

Francesco Incelli¹, <https://orcid.org/0000-0003-1818-4293>

Massimo Rossetti², <https://orcid.org/0000-0002-1392-956X>

¹ Scuola di dottorato, Tecnologie verdi, Università luav di Venezia, Italia

² Dipartimento di Culture di Progetto, Università luav di Venezia, Italia

fincelli@iuav.it

rossetti@iuav.it

Abstract. Questo contributo illustra i risultati della ricerca “Thermo-Electric Photovoltaic Panel” condotta dall’Università luav di Venezia in collaborazione con quattro aziende. La ricerca ha preso in esame un nuovo dispositivo che combina le proprietà fotoelettriche dei pannelli fotovoltaici con quelle delle celle termoelettriche per aumentare l’efficienza della produzione di energia. Questa tecnologia è in grado di sfruttare lo scambio termico per produrre energia in assenza di radiazione solare e rappresenta un significativo miglioramento della tecnologia dei pannelli fotovoltaici e delle celle termoelettriche. La ricerca ha inoltre verificato la fattibilità della tecnologia e individuato proposte per il suo utilizzo negli involucri architettonici e nel settore dei trasporti.

Parole chiave: Pannello fotovoltaico termoelettrico; Involucro edilizio; Facciata integrata; Architettura circolare.

Stato dell’arte

Caratteristiche della tecnologia fotovoltaica

La tecnologia fotovoltaica converte l’energia solare in elettricità attraverso l’effetto fotovoltaico, in cui i semiconduttori opportunamente “drogati” generano elettricità quando sono esposti alla radiazione solare (Belsky *et al.*, 2022). Tuttavia, questa tecnologia presenta alcuni svantaggi, tra cui l’intermittenza nella produzione di energia dovuta alla variabilità della fonte solare. Di conseguenza, la tecnologia fotovoltaica viene spesso combinata con altri sistemi di energia rinnovabile, come l’energia eolica, per garantire una produzione di energia più costante. (Sikula and Krejci, 2022). In questo contesto, il progetto di ricerca si è basato sul concetto di combinare la conversione fotovoltaica con altri sistemi di conversione energetica, inserendo una fonte di energia alternativa direttamente nel pannello fotovoltaico invece di installare un sistema separato; il risultato ottenuto è chiamato “pannello fotovoltaico termoelettrico”.

Photovoltaic Thermo-Electric (PTE) panel: a *low-tech* approach for the energy transition in Architecture

Abstract. This paper presents the results of the “Thermo-Electric Photovoltaic Panel” research conducted by Università luav di Venezia in partnership with four companies. The research examined a new device that combines the photoelectric properties of photovoltaic panels with those of thermoelectric cells to increase the efficiency of energy production. This technology exploits heat exchange to produce energy in the absence of solar radiation, and marks a significant improvement in photovoltaic panel and thermoelectric cell technology. The research also verified the feasibility of the technology, and identified proposals for its use in architectural envelopes and in the transport sector.

Keywords: Thermoelectric photovoltaic panel; Building envelope; Integrated facade; Circular architecture.

Caratteristiche del pannello PTE

Il “pannello fotovoltaico termoelettrico” (di seguito PTE da “Photovoltaic Thermo-Electric”) è costituito da due componenti distinti che lavorano insieme: il primo è il pannello fotovoltaico a celle di silicio (Mughal *et al.*, 2018) comunemente utilizzato per convertire la radiazione solare in energia elettrica; il secondo è costituito da uno strato di celle di Peltier (Enescu, 2023) opportunamente configurate per generare un potenziale elettrico sfruttando l’effetto termoelettrico, o “effetto Seebeck”, in risposta alle variazioni di temperatura tra le facce della cella.

L’effetto Seebeck

L’effetto Seebeck (Wang *et al.*, 2018) è la generazione di un potenziale elettrico quando una faccia di un materiale conduttore viene riscaldata e l’altra raffreddata (Kasap, 2018). Ciò determina una differenza di tensione, nota come “effetto Seebeck termoelettrico”. La natura reversibile di questo effetto ha portato all’invenzione del dispositivo termoelettrico chiamato “cella di Peltier” da parte di Jean Charles Athanase Peltier (Pennelli *et al.*, 2022). Il concetto di pannelli PTE combina gli effetti fotovoltaici e termoelettrici in un unico pannello, utilizzando la radiazione solare per attivare entrambi i processi. Tuttavia, affinché l’effetto termoelettrico sia sostenuto, è necessario che vi sia una differenza di temperatura tra le facce calde e fredde del pannello.

Stratigrafia dei pannelli fotovoltaici e termoelettrici

La configurazione sviluppata e testata prevedeva la seguente stratigrafia dei pannelli:

State-of-the-Art

Features of photovoltaic technology

Photovoltaic technology converts solar energy into electricity through the photovoltaic effect in which suitably ‘doped’ semiconductors generate electricity when exposed to solar radiation (Belsky *et al.*, 2022). However, this technology has some disadvantages, including intermittent energy production due to the variability of the solar source. Consequently, photovoltaic technology is often combined with other renewable energy systems, such as wind power, to ensure the consistency of energy production (Sikula and Krejci, 2022). In this context, the research project was based on the concept of combining photovoltaic conversion with other energy conversion systems by inserting an alternative energy source directly into the photovoltaic panel, instead of installing a

separate system. The result obtained is called a ‘thermoelectric photovoltaic panel’.

PTE Panel Features

The ‘photovoltaic thermo-electric panel’ (hereafter PTE from ‘Photovoltaic Thermo-Electric’) consists of two separate components working together: the first is the silicon cell photovoltaic panel (Mughal *et al.*, 2018), commonly used to convert solar radiation into electricity; the second consists of a layer of Peltier cells (Enescu, 2023) suitably configured to generate an electrical potential by exploiting the thermo-electric effect, or ‘Seebeck effect’, in response to temperature variations between the cell faces.

The Seebeck effect

The Seebeck effect (Wang *et al.*, 2018) is the generation of an electrical poten-

1. vetro protettivo esterno;
2. strato in Etilene Vinil Acetato (EVA);
3. strato della cella di silicio;
4. lastra di vetro intermedia;
5. Strato di celle di Peltier o TEG (Thermo-Electric Generator);
6. vetro protettivo all'interno.

Per la maggior parte delle valutazioni viene utilizzata questa configurazione, ad eccezione di alcune applicazioni che richiedono l'uso di materiali diversi; ad esempio, possono essere introdotte resine epossidiche e paraffine trasparenti, oppure può essere richiesta una diversa configurazione della stratigrafia del pannello con l'inclusione di cavità interne.

Metodologia e fasi della ricerca

Da un punto di vista metodologico, la valutazione della fattibilità del pannello e del suo utilizzo si è basata sui criteri di *circularità*, *modularità* e *versatilità*, definiti come segue:

- *Circularità*: la capacità del prodotto di essere facilmente riconfigurato anche con modifiche sostanziali, pur mantenendo la sua funzionalità di base, ad esempio cambiando alcuni materiali in base alle condizioni ambientali per garantire il riutilizzo attraverso più cicli di vita. (Rigamonti and Mancini, 2021).
- *Modularità*: la capacità del prodotto di essere fabbricato in moduli, anche di dimensioni diverse. (Minunno *et al.*, 2020).
- *Versatilità*: la capacità del prodotto di adattarsi a un'ampia gamma di usi, mantenendo invariata o minimamente

tial when one face of a conducting material is heated and the other is cooled (Kasap, 2018). This results in a voltage difference, known as the 'Seebeck thermoelectric effect.' The reversible nature of this effect led to the invention of the thermoelectric device called the 'Peltier cell' by Jean Charles Athanase Peltier (Pennelli *et al.*, 2022). The concept of PTE panels combines the photovoltaic and thermoelectric effects in a single panel, utilising solar radiation to activate both processes. However, for the thermoelectric effect to be sustained, there needs to be a temperature difference between the hot and cold faces of the panel.

Stratigraphy of photovoltaic and thermoelectric panels

The configuration developed and assessed had the following panel stratigraphy:

1. external protective glass;
 2. layer made of Ethylene Vinyl Acetate (EVA);
 3. layer of the silicon cell;
 4. intermediate glass pane;
 5. Peltier cell layer or TEG (Thermo-Electric Generator);
 6. protective glass inside.
- This configuration is used for most evaluations, except for some applications that require the use of miscellaneous *materials*; for example, transparent epoxy and paraffin resin may be introduced, or a different configuration of the panel stratigraphy may be required with the inclusion of internal cavities.

Methodology and research phases

From a methodological point of view, the feasibility assessment of the panel and its use was based on the criteria of *circularity*, *modularity* and *versatility*,

modificata la sua struttura o composizione di base. (ISO, 2022).

Sono stati eseguiti confronti con prodotti simili e apportate modifiche alla configurazione strutturale, tenendo conto delle caratteristiche dello studio. Le proposte sono state organizzate in quattro fasi (work packages): la ricerca delle soluzioni esistenti e la valutazione della fattibilità del pannello PTE nel WP1, workshop di progettazione e analisi SWOT nel WP2, sviluppo di soluzioni innovative e progetti dettagliati nel WP3 e prototipazione virtuale, analisi termiche e identificazione di futuri sviluppi nel WP4.

Sono stati identificati sette potenziali campi di applicazione in cui il pannello PTE può superare i pannelli fotovoltaici convenzionali:

- facciata ventilata con un substrato poroso;
- parete o tetto verde;
- superfici d'acqua (non discusse in questo documento);
- facciate in vetro ventilato e alluminio/acciaio;
- mezzi di trasporto;
- barriere antirumore (non discusse in questo studio);
- edifici industriali (non trattati in questo studio).

Risultati

L'integrazione di cavità ventilata sul retro dei pannelli a celle di Peltier viene utilizzata per ottimizzare l'effetto Seebeck e massimizzare il gradiente termico. Questi pannelli assomigliano ai pannelli fotovoltaici tradizionali, ma sono progettati specificamente per aumentare la differenza di temperatura tra gli strati della cella di Peltier. Questo aumento del gradiente termico consente all'effetto Seebeck di generare corrente aggiuntiva

defined as follows:

- *Circularity*: the ability of the product to be easily reconfigured even with substantial changes, while maintaining its basic functional features, e.g., by changing certain materials to suit environmental conditions to ensure reuse across multiple life cycles (Rigamonti and Mancini, 2021).
- *Modularity*: the ability of the product to be manufactured in modules, even of varying sizes (Minunno *et al.*, 2020).
- *Versatility*: the ability of the product to adapt to a wide range of uses, keeping its basic structure or composition unchanged or minimally modified. (ISO, 2022).

A comparison with comparable products and the necessary modifications to the typological or stratigraphic configuration of the structural elements

were conducted, taking into account the characteristics of the object studied. The evaluation and formulation of the proposals were organised into four Work Packages (WP): WP1 focused on researching and comparing existing solutions, on the production of *concepts*, and on verifying PTE panel feasibility. WP2 involved design workshops and SWOT analyses for the various applications. WP3 defined innovative solutions and detailed designs for the most efficient applications. WP4 included virtual prototyping, thermal analyses and identification of future research developments.

Seven potential fields of application have been identified in which the PTE panel can outperform conventional photovoltaic panels:

- ventilated façade with a porous substrate;
- green wall or roof;

che, combinata con la conversione fotovoltaica, migliora l'efficienza complessiva del dispositivo.

Installazione su substrato poroso (ceramica o cemento) in facciata ventilata

L'approccio proposto (Fig. 1) integra il pannello PTE all'interno di un sistema di facciata ventilata, includendo uno strato di materiale poroso a contatto con la faccia fredda del pannello. Il sistema funziona come schermo anti-pioggia, raccogliendo l'umidità dell'acqua piovana e dell'aria. La ventilazione all'interno dell'intercapedine, insieme all'evaporazione dal materiale poroso (Prieto *et al.*, 2018; Theokli *et al.*, 2021) riduce la temperatura della faccia non esposta al sole, ottenendo un raffreddamento passivo attraverso la convezione e l'evaporazione. (Bakhshoodeh *et al.*, 2022; Noaman *et al.*, 2022). Questo processo trasferisce calore e dissipa energia (Bakhshoodeh *et al.*, 2022; Narayanan, 2017; Prieto *et al.*, 2018). La ventilazione impedisce la saturazione del vapore, consentendo un'evaporazione continua. L'approccio ottimizza le prestazioni dei pannelli PTE sfruttando i meccanismi di raffreddamento naturale.

Installazione su tetti o pareti verdi

Una seconda proposta vede il pannello PTE installato vicino a un tetto verde o a una superficie simile (Fig. 2). Secondo Lynn and Lynn (2020), la superficie dello strato erboso aiuta a mantenere una temperatura più bassa, anche in presenza di luce solare diretta, che può portare a un gradiente termico maggiore rispetto a una superficie più convenzionale in mattoni o pietra (Jamei, Elmira *et al.*, 2021; Ji *et al.*, 2023; Lynn and Lynn, 2020; Yazdani and Baneshi, 2021). Posizionando la faccia fredda del pannello PTE

- water surfaces (not discussed in this document);
- ventilated glass and aluminium/steel façades;
- means of transport;
- noise barriers (not discussed in this study);
- industrial buildings (not discussed in this study).

Results

The integration of ventilated cavities on the back of Peltier cell panels is used to optimise the Seebeck effect and maximise the thermal gradient. These panels resemble traditional photovoltaic panels but are specifically designed to enhance the temperature difference between the layers of the Peltier cell. This increase in thermal gradient allows the Seebeck effect to generate additional current, which, when combined with photovoltaic conversion,

improves the overall efficiency of the device.

Installation on porous substrate (ceramic or concrete) in a ventilated façade

The proposed approach (Fig. 1) integrates the PTE panel within a ventilated façade system, including a layer of porous material in contact with the panel's cold face. The system functions as a rain screen, collecting moisture from rainwater and air. Ventilation within the cavity, along with evaporation from the porous material (Prieto *et al.*, 2018; Theokli *et al.*, 2021), reduces the temperature of the non-sun-exposed face, achieving passive cooling through convection and evaporation (Bakhshoodeh *et al.*, 2022; Noaman *et al.*, 2022). This process transfers heat and dissipates energy (Bakhshoodeh *et al.*, 2022; Narayanan, 2017; Prieto *et al.*, 2018). Ventilation prevents va-

vicino alla superficie erbosa, è possibile mantenere la parte inferiore del sistema a circa 15-25°C, anche in estate. (Aboelata, 2021; Jamei, E. *et al.*, 2023; Ji *et al.*, 2023; Vaz Monteiro *et al.*, 2017) a differenza dei materiali lapidei esposti al sole, che possono raggiungere temperature di 75-80°C; l'adozione di questa configurazione offre un innegabile vantaggio termoelettrico. Sulla base dei dati preliminari raccolti, la temperatura superficiale della parte irradiata del pannello può raggiungere gli 85°C nello scenario di massima esposizione, portando a un gradiente termico tra le facce di $DT=85-15=70^{\circ}C$. Per abbassare e stabilizzare la temperatura del tetto verde, al di sotto di esso viene posizionata un'intercapedine ventilata. La figura 2 illustra l'applicazione del sistema pannello PTE/tetto verde/intercapedine ventilata in una proposta di rifacimento della copertura di un edificio in muratura.

Installazione su facciate ventilate in vetro e alluminio/acciaio

Il pannello PTE può essere utilizzato come unità di base nei sistemi di facciata ventilata, analogamente a come vengono attualmente utilizzati i pannelli fotovoltaici standard. Affinché il pannello PTE possa essere utilizzato efficacemente, il sistema deve garantire una ventilazione costante della superficie non irradiata; le facciate con un'intercapedine non ventilata ostacolerebbero l'effetto termoelettrico delle celle di Peltier. Sebbene l'uso di pannelli PTE in questa applicazione sia standard, è stata condotta un'analisi termica per determinare la migliore composizione stratigrafica dei pannelli per ottenere prestazioni ottimali. Questa analisi ha identificato le configurazioni più deboli e ha guidato la ricerca futura sui pannelli termoelettrici. I materiali e le proprietà termiche utilizzati nell'analisi sono elencati in (Tab. 1) (Çengel *et al.*, 2022).

pour saturation, allowing continuous evaporation. The approach optimises PTE panel performance by leveraging natural cooling mechanisms.

Installation on roofs or green walls

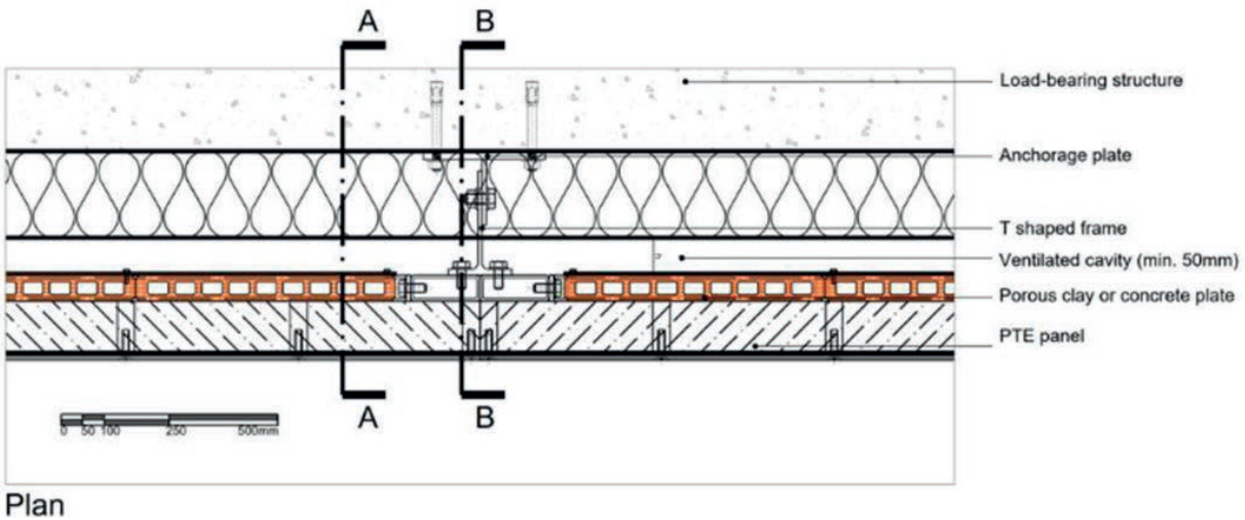
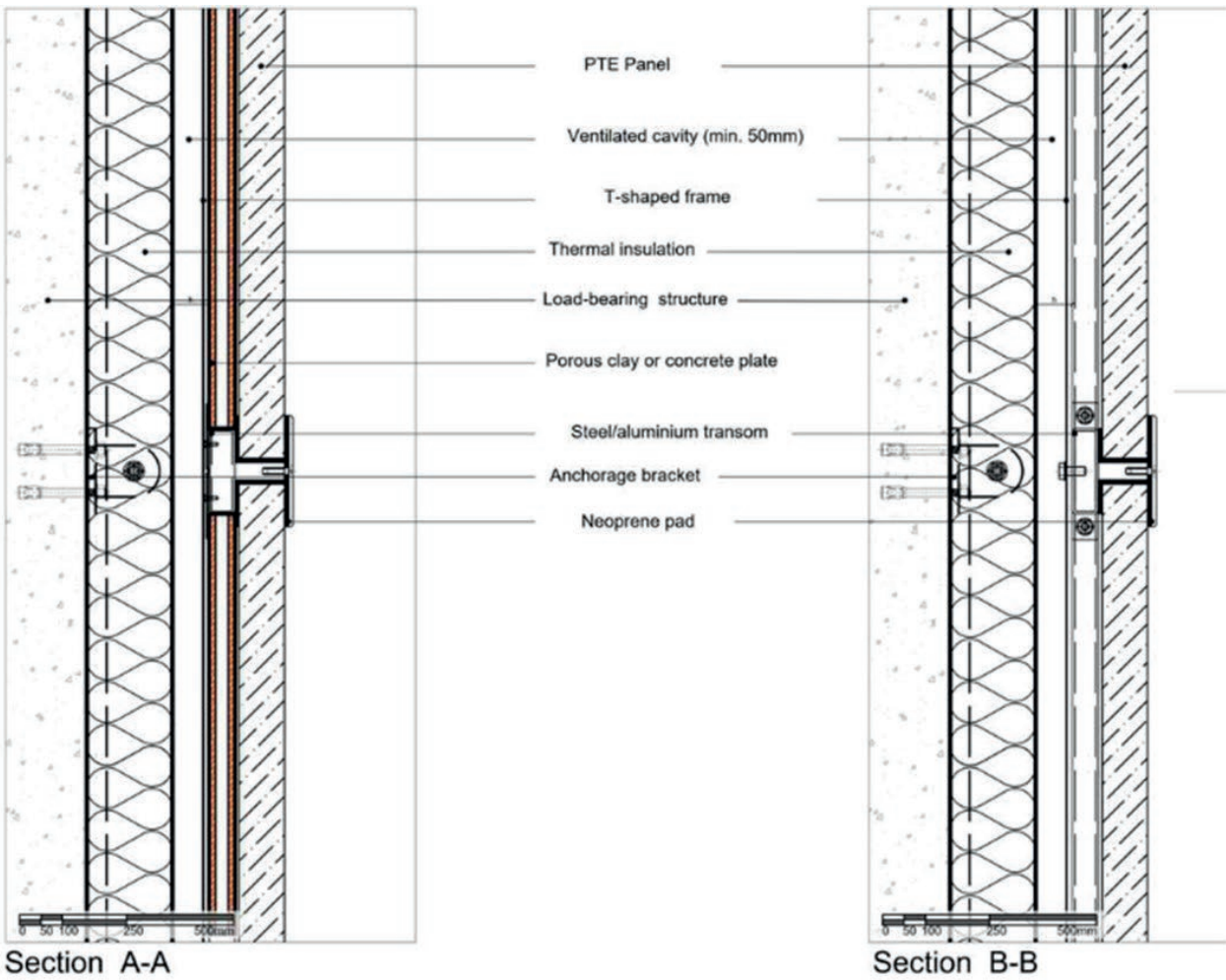
A second proposal sees the PTE panel installed close to a green roof or similar surface (Fig. 2). According to Lynn and Lynn (2020), the grassy layer surface helps maintain a lower temperature, even in the presence of direct sunlight, which can lead to a greater thermal gradient than a more conventional brick or stone surface (Jamei, Elmira *et al.*, 2021; Ji *et al.*, 2023; Lynn and Lynn, 2020; Yazdani and Baneshi, 2021). By placing the cold face of the PTE panel close to the grass surface, the lower part of the system can be maintained at around 15-25°C, even in summer (Aboelata, 2021; Jamei, E. *et al.*, 2023; Ji *et al.*, 2023; Vaz Monteiro

et al., 2017), unlike stone materials exposed to the sun, which can reach temperatures of 75-80°C. The adoption of this configuration offers an undeniable thermoelectric advantage. Based on the preliminary data collected, the surface temperature of the irradiated part of the panel can reach 85°C in the maximum exposure scenario, leading to a thermal gradient between the faces of $DT=85-15=70^{\circ}C$. To lower and stabilise the temperature of the green roof, a ventilated cavity is placed beneath it. Figure 2 illustrates the application of the PTE panel/green roof/ventilated cavity system in a proposed re-roofing of a masonry building.

Installation on glass and aluminium/steel ventilated façades

The PTE panel can be used as a basic unit in ventilated façade systems, similarly to how standard photovoltaic

01 |



Tab. 1 | Materiali e proprietà termiche utilizzati nell'analisi termica
 Materials and thermal properties used in thermal analysis

Tab. 2 | Riepilogo della temperatura delle celle fotovoltaiche e dei risultati TEG
 Summary of photovoltaic cell temperature and TEG results

Le cinque configurazioni valutate sono:

1. Strato fotovoltaico e termoelettrico a contatto con il vetro isolante rivolto verso l'intercapedine ventilata.
2. Strato termoelettrico rivolto verso l'intercapedine ventilata, separato dallo strato fotovoltaico da un doppio vetro.
3. Strati fotovoltaici e termoelettrici separati a doppio vetro.
4. Pannello senza doppio vetro, con contatto tra strato termoelettrico e fotovoltaico.
5. Pannello senza vetro di protezione posteriore, con contatto tra strato termoelettrico e fotovoltaico e celle di Peltier sigillato con pellicola impermeabile.

I risultati delle analisi termiche (Tab. 2) delle cinque stratigrafie per il pannello PTE applicato a facciate ventilate in vetro e alluminio/acciaio sono riassunti in (Fig. 3) e (Fig. 4).

L'analisi termica è stata eseguita con una temperatura costante di +17°C sulla superficie confinante con la cavità ventilata e di +85°C sulla superficie esposta al sole. Si è considerata solo la ventilazione naturale, senza convezione forzata, e l'analisi è stata stazionaria. La configurazione "d" ha mostrato il più alto gradiente termico per la cella di Peltier (3,2°C) e la temperatura più bassa (tra 49,9°C e 52°C). Per confermare i risultati, sono stati realizzati prototipi (Fig. 5) di tre diverse configurazioni di pannelli, che sono stati testati internamente da Zago S.r.l. con l'assistenza di consulenti esterni.

Prototipo 1

Il prototipo di pannello fotovoltaico include generatori termoelettrici (TEG) posizionati dietro uno strato di vetro e uno di vuoto. Le celle TEG sul retro del pannello generano fino al

panels are currently used. For the PTE panel to be used effectively, the system must ensure constant ventilation of the non-irradiated surface as façades with an unventilated cavity would hinder the thermoelectric effect of Peltier cells. Although the use of PTE panels in this application is standard, a thermal analysis was conducted to determine the best panel stratigraphic composition for optimal performance. This analysis identified the weakest configurations and guided future research into thermoelectric panels. The materials and thermal properties used in the analysis are listed in Tab. 1. (Çengel *et al.*, 2022).

The five configurations evaluated are:
 1. Photovoltaic and thermoelectric layer in contact with the insulating glass facing the ventilated cavity.
 2. Thermoelectric layer facing the ventilated cavity, separated from the

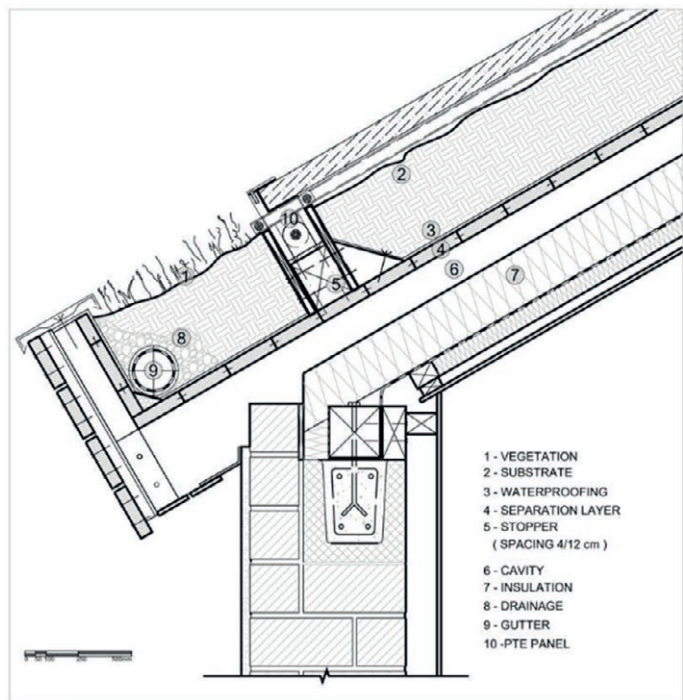
photovoltaic layer by double glazing.

3. Separate double-glazed photovoltaic and thermoelectric layers.

4. Panel without double glazing, with contact between thermoelectric and photovoltaic layers.

5. Panel without rear protective glass, with contact between thermoelectric and photovoltaic layer and Peltier cells sealed with waterproof film. The results of thermal analyses (Tab. 2) of the five stratigraphic details of the PTE panel applied to glass and aluminium/steel ventilated façades are summarised in (Fig. 3) and (Fig. 4).

The conditions for the thermal analysis were set with a constant temperature of +17°C on the surface bordering the ventilated cavity and +85°C on the surface exposed to the sun. The analysis considered only natural ventilation, without forced convection, and was



Section

15% in più di elettricità durante l'autunno/inverno. La superficie esposta al sole accumula calore, dissipato dall'aria esterna, mentre le celle TEG convertono il calore in energia. L'uso del vetro migliora l'efficienza dei TEG. Il prototipo offre una soluzione efficiente per massimizzare i rendimenti fotovoltaici e termoelettrici.

Prototipo 2

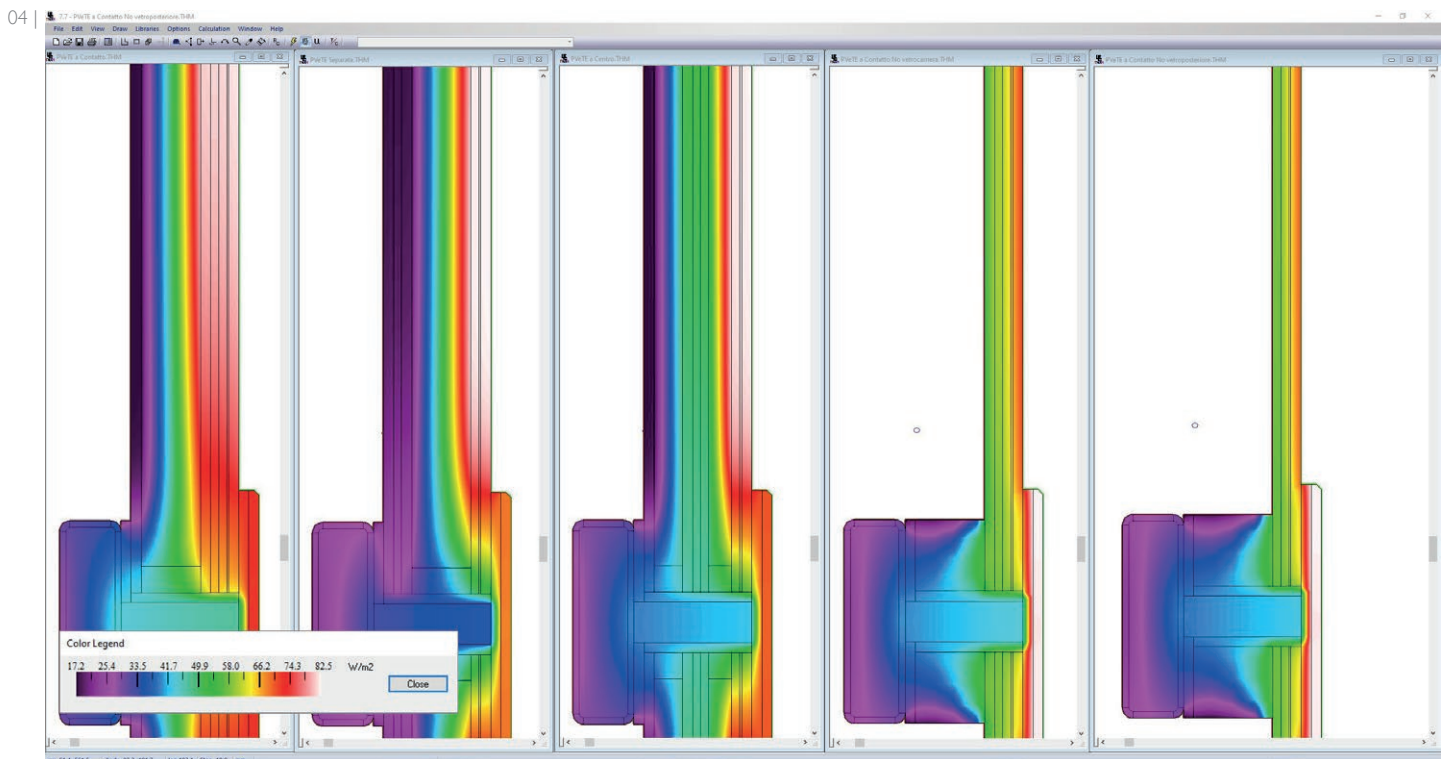
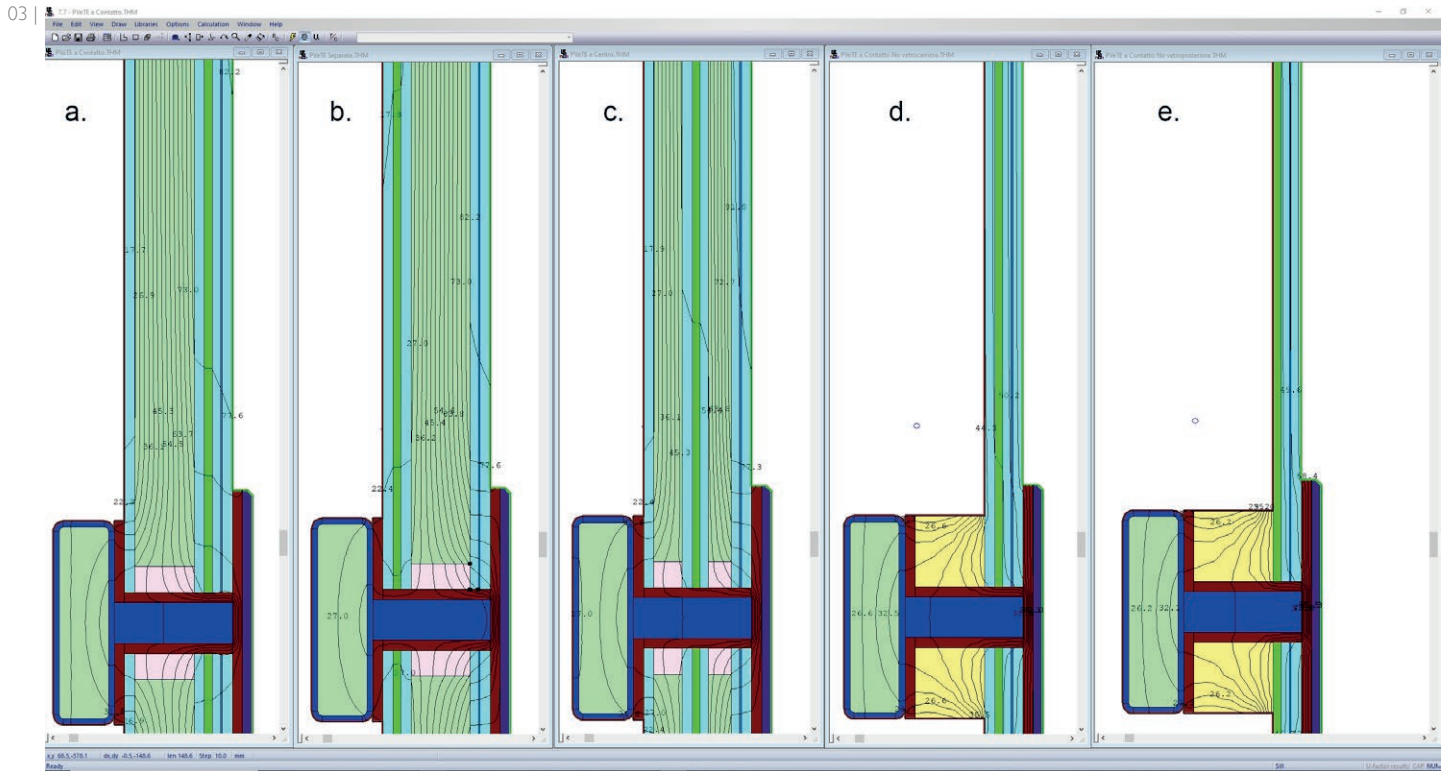
Un secondo prototipo è stato sviluppato per migliorare ulteriormente il dispositivo, racchiudendo sia il pannello fotovoltaico che lo strato di celle Peltier in un'unica camera di vetro riempita di gas inerte per creare un vuoto simulato. Anche i TEG sul lato freddo sono stati collocati nella stessa camera del pannello fo-

Materiale	Colore nel modello di simulazione		Conduttività termica (W/mK)		Emissività
	a	b	c	d	
Vetro (spessore variabile 5/3 mm)	[Light Blue]		1.4	0.84	
Acciaio	[Dark Blue]		45	0.2	
Silicio (celle fotovoltaiche di 0,3 mm di spessore)	[Blue]		148	0.75	
Bi-Sn (spessore cella di Peltier 3,9 mm)	[Green]		30	0.9	
Silicone (sigillante)	[Yellow]		0.35	0.9	
Neoprene (antiurto)	[Red]		0.23	0.9	

Risultati	a.	b.	c.	d.	e.
Differenza di temperatura tra le facce della cella di Peltier (DT)	0.4°C	0.5°C	0.6°C	3.2°C	1.9°C
Temperatura Celle fotovoltaiche	82°C	82.5°C	82.5°C	52°C	49.9°C

03 | Diagrammi lineari dell'isoterma che mostrano il gradiente di temperatura attraverso le diverse configurazioni
Isotherm line diagrams showing the temperature gradient across different configurations

04 | Diagrammi in scala di colore che mostrano il gradiente di temperatura di diverse configurazioni
Colour scale diagrams showing the temperature gradient of different configurations



tovoltaico. Tuttavia, questo prototipo non ha ottenuto le stesse prestazioni del primo, poiché la superficie esposta al sole del pannello non può dissipare il calore a causa del foglio esterno che la incapsula, e le celle TEG sul lato posteriore richiedono un incapsulamento in vetro più freddo per trasformare efficacemente il calore del lato caldo in energia. I test condotti non hanno mostrato miglioramenti significativi rispetto al pannello standard e in alcuni casi l'efficienza del pannello standard è stata ridotta, nonostante l'aggiunta di 100 TEG sul lato posteriore.

Prototipo 3

Il terzo prototipo presenta un pannello con una superficie trattata sotto vuoto e celle TEG alloggiare in una camera sotto vuoto separata. La superficie esposta al sole del pannello accumula calore, che può essere dissipato dall'aria esterna, mentre le celle TEG convertono il calore del lato caldo in energia. L'isolamento sottovuoto ottimizza lo scambio di calore e massimizza la differenza di temperatura. Sebbene il vetro frontale comporti una perdita di efficienza del 5%, permette di ottenere la massima differenza di temperatura, consentendo prestazioni ottimali delle celle TEG. I test dimostrano un aumento medio dell'energia del 20% in autunno/inverno rispetto al pannello standard e i test di laboratorio dimostrano un aumento dell'energia fino al 50% rispetto al solo pannello fotovoltaico. Questo progetto si allinea al modello di simulazione "d" e si dimostra la configurazione più efficace per i parametri dello studio.

Installazione su mezzi di trasporto

Integrando i pannelli PTE (Photovoltaic-Thermoelectric) in vari mezzi di trasporto come automobili, barche e camper, i pannelli sfruttano il movimento del veicolo e il flusso d'aria per fornire

stationary. The highest thermal gradient for the Peltier cell was found in configuration *d*, with a value of 3.2°C, in which the lowest temperature (between 49.9°C and 52°C) was also found. To confirm the simulation results, three different panel configurations were produced, the prototypes of which (Fig. 5) were tested in-house by Zago S.r.l. with the assistance of consultants from Archimedetch S.r.l and Iuav.

Prototype 1

The prototype photovoltaic panel incorporates thermoelectric generators (TEG) positioned behind a vacuum and a layer of glass. The front side of the panel is exposed to sunlight without a glass cover, thus maximising photovoltaic efficiency. However, this version lacks heat accumulation during winter months, resulting in a low temperature differential for the TEG cells located

behind the panel. The combination of photovoltaic and thermoelectric components in this design shows promising results. The TEG cells on the back of the panel generate around 15% more electricity during autumn/winter, with potential energy increases of up to 40% when a temperature differential of at least 60°C is achieved. The sun-exposed surface of the panel stores heat, dissipated by outside air, while the TEG cells on the reverse side convert the hot side's heat into energy. The use of vacuum glass enhances TEG performance by maintaining a cold temperature, thereby improving energy conversion efficiency. Overall, this prototype offers an efficient solution to maximise both photovoltaic and thermoelectric yields.

Prototype 2

A second prototype was developed to further improve the device by enclosing



ventilazione e mantenere un elevato gradiente termico lungo il loro spessore. (Diahovchenko *et al.*, 2022; Jin *et al.*, 2022; Khan *et al.*, 2023; Pochont and Sekhar Y, 2023; Tiano *et al.*, 2020) Sono state sviluppate soluzioni di montaggio per adattare i pannelli a diverse applicazioni di trasporto, comprese le superfici curve. Tuttavia, l'applicazione delle celle di Peltier, essenziali per la tecnologia termoelettrica, richiede una superficie piatta del pannello, con conseguente aumento dei costi di progettazione e installazione per le superfici curve. Nel caso delle imbarcazioni, l'installazione di pannelli solari può essere in contrasto con l'estetica, quindi viene proposto un approccio progettuale che utilizza i pannelli PTE per un taxi veneziano per esplorarne la fattibilità. Il progetto (Fig. 6) prevede l'innalzamento di uno strato sopra la superficie dell'imbarcazione per creare canali di ventilazione su cui sono installati i pannelli, con prese d'aria e uscite posizionate strategicamente. La disposizione modulare delle celle si avvicina alla geometria curva del ponte dell'imbarcazione e ulteriori sviluppi prevedono pannelli personalizzati che coprono l'intera superficie del ponte. L'attuale configurazione dei pannelli fornisce un'area di generazione di energia di 2,07 m², riducendo il consumo di combustibile fossile per alcune ore

ing both the photovoltaic panel and the Peltier cell layer in a single glass chamber filled with inert gas to create a simulated vacuum. The TEGs on the cold side were also placed in the same chamber as the photovoltaic panel. However, this prototype did not achieve the same performance as the first one, as the panel's sun-exposed surface cannot dissipate heat due to the outer sheet encapsulating it, and the TEG cells on the reverse side require a colder glass encapsulation to effectively transform the hot-side's heat into energy. Tests conducted showed no significant improvement over the standard panel, and in some cases the efficiency of the standard panel was reduced, despite the addition of 100 TEGs on the back side.

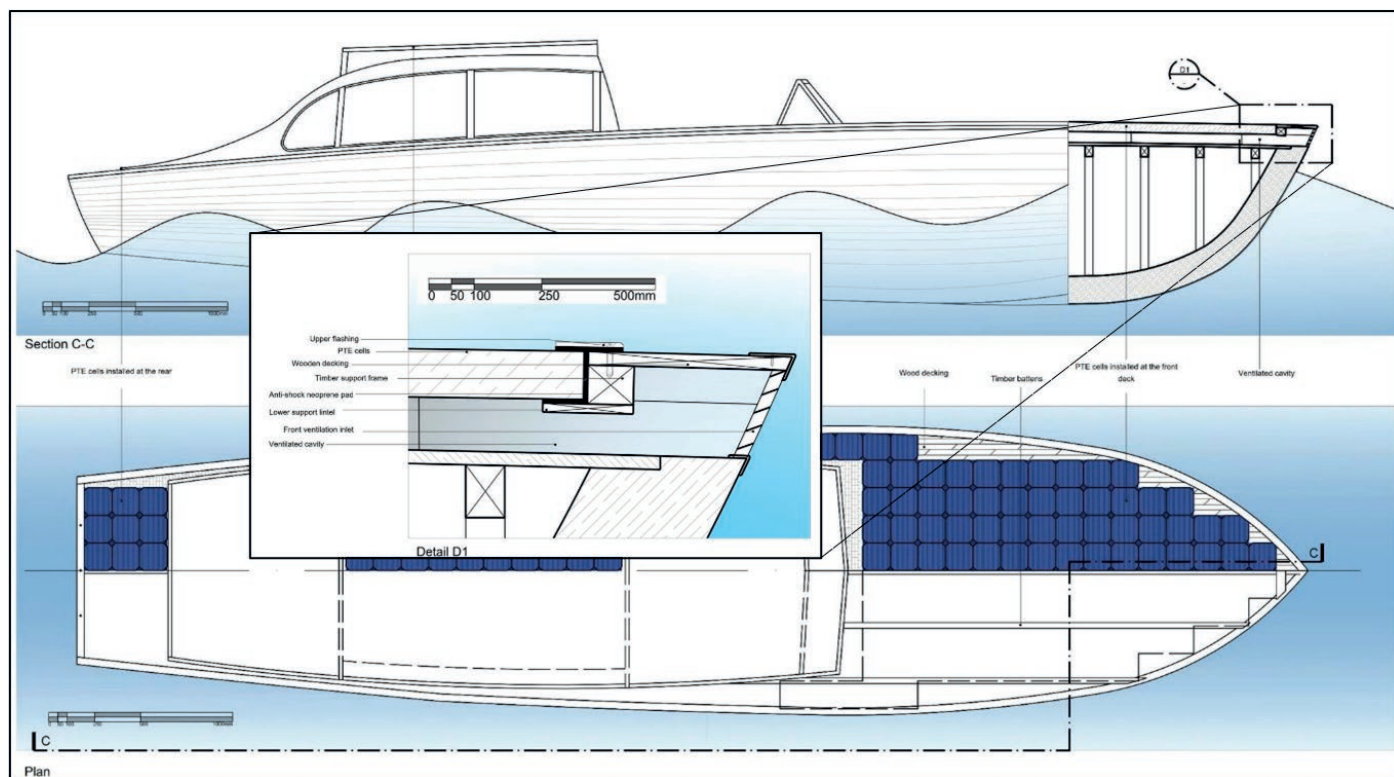
Prototype 3

The third prototype features a panel with a vacuum-treated surface and

TEG cells housed in a separate vacuum chamber. The panel's sun-exposed surface stores heat, which can be dissipated by the outside air, while the TEG cells convert the hot side's heat into energy. The vacuum insulation optimises heat exchange and maximises the temperature difference. Although the front glass causes a 5% efficiency loss, it allows for the maximum temperature difference, enabling optimal TEG cell performance. Tests show a 20% average energy increase in autumn/winter compared to the standard panel, and laboratory tests demonstrate up to a 50% energy increase compared to the photovoltaic panel alone. This design aligns with simulation model "d" and proves to be the most effective configuration for the study parameters.

Installation on means of transport

When PTE (Photovoltaic-Thermoelectric) panels are integrated into vari-



al giorno e una riduzione stimata delle emissioni annuali di CO₂ di circa 3 tonnellate. (Tercan *et al.*, 2021).

Conclusioni e sviluppi futuri

non vincolate alla geometria quadrata delle celle di silicio convenzionali. L'uso della stampa a inchiostro semiconduttore per lo strato termoelettrico semplificherebbe il processo di produ-

La ricerca ha evidenziato l'opportunità di sviluppare lastre fotovoltaiche termoelettriche

ous modes of transportation, such as cars, boats, and campers, the panels take advantage of vehicle movement and airflow to provide ventilation and maintain a high thermal gradient across their thickness. (Diahovchenko *et al.*, 2022; Jin *et al.*, 2022; Khan *et al.*, 2023; Pochont and Sekhar Y, 2023; Tiano *et al.*, 2020) Mounting solutions have been developed to adapt the panels to different transport applications, including curved surfaces. However, the application of Peltier cells, which are essential for thermoelectric technology, requires a flat panel surface, leading to increased design and installation costs for curved surfaces. In the case of boats, the installation of solar panels can clash with aesthetics, so a design approach using PTE panels for a Venetian taxi is proposed to explore its viability. The design (Fig. 6) involves raising a layer above the boat's surface

to create ventilation channels over which the panels are installed with strategically positioned air intakes and outlets. The modular layout of the cells approximates the boat's curved deck geometry, and further developments include custom-made panels that cover the entire deck surface. The current panel configuration provides an energy generation area of 2.07 m², reducing fossil fuel usage for a few hours a day and estimated annual CO₂ emission reduction of about 3 tonnes (Tercan *et al.*, 2021).

Conclusions and future developments

The research highlighted the opportunity for the development of thermoelectric photovoltaic sheets not bound to the square geometry of conventional silicon cells. The use of semiconductor ink printing for the thermoelectric

zione e avrebbe il potenziale per ridurre i costi (Ai *et al.*, 2004; Dobrozhan *et al.*, 2020; Moreira *et al.*, 2021; Simonenko *et al.*, 2019). Grafco S.r.l. ha condotto test specifici sulle celle termoelettriche realizzate tramite stampa, dando vita a un prototipo funzionante denominato PTEG (Printed Thermo-Electric Generator). Il prototipo PTEG è stato sottoposto a test di resistenza agli agenti atmosferici, evidenziando la necessità di un substrato protettivo o di una vernice per prevenire l'ossidazione. In termini di efficienza di conversione, il prototipo PTEG ha rag-

layer would simplify the production process and has the potential for cost reduction (Ai *et al.*, 2004; Dobrozhan *et al.*, 2020; Moreira *et al.*, 2021; Simonenko *et al.*, 2019). Grafco S.r.l. conducted specific tests on thermoelectric cells made through printing, resulting in a working prototype called PTEG (Printed Thermo-Electric Generator). The PTEG prototype underwent weathering tests, highlighting the need for a protective substrate or paint to prevent oxidation. In terms of conversion efficiency, the PTEG prototype achieved 15% efficiency compared to industrially manufactured TEG devices. Further long-term studies are required to confirm its performance. However, the research underscores the potential for advancements in photovoltaic technology and its role in energy transition through its combination with other energy harvesting devices,

such as thermoelectric cells, thus paving the way for further experimentation of hybrid technologies in the built environment.

ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGMENTS, COPYRIGHT

All parties of the joint venture between Zago S.r.l. (the leader), Archimedetch S.r.l., Grafco S.r.l., and Issg S.r.l. and the authors agreed on the content of this paper and granted permission for publication.

The research was conducted by Università Iuav di Venezia within the project "Photovoltaic Thermal-Electric Panel", financed by the Veneto Region through the POR FESR 2014-2020 funds for "Research, Technological Development and Innovation". The aim was to support collaborative R&D activities for the development of new sustainable technologies, products and

giunto un'efficienza del 15% rispetto ai dispositivi TEG prodotti industrialmente. Sono necessari ulteriori studi a lungo termine per confermarne le prestazioni, ma la ricerca sottolinea il potenziale di avanzamento della tecnologia fotovoltaica e il suo ruolo nella transizione energetica attraverso la combinazione con altri dispositivi di raccolta dell'energia come le cellule termoelettriche, aprendo la strada a ulteriori sperimentazioni di tecnologie ibride nell'ambiente costruito.

ATTRIBUZIONE, RINGRAZIAMENTI, DIRITTI DI COPYRIGHT

Questo articolo è frutto della stretta collaborazione tra i due autori; tutte le parti della joint venture tra Zago S.r.l. (in qualità di capofila), Archimedetech S.r.l., Grafcò S.r.l. e Issg S.r.l. hanno concordato con gli autori il contenuto di questo articolo e hanno concesso l'autorizzazione alla pubblicazione.

La ricerca è stata intrapresa dall'Università Iuav di Venezia nell'ambito del progetto "Pannello Fotovoltaico Termico-Elettrico", finanziato dalla Regione Veneto attraverso i fondi POR FESR 2014-2020 per "Ricerca, Sviluppo Tecnologico e Innovazione" con l'obiettivo di sostenere attività collaborative di R&S per lo sviluppo di nuove tecnologie, prodotti e servizi sostenibili. La ricerca ha visto la collaborazione di quattro aziende – Zago S.r.l. (capofila), Archimedetech S.r.l., Grafcò S.r.l. e Issg S.r.l. – impegnate nello sviluppo e nella sperimentazione della nuova tecnologia. L'Università Iuav di Venezia, in qualità di Ente di Ricerca, ha svolto la funzione di "Direzione Scientifica" tramite il Prof. Massimo Rossetti e l'Assegnista di Ricerca Ing. Francesco Incelli.

REFERENCES

Aboelata, A. (2021), "Assessment of green roof benefits on buildings' energy-saving by cooling outdoor spaces in different urban densities in arid cities", *Energy*, Vol. 219, 119514.

services. The research involved the collaboration of four companies – Zago S.r.l. (lead partner), Archimedetech S.r.l., Grafcò S.r.l. and Issg S.r.l. – engaged in developing and testing the innovative technology. Università Iuav di Venezia, as Research Organisation, acted as "Research Coach" through Prof. Massimo Rossetti and Research Fellow Eng. Francesco Incelli.

Ai, Y., Liu, Y., Cui, T. and Varahramyan, K. (2004), "Thin film deposition of an n-type organic semiconductor by ink-jet printing technique", *Thin Solid Films*, Vol. 450, n.2, pp. 312-315.

Bakhshoodeh, R., Ocampo, C. and Oldham, C. (2022), "Exploring the evapotranspirative cooling effect of a green façade", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 81, 103822.

Belsky, A.A., Glukhanich, D.Y., Carrizosa, M.J. and Starshaia, V.V. (2022), "Analysis of specifications of solar photovoltaic panels", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 159, 112239.

Çengel, Y.A., Dall'Ò, G. and Sarto, L. (2022), *Termodinamica e trasmissione del calore*, McGraw-Hill Education.

Diahovchenko, I., Petrichenko, L., Borzenkov, I. and Kolcun, M. (2022), "Application of photovoltaic panels in electric vehicles to enhance the range", *Heliyon*, Vol. 8, n.12, e12425.

Dobrozhan, O., Baláz, M., Vorobiov, S., Baláz, P. and Opanasyuk, A. (2020), "Morphological, structural, optical properties and chemical composition of flexible Cu₂ZnSnS₄ thin films obtained by ink-jet printing of polyol-mediated nanocrystals", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 842, 155883.

Enescu, D. (2023), "Applications of Thermoelectricity in Buildings: From Energy Harvesting to Energy Management", *Sustainability in Energy and Buildings*, Vol. 20, pp. 152-163.

ISO (2022), *BS ISO 21931-1:2022: Sustainability in buildings and civil engineering works. Framework for methods of assessment of the environmental, social and economic performance of construction works as a basis for sustainability assessment*, British Standards Institute.

Jamei, E., Chau, H.W., Seyedmahmoudian, M., Mekhilef, S.S. and Sami, F.A. (2023), "Green roof and energy – role of climate and design elements in hot and temperate climates", *Heliyon*, Vol. 9, n.5, e15917.

Jamei, E., Chau, H.W., Seyedmahmoudian, M. and Stojcevski, A. (2021), "Review on the cooling potential of green roofs in different climates", *Science of the Total Environment*, Vol. 791, 148407.

- Ji, L., Shu, C., Laouadi, A., Lacasse, M. and Wang, L. (2023), "Quantifying improvement of building and zone level thermal resilience by cooling retrofits against summertime heat events", *Building and Environment*, Vol. 229, 109914.
- Jin, Z., Li, D., Hao, D., Zhang, Z., Guo, L., Wu, X. and Yuan, Y. (2022), "A portable, auxiliary photovoltaic power system for electric vehicles based on a foldable scissors mechanism", *Energy and Built Environment*.
- Kasap, S.O. (2018), *Principles of electronic materials and devices* (International student edition, fourth edition ed.), McGraw-Hill Education.
- Khan, S., Sudhakar, K., Yusof, M.H.B., Azmi, W. H. and Ali, H.M. (2023), "Roof integrated photovoltaic for electric vehicle charging towards net zero residential buildings in Australia" *Energy for Sustainable Development*, Vol. 73, pp. 340-354.
- Lynn, B.H. and Lynn, I.M. (2020), "The impact of cool and green roofs on summertime temperatures in the cities of Jerusalem and Tel Aviv", *Science of the Total Environment*, Vol. 743, 140568.
- Minunno, R., O'Grady, T., Morrison, G. M. and Gruner, R. L. (2020), Exploring environmental benefits of reuse and recycle practices: A circular economy case study of a modular building, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 160, 104855.
- Moreira, T., Maia, M., Parola, A.J., Zangoli, M., Di Maria, F. and Laia, C.A.T. (2021), Chapter 12 – Ink-jet-printed semiconductor electrochromic nanoparticles: Development and applications in electrochromism, in: Das, S. and Dhara S. (Eds.), *Chemical Solution Synthesis for Materials Design and Thin Film Device Applications*, Elsevier, pp. 407-437.
- Mughal, S., Sood, Y.R. and Jarial, R.K. (2018), "A review on solar photovoltaic technology and future trends", *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, Vol. 4, n.1, 227-235.
- Narayanan, R. (2017), "Chapter Seven - Heat-Driven Cooling Technologies", in Rasul, M.G., Azad, A.K. and Sharma S.C. (Eds.), *Clean Energy for Sustainable Development*, Academic Press, pp. 191-212.
- Noaman, D.S., Moneer, S.A., Megahed, N.A. and El-Ghafour, S.A. (2022), "Integration of active solar cooling technology into passively designed facade in hot climates", *Journal of Building Engineering*, Vol. 56, 104658.
- Pennelli, G., Dimaggio, E. and Macucci, M. (2022), "Electrical and thermal optimization of energy-conversion systems based on thermoelectric generators", *Energy*, Vol. 240, 122494.
- Pochont, N.R. and Sekhar Y.R. (2023), "Recent trends in photovoltaic technologies for sustainable transportation in passenger vehicles – A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 181, 113317.
- Prieto, A., Knaack, U., Auer, T. and Klein, T. (2018), "Passive cooling & climate responsive façade design: Exploring the limits of passive cooling strategies to improve the performance of commercial buildings in warm climates", *Energy and Buildings*, Vol. 175, 30-47.
- Rigamonti, L. and Mancini, E. (2021), "Life cycle assessment and circularity indicators", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 26, n.10, pp. 1937-1942.
- Sikula, M. and Krejci, P. (2022), "Defects of Photovoltaic Panels", *22nd International Scientific Conference on Electric Power Engineering (Epe)*, pp. 191-194.
- Simonenko, E.P., Mokrushin, A.S., Simonenko, N.P., Voronov, V.A., Kim, V.P., Tkachev, S.V., Gubin, S.P., Sevastyanov, V.G. and Kuznetsov, N.T. (2019), "Ink-jet printing of a TiO₂-10%ZrO₂ thin film for oxygen detection using a solution of metal alkoxoacetylacetonates", *Thin Solid Films*, Vol. 670, 46-53.
- Tercan, Ş.H., Eid, B., Heidenreich, M., Kogler, K. and Akyürek, Ö. (2021), "Financial and Technical Analyses of Solar Boats as A Means of Sustainable Transportation", *Sustainable Production and Consumption*, Vol. 25, 404-412.
- Theokli, C., Elia, C., Markou, M., and Vassiliades, C. (2021), "Energy renovation of an existing building in Nicosia Cyprus and investigation of the passive contribution of a BIPV/T double façade system: A case-study", *Energy Reports*, Vol. 7, pp. 8522-8533.
- Tiano, F.A., Rizzo, G., Marino, M. and Monetti, A. (2020), "Evaluation of the potential of solar photovoltaic panels installed on vehicle body including temperature effect on efficiency", *eTransportation*, Vol. 5, 100067.
- Vaz Monteiro, M., Blanuša, T., Verhoef, A., Richardson, M., Hadley, P. and Cameron, R.W. F. (2017), "Functional green roofs: Importance of plant choice in maximising summertime environmental cooling and substrate insulation potential", *Energy and Buildings*, Vol. 141, 56-68.
- Wang, Y., Hu, Y., Bocklund, B., Shang, S., Zhou, B., Liu, Z. and Chen, L. (2018), "First-principles thermodynamic theory of Seebeck coefficients", *Physical Review B*, Vol. 98, n. 22, 224101.
- Yazdani, H. and Baneshi, M. (2021), "Building energy comparison for dynamic cool roofs and green roofs under various climates", *Solar Energy*, Vol. 230, 764-778.