

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Estudo teórico sobre o desenvolvimento de tecnologias de
resfriamento para módulos fotovoltaicos**

Andressa Lopes Oliveira

Orientadora: Profa. Dra. Elaine Maria Cardoso

Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Engenharia - UNESP –
Câmpus de Ilha Solteira, para
cumprimento de requisito para obtenção do
Grau de Engenheiro Mecânico.

Ilha Solteira – SP

Junho/2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Oliveira, Andressa Lopes.
O48e Estudo teórico sobre o desenvolvimento de tecnologias de resfriamento
para módulos fotovoltaicos / Andressa Lopes Oliveira. -- Ilha Solteira: [s.n.],
2022
36 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

Orientador: Elaine Maria Cardoso
Inclui bibliografia

1. Pannel fotovoltaico. 2. Energia. 3. Resfriamento.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira

Curso de Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: Estudo teórico sobre o desenvolvimento de tecnologias de resfriamento para módulos fotovoltaicos

ALUNO: Andressa Lopes Oliveira **RA:** 162054335

ORIENTADOR: Profa. Dra. Elaine Maria Cardoso

Aprovado (×) - Reprovado () pela Comissão Examinadora

Comissão Examinadora:

DocuSigned by:

Elaine Maria Cardoso

7A7667B36FEE446...

Prof. Dra. Elaine Maria Cardoso - UNESP

Presidente (Orientador)

DocuSigned by:

IGOR SEICHO KIYOMURA

7841E355ACF6402...

Prof. Dr. Igor Seicho Kiyomura - UNIGRAN

DocuSigned by:

WP

08FA59A3BED74B1...

Prof. Dr. Wilson Espíndola Passos - UNIGRAN

Ilha Solteira(SP) 06 de junho de 2022.

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Cursos: Eng^a Agrônômica, Ciências Biológicas, Eng. Civil, Eng. Elétrica, Eng. Mecânica, Física, Matemática e Zootecnia.
Avenida Brasil Centro, 56 - CEP 15385-000 Ilha Solteira São Paulo Brasil
pabx (18) 3743 1000 fax (18) 3742 2735 scom@adm.feis.unesp.br www.feis.unesp.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente aos meus pais que contribuíram para que eu estivesse aqui, completando minha formação; ao meu namorado que me ajudou psicologicamente e emocionalmente e sempre me motivou; e à minha orientadora Profa. Dra. Elaine Maria Cardoso que me ensinou e me orientou nesse tempo que estivemos caminhando nesse processo.

RESUMO

Os painéis fotovoltaicos (PV), sendo uma tecnologia ecologicamente correta, tornaram-se uma fonte crucial de eletricidade, satisfazendo a crescente demanda de energia e substituindo a escassez relacionada às fontes de energia convencionais. Apesar de absorver cerca de 80% da radiação incidente, as células fotovoltaicas apresentam baixa eficiência de conversão; assim, uma parcela menor da radiação absorvida é convertida em energia elétrica, sendo a maior parte convertida em calor que leva ao aumento da temperatura do painel. Como consequência, há um menor desempenho de conversão e menor confiabilidade em longo prazo. Para mitigar esses efeitos, diferentes sistemas de refrigeração têm sido projetados e investigados com o objetivo de evitar efetivamente o aumento excessivo da temperatura do painel PV. Este trabalho tem como objetivo revisar os métodos de resfriamento de sistemas fotovoltaicos, categorizando-os de acordo com os modos de transferência de calor: resfriamento convectivo (resfriamento hidro e aerodinâmico com ou sem superfícies estendidas) e resfriamento condutivo (materiais de mudança de fase). Cada categoria foi analisada e os principais resultados, em comparação aos painéis fotovoltaicos sem sistemas de resfriamento acoplado, são apresentados. Espera-se que o trabalho apresentado possa fornecer uma diretriz sobre as melhores técnicas de resfriamento aplicadas à energia fotovoltaica para a maior eficiência do sistema.

Palavras-Chave: Solar Energy. Systems Photovoltaic. Thermoregulation. Passive and active cooling techniques.

RESUMO

ABSTRACT

Panels (PV) replacing eco-friendly technology have become a crucial source of electricity and satisfying a growing demand for photovoltaics, replacing a source related to electrical energy. Despite absorbing about 80% of incident radiation, photovoltaic cells exhibit low conversion efficiency; thus, a smaller portion of the demand, most of which is converted into electrical energy, which leads to an increase in the temperature of the panel. As a result, there is lower conversion performance and lower long-term reliability. To mitigate these effects, different cooling systems have been maintained and proven in order to prevent the PV panel from increasing temperature. This work aims to review the methods of cooling photovoltaic systems, categorizing them into convective heat transfer mode (cooling hydrores and aerodynamic changes with or according to adjustments) and conductive cooling (phase change materials). Each category has been isolated and the main results, compared to photovoltaic panels without heating cooling systems, are presented. It is hoped that the work can provide a guideline on the best improvement techniques applied to the greater efficiency of the photovoltaic system.

Key-Words: Energia solar. Sistemas Fotovoltaicos. Termorregulação. Técnicas de resfriamento passivas e ativa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático do circuito de uma célula fotovoltaica.....	13
Figura 2 - Influência da temperatura sobre a potência de saída de painéis PV constituídos de diferentes materiais.....	14
Figura 3 - Diagrama esquemático de circuito fechado para resfriamento frontal de painel PV.	16
Figura 4 - Sistema de resfriamento duplo: (a) aspersores na superfície frontal e (b) aspersores na superfície posterior do painel PV.....	17
Figura 5 – (a) Foto e (b) desenho esquemático de um sistema fotovoltaico térmico à base de água.....	18
Figura 6 – Fotografia da vista de aletas de alumínio com material de mudança de fase (PCM).	
Figura 7 - Esquema de um sistema NFPVT simples.	20
Figura 8 - Eficiência elétrica e térmica do sistema fotovoltaico à base de nanofluidos Al_2O_3 -água, CuO -água e SiC -água comparada com água pura.	21
Figura 9 – Esquema do sistema NFPVT-PCM.....	21
Figura 10 - Sistema APVT baseado em trocador de calor enterrado: (a) arranjo e (b) desenho esquemático do sistema APVT.....	23
Figura 11 - Desenho esquemático sistema fotovoltaico híbrido (ar/água).	23
Figura 12- Dissipadores de calor: (a) segmentado e (b) convencional.....	24
Figura 13- (a) aletas de perfil L perfuradas e (b) aletas longitudinais paralelas.	25

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Al_2O_3	Óxido de Alumínio
APVT	Sistema fotovoltaico térmico à base de ar
CPV-PCM	Sistema fotovoltaico concentrado com material de mudança de fase
CuO	Óxido de Cobre
EG	Etilenoglicol Puro
HFO_2	Ácido Fluoroso
INOCT	Temperatura nominal de operação da célula instalada
NOCT	Temperatura nominal de operação da célula solar
MgF_2	Fluoreto de Magnésio
MWCNT	Nanotubos de carbono com múltiplas paredes
NFPVT	Sistema fotovoltaico térmico à base de nanofluido
PCM	Materiais de mudança de fase
PV-PCM	Sistema fotovoltaico acoplado à PCM
PVT	Sistema fotovoltaico térmico
TiO_2	Dióxido de Titânio
TPT	Fluoreto de Polivinila-Poliéster-Fluoreto de Polivinila
Si	Silício
SiC	Carbeto de silício
Si_3N_4	Nitreto de silício
SiO_2	Dióxido de silício
WPVT	Sistema fotovoltaico térmico à base de água

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Fator material adimensional da junção
A_c	Área do absorvedor [m^2]
a	Limite superior para a temperatura do módulo
b	Taxa de redução da temperatura
c_p	Calor específico [$kJ/kg\ K$]
E	Irradiância solar na superfície do módulo [W/m^2]
E_o	Irradiância solar de referência no módulo [W/m^2]
f_{PV}	Redução da eficiência do painel
G_T	Média por hora da radiação incidente [W/m^2]
$G_{T,STC}$	Radiação solar medida em $1\ kW/m^2$ [W/m^2]
G_{ref}	Incidência de fluxo de radiação solar de referência [W/m^2]
H	Incidência total [Wh/m^2]
I_D	Fotocorrente [A]
I_{Ph}	Corrente de saturação reversa [A]
I_{PV}	Corrente de saída [A]
K	Constante de Stephan-Boltzmann [$W/m^2\ K^4$]
$\dot{m}$	Vazão mássica [kg/s]
P_{PVn}	Potência nominal de saída [W]
R	Resistência [Ω]
T_a	Temperatura do ar ambiente [$^{\circ}C$]
T_b	Temperatura da parte posterior do módulo [$^{\circ}C$]
T_c	Temperatura da célula [$^{\circ}C$]
$T_{F,in}$	Temperatura do fluido na entrada [$^{\circ}C$]
$T_{F,out}$	Temperatura do fluido na saída [$^{\circ}C$]
T_{PV}	Temperatura no painel PV [$^{\circ}C$]
$T_{PV,STC}$	Temperatura nas condições de teste padrão de $25\ ^{\circ}C$ [$^{\circ}C$]
U	Coeficiente global de transferência de calor [W/m^2K]
U_L	Coeficiente global de perda térmica [W/m^2K]
ΔT	Diferença de temperatura [$^{\circ}C$]
V_{PV}	Tensão de saída [V]
α	Absortividade da célula fotovoltaica

β	Coeficiente de correção da eficiência elétrica [%/°C]
η_{elec}	Eficiência elétrica nas condições de teste padrão de 25 °C
φ	Irradiância solar incidente
τ	Transmitância
η_e	Eficiência elétrica
η_o	Eficiência óptica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	11
2.1.	Princípio do funcionamento da célula fotovoltaica e a influência da temperatura em sua <i>performance</i>	12
2.2.	Métodos de resfriamento aplicados para aumentar o desempenho de painéis PV	14
2.2.1	Resfriamento por convecção	15
2.2.1.1	<i>Resfriamento à base de líquidos</i>	15
2.2.1.2.	<i>Resfriamento à base de ar</i>	22
2.2.1.3	<i>Efeito da área estendida no resfriamento convectivo</i>	24
2.2.2.	Refrigeração por condução: resfriamento à base de PCM	25
3	CONCLUSÕES	28
	REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

A partir da 1ª Revolução Industrial, o mundo começou a ser, cada vez mais, dependente da energia elétrica. A base energética dos países industrializados era o carvão e os combustíveis fósseis, sendo estes não renováveis, ou seja, sem garantia dos mesmos em longo prazo (Wrigley, 2010). Este problema, além da economia global que progressivamente se desenvolvia e mostrava quão importante era a energia em qualquer sociedade, fez com que os países se despertassem à procura de uma nova fonte de energia, uma energia renovável, sendo a energia solar uma delas.

Atualmente, o problema de recursos energéticos é ainda mais agravado pelas mudanças climáticas, poluição e desmatamento (Croni et al., 2018), além da complicação causada para a saúde humana e da deterioração da infraestrutura, através da chuva ácida. Assim, a energia solar é uma solução a este problema; sua conversão em energia elétrica pode ser feita através de painéis fotovoltaicos (PV's), como apresenta Ranabhat et al. (2016). Este mecanismo é feito essencialmente por fótons da luz solar que atingem a célula fotovoltaica, liberando elétrons que são atraídos por condutores, gerando um fluxo de corrente contínua. A primeira célula fotovoltaica que gerou energia de forma significativa foi feita em 1954 no laboratório de pesquisa da AT&T nos Estados Unidos. Entretanto, a complexidade inserida no mecanismo da geração de energia por células fotovoltaicas e seu alto custo (uma célula fotovoltaica de 1 W custava em torno de US\$ 300) fez com que poucas empresas investissem na época (Hoang, 2017). O aumento do preço do petróleo na década de 70 aumentou a procura pela energia solar, além das questões ambientais que gradativamente se incorporavam no mercado; com isso na década de 80, os Estados Unidos já dominavam 80% da produção de energia solar do mundo e na década 90, as empresas de energia fotovoltaica estadunidenses já respondiam por cerca de 30% da remessa mundial. Entretanto não era considerado um negócio rentável para as empresas em comparação aos combustíveis fósseis, fazendo com que muitas empresas falissem.

Com as mudanças climáticas cada vez mais em pauta, no começo do século XXI ocorreu o *boom* da energia solar, agora com subsídios governamentais e, em alguns países, a obrigatoriedade de instalação de energia solar fotovoltaica em novos edifícios dentre as medidas para o uso dessa fonte de energia. De acordo com Chang et al. (2017) a economia verde (políticas relacionadas à sustentabilidade) foi outro fator que

influenciou essa crescente da energia solar, com a possibilidade de alavancar a economia através da melhoria da produtividade do trabalho que a energia solar oferece.

Além disso, tecnologias para melhorar a eficiência das células fotovoltaicas foram desenvolvidas, dentre os quais se podem citar os diferentes métodos de resfriamento para evitar o aumento excessivo da temperatura dos painéis PV, como apresenta Xiao et al. (2018) e Ali (2020).

Desse modo, o objetivo deste trabalho é analisar o impacto dos diferentes métodos de resfriamento (passivo ou ativo) na termorregulação das células fotovoltaicas e assim fornecer uma diretriz sobre as melhores técnicas de resfriamento aplicadas à energia fotovoltaica para a maior eficiência do sistema.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A demanda de energia de um país é uma forma de mensurar o desenvolvimento de sua economia. Espera-se que o consumo de energia quando comparado com o ano de 2010 cresça cerca de 40% em 2030 (Agroui, 2012; Ahmed et al., 2013). Globalmente, 67% da produção de energia dependem de usinas que geram energia a partir de combustíveis que emitem gases prejudiciais, aumentando o aquecimento global (Chauan et al., 2019). Portanto, fontes renováveis se tornaram uma alternativa vital para o enorme aumento de demanda em sistemas de energia (Adefarati e Bansal, 2016); não somente uma demanda de energia “*eco-friendly*” para satisfazer a demanda extra de energia, mas representam soluções para fornecer energia para áreas remotas, sendo também combinadas com outros tipos de geração de energia (Senthil Kumar et al., 2018).

Recentemente, entre as fontes de energia renovável, os sistemas fotovoltaicos são os mais empregados devido a sua simples operação, ao seu baixo a moderado custo de implementação e ao aprimoramento em sua fabricação e controle (Hu et al., 2016; Yau e Lim, 2016). O sistema fotovoltaico foi proposto pela primeira vez em 1953 em que uma banda de energia de um semicondutor foi usada para converter luz solar em energia elétrica (Nelson, 2003; Yau e Lim, 2016). Desde então, muito esforço tem sido feito por pesquisadores para estabelecer métodos modernos de fabricação de células fotovoltaicas (Tao, 2008; Schmidtke, 2010).

As células fotovoltaicas de silício podem ser classificadas como monocristalina, policristalina e amorfa (Jean et al., 2015; Ibn-Mohammed et al., 2017). As células

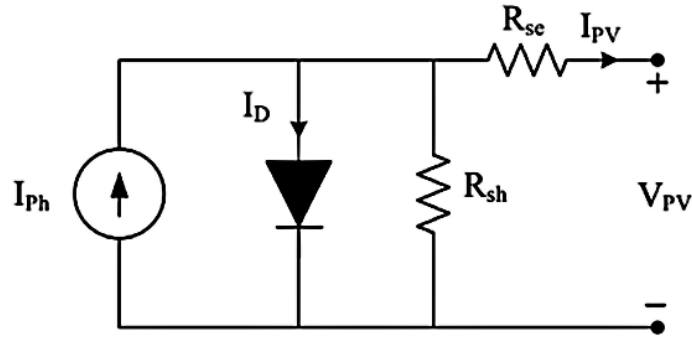
solares com base de silício cristalino, especialmente o monocristalino e o policristalino, contribuem com 90% dos painéis fotovoltaicos do mercado (Placzek-Popko, 2017). Apesar de sistemas fotovoltaicos possuírem vantagens quando comparados com outras tecnologias de energia renovável, como longa vida de operação com baixa manutenção e baixo custo de geração (Parida et al., 2011; Wang et al., 2014), sua eficiência é baixa; somente 15% a 20% da radiação solar incidente são convertidos em energia elétrica (Teo et al., 2012).

Além disso, a eficiência dos painéis fotovoltaicos é impactada pela temperatura de sua superfície, acúmulo de pó, condições do local de sua instalação, dentre outros fatores (Rahman et al., 2015). Outros fatores também influenciam no desempenho dos painéis fotovoltaicos, os chamados coeficientes de *performance*. Muitos desses são perdas devido ao tempo, aos cabos, à região de sombreamento, circuitos, etc. A análise do ponto de potência máxima também é um importante fator e todos esses coeficientes determinam o desempenho do sistema. A temperatura da superfície do módulo fotovoltaico é o parâmetro mais crucial, pois 1 °C a mais na superfície diminui a eficiência do painel em 0,40 - 0,65% e o aumento excessivo danifica a estrutura do material que compõe a célula reduzindo seu tempo de vida (Rahman et al., 2015; Ebaid et al., 2018). Portanto, faz-se necessário o controle da temperatura do painel PV por meio de técnicas de resfriamento passivo ou ativo; dessa forma, também tem-se a melhora do desempenho do sistema (Nizetic et al., 2017; Nizetic et al., 2018). Por exemplo, o sistema térmico fotovoltaico híbrido pode alcançar uma eficiência elétrica aprimorada através do resfriamento dos painéis PV, além de usar o calor extraído como um ganho de energia que pode ser usado em diferentes aplicações (Fuentes et al., 2018; Joshi e Dhoble, 2018; Sultan e Ervina Efzan, 2018).

2.1. Princípio do funcionamento da célula fotovoltaica e a influência da temperatura em sua *performance*

Quando a célula fotovoltaica é exposta à radiação solar, a junção P-N capta o fóton e esse fenômeno produz um potencial energético na junção, então as cargas fluem e a fotocorrente resultante fica paralela com o diodo da junção P-N, conforme apresenta a Figura 1.

Figura 1 - Desenho esquemático do circuito de uma célula fotovoltaica.



Fonte: (Krishan e Suhag, 2019)

O circuito presente na Figura 1 é considerado o modelo mais popular para representar uma única célula fotovoltaica, em que a corrente de saída é calculada pela Equação 1:

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D \left[\exp \left(\frac{V_{PV} + R_{se} \cdot I_{PV}}{A \cdot K \cdot T_{PV}} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + R_{se} \cdot I_{PV}}{R_{sh}} \right] \quad (1)$$

em que I_{PV} e V_{PV} são, respectivamente, a corrente [A] e a tensão de saída da célula fotovoltaica [V]; I_{ph} e I_D são a corrente de saturação reversa e a fotocorrente [A], respectivamente; R_{sh} e R_{se} são as resistências em paralelo e em série [Ω], respectivamente; A é um fator adimensional relacionado ao material da junção; K é a constante de Stephan-Boltzmann e T_{PV} é a temperatura da célula fotovoltaica.

A temperatura de operação da célula fotovoltaica é o elemento mais crítico no processo de conversão de energia; temperaturas elevadas causam o superaquecimento do painel PV e, por conseguinte, a eficiência e a potência de saída reduzem consideravelmente.

A dependência da potência de saída e a eficiência energética com a temperatura está presente nas Equações 2 e 3, respectivamente:

$$P_{PV} = P_{PVn} \cdot f_{PV} \left(\frac{G_T}{G_{T,STC}} \right) \cdot [1 + \beta_r (T_{PV} - T_{PV,STC})] \quad (2)$$

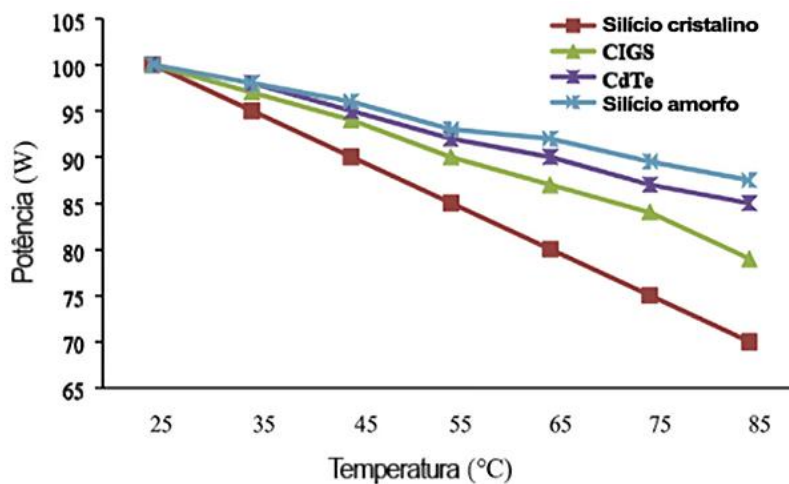
$$\eta_{elec} = \eta_{T_{STC}} \cdot [\gamma \cdot \log_{10}(G_T) + (1 - \beta_r (T_{PV} - T_{STC}))] \quad (3)$$

em que P_{PVn} é a potência de saída nominal do painel fotovoltaico; η_{elec} é a eficiência elétrica da célula medida em condições de teste padrão de 25 °C; G_T é a média por hora

da radiação solar incidente; $G_{T,STC}$ é a radiação solar medida em 1 kW/m^2 ; f_{PV} é a redução da eficiência do painel [%]; $T_{PV,STC}$ é a temperatura da célula nas condições de teste padrão de 25°C ; γ é o coeficiente de intensidade da radiação solar para a eficiência da célula, geralmente assumido como zero; e β_r é o coeficiente de correção da eficiência elétrica devido ao aumento de temperatura [$\%/^\circ\text{C}$], sendo normalmente igual a $0,004\text{-}0,005/^\circ\text{C}$.

Devido ao aumento de temperatura da superfície da célula fotovoltaica, a resistência do circuito aumenta e isso limita a velocidade do elétron, afetando a tensão do circuito aberto e prejudicando o material da célula. A razão da queda de tensão pelo aumento de temperatura é chamada de coeficiente de correção (β_r), o qual descreve a dependência com a temperatura de um material específico e indica a relação entre a produção de energia fotovoltaica e a temperatura de superfície do painel fotovoltaico; usualmente os fabricantes fornecem em seus manuais esse valor. A Figura 2 apresenta o efeito do aumento da temperatura na potência de saída para vários tipos de materiais.

Figura 2 - Influência da temperatura sobre a potência de saída de painéis PV constituídos de diferentes materiais.



Fonte: Adaptada de Hasanuzzaman et al. (2016)

2.2. Métodos de resfriamento aplicados para aumentar o desempenho de painéis PV

Para regular a temperatura dos painéis, diferentes métodos de resfriamento podem ser aplicados usando tanto sistemas de resfriamento passivos quanto ativos. Sistemas passivos baseiam-se na troca de calor por convecção livre, portanto, não precisam de fontes de potência externas, mas precisam de dissipadores de calor como

aletas ou dispositivos semelhantes para melhorar o processo de transferência de calor; e o principal fluido de trabalho usado para este tipo de sistema é o ar. Sistemas ativos usam como princípio a convecção forçada, necessitando assim de um sistema de bombeamento o qual tem consumo energético. A potência consumida no bombeamento do fluido de trabalho (ar, água, dentre outros) está relacionada com a queda de pressão no sistema, a qual depende da vazão, do tipo de fluido e da geometria do dissipador de calor.

2.2.1 Resfriamento por convecção

Os métodos de resfriamento por convecção podem ser classificados em resfriamento à base de líquidos e resfriamento à base de gases. As técnicas usadas quando envolve líquidos podem ser subdivididas em sistemas passivos ou ativos, sem ou com sistema de bombeamento, respectivamente. Por outro lado, as técnicas que utilizam gases podem ser subdivididas em convecção forçada ou natural, com ou sem ventilador (ou ventoinha), respectivamente. Além disso, para aumentar a área de transferência de calor, dissipadores de calor (por exemplo, aletas) com diferentes materiais, configurações e orientações podem ser acoplados ao painel fotovoltaico.

2.2.1.1 Resfriamento à base de líquidos

Normalmente, usa-se água como fluido de trabalho, pois “ainda” é viável economicamente e apresenta uma boa condutividade e capacidade térmica. Sistemas fotovoltaicos híbridos têm sido investigados e seu desempenho termoelétrico avaliado. Recentemente, com o avanço da nanotecnologia, nanopartículas de diferentes materiais têm sido adicionadas à água para melhorar suas características térmicas, os chamados nanofluidos. Nestes, as propriedades físicas (viscosidade, condutividade térmica, densidade, calor específico) dependem de parâmetros como concentração de nanopartículas e temperatura (Abdallah et al., 2019).

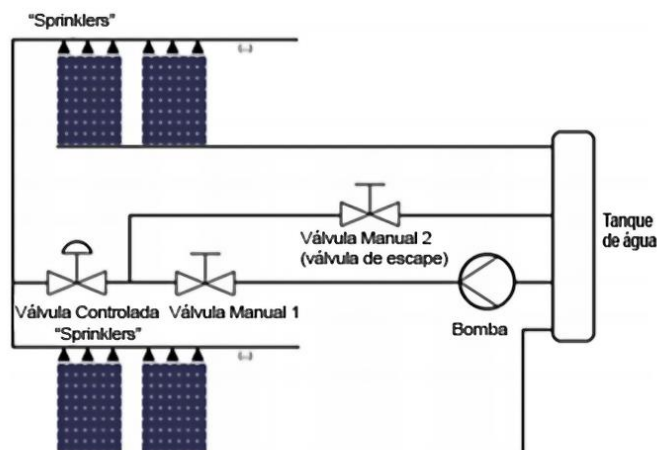
Embora, no resfriamento ativo a vazão do líquido melhore o resfriamento por convecção, o custo de operação, devido ao consumo de energia para bombear a fluido, aumenta. Além disso, o termo referente a potência de bombeamento deve ser considerado quando se calcula a eficiência do sistema, subtraindo-o da potência de saída. Assim, no caso de uso de um sistema de resfriamento ativo, o projeto do mesmo

deve ser otimizado, inclusive considerando se o resfriamento será na parte frontal, posterior ou em ambos os lados do painel PV.

Saxena et al. (2018) estudaram o impacto do resfriamento à base de água na produção energética de um painel PV comercial, considerando uma faixa de radiação solar de 87,38 a 359,17 W/m². Diferentes vazões volumétricas foram testadas (3; 5,3 e 6,2 l/min) e a produção de energia aumentou em 18% quando comparada àquela de um painel PV sem sistema de resfriamento. Os autores recomendam que a técnica de resfriamento utilizada seja incorporada ao arranjo de abastecimento de água para aplicações domésticas.

Tashtoush e Al-Oqool (2019) investigaram experimentalmente o desempenho de painéis fotovoltaicos resfriados frontalmente por meio de aspersores (Figura 3). A produção anual de eletricidade aumentou em 12% para uma planta de 5 kW e a temperatura de superfície do painel reduziu de 60 para 30 °C.

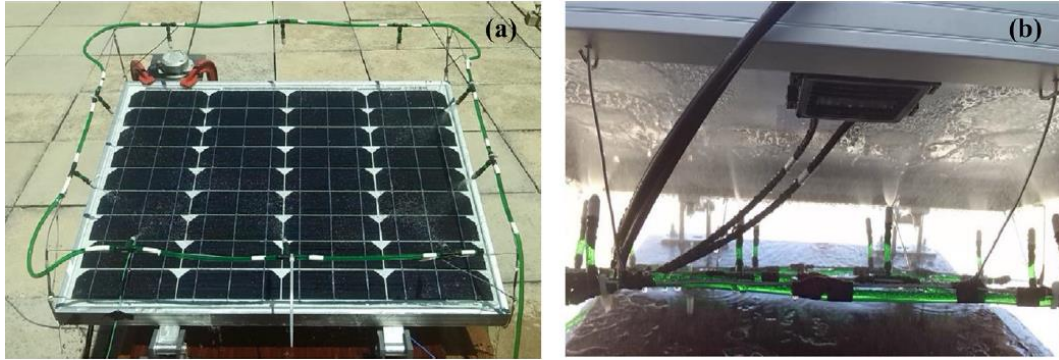
Figura 3 - Diagrama esquemático de circuito fechado para resfriamento frontal de painel PV.



Fonte: Adaptada de Castanheira et al. (2018)

Para um painel PV com sistema de resfriamento acoplado à parte posterior, Zilli et al. (2018) relataram um aumento na potência de saída de até 12%, ocorrendo um comportamento de aumento similar para a eficiência. O uso de aspersores de água tanto na parte frontal quanto na parte posterior do painel resultou em um melhor desempenho na conversão de energia comparado a outros sistemas que usam fluidos refrigerantes. Nizetic et al. (2016) propuseram um sistema de resfriamento duplo conforme mostrado na Figura 4. Tal sistema levou a um aumento de 16,3 e 14,1% na potência de saída e eficiência, respectivamente, com uma redução de 30 °C na temperatura do painel.

Figura 4 - Sistema de resfriamento duplo: (a) aspersores na superfície frontal e (b) aspersores na superfície posterior do painel PV.



Fonte: (Nižetić et al., 2016)

Sistemas térmicos fotovoltaicos à base de água (WPVT) dependem da configuração e características construtivas da unidade de refrigeração acoplada à superfície posterior do painel PV. As eficiências térmicas e termoelétricas de qualquer unidade PVT podem ser calculadas da seguinte forma (Nahar et al., 2017; Nasrin et al., 2018):

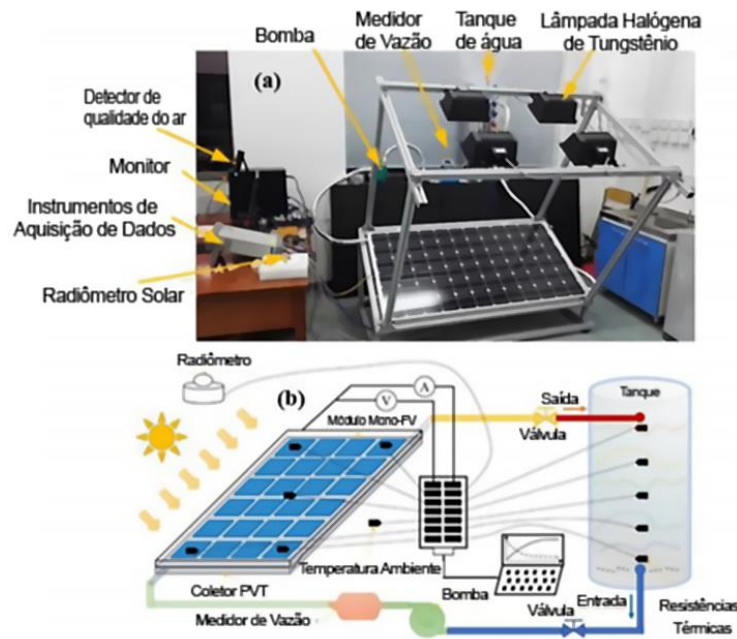
$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}c_p(T_{F,out}-T_{F,in})}{G_T A_c} \quad (4)$$

$$\eta_{PVT} = \eta_{th} + \eta_{elec} \quad (5)$$

em que $\dot{m}$ é a vazão mássica [kg/s]; c_p é o calor específico [kJ/kgK]; $T_{F,out}$ é a temperatura de saída do fluido [°C]; $T_{F,in}$ é a temperatura de entrada do fluido; G_T é a irradiação solar [W/m²]; e A_c é a área do absorvedor [m²].

Pang et al. (2019) estudaram o desempenho de um sistema WPVT consistindo de um painel fotovoltaico acoplado a um coletor de cobre-alumínio, como mostrado na Figura 5. Para obter condições ideais de operação, o desempenho do sistema foi analisado para diferentes ângulos de inclinação (15 a 40°) e valores de vazões mássicas de água (0,005 a 0,25 kg/s). As eficiências elétrica e térmica aumentaram, respectivamente, 11 e 57%. O desempenho ótimo do sistema ocorreu para uma vazão de 0,15 kg/s e para um ângulo de inclinação de 25°.

Figura 5 – (a) Foto e (b) desenho esquemático de um sistema fotovoltaico térmico à base de água.



Fonte: Adaptada de Pang et al. (2019)

Comparado ao sistema PVT com arranjo de tubos de calor, o WPVT teve melhor desempenho (Yuan et al., 2018). Além disso, de acordo com Kazemian et al. (2018), em comparação com os sistemas PVT de etilenoglicol puro (EG) e mistura EG/água (50% em peso), o WPVT teve melhor eficiência térmica e elétrica. Uma recomendação dos autores é para o uso da mistura EG/água (50% em peso) em regiões frias, por possuir um ponto de congelamento mais baixo.

Por outro lado, materiais de mudança de fase (PCM) podem ser usados em sistemas híbridos com WPVT para aumentar a eficiência total. Preet et al. (2017) compararam experimentalmente o desempenho de: um módulo fotovoltaico simples, um sistema WPVT com placa absorvedora dupla e um sistema WPVT integrado com PCM. Na unidade WPVT-PCM, a parafina RT-30 foi usada como material de mudança de fase e os testes foram realizados para diferentes valores de vazão mássica (0,013; 0,023 e 0,031 kg/s). O melhor desempenho foi obtido no caso do sistema WPVT-PCM, sendo que para uma vazão de 0,031 kg/s o aumento foi de 300% em comparação ao sistema fotovoltaico simples.

Figura 6 – Fotografia da vista de aletas de alumínio com material de mudança de fase (PCM).

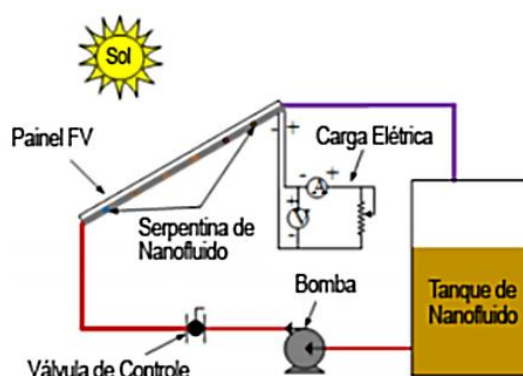


Fonte: Preet et al. (2017)

Além disso, Salem et al. (2019) testaram diferentes técnicas de resfriamento para módulos fotovoltaicos (água e/ou mistura de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PCM}$) em várias razões de ocupação de 0 a 100% de água (ou seja, 100 a 0% de mistura). As faixas testadas para vazão de água e concentração de nanopartículas foram de 0 a 1 l/min e 0 a 1%, respectivamente. Os autores reportaram que o painel PV totalmente resfriado a água teve desempenho superior ao daquele resfriado usando PCM; mas, ao adicionarem óxido de alumínio (Al_2O_3) (1% de concentração) esse comportamento se inverteu. O melhor desempenho foi obtido para o sistema híbrido (água/PCM/ Al_2O_3) na razão de ocupação de 75% de água (mistura de 25%), vazão de 1 l/min e 1% de concentração de nanopartículas.

A adição de nanopartículas no fluido base aumenta suas propriedades térmicas como, a condutividade térmica, a viscosidade e a densidade. Assim, os nanofluidos têm sido efetivamente utilizados em sistemas PVT, aumentando a eficiência elétrica e térmica, melhorando o processo de transferência de calor e diminuindo a temperatura da célula fotovoltaica (Al-Waeli et al., 2017). Basicamente, um sistema fotovoltaico baseado em nanofluido (NFPVT) consiste em um painel fotovoltaico com os dispositivos correspondentes, tanque de nanofluido, bomba, tubulação e seus acessórios, como apresenta a Figura 7.

Figura 7 - Esquema de um sistema NFPVT simples.

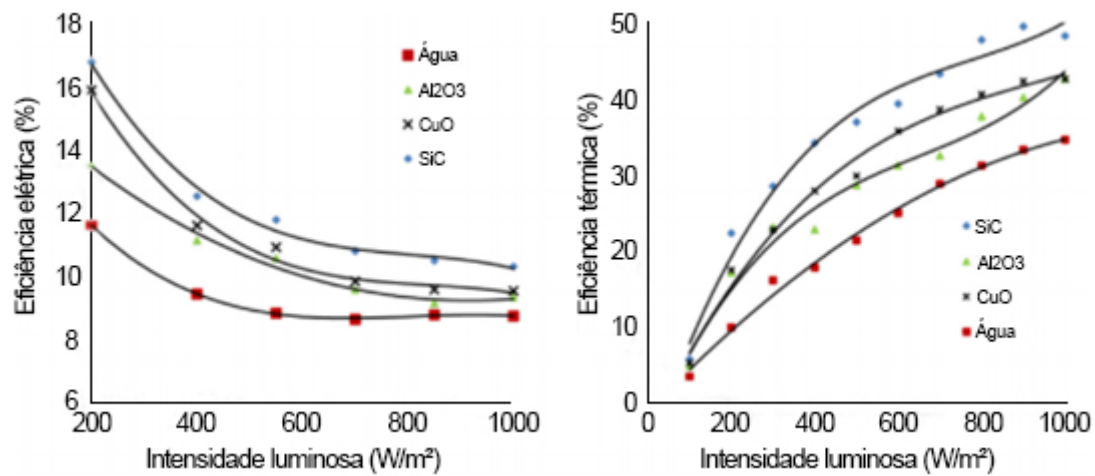


Fonte: Adaptada de Abdallah et al. (2018)

Abdallah et al. (2018) investigaram experimentalmente um sistema PVT, primeiro à base de água para estabelecer uma vazão ótima na qual diferentes concentrações de nanofluido (Al_2O_3 -água) foram então estudadas. Além disso, usando o mesmo valor de vazão, nanotubos de carbonos (MWCNT) foram adicionados à água em diferentes concentrações e usados como fluido de trabalho (Abdallah et al., 2019). Para a vazão ótima de 1,2 l/min, a eficiência máxima do sistema foi de 32, 56 e 61%, para água pura, Al_2O_3 -água (concentração de 0,1%) e MWCNT/água (concentração de 0,075%), respectivamente.

Devido às suas propriedades térmicas e estabilidade, o nanofluido de carbetto de Silício (SiC -água) teve melhor desempenho térmico e elétrico quando comparado ao de óxido de cobre (CuO -água) e de alumínio (Al_2O_3 -água), conforme mostra a Figura 8. O nanofluido SiC -água reduziu a temperatura do módulo fotovoltaico em 28,1% e aumentou a eficiência térmica em até 89,75% em comparação ao sistema WPVT.

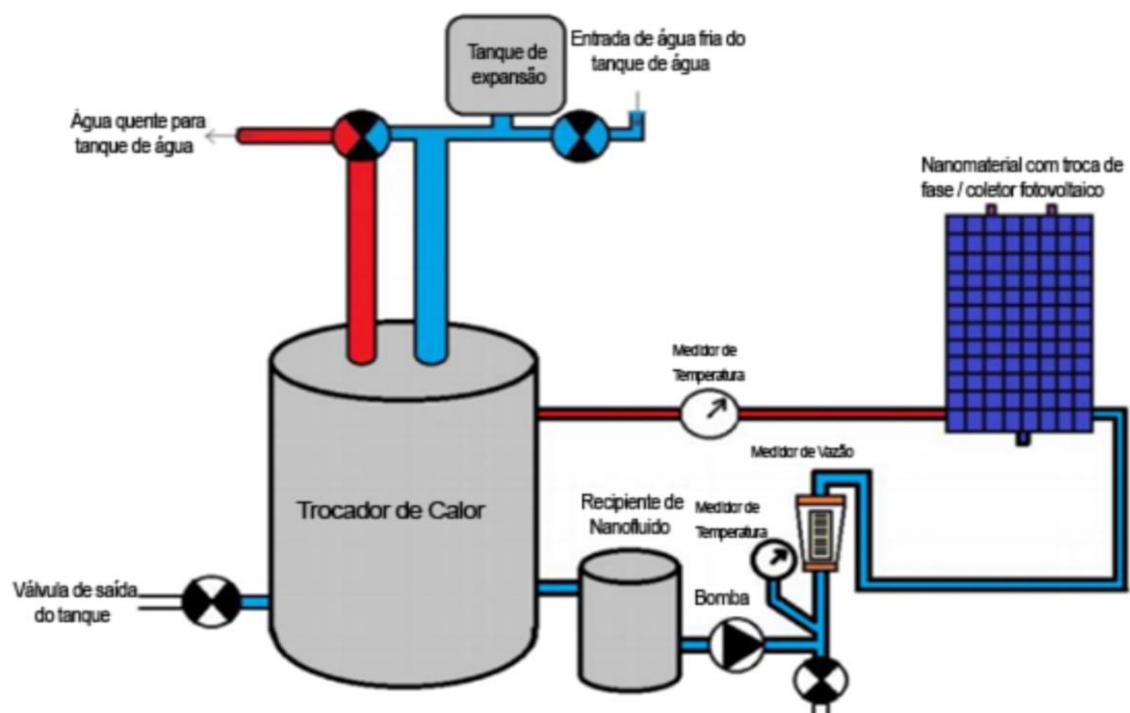
Figura 8 - Eficiência elétrica e térmica do sistema fotovoltaico à base de nanofluidos Al_2O_3 -água, CuO -água e SiC -água comparada com água pura.



Fonte: Adaptada de Al-Waeli et al. (2017)

Materiais de mudança de fase também podem ser usados conjuntamente em um sistema NFPVT para influenciar positivamente o desempenho termoelétrico. Por exemplo, Al-Waeli et al. (2017) usaram um sistema PVT híbrido com PCM e nanopartículas de SiC e resfriado por circulação de nanofluido SiC -água a $0,17 \text{ kg/s}$, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Esquema do sistema NFPVT-PCM.



Fonte: Adaptada de Al-Waeli et al. (2019)

As nanopartículas foram dispersas no PCM em frações mássicas de 0,1; 0,5; 1; 2; 3 e 4%. O sistema de resfriamento proposto alcançou potência elétrica e eficiência de até 120 W e 13,7%, respectivamente, em comparação com 61 W e 7,1% para um sistema PV sem sistema de resfriamento acoplado.

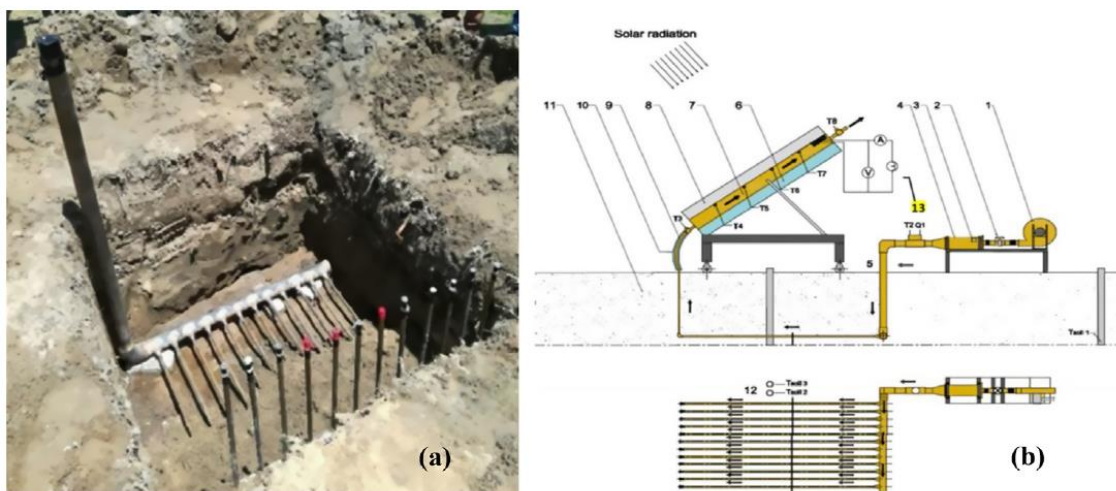
2.2.1.2. *Resfriamento à base de ar*

Geralmente, as técnicas de resfriamento à base de ar dependem da transferência de calor por convecção forçada usando um soprador ou ventilador conectado às válvulas de controle para determinar a vazão de ar desejada. Em outras palavras, o sistema de resfriamento fotovoltaico à base de ar pode ser considerado como um sistema PVT composto por um painel fotovoltaico e trocador de calor à base de ar (APVT).

Para redução na temperatura do painel fotovoltaico, Sajjad et al. (2019) propuseram um sistema de resfriamento à base de ar advindo de um condicionador de ar. Comparado a um painel fotovoltaico sem sistema de resfriamento acoplado, o sistema proposto resultou em um de 7,2 e 6% na potência elétrica e na eficiência, respectivamente.

Um novo *design* de APVT baseado em um trocador de calor enterrado foi apresentado por Elminshawy et al. (2019), conforme mostrado na Figura 10. As vazões do ar ambiente através do trocador de calor foram de 0,0228 a 0,0288 m³/s, com temperaturas de 35, 40 e 45 °C. O sistema proposto controlou satisfatoriamente a temperatura do painel PV; comparado a um módulo sem sistema de resfriamento (cuja temperatura de superfície era de aproximadamente 65 °C), a temperatura do módulo com o sistema proposto diminuiu para faixas de 34 a 52 °C.

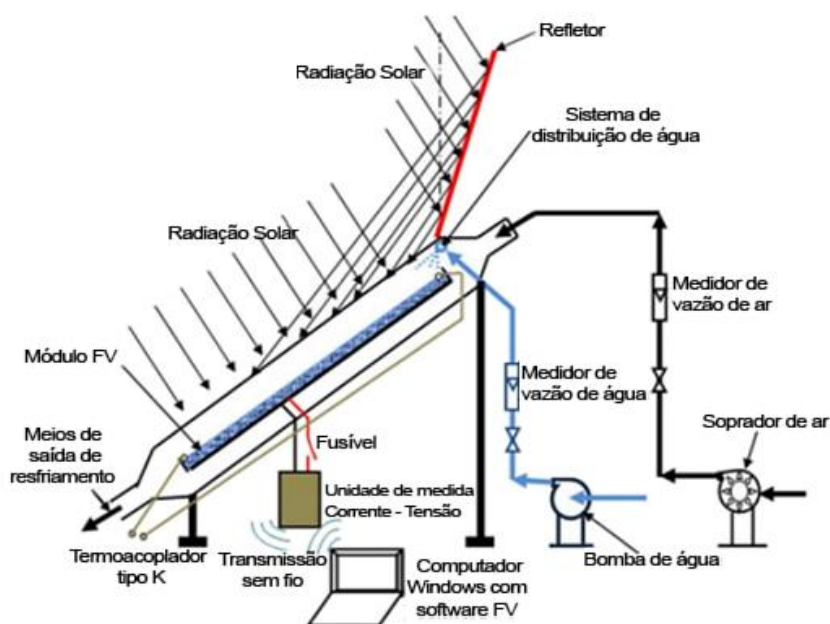
Figura 10 - Sistema APVT baseado em trocador de calor enterrado: (a) arranjo e (b) desenho esquemático do sistema APVT.



Fonte: Adaptada de Elminshawy et al. (2019)

O painel fotovoltaico com sistema de resfriamento à base de água teve melhor resultado em termos de desempenho e aspectos econômicos quando comparado àqueles com sistemas de resfriamento que utilizam convecção forçada de ar ou híbridos (líquido e ar) de acordo com Kabeel et al. (2019). Todos os sistemas foram testados na presença de refletores, como mostra a Figura 11.

Figura 6 - Desenho esquemático sistema fotovoltaico híbrido (ar/água).



Fonte: Adaptada de Kabeel et al. (2019)

Comparado com um sistema fotovoltaico convencional, o aumento líquido na potência diária foi de 80, 178 e 245 Wh/dia, para resfriamento à base de ar, híbrido e de água, respectivamente. Além disso, os custos por kWh foram de 0,072 \$/kWh para os sistemas à base de ar e híbrido e de 0,061 \$/kWh para o sistema à base de água; para um sistema fotovoltaico convencional o custo foi de 0,062 \$/kWh.

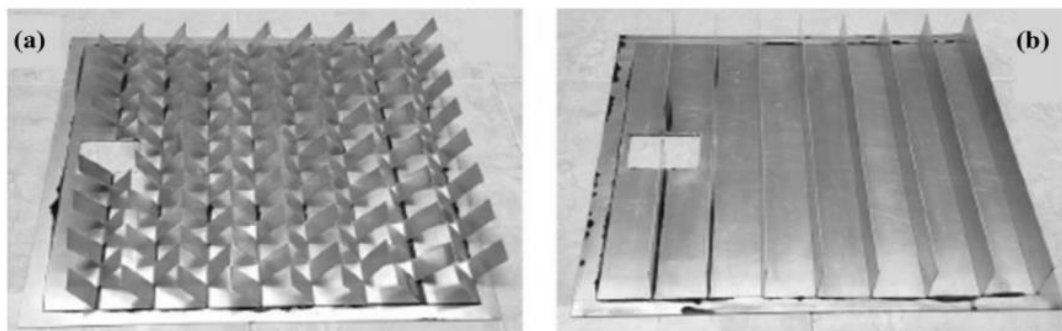
2.2.1.3 Efeito da área estendida no resfriamento convectivo

Geralmente, aletas e dissipadores de calor são técnicas comuns para aumentar a área de transferência de calor. Aletas estão sendo usadas para uma ampla variedade de aplicações térmicas com diferentes formas tais como, longitudinal (forma de L) e ondulada, além de serem usadas em diferentes arranjos.

El Mays et al. (2017) testaram um painel fotovoltaico com dissipador de calor de placa de alumínio com aletas paralelas na parte frontal. A presença das aletas reduziu 6,1 °C, em média, a temperatura do painel PV; a eficiência de conversão e a potência de saída aumentaram em 1,75% e 1,8 W, respectivamente, em comparação com o painel sem a presença do dissipador de calor. Além disso, Bayrak et al. (2019) estudaram o desempenho de células fotovoltaicas aplicando 10 configurações de aletas diferentes (comprimento, tamanho, número e matriz). As aletas escalonadas verticalmente (26 aletas com 20 cm/cada de comprimento) obtiveram os melhores resultados, com eficiência de aproximadamente 12%.

O uso de diferentes orientações das aletas foi considerado por Hernandez-Perez et al. (2020) ao analisarem dissipadores de calor de alumínio com aletas retas comuns e outras com segmentos inclinados, conforme mostrado na Figura 12.

Figura 72 - Dissipadores de calor: (a) segmentado e (b) convencional.

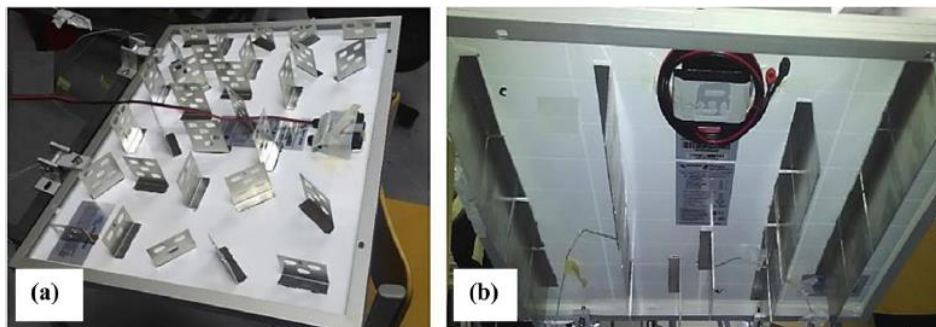


Fonte: (Hernandez-Perez et al., 2020)

O dissipador de calor segmentado apresentou o melhor desempenho, segundo Hernandez-Perez et al. (2020), com menor perda de pressão e maior transferência de calor por convecção. A redução máxima da temperatura foi de aproximadamente 10 °C, com um aumento na eficiência de conversão de ~4% nas horas de pico de irradiação (800 – 1000 W/m²). Com base nos resultados, pode-se obter um aumento de capacidade por metro quadrado de 6 W.

Por outro lado, usando outras configurações de aleta (perfurada, espuma, etc) alcançou-se um bom resfriamento do painel fotovoltaico. Usando aletas de perfil L perfuradas e posicionadas aleatoriamente (Figura 13a) em vez de perfil longitudinal paralelo (Figura 13b), Grubisic-Cabo et al. (2018) obtiveram melhor desempenho com aumento médio de 2% na eficiência. Além disso, Selimefendigil et al. (2018) realizaram estudos experimentais sobre a eficiência de painéis fotovoltaicos com aletas porosas feitas de espuma metálica de alumínio (75 – 95% de porosidade). Os autores relataram que as estruturas porosas de 10 mm, melhoraram o desempenho do sistema (aumento de 7,26 W na potência de saída).

Figura 13- (a) aletas de perfil L perfuradas e (b) aletas longitudinais paralelas.



Fonte: (Grubišić-Čabo et al., 2018)

A fim de intensificar o processo de transferência de calor, aletas também podem ser adicionados na face posterior de uma placa absorvedora que, por sua vez, está acoplada a um painel fotovoltaico (Fan et al., 2017).

2.2.2. Refrigeração por condução: resfriamento à base de PCM

A integração de PCMs de alto calor latente nos módulos fotovoltaicos tem duas funções: reduzir a temperatura do painel e armazenar calor para outras aplicações térmicas. Muitas investigações têm reportado a influência positiva do PCM no

resfriamento de painéis fotovoltaicos e a correspondente melhora da eficiência do sistema fotovoltaico. Japs et al. (2016) testaram sistemas PV-PCM constituídos por três módulos fotovoltaicos: um módulo fotovoltaico convencional e outros dois com PCMs diferentes de mesma temperatura de fusão. Observou-se que o PCM com maior condutividade térmica e menor armazenamento térmico gerou mais energia do que o de menor condutividade térmica. Observou-se também que o módulo PV-PCM apresentou melhor eficiência que o convencional. Waqas e Ji (2017) demonstraram que a temperatura de um módulo PV foi significativamente reduzida para 42 °C com o uso de PCM cuja temperatura de fusão era de 35 °C (o módulo convencional atingiu temperaturas de 64 °C) e a eficiência aumentou até 9% durante o horário de pico de radiação.

Como a transferência de calor do painel fotovoltaico através do PCM ocorre por condução, a incorporação de materiais de alta condutividade no PCM é considerada uma solução viável para uma distribuição de temperatura mais uniforme dentro da unidade do PCM (contêiner); aletas são um exemplo de otimização da transferência de calor em PCMs (Ma et al., 2019).

Khanna et al. (2018; 2019) realizaram um estudo de otimização da profundidade do contêiner PCM, considerando também diferentes espaçamento, comprimento e espessura de aletas. Quanto maior o comprimento e a espessura e menor o espaçamento das aletas, uma quantidade maior de PCM foi necessária para um resfriamento fotovoltaico eficaz. Para o sistema proposto, a melhor espessura e espaçamento das aletas foi 25 cm e 2 mm, respectivamente, enquanto o melhor comprimento da aleta foi o valor para o qual ela encostou a base do contêiner.

Um sistema fotovoltaico concentrado com material de mudança de fase (CPV-PCM) foi analisado por Lu et al. (2018). A existência do PCM reduziu a temperatura do sistema fotovoltaico em mais de 20 °C durante o processo de mudança de fase, com aumento de 10% na eficiência elétrica. Numericamente, foi estudado o efeito da fixação das aletas, vertical ou horizontal, com diferentes espessuras; as aletas fixadas verticalmente apresentaram resultados melhores. Para uma irradiância de 670 W/m², o sistema CPV-PCM com aletas verticais reduziu a temperatura das células fotovoltaicas em 25 °C, com uma melhora de 10 a 12% na eficiência de conversão em comparação com um sistema sem PCM.

A adição de nanopartículas de alta condutividade e espuma metálica também são métodos promissores para melhorar as características termofísicas e químicas de PCMs,

permitindo assim aplicações mais amplas com melhor desempenho do sistema. Sarafraz et al. (2019) investigaram experimentalmente o desempenho térmico e elétrico de um sistema PV com resfriamento, composto de MWCNT/Parafina, acoplado na parte posterior do painel fotovoltaico. Os resultados mostraram que o sistema projetado levou a um aumento de 20 e 30% na energia elétrica e térmica produzida, respectivamente. Mahdi et al. (2021) investigaram numericamente um painel PV com camada de espuma metálica na parte posterior da camada PCM, considerando diferentes espessuras de camada PCM e diferentes ângulos de inclinação do painel PV. Os resultados mostraram que a inclusão da espuma metálica aumentou o tempo de fusão do PCM e o tempo de gerenciamento térmico do painel PV em 32 e 55%, respectivamente. A espessura do PCM na faixa de 20 a 30 mm aumentou o tempo de fusão em 54%.

Yousef et al. (2022) analisaram um painel PV integrado com parafina (PV-PCM) e um painel fotovoltaico integrado com espuma metálica (alumínio) embutida no PCM (PV-PCM/Foam); e compararam os resultados com painéis fotovoltaicos convencionais para diferentes condições climáticas. Os autores demonstraram que durante o verão as eficiências elétricas dos sistemas PV-PCM e PV-PCM/Foam foram superiores em 9 e 14%, respectivamente, em relação a um painel de referência; no inverno os painéis modificados melhoraram a eficiência do painel PV em 3,7 e 4,8%, respectivamente. Gao et al. (2022) mostraram experimentalmente que, combinando a técnica de resfriamento por PCM com meios porosos, a eficiência elétrica média do painel fotovoltaico foi aumentada em 9,7%.

Uma consideração importante ao usar soluções baseadas em PCM é que, se o PCM não for escolhido adequadamente para um projeto e aplicação específicos, isso pode levar a uma deterioração no desempenho, ou seja, um aumento na temperatura de um painel fotovoltaico. Isso foi demonstrado explicitamente por Bayrak et al. (2020), onde a utilização de PCMs resultou em um efeito negativo na potência de saída do painel fotovoltaico se a temperatura do PCM fosse maior que a temperatura da superfície do painel fotovoltaico. Assim, o ponto de fusão do PCM é um parâmetro crítico, pois a temperatura de operação de um painel fotovoltaico é ligeiramente superior ao ponto de fusão do PCM. Portanto, é importante selecionar um PCM com baixo ponto de fusão para um resfriamento fotovoltaico eficaz.

Também é importante notar que o PCM só pode absorver uma quantidade limitada de calor. Assim, a capacidade calorífica do PCM também é um parâmetro importante, o qual deve ser elevado o suficiente para absorver o calor residual nos

painéis fotovoltaicos durante um dia inteiro. Portanto, a densidade e a capacidade de calor específico do PCM devem ser cuidadosamente consideradas. Estruturas adicionais de transferência de calor, como aletas ou espumas metálicas, podem ser usadas para aumentar a transferência de calor entre o painel fotovoltaico e o PCM, diminuindo ainda mais a temperatura.

3 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi feita uma extensa pesquisa sobre os métodos de resfriamento de sistemas fotovoltaicos. As técnicas revisadas foram categorizadas de acordo com os modos de transferência de calor: resfriamento convectivo (resfriamento à base de água ou ar com ou sem aletas) e resfriamento condutivo por meio de materiais de mudança de fase. Discussões detalhadas sobre os correspondentes trabalhos para cada categoria foram apresentados e os principais resultados foram fornecidos. Assim, a partir dos trabalhos mencionados anteriormente, tem-se as seguintes conclusões:

- As técnicas de resfriamento ativo são mais eficazes do que as técnicas de resfriamento passivo. Em muitos casos, no entanto, o resfriamento passivo pode substituir o resfriamento ativo devido a menor complexidade ou custo, especialmente em instalações privadas (exemplo, instalações domésticas) de pequeno porte. Nesses casos, é preferível o uso de PCMs e abordagens de resfriamento passivo com superfícies estendidas. Quando os custos de bombeamento são levados em consideração, as técnicas passivas às vezes podem gerar mais ganho de potência do que as ativas.
- O gerenciamento térmico de células fotovoltaicas quando estas fazem parte de sistemas PVT híbridos é uma abordagem promissora, pois o calor residual das células fotovoltaicas pode ser utilizado para aplicações térmicas.
- Ao empregar sistemas fotovoltaicos térmicos, um sistema de resfriamento ativo parece ser a solução mais proeminente na maioria das aplicações, pois permite uma maior recuperação do calor residual. Além disso, o resfriamento ativo à base de água é a melhor solução quando o objetivo principal é aumentar a eficiência elétrica.
- Os sistemas PVT resfriados a ar têm melhor desempenho do que os painéis PV convencionais, mas não são tão bons quanto os sistemas PVT resfriados a

água ou nanofluidos e sistemas integrados PV-PCM. O desempenho do sistema pode ser melhorado com a integração de outras técnicas passivas, como aletas, dissipadores de calor e PCMs.

- Os nanofluidos têm coeficientes de transferência de calor mais elevados em comparação com a água levando, assim, a menores temperaturas de operação para condições operacionais semelhantes. O resfriamento à base de nanofluidos merece um estudo mais aprofundado, devendo incluir análises de custo-benefício, de melhor estabilidade e caracterização de desempenho, uma vez que a utilização desses fluidos tem desafios para sua implementação prática como, custo adicional, complexidade de manutenção e impacto ambiental.
- Os PCMs podem armazenar uma quantidade significativa de energia térmica por unidade de volume em relação, por exemplo, à água, devido ao calor latente de fusão. A integração de PCMs com células fotovoltaicas pode desempenhar um papel significativo na termorregulação e no consequente aumento da eficiência fotovoltaica. Mais pesquisas são necessárias para aumentar a condutividade térmica, estabilidade e comportamento efetivo de PCMs, bem como para reduzir o custo de seu uso.

Recomendações para futuros trabalhos:

- Pesquisas adicionais em modelagem numérica ajudam a ter uma ideia sobre o desempenho do sistema para diferentes condições climáticas. O estudo numérico pode auxiliar no projeto e desenvolvimento do sistema; economizando tempo e dinheiro, e evitando vários experimentos para entender o comportamento do sistema.
- Na maioria dos estudos realizados, o experimento é feito apenas por alguns dias ou período específico do ano. Para entender o desempenho do sistema por um longo período é importante realizar a análise do sistema fotovoltaico integrado com uma das técnicas de resfriamento aqui mencionada para o ano inteiro. Assim ter-se-á uma melhor compreensão do efeito de diferentes técnicas de resfriamento no sistema.

- Faz-se necessário analisar o período de retorno do sistema de resfriamento projetado, o que pode potencialmente aproximar a pesquisa da implementação e de maior investimento. Além disso, a análise ambiental deve considerar a vida útil do sistema de resfriamento e seu impacto no ecossistema. Isso ajudará a otimizar o uso de recursos, bem como minimizar o impacto ambiental.

REFERÊNCIAS

- Abdallah, S.R., Elsemary, I.M., Altohamy, A.A., Abdelrahman, M., Attia, A.A., Abdellatif, O.E., 2018. Experimental investigation on the effect of using nano fluid (Al₂O₃-Water) on the performance of PV/T system. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 7, 1-7.
- Abdallah, S.R., Saidani-Scott, H., Abdellatif, O.E., 2019. Performance analysis for hybrid PV/T system using low concentration MWCNT (water-based) nanofluid. *Sol. Energy* 181, 108-115.
- Adefarati, T., Bansal, R.C., 2016. Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review. *IET Renew. Power Gener.* 10 (7), 873-884.
- Agroui, K., 2012. Indoor and outdoor characterizations of photovoltaic module based on multicrystalline solar cells. *Energy Procedia* 18, 857-866.
- Ahmed, F., Al Amin, A.Q., Hasanuzzaman, M., Saidur, R., 2013. Alternative energy resources in Bangladesh and future prospect. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 25, 698-707.
- Ali, H. M. (2020). Recent advancements in PV cooling and efficiency enhancement integrating phase change materials based systems—A comprehensive review. *Solar Energy*, 197, 163-198.
- Al-Waeli, A.H., Sopian, K., Chaichan, M.T., Kazem, H.A., Hasan, H.A., Al-Shamani, A.N., 2017. An experimental investigation of SiC nanofluid as a basefluid for a photovoltaic thermal PV/T system. *Energy Convers. Manag.* 142, 547-558.
- Al-Waeli, A.H., Sopian, K., Chaichan, M.T., Kazem, H.A., Ibrahim, A., Mat, S., Ruslan, M.H., 2017. Evaluation of the nanofluid and nano-PCM based photovoltaic thermal (PVT) system: an experimental study. *Energy Convers. Manag.* 151, 693-708.
- Al-Waeli, A.H.A., Chaichan, M.T., Kazem, H.A., Sopian, K., 2017. Comparative study to use nano-(Al₂O₃, CuO, and SiC) with water to enhance photovoltaic thermal PV/T collectors. *Energy Convers. Manag.* 148, 963-973.
- Al-Waeli, A.H.A., Chaichan, M.T., Kazem, H.A., Sopian, K., Safaei, J., 2018. Numerical study on the effect of operating nanofluids of photovoltaic thermal system (PV/T) on the convective heat transfer. *Case Stud. Therm. Eng.* 12, 405-413.
- Al-Waeli, A.H.A., Kazem, H.A., Chaichan, M.T., Sopian, K., 2019. Experimental investigation of using nano-PCM/nanofluid on a photovoltaic thermal system (PVT): technical and economic study. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 11, 213-230.

- Al-Waeli, A.H.A., Sopian, K., Kazem, H.A., Chaichan, M.T., 2018. Nanofluid based grid connected PV/T systems in Malaysia: a techno-economical assessment. *Sustain. Energy Technol. Assessments* 28, 81-95.
- Al-Waeli, A.H.A., Sopian, K., Kazem, H.A., Yousif, J.H., Chaichan, M.T., Ibrahim, A., Mat, S., Ruslan, M.H., 2018. Comparison of prediction methods of PV/T nanofluid and nano-PCM system using a measured dataset and artificial neural network. *Sol. Energy* 162, 378-396.
- Bayrak, F., Oztop, H. F., Selimefendigil, F. (2020). Experimental study for the application of different cooling techniques in photovoltaic (PV) panels. *Energy Conversion and Management*, 212, 112789.
- Bayrak, F., Oztop, H.F., Selimefendigil, F., 2019. Effects of different fin parameters on temperature and efficiency for cooling of photovoltaic panels under natural convection. *Sol. Energy* 188, 484-494.
- Castanheira, A.F.A., Fernandes, J.F.P., Branco, P.J.C., 2018. Demonstration project of a cooling system for existing PV power plants in Portugal. *Appl. Energy* 211, 1297-1307.
- Chang, R. D., Zuo, J., Zhao, Z. Y., Zillante, G., Gan, X. L., & Soebarto, V. (2017). Evolving theories of sustainability and firms: History, future directions and implications for renewable energy research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 48-56.
- Chauhan, P.J., Reddy, B.D., Bhandari, S., Panda, S.K., 2019. Battery energy storage for seamless transitions of wind generator in standalone microgrid. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 55 (1), 69-77.
- Cronin, J., Anandarajah, G., Dessens, O. (2018). Climate change impacts on the energy system: a review of trends and gaps. *Climatic Change* 151, 79–93.
- El Mays, A., Ammar, R., Hawa, M., Akroush, M.A., Hachem, F., Khaled, M., Ramadan, M., 2017. Improving photovoltaic panel using finned plate of aluminum. *Energy Procedia* 119, 812-817.
- Elminshawy, N.A.S., El Ghandour, M., Gad, H.M., El-Damhogi, D.G., El-Nahhas, K., Addas, M.F., 2019. The performance of a buried heat exchanger system for PV panel cooling under elevated air temperatures. *Geothermics* 82, 7-15.
- Fan, W., Kokogiannakis, G., Ma, Z., Cooper, P., 2017. Development of a dynamic model for a hybrid photovoltaic thermal collector e solar air heater with fins. *Renew. Energy* 101, 816-834.

- Fuentes, M., Vivar, M., de la Casa, J., Aguilera, J., 2018. An experimental comparison between commercial hybrid PV-T and simple PV systems intended for BIPV. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 93, 110-120.
- Gao, Y., Hu, G., Zhang, Y., Zhang, X. (2022). An experimental study of a hybrid photovoltaic thermal system based on ethanol phase change self-circulation technology: Energy and exergy analysis. *Energy*, 238, 121663.
- Grubisic-Cabo, F., Nizetic, S., Coko, D., Marinic Kragic, I., Papadopoulos, A., 2018. Experimental investigation of the passive cooled free-standing photovoltaic panel with fixed aluminum fins on the backside surface. *J. Clean. Prod.* 176, 119-129.
- Hasanuzzaman, M., Malek, A.B.M.A., Islam, M.M., Pandey, A.K., Rahim, N.A., 2016. Global advancement of cooling technologies for PV systems: a review. *Sol. Energy* 137, 25-45.
- Hernandez-Perez, J.G., Carrillo, J.G., Bassam, A., Flota-Banuelos, M., Patino- Lopez, L.D., 2020. A new passive PV heatsink design to reduce efficiency losses: a computational and experimental evaluation. *Renew. Energy* 147, 1209-1220.
- Hoang, S. (2017). The Environmental History of Solar Photovoltaic Cells. Disponível: <https://repository.wellesley.edu/islandora/object/ir%3A1017/datastream/PDF/view> (Acessado em Novembro/2021)
- Hu, J., Chen, W., Yang, D., Zhao, B., Song, H., Ge, B., 2016. Energy performance of ETFE cushion roof integrated photovoltaic/thermal system on hot and cold days. *Appl. Energy* 173, 40-51.
- Ibn-Mohammed, T., Koh, S.C.L., Reaney, I.M., Acquaye, A., Schileo, G., Mustapha, K.B., Greenough, R., 2017. Perovskite solar cells: an integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 80, 1321-1344.
- Japs, E., Sonnenrein, G., Krauter, S., Vrabec, J., 2016. Experimental study of phase change materials for photovoltaic modules: energy performance and economic yield for the EPEX spot market. *Sol. Energy* 140, 51-59.
- Jean, J., Brown, P.R., Jaffe, R.L., Buonassisi, T., Bulovic, V., 2015. Pathways for solar photovoltaics. *Energy Environ. Sci.* 8 (4), 1200-1219.
- Joshi, S.S., Dhoble, A.S., 2018. Photovoltaic -Thermal systems (PVT): technology review and future trends. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 92, 848-882.

- Kabeel, A.E., Abdelgaied, M., Sathyamurthy, R., 2019. A comprehensive investigation of the optimization cooling technique for improving the performance of PV module with reflectors under Egyptian conditions. *Sol. Energy* 186, 257-263.
- Kazemian, A., Hosseinzadeh, M., Sardarabadi, M., Passandideh-Fard, M., 2018. Effect of glass cover and working fluid on the performance of photovoltaic thermal (PVT) system: an experimental study. *Sol. Energy* 173, 1002-1010.
- Khanna, S., Newar, S., Sharma, V., Reddy, K.S., Mallick, T.K., 2019. Optimization of fins fitted phase change material equipped solar photovoltaic under various working circumstances. *Energy Convers. Manag.* 180, 1185-1195.
- Khanna, S., Reddy, K.S., Mallick, T.K., 2018b. Optimization of finned solar photovoltaic phase change material (finned pv pcm) system. *Int. J. Therm. Sci.* 130, 313-322.
- Krishan, O., Suhag, S., 2019. Techno-economic analysis of a hybrid renewable energy system for an energy poor rural community. *J. Energy Storage* 23, 305-319.
- Lu, W., Liu, Z., Flor, J.-F., Wu, Y., Yang, M., 2018. Investigation on designed finsenhanced phase change materials system for thermal management of a novel building integrated concentrating PV. *Appl. Energy* 225, 696-709.
- Ma, T., Li, Z., Zhao, J., 2019. Photovoltaic panel integrated with phase change materials (PV-PCM): technology overview and materials selection. *Renew. Sustain Energy Rev.* 116, 109406.
- Mahdi, J. M., Singh, R. P., Al-Najjar, H. M. T., Singh, S., Nsofor, E. C., 2021. Efficient thermal management of the photovoltaic/phase change material system with innovative exterior metal-foam layer. *Solar Energy*, 216, 411-427.
- Nahar, A., Hasanuzzaman, M., Rahim, N.A., 2017. Numerical and experimental investigation on the performance of a photovoltaic thermal collector with parallel plate flow channel under different operating conditions in Malaysia. *Sol. Energy* 144, 517-528.
- Nasrin, R., Hasanuzzaman, M., Rahim, N.A., 2018. Effect of high irradiation and cooling on power, energy and performance of a PVT system. *Renew. Energy* 116, 552-569.
- Nelson, J., 2003. *The Physics of Solar Cells*. World Scientific Publishing Company.
- Nizetic, S., Arıcı, M., Bilgin, F., Grubisic-Cabo, F., 2018. Investigation of pork fat as potential novel phase change material for passive cooling applications in photovoltaics. *J. Clean. Prod.* 170, 1006-1016.

- Nizetic, S., Coko, D., Yadav, A., Grubisic-Cabo, F., 2016. Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: the performance response. *Energy Convers. Manag.* 108, 287-296.
- Nizetic, S., Giama, E., Papadopoulos, A.M., 2018. Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part II: active cooling techniques. *Energy Convers. Manag.* 155, 301-323.
- Nizetic, S., Papadopoulos, A.M., Giama, E., 2017. Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part I: passive cooling techniques. *Energy Convers. Manag.* 149, 334-354.
- Pang, W., Cui, Y., Zhang, Q., Yu, H., Zhang, L., Yan, H., 2019. Experimental effect of high mass flow rate and volume cooling on performance of a water-type PV/T collector. *Sol. Energy* 188, 1360-1368.
- Parida, B., Iniyar, S., Goic, R., 2011. A review of solar photovoltaic technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (3), 1625-1636.
- Placzek-Popko, E., 2017. Top PV market solar cells 2016. *Opto-Electron. Rev.* 25 (2), 55-64.
- Preet, S., Bhushan, B., Mahajan, T., 2017. Experimental investigation of water based photovoltaic/thermal (PV/T) system with and without phase change material (PCM). *Sol. Energy* 155, 1104-1120.
- Rahman, M.M., Hasanuzzaman, M., Rahim, N.A., 2015. Effects of various parameters on PV-module power and efficiency. *Energy Convers. Manag.* 103, 348-358.
- Ranabhat, K., Patrikeev, L., Antal'evna-Revina, A., Andrianov, K., Lapshinsky, V., & Sofronova, E. (2016). An introduction to solar cell technology. *Journal of Applied Engineering Science*, 14(4), 481-491.
- Sajjad, U., Amer, M., Ali, H.M., Dahiya, A., Abbas, N., 2019. Cost effective cooling of photovoltaic modules to improve efficiency. *Case Stud. Therm. Eng.* 14, 100420.
- Salem, M.R., Elsayed, M.M., Abd-Elaziz, A.A., Elshazly, K.M., 2019. Performance enhancement of the photovoltaic cells using Al₂O₃/PCM mixture and/or water cooling-techniques. *Renew. Energy* 138, 876-890.
- Sarafraz, M.M.; Safaei, M.R.; Leon, A.S.; Tlili, I.; Alkanhal, T.A.; Tian, Z.; Goodarzi, M.; Arjomandi, M. Experimental Investigation on Thermal Performance of a PV/T-PCM (Photovoltaic/Thermal) System Cooling with a PCM and Nanofluid. *Energies* 2019, 12, 2572.

- Saxena, A., Deshmukh, S., Nirali, S., Wani, S., 2018. Laboratory based experimental investigation of photovoltaic (PV) thermo-control with water and its proposed real-time implementation. *Renew. Energy* 115, 128-138.
- Schmidtke, J., 2010. Commercial status of thin-film photovoltaic devices and materials. *Optic Express* 18 (Suppl. 3).
- Selimefendigil, F., Bayrak, F., Oztop, H.F., 2018. Experimental analysis and dynamic modeling of a photovoltaic module with porous fins. *Renew. Energy* 125, 193-205.
- Senthil Kumar, J., Charles Raja, S., Jeslin Drusila Nesamalar, J., Venkatesh, P., 2018. Optimizing renewable based generations in AC/DC microgrid system using hybrid Nelder-Mead e cuckoo Search algorithm. *Energy* 158, 204-215.
- Siecker, J., Kusakana, K., Numbi, B.P., 2017. A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 79, 192-203.
- Sultan, S.M., Ervina Efzan, M.N., 2018. Review on recent Photovoltaic/Thermal (PV/T) technology advances and applications. *Sol. Energy* 173, 939-954.
- Tao, M., 2008. Inorganic photovoltaic solar cells: silicon and beyond. *Electrochem. Soc. Interface* 17, 30-35.
- Tashtoush, B., Al-Oqool, A., 2019. Factorial analysis and experimental study of water-based cooling system effect on the performance of photovoltaic module. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 16 (7), 3645-3656.
- Teo, H.G., Lee, P.S., Hawlader, M.N.A., 2012. An active cooling system for photovoltaic modules. *Appl. Energy* 90 (1), 309-315.
- Wang, Y., Zhou, S., Huo, H., 2014. Cost and CO₂ reductions of solar photovoltaic power generation in China: perspectives for 2020. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 39, 370-380.
- Waqas, A., Ji, J., 2017. Thermal management of conventional PV panel using PCM with movable shutters e a numerical study. *Sol. Energy* 158, 797-807.
- Wrigley, E. (2010). *Energy and the English Industrial Revolution*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511779619
- Xiao, M., Tang, L., Zhang, X., Lun, I. Y. F., Yuan, Y. (2018). A review on recent development of cooling technologies for concentrated photovoltaics (CPV) systems. *Energies*, 11(12), 3416.
- Yau, Y.H., Lim, K.S., 2016. Energy analysis of green office buildings in the tropicsdphotovoltaic system. *Energy Build.* 126, 177-193.

- Yousef, M. S., Sharaf, M., Huzayyin, A. S. (2022). Energy, exergy, economic, and enviroeconomic assessment of a photovoltaic module incorporated with a paraffin-metal foam composite: An experimental study. *Energy*, 238, 121807.
- Yuan, W., Ji, J., Li, Z., Zhou, F., Ren, X., Zhao, X., Liu, S., 2018. Comparison study of the performance of two kinds of photovoltaic/thermal(PV/T) systems and a PV module at high ambient temperature. *Energy* 148, 1153-1161.
- Zilli, B.M., Lenz, A.M., de Souza, S.N.M., Secco, D., Nogueira, C.E.C., Junior, O.H.A., Nadaleti, W.C., Siqueira, J.A.C., Gurgacz, F., 2018. Performance and effect of water-cooling on a microgeneration system of photovoltaic solar energy in Paraná, Brazil. *J. Clean. Prod.* 192, 477-485.