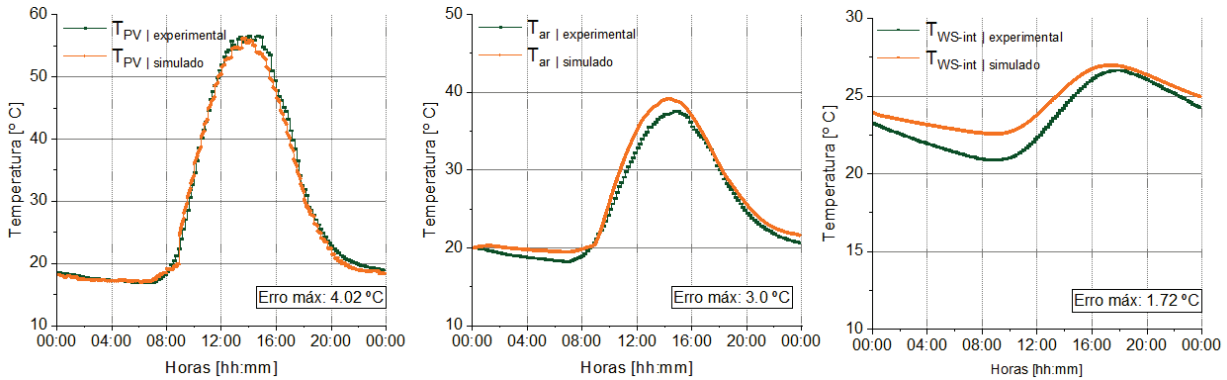


Fig 5. Validação do modelo BIPV-WS configuração não-ventilado

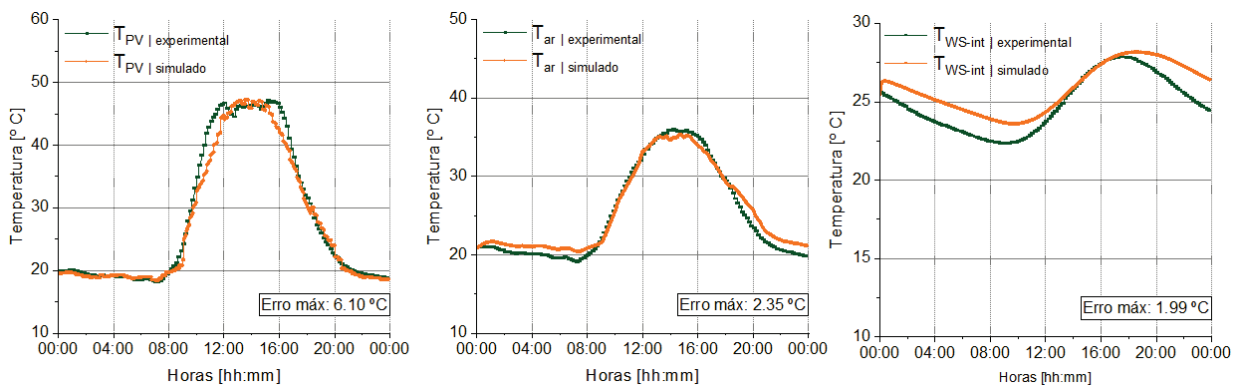


Fig 6. Validação do modelo BIPV-WS ventilado

Para ambos os casos-estudo, as temperaturas calculadas pelo modelo numérico demonstram valores e evoluções semelhantes com os dados experimentais. Os picos de divergência entre o simulado e o experimental encontram-se na temperatura do PV, sendo que o caso ventilado apresenta a maior diferença de valores, com um máximo de 6.10 °C. No entanto, a evolução da temperatura ao longo do dia é semelhante entre o caso experimental e numérico, tanto para a temperatura do PV, como para a temperatura do ar, sendo que esta última mostra poucas diferenças entre os dois resultados. Por último, para a temperatura da superfície interior, as duas comparações apresentam uma ligeira diferença, com máximos de 1.99 °C para o caso ventilado, mas com a evolução da temperatura ao longo do dia a ser ligeiramente distinta no início do dia.

COMENTÁRIOS FINAIS

Este artigo apresenta a validação de um modelo numérico de um módulo fotovoltaico integrado num edifício combinado com um tanque de armazenamento de água (BIPV-WS), como parte de uma fachada do edifício Solar XXI. A experiência faz parte do projeto de pesquisa *NZEB_LAB*, cujo objetivo é promover o teste e o desenvolvimento de todas as aplicações de energia solar em edifícios. O comportamento térmico de cada camada do protótipo foi calculado com base nas condições envolventes: irradiação global horizontal, temperatura interior e temperatura exterior.

A utilização de MatLab/Simulink como ferramenta de modelação e cálculo de balanços térmicos mostrou-se precisa, sendo a maioria dos resultados numéricos bastante semelhantes aos experimentais. As diferenças mais significantes

foram encontradas na temperatura do PV no caso ventilado, e no comportamento da parede interior durante a madrugada, o qual apresenta um decréscimo de temperatura menos acentuado. Estas divergências são derivadas da abordagem relativamente simples do modelo, no qual não foram considerados efeitos complexos na simulação do protótipo – tais como vento e turbulência, sombreamento parcial e paredes não-adiabáticas. Por outro lado, o método experimental pode induzir o método numérico em erro, não só pelo erro inerente dos sensores utilizados, como também pelo seu posicionamento. Neste último, é destacado o sensor de ambiente interior, o qual se encontra a meio da sala, numa posição elevada, em contraste com a parede do protótipo, que se encontra numa elevação reduzida, debaixo de uma janela. Também existe a possibilidade de infiltrações de ar e de evaporação de água no tanque ao longo do tempo. Neste último caso, há a possibilidade de o modelo numérico simular um tanque com maior quantidade de água do que o tanque testado no método experimental.

Este estudo insere-se no âmbito do projeto de investigação NZEB_LAB, cujo objetivo é promover a o desenvolvimento de todas as aplicações da energia solar em edifícios, estando este trabalho inserido na Atividade de Investigação 2.1 “Investigação Experimental de novas aplicações, sistemas inovadores de energia solar (laboratório e edifício real), e flexibilidade energética de edifícios e sistemas solares integrados”.

AGRADECIMENTOS

NZEB_LAB - Infraestrutura de Investigação em Integração de Sistemas de Energia Solar em Edifícios ”(Ref. LISBOA-01-0145-FEDER-022075)” é financiada com fundos nacionais FCT / MCTES (PIDDAC) e FEDER europeu do Programa de Operação Regional de Lisboa.

REFERÊNCIAS

Lloret A, Andreu J & Merten J (1995, October). The Mataro Library: a 53kWp grid connected building with integrated PV-thermal multifunctional modules.

Charron, R. & Athienitis, A.K. (2003, June). Optimization of the Performance of PV-Integrated Double Façades. *ISES Solar World Congress, Goteborg, Sweden*.

Athienitis, A. K., Zhang, K., & Feldman, D. (2005, May). A study of double facades with phase-change storage and photovoltaics. *International Conference “Passive and Low Energy Cooling 855 for the Built Environment.”*

Aelenei, L., Pereira, R., Gonçalves, H., & Athienitis, A. (2014). Thermal Performance of a Hybrid BIPV-PCM: Modeling, Design and Experimental Investigation. *Energy Procedia, 48*, 474-483. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.056>

Aelenei, L. & Gonçalves, H. (2013, *September*). From solar building design to Net Zero Energy Buildings: performance insights of an office building. *International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry*.

Gonçalves, H., Camelo, S., Horta, C, Graça, J.M., Aelenei, L., Oliveira, M.P., Joyce A., & Rodrigues C. (2010) Solar XXI-Em direcção à energia zero / Towards zero energy, @LNEG 2010 (ISBN:978-989-675-007-7). Lisbon; 2010

Duffie, J.A., Beckman, W.A., *Solar Engineering of Thermal Processes* 2nd edition, Wiley, New York; 1991

Ricardo Pereira (2020). Variable Convective Heat Transfer Coefficient (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/39512-variable-convective-heat-transfer-coefficient>), MATLAB Central File Exchange.

Neises, T. (2011). Development and Validation of a Model to Predict the Temperature of a Photovoltaic Cell. Master of Science Thesis. University of Wisconsin–Madison.

King, D.L.; Boyson, W.E.; Kratochvill, J.A. (2004) Photovoltaic Array Performance Model, SANDIA Report SAND2004-3535; Sandia National Laboratories: Albuquerque, NM, USA

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2002). *Fundamentals of heat and mass transfer*. New York: J. Wiley.