

**COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM PROTÓTIPO BIPV COMBINADO COM
ARMAZENAMENTO DE ÁGUA: ANÁLISE EXPERIMENTAL****Sousa M.A.C.*, Aelenei L. *, Gonçalves H.***

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

<https://doi.org/10.34637/cies2020.2.2138>

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 os resultados de uma campanha experimental de protótipo construído no âmbito do projeto NZEB_LAB. O protótipo consiste num módulo fotovoltaico combinado com um tanque de armazenamento de água, separados por uma cavidade de ar ventilada. O sistema foi integrado e analisado em condições reais de funcionamento na fachada do edifício SolarXXI – um edifício de consumo energético quase nulo (nZEB) em Lisboa, Portugal. Os resultados apresentados neste artigo mostram a capacidade de armazenamento do tanque de água, mantendo a temperatura da água de 23°C-25°C por um período de 9 horas durante o um dia de Inverno, depois do pôr-do-sol. A ventilação da cavidade de ar permitiu recuperar o calor para o interior durante o Inverno, e, durante o Verão, libertar o calor para o exterior, evitando o sobreaquecimento do protótipo.

PALAVRAS-CHAVE: BIPV, nZEB, Armazenamento 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 results of an experimental campaign of a prototype built within the scope of the project NZEB_LAB. The prototype consists of a photovoltaic module combined with a water storage tank (BIPV-WS), with the layers separated by a ventilated air cavity. The system was integrated and analyzed under real operating conditions at the façade of Solar XXI - a nearly Zero Energy Building (nZEB) in Lisbon, Portugal. The results of this article demonstrated the thermal storage capacity of the water tank, maintaining the water temperature of 23°C-25°C for a period of 9 hours during winter, even after sunset. The ventilation of the air cavity made it possible to recover the heat to the interior during the winter, and, during the summer, to release the heat to the outside, avoiding the overheating of the prototype.

KEYWORDS: BIPV, nZEB, Water Storage, Integrated Facades

INTRODUÇÃO

Os estudos e as tendências políticas relativamente as alterações climáticas tornaram imperativo reduzir a dependência de uso 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 têm de ser uma prioridade. Sistemas fotovoltaicos integrados em fachadas podem ser utilizados para gerar eletricidade e calor útil (Lloret et.al, 2003), com possíveis eficiências de 70% (Charron y Athienitis, 2003). Além disso, o armazenamento térmico integrado ao edifício pode ser um meio eficaz de reduzir os picos de carga e controlar as flutuações de temperatura associadas (Athienitis et.al, 2005) (Aelenei et.al, 2014). No entanto, o estudo de soluções que combinam ambos sistemas é reduzido.

Este artigo apresenta os primeiros resultados de uma investigação experimental de um protótipo de fachada com módulo fotovoltaico integrado na fachada do Edifício Solar XXI (Building Integrated Photovoltaic-BIPV, neste artigo sendo adotada a terminologia inglês), combinado com tanque de armazenamento de água (Building Integrated Photovoltaic-Water Storage, BIPV-WS). O protótipo tem o objetivo de tirar proveito das características de um BIPV: aproveitamento da geração da energia renovável e a utilização da energia gerada pela conversão fotovoltaica, para efeitos de aquecimento passivo da temperatura interior do edifício, melhorar a eficiência do sistema fotovoltaico, através da limitação do aumento da sua temperatura. Estes objetivos podem ser alcançados utilizando a ventilação da cavidade de ar existente atrás do BIPV. O calor libertado no processo de conversão do PV é recuperado para o aquecimento interno durante o inverno, e para o exterior – arrefecimento - durante o verão, através do manuseamento/operação de condutas. Por outro lado, a otimização do desempenho do sistema pode ser alcançada utilizando componentes de armazenamento. A utilização de tanque de água permite controlar a flutuação de temperatura associada ao sistema integrado através do armazenamento de calor sensível. A água possui maior capacidade térmica do que elementos convencionais, e tem sido objeto de estudo para componentes de paredes e telhados, provando ser uma solução eficaz e econômica que pode melhorar o conforto térmico interno e reduzir o consumo de energia e uso do concreto do edifício (Wu y Lei 2016). Como tal, o armazenamento de calor sensível através de um tanque de água permite uma temperatura estável e constante da parede interior durante o longo do dia, enquanto que apresenta um custo de capital inicial reduzido quando comparado a materiais inovadores, como materiais de mudança de fase (PCM).

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)

Conceber, desenvolver e testar novas soluções de elementos integrados de fachada é um dos principais objetivos das atividades de investigação integradas no quadro da NZEB_LAB: Infraestrutura de Investigação em Sistemas de Energia Solar, localizada em Lisboa, Portugal. Esta infraestrutura de investigação integra capacidades e equipamentos experimentais na área de energia solar (Laboratório de Energia Solar), na área de materiais (Laboratório de Materiais e Revestimentos) e SolarXXI - edifício de escritórios de necessidades energéticas quase nulas (NZEB), funcionando como um laboratório vivo e servindo para testes em ambiente real para fachada de edifícios.

SolarXXI

O edifício SolarXXI é uma das principais plataformas de teste da infraestrutura NZEB_LAB, o protótipo de fachada de edifício é instalado e testado em condições reais de funcionamento (Fig. 1).

O Solar XXI foi construído em Lisboa em 2006 como projeto de demonstração do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) (Aelenei & Gonçalves, 2013), e tem o objetivo de ser um exemplo de edifício solar de baixo consumo energético, utilizando sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento (arrefecimento do solo) em direção a um nZEB (Gonçalves et. all, 2010). O edifício integra várias soluções passivas para redução do consumo de energia no inverno e no verão. A fachada principal é orientada a sul, e possui sistemas BIPV com recuperação de calor, que auxilia no aquecimento no inverno. No verão, um sistema de arrefecimento do solo (tubos enterrados) é utilizado para arrefecer o edifício, juntamente com a proteção solar através da operação de estores, e de estratégias de arrefecimento noturno através da ventilação pelas aberturas do edifício, incluindo uma claraboia central.

Os sistemas BIPV consistem em 76 módulos de silício policristalino, e possuem uma área de cerca de 96 m² e potência de pico de 12 kW. A produtividade é de cerca de 1004 kWh / kW (Gonçalves et.all, 2012). Embora o edifício seja um

edifício de escritórios, no rés-do-chão, estão preparadas duas salas de teste (Fig.2, lado direito) para a integração e teste de protótipos de fachada.



Fig. 1. Edifício Solar XXI

Descrição do protótipo BIPV-WS

O protótipo BIPV-WS foi instalado na fachada principal do SolarXXI no final do inverno de 2019 e desde então é testado em condições reais. o protótipo é composto por uma camada externa (painel fotovoltaico) e uma camada interna (tanque de água), separadas por uma cavidade de ar ventilada. 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 passivo do interior do edifício durante a estação de aquecimento, por recuperação do calor gerado pelo PV no processo de conversão. Por outro lado, a utilização e integração, do tanque de água tem como objetivo a acumulação e armazenamento do mesmo calor, mantendo-se a uma temperatura estável por um período prolongado de tempo. Durante o período noturno, 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 para o exterior. Durante o verão, o modo de operação da é diferente, tendo o objetivo de expelir o calor acumulado na cavidade do ar durante o dia. 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. As principais características do protótipo estão descritas na Tabela 1.

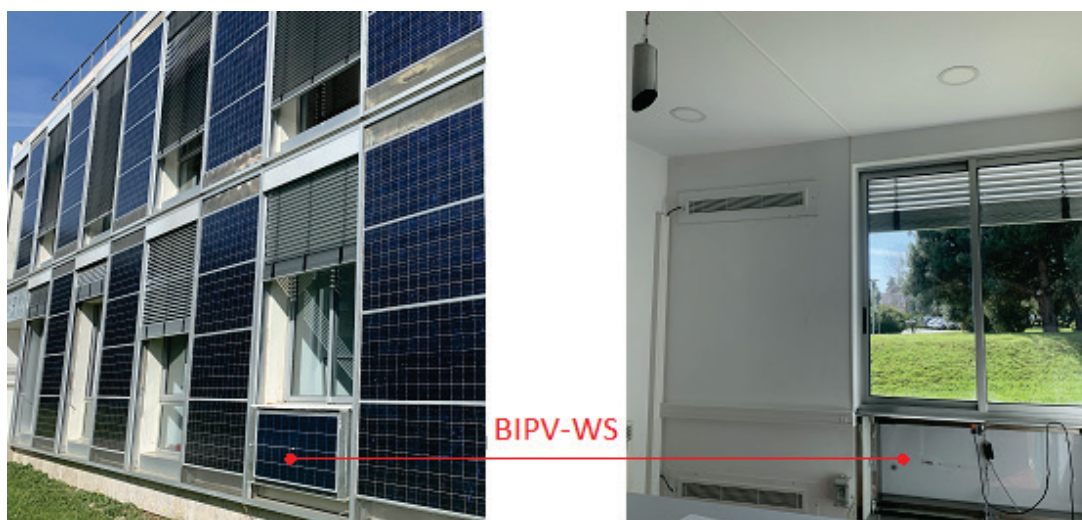


Fig. 2. Protótipo BIPV-WS

Configuração experimental

O protótipo BIPV-WS é totalmente monitorizado em todas as suas superfícies, cavidade de ar e interior de tanque de água, a fim de entender o comportamento térmico do sistema. As temperaturas de ar interior e exterior também são monitorizadas, assim como a irradiação solar global, através de uma estação meteorológica instalada no telhado do SolarXXI. Para a avaliação do comportamento térmico do protótipo, foram colocados sensores PT100 2x2,3mm, classe B, em cada camada do protótipo. Estes sensores medem a temperatura média em intervalos de 10 minutos, sendo utilizados três tipos diferentes para cada aplicação, tal como demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1. Sensores utilizados

Sensor	Aplicação	Intervalo de Temperatura (° C)
Omega PR-10-2-M45-100-ST	Superfície	[-50; 200]
Omega SA2F-RTD-3-100-A-10M	Imersão e ar	[-200; 600]
RS Pro 376-1477	Ambiente	[-10;40]

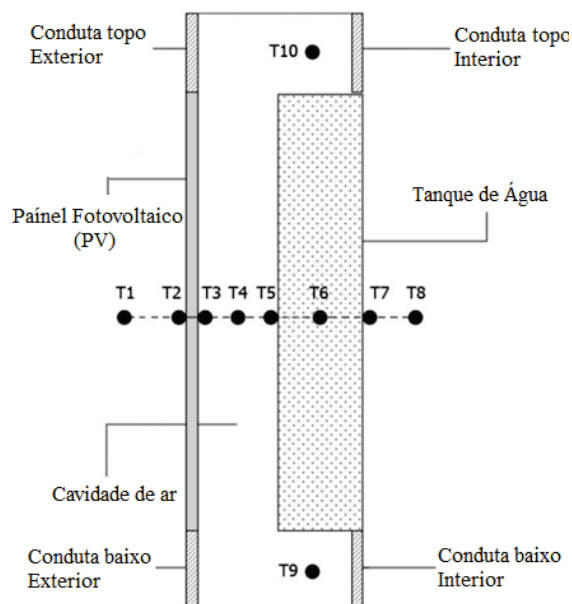


Fig. 3. Configuração do protótipo BIPV-WS

Tabela 2. Sensores instalados

Sensor	Posição	Temperatura
T1	Ambiente exterior	T_{out}
T2	PV – superfície exterior	$T_{PV, ext}$
T3	PV – superfície interior	T_{PV}
T4	Cavidade de ar	T_{air}
T5	Tanque de água – superfície exterior	T_{WS-ext}
T6	Água	T_{water}
T7	Tanque de água – superfície interior	T_{WS-int}
T8	Ambiente Interior	T_{int}
T9	Cavidade de ar – topo	$T_{air,top}$
T10	Cavidade de ar – baixo	$T_{air,bot}$

RESULTADOS E ANÁLISE EXPERIMENTAL

O BIPV-WS foi testado durante os períodos de inverno e verão, e o seu comportamento térmico foi analisado através de monitorização. Para cada estação do ano, foram utilizados diferentes modos de ventilação. Durante o inverno, a ventilação é feita entre as 10:00 e as 17:30 com o ambiente interior da sala, de modo a recuperar o calor. O período de tempo foi selecionado de modo a garantir que a cavidade de ar teve tempo para ser aquecida pelo PV, atingindo a temperatura de conforto necessária para o interior da sala, e evitando perdas de calor da sala. Durante o verão, a configuração da ventilação é alterada, usando as condutas exteriores proporcionar a ventilação com ar exterior, evitando o sobreaquecimento do protótipo.

Comportamento térmico de BIPV-WS durante o Inverno

O período de monitorização do Inverno foi caracterizado por dias parcialmente nublados. Foi escolhido para análise o dia 18 de fevereiro (Fig. 4) com nível máximo de radiação global de 690W/m² e temperatura máxima de 20°C.

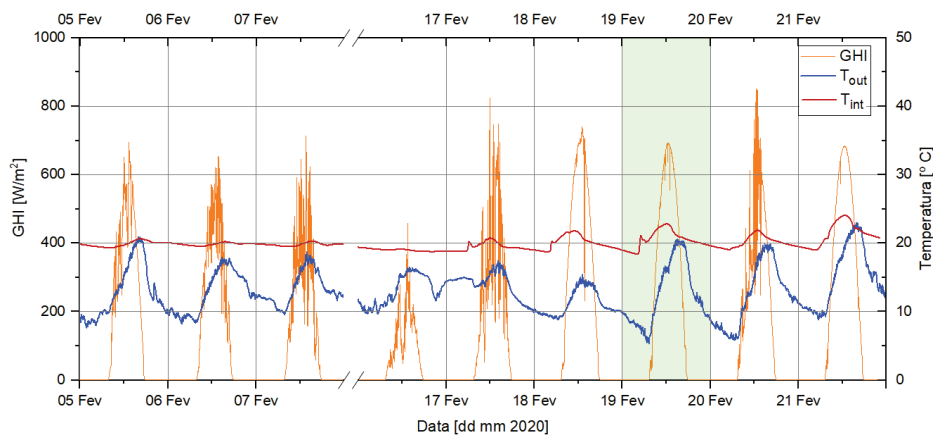


Fig. 4. Condições atmosféricas durante o Inverno (fevereiro 2020)

O comportamento térmico do protótipo durante o dia do inverno é apresentado na Figura 5 onde se pode verificar que o PV atinge uma temperatura entre os 43°C e os 50°C durante o dia. A partir de 10:00 as condutas interiores do protótipo foram abertas e assim a cavidade do ar é ventilada, o ar sendo conduzido para o gabinete adjacente. A temperatura da cavidade do ar sofreu uma diminuição de 3°C quando a ventilação foi ativada através da abertura das condutas.

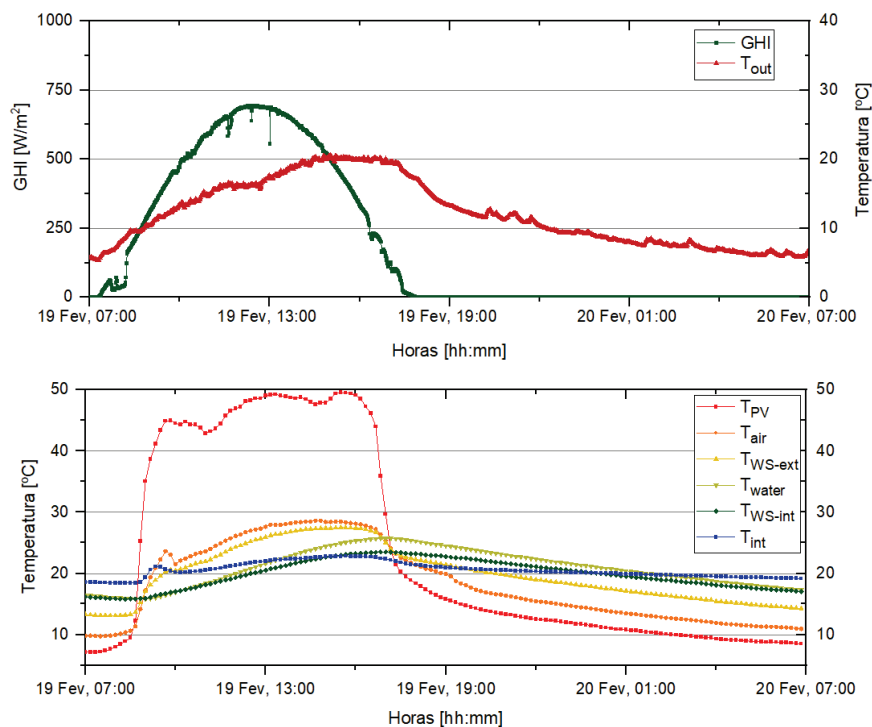


Fig. 5. Comportamento térmico do BIPV-WS ventilado no inverno e condições meteorológicas

Relativamente a utilização do tanque da água, é possível observar a temperatura da água a alcançar um pico de temperatura de 25.5°C às 17:30. A superfície interior do tanque de água apresenta temperaturas entre os 16.5°C e 24°C, sendo que a sua temperatura é superior a 20°C, temperatura de conforto mínima, durante um período aproximado de 12 horas, sendo que metade deste período é após o pôr-do-sol. Assim, o armazenamento térmico contribui como prevenção de perdas de calor do edifício para o exterior. Uma análise da temperatura do PV e temperatura da água é ilustrada na Figura 6 para verificar a capacidade de armazenamento de calor gerido pelo PV através da utilização da água, seguindo o comportamento da temperatura da água e do PV ao longo do dia e no período de radiação.

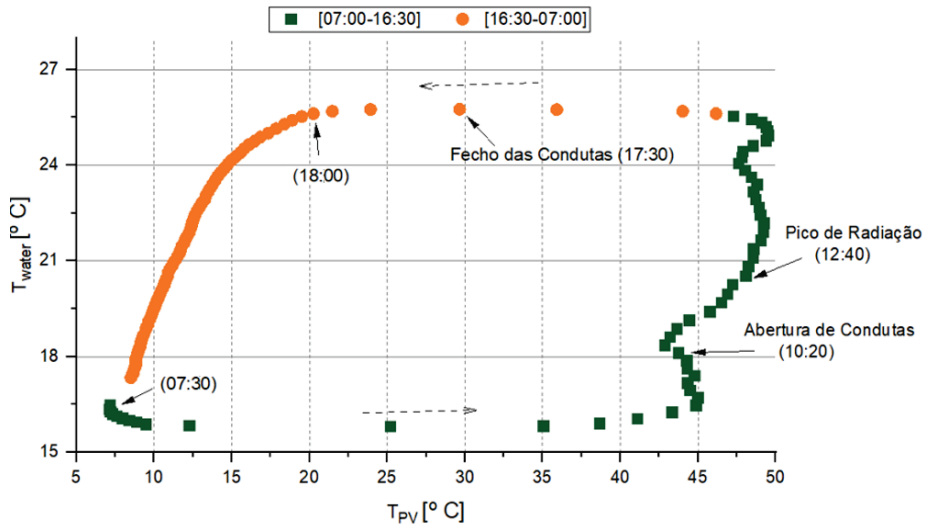


Fig. 6. Relação entre as temperaturas do PV e da água durante o Inverno (19 fevereiro 2020 – 20 fevereiro 2020)

A temperatura do PV apresenta valores muito baixos durante o início da manhã (abaixo de 10°C), subindo radicalmente até 45°C (10h) e quase 50°C (13h). Por outro lado, a temperatura da água aumenta desde 16.5° C até 25.5° C, e, embora o PV esteja a gerar calor apenas durante o dia (07:30-18:00), a água mantém a sua temperatura acima dos 20° C desde as 12:00 até às 02:00 do dia seguinte, evitando perdas para o ambiente exterior tanto durante o dia, como durante a noite.

Comportamento térmico de BIPV-WS durante o Verão

A semelhança da análise apresentada para o dia de inverno, no mês de agosto foi escolhido um dia típico de verão (8 de agosto) de acordo com ilustrado na Figura 7.

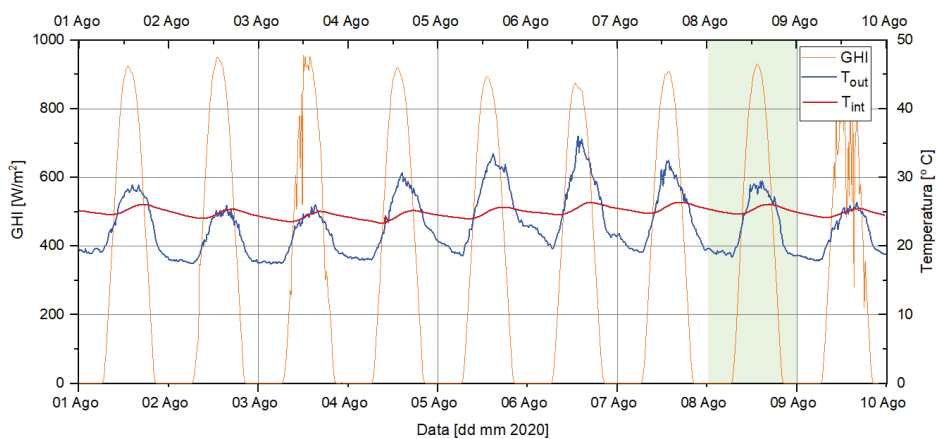


Fig 7. Condições atmosféricas durante o Verão (agosto 2020)

O dia 8 de agosto é caracterizado por nível de radiação global horizontal (GHI) máxima de 935 W/m² e temperaturas exteriores máximas de 30°C. Foram registadas as temperaturas de cada superfície do protótipo, e comparadas entre si na Figura 8, no modo de ventilação para o exterior. É possível observar que o PV atinge uma temperatura relativamente constante durante o dia entre os 45°C e os 48°C. Os picos de temperatura acontecem por volta das 10:30

e 16:30, sendo estes instantes de elevados valores de GHI, e nos quais a posição do sol não é tão elevada como a meio do dia, proporcionando uma maior incidência na fachada perpendicular ao solo.

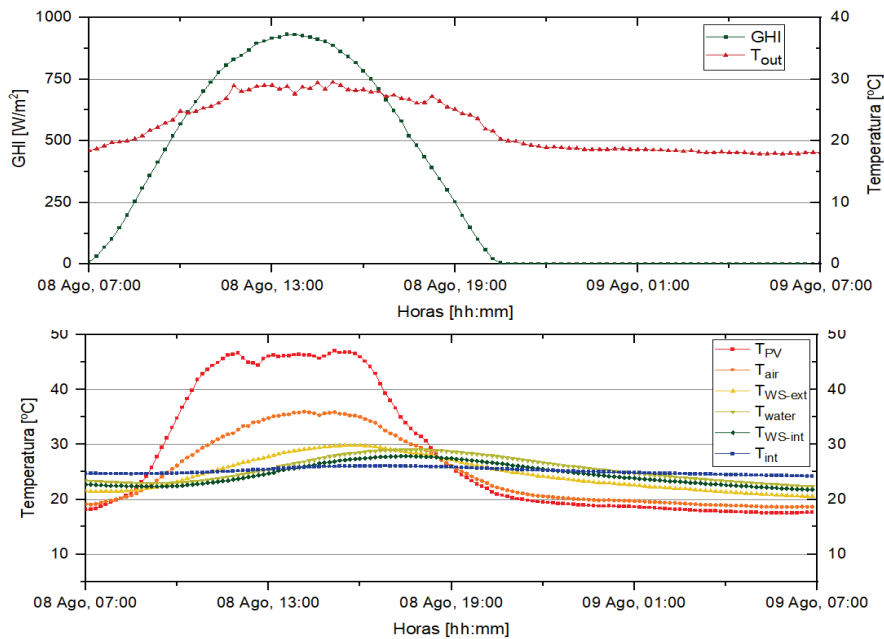


Fig. 8. Comportamento térmico do BIPV-WS ventilado no verão (topo) e condições meteorológicas (baixo)

De modo a analisar, em maior detalhe, a influência da água no protótipo, foi feita uma análise entre a temperatura do PV e a temperatura da água ao longo do dia, sendo esta representada pela Figura 9 em dois períodos distintos: desde o nascer-do-sol até ao início do por-do-sol; e desde o início do por-do-sol até às 07:00 do dia seguinte.

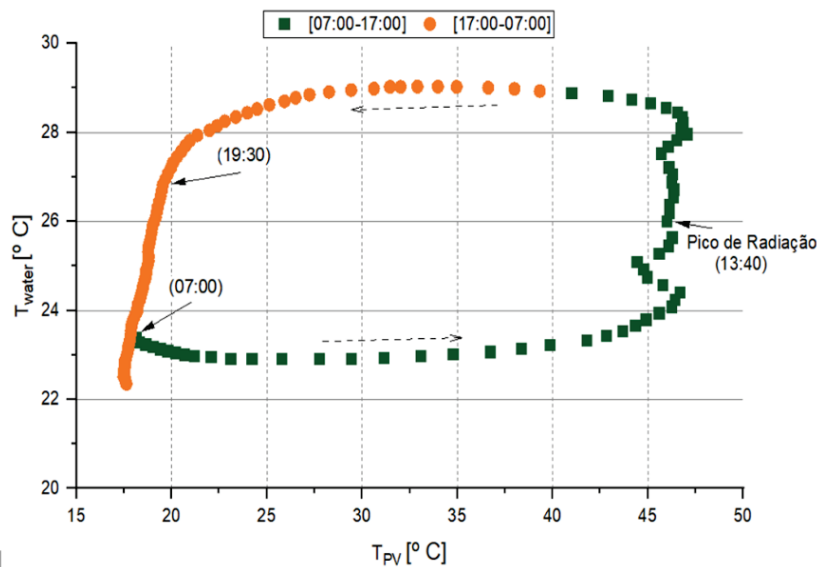


Fig. 9. Relação entre as temperaturas do PV e da água durante o Verão (8 agosto 2020 – 9 agosto 2020)

Com base na Figura 9, é possível verificar a variação da temperatura PV, num período de tempo reduzido (3h), enquanto a variação da temperatura da água é lenta, consequência da sua capacidade térmica de armazenamento, com valores mínimos de 23° C no início do dia a máximos de 28.5 ° C, uma variação de 5.5° C, quando comparado á variação de 30° C do PV. Esta estabilidade térmica permite a redução de ganhos térmicos para o edifício durante o verão. Enquanto que a temperatura do PV atinge 25° C às 09:00 e, a partir das 10:30, encontra-se a temperaturas superiores a 40° C, a temperatura da água mantém-se estável de 23°C. A água irá ser aquecida lentamente, atingindo 25°C apenas às 13:00, representando um período total de 6 horas, durante o dia, que a água se encontra abaixo da temperatura de conforto máxima desejada no verão. Em conjunto com o período da noite, a temperatura da água mantém-se abaixo de 25° C durante um período total de 12 horas e 30 minutos.

COMENTÁRIOS FINAIS

Este artigo apresenta os resultados de uma investigação experimental 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. O trabalho faz parte do projeto de investigação *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 analisado em dois dias típicos de inverno e verão - em Lisboa, Portugal, com base nas temperaturas reais da cavidade de ar ventilado, módulo fotovoltaico e tanque de água. A utilização do tanque de água demonstra ser um armazenamento térmico eficaz no protótipo testado, durante o período de inverno, a temperatura da água encontra-se entre os 20°C-26°C por um período de aproximadamente 13 horas, mesmo depois do pôr-do-sol. Além disso, através da ventilação da cavidade de ar, o calor gerado pelo painel fotovoltaico pode ser recuperado naturalmente para o interior do edifício, mantendo a temperatura alta o suficiente para aquecer a água, e reduzindo a temperatura do PV, quando comparando com os casos não-ventilados.

Em condições climáticas de verão, enquanto que o PV alcançou temperaturas de quase 60°C, a temperatura da água do tanque mantém-se abaixo de 25° C durante um período total de 12 horas e 30 minutos.

Trabalhos futuros envolvem uma comparação entre a utilização da água como fonte de armazenamento com outros tipos de componentes/matérias integrados com o painel fotovoltaico.

AGRADECIMIENTOS

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

Garde, F.; Ayoub, J.; Aelenei, L.; Aelenei, D.; Scognamiglio, A. (2017). *Solution Sets for Net Zero Energy Buildings Feedback from 30 Net ZEBs worldwide*, 1st ed. Ernst & Sohn

European Parliament (2010). “Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings”, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj>

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

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

Athienitis, A. K.; Zhang, K.; Feldman, D. (2005). 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>

Wu, T.; Lei, C. (2016). A review of research and development on water wall for building applications. *Energy and Buildings*, 112, 198-208. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.003>

Aelenei, L.; Gonçalves, H. (2013). 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 direção à energia zero / Towards zero energy, @LNEG 2010 (ISBN:978-989-675-007-7). Lisbon; 2010

Gonçalves, H.; Aelenei, L.; Rodrigues, C. Solar XXI: A Portuguese Office Building towards Net Zero-Energy Building. In: The REHVA European HVAC Journal, vol. 49, nº 3, 2012, p. 34-40