



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Nuno Miguel Silva Sousa

Influência da Temperatura no Rendimento de Módulos Fotovoltaicos: Análise Experimental



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Nuno Miguel Silva Sousa

Influência da Temperatura no Rendimento de Módulos Fotovoltaicos: Análise Experimental

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Área de especialização em tecnologias energéticas e
ambientais

Trabalho efetuado sob a orientação do(a):

Professor Doutor José Carlos Teixeira

Professora Doutora Flávia Vieira Barbosa

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial

CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Este trabalho reflete todo o esforço e dedicação investidos na conclusão da etapa final do meu percurso acadêmico. No entanto, esta jornada não teria sido possível sem o contributo indispensável de muitas partes, às quais faço questão de deixar o meu profundo agradecimento.

Primeiramente, gostaria de expressar a mais profunda gratidão ao meu orientador, Professor Doutor José Carlos Teixeira, pelo seu apoio imensurável, paciência e feedback construtivo, que foram essenciais para a conclusão bem-sucedida desta investigação. A sua sabedoria e experiência enriqueceram significativamente a qualidade deste trabalho. Agradeço pelo suporte e motivação, e por me ter proporcionado a oportunidade de integrar um projeto numa área de interesse pessoal, que me permitiu reconhecer o contributo real da mesma. Manifesto também o meu sincero agradecimento à minha coorientadora, Professora Doutora Flávia Barbosa, pelas valiosas lições profissionais e pessoais, comentários construtivos e conselhos sábios e amigáveis. A sua confiança no meu trabalho, apesar da distância física, foi fundamental para que pudesse produzir um trabalho de qualidade.

Ao Diogo Oliveira, um agradecimento especial pela disponibilidade, boa vontade, paciência e apoio no laboratório ao longo de todo o processo, assim como pelos momentos de amizade e companhia. Gostaria também de manifestar a minha gratidão ao Eng. Carlos Costa pelo apoio prestado e conhecimento partilhado. Os seus conselhos e companheirismo foram determinantes ao longo desta jornada.

Aos meus amigos e familiares, reconhecer o papel fundamental desempenhado ao longo de toda esta etapa tão importante da minha vida. Um agradecimento especial aos meus amigos mais próximos, pela sua companhia, crença nas minhas capacidades e sobretudo pelas memórias criadas para além do ambiente académico. À minha namorada, manifesto uma enorme gratidão pelo seu apoio constante, amor, compreensão e paciência, encorajando-me continuamente, independentemente do quão difícil parecia o futuro. Sem o seu incentivo e o seu abraço, nada disto teria sido alcançável.

Por último, estendo a minha mais profunda gratidão aos meus pais, por acreditarem em mim e me proporcionarem um apoio inabalável em cada etapa da minha vida. À minha mãe, um agradecimento especial por todo o carinho e atenção que demonstrou durante os momentos mais exigentes ao longo do curso de Engenharia Mecânica.

A todos, o meu sincero e profundo agradecimento!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

STATEMENT OF INTEGRITY

I hereby declare having conducted this academic work with integrity. I confirm that I have not used plagiarism or any form of misuse or falsification of information or results at any stage of its development.

I further declare that I have fully acknowledged the Code of Ethical Conduct of the University of Minho.

RESUMO

A crescente necessidade de otimizar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos tem incentivado o desenvolvimento de tecnologias que permitam uma melhor monitorização do seu desempenho energético. O aumento da temperatura de operação dos painéis fotovoltaicos representa um dos principais desafios para a sua eficiência, sendo responsável por uma redução significativa na potência fornecida. Neste contexto, a presente dissertação centra-se no desenvolvimento de um sistema de monitorização *open source*, concebido para recolher e analisar, em tempo real, variáveis críticas como temperatura, corrente elétrica, tensão elétrica e radiação solar, permitindo uma avaliação detalhada do comportamento térmico e energético de um sistema fotovoltaico autónomo.

O principal objetivo consistiu na implementação de um sistema de monitorização de baixo custo e fácil integração, capaz de quantificar a influência da temperatura dos módulos fotovoltaicos na potência fornecida pelos mesmos. A metodologia adotada envolveu uma caracterização detalhada de todo o tipo de sistemas fotovoltaicos, o desenvolvimento do sistema de monitorização utilizando sensores acessíveis e um microcontrolador para aquisição e processamento de dados. Foram realizadas medições em condições ambientais reais, permitindo a análise do impacto térmico sobre o desempenho do painel e a determinação de coeficientes de temperatura específicos para diferentes intervalos de radiação solar.

Além da monitorização do sistema fotovoltaico, foram idealizados dois sistemas de arrefecimento, um passivo e outro ativo, como possíveis soluções para mitigar os efeitos do sobreaquecimento. Apesar de não terem sido implementados, foi discutida a possibilidade de expandir o sistema de monitorização desenvolvido, integrando sensores adicionais para a avaliação da eficácia destas soluções térmicas.

Os resultados experimentais confirmam a influência direta da temperatura na eficiência do painel fotovoltaico, evidenciando perdas de potência superiores a 20% em períodos de radiação média-alta. O sistema de monitorização demonstrou ser uma ferramenta eficaz para a análise do comportamento térmico do painel, proporcionando uma base sólida para futuras investigações no setor da energia solar. Conclui-se que este estudo contribui para o avanço do conhecimento na monitorização e avaliação térmica de sistemas fotovoltaicos, servindo como referência para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e sustentáveis.

PALAVRAS-CHAVE

ARREFECIMENTO; MONITORIZAÇÃO; POTÊNCIA ELÉTRICA; SISTEMAS FOTOVOLTAICOS; TEMPERATURA.

ABSTRACT

The growing need to optimize the efficiency of photovoltaic systems has driven the development of technologies that enable improved monitoring of their energy performance. The increase in operating temperature of photovoltaic modules is one of the main challenges to their efficiency, significantly reducing the power output. In this context, this dissertation focuses on the development of an open-source monitoring system, designed to collect and analyze, in real time, critical variables such as temperature, electrical current, electrical voltage, and solar radiation, allowing for a detailed assessment of the thermal and energy behavior of an autonomous photovoltaic system.

The main objective was the implementation of a low-cost and easily integrable system capable of quantifying the influence of module temperature on the power output. The adopted methodology included a detailed characterization of different photovoltaic systems, the development of the monitoring system using accessible sensors, and a microcontroller for data acquisition and processing. Measurements were carried out under real environmental conditions, enabling the analysis of thermal impact on panel performance and the determination of specific temperature coefficients for different solar radiation intervals.

In addition to photovoltaic system monitoring, two cooling systems, one passive and one active, were conceptualized as potential solutions to mitigate overheating effects. Although these systems were not implemented, the possibility of expanding the developed monitoring system to integrate additional sensors for evaluating the effectiveness of these thermal solutions was discussed.

The experimental results confirm the direct influence of temperature on photovoltaic panel efficiency, revealing power losses exceeding 20% during medium to high radiation periods. The monitoring system proved to be an effective tool for analyzing the thermal behavior of the panel, providing a solid foundation for future research in the solar energy sector. It is concluded that this study contributes to the advancement of knowledge in the monitoring and thermal evaluation of photovoltaic systems, serving as a reference for the development of more efficient and sustainable solutions

KEYWORDS

COOLING; MONITORING; ELECTRICAL POWER; PHOTOVOLTAIC SYSTEMS; TEMPERATURE.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Índice.....	vi
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas	xi
Lista de Símbolos	xii
1. Introdução	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Guia de Leitura	3
2. Estado da arte e Revisão de literatura.....	5
2.1. Sistemas Fotovoltaicos.....	5
2.1.1. Princípio de funcionamento	5
2.1.2. Tipos de células fotovoltaicas.....	6
2.1.3. Componentes dos Sistemas Fotovoltaicos	8
2.1.4. Classificação dos Sistemas Fotovoltaicos	11
2.1.4.1. Sistemas Fotovoltaicos <i>On-Grid</i>	11
2.1.4.2. Sistemas Fotovoltaicos Off-Grid	12
2.1.4.3. Sistemas Fotovoltaicos Híbridos	13
2.1.5. Transferência de calor em sistemas fotovoltaicos	15
2.1.5.1. Condução.....	15
2.1.5.2. Convecção.....	16
2.1.5.3. Radiação	17
2.2. Métodos de Arrefecimento de Painéis Fotovoltaicos	18
2.2.1. Arrefecimento Passivo	20
2.2.2. Arrefecimento Ativo	22

2.3.	Monitorização de Sistemas Fotovoltaicos	25
3.	Materiais e Métodos do Sistema de monitorização	28
3.1.	Parâmetros.....	28
3.2.	Componentes e Funcionamento do Sistema	29
3.3.	Hardware.....	30
3.3.1.	Arduino	30
3.3.2.	Adafruit Datalogger Shield.....	32
3.3.3.	Sensor de temperatura	33
3.3.4.	Sensor de Corrente.....	34
3.3.5.	Divisor de Tensão	34
3.3.6.	Piranómetro SPN1 e Datalogger GP1	35
3.4.	Software	37
3.4.1.	Arduino IDE.....	37
3.4.2.	DeltaLINK.....	37
3.5.	Aplicação do Sistema de Monitorização	37
3.5.1.	Instalação Exterior	38
3.5.2.	Instalação Interior.....	39
3.5.3.	Código do Arduino.....	41
3.6.	Procedimento Experimental.....	43
3.6.1.	Período e Condições de Monitorização	43
3.6.2.	Método Experimental.....	45
4.	Análise e Discussão de Resultados do Sistema de Monitorização	47
4.1.	Comportamento Geral do Sistema.....	47
4.1.1.	Céu Limpo	48
4.1.2.	Céu Parcialmente Nublado	49
4.1.3.	Céu Completamente Nublado	51
4.2.	Influência da Temperatura na Potência Fornecida	52

4.2.1.	Análise Gráfica e Cálculo dos Coeficientes de Temperatura	52
4.2.1.1.	Intervalo de Radiação: 200-299 W/m ²	52
4.2.1.2.	Intervalo de Radiação: 300-399 W/m ²	54
4.2.1.3.	Intervalo de Radiação: 400-499 W/m ²	55
4.2.1.4.	Intervalo de Radiação: 500-599 W/m ²	56
4.2.1.5.	Intervalo de Radiação: 600-699 W/m ²	57
4.2.2.	Discussão dos Resultados Obtidos	58
4.3.	Limitações e Desafios Associados ao Sistema de Monitorização.....	60
5.	Projeto dos sistemas de arrefecimento	63
5.1.	Princípios de Funcionamento	63
5.1.1.	Arrefecimento Passivo: Convecção Natural.....	63
5.1.2.	Arrefecimento Ativo: Convecção Forçada.....	65
5.2.	Monitorização dos Sistemas de Arrefecimento	66
5.3.	Limitações Associadas aos Sistemas de Arrefecimento	68
6.	Considerações finais	70
6.1.	Conclusões.....	70
6.2.	Perspetivas e Trabalhos Futuros.....	71
	Referências Bibliográficas	73
	Anexos	80
	Anexo A: Código desenvolvido para o sistema de monitorização	81
	Anexo B: Valores registados pelo sistema de monitorização.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do interior de uma célula fotovoltaica (Labrique, s.d.)	6
Figura 2 – Célula fotovoltaica monocristalina (Labrique, s.d.).....	6
Figura 3 – Célula fotovoltaica policristalina (Labrique, s.d.)	7
Figura 4 – Módulo de células fotovoltaicas de filme fino (Labrique s.d.)	7
Figura 5 – Módulo fotovoltaico e componentes (Arabach 2019)	8
Figura 6 – Micro-inversor fotovoltaico (Paulo 2019)	9
Figura 7 – Bateria de chumbo-ácido.....	10
Figura 8 – Controlador de carga.....	10
Figura 9 – Componentes de um sistema fotovoltaico on-grid (Svarc, 2020).....	12
Figura 10 – Componentes de um sistema fotovoltaico <i>off-grid</i> (Svarc, 2020).....	13
Figura 11 – Componentes de um sistema fotovoltaico híbrido (Svarc, 2020)	14
Figura 12 – Esquema de um sistema híbrido solar-eólico	14
Figura 13 – Transferência de calor num painel solar fotovoltaico	15
Figura 14 – Transferência de calor por condução (Cengel, 2002)	16
Figura 15 – Representação esquemática da convecção forçada e natural (Mathieu, 2018)	17
Figura 16 – Instalação fotovoltaica incorporada com sistema de arrefecimento com ar geotérmico (Elminshawy et al., 2019)	23
Figura 17 – Arquitetura de sistemas de monitorização	27
Figura 18 – Diagrama da arquitetura do sistema e direção do fluxo de informação	30
Figura 19 – Arduino Mega 2560 R3	32
Figura 20 – Adafruit <i>Datalogger shield</i>	33
Figura 21 – Termopar tipo K incorporado com módulo MAX6675.....	33
Figura 22 – Sensor de Corrente ACS712 de 20 A	34
Figura 23 – Piranómetro SPN1 da Delta-T Devices	36
Figura 24 – Datalogger GP1 da Delta-T Devices.....	36
Figura 25 – Componentes da instalação exterior no telhado do DEM	38
Figura 26 – Fixação do termopar tipo K ao painel fotovoltaico.....	39
Figura 27 – Componentes presentes na instalação interior.....	40
Figura 28 – Close-up das Interações Arduino - Datalogging Shield - Sensores.....	41

Figura 29 – Algoritmo do código utilizado no Arduino IDE	42
Figura 30 – Condições meteorológicas durante o mês de outubro, em Guimarães (fonte: https://www.meteoblue.com/pt/tempo/semana/guimarães_portugal_2738752)	44
Figura 31 – Condições meteorológicas durante o mês de novembro, em Guimarães (fonte: https://www.meteoblue.com/pt/tempo/semana/guimarães_portugal_2738752)	44
Figura 32 – Variação da radiação solar e da temperatura do painel ao longo de um dia de céu limpo (23/10/2024).....	48
Figura 33 – Variação da radiação solar e da potência do painel ao longo de um dia de céu limpo (23/10/2024).....	49
Figura 34 – Variação da radiação solar e da temperatura do painel ao longo de um dia de céu parcialmente nublado (26/10/2024).....	50
Figura 35 – Variação da radiação solar e da potência do painel ao longo de um dia de céu parcialmente nublado (26/10/2024).....	50
Figura 36 – Variação da radiação solar e da temperatura do painel ao longo de um dia de céu completamente nublado (01/11/2024).....	51
Figura 37 – Variação da radiação solar e da potência do painel ao longo de um dia de céu completamente nublado (01/11/2024).....	51
Figura 38 – Relação entre a temperatura do painel e a potência fornecida para níveis de radiação $\in [200;299] \text{ W/m}^2$	53
Figura 39 – Relação entre a temperatura do painel e a potência fornecida para níveis de radiação $\in [300;399] \text{ W/m}^2$	54
Figura 40 – Relação entre a temperatura do painel e a potência fornecida para níveis de radiação $\in [400;499] \text{ W/m}^2$	55
Figura 41 – Relação entre a temperatura do painel e a potência fornecida para níveis de radiação $\in [500;599] \text{ W/m}^2$	56
Figura 42 – Relação entre a temperatura do painel e a potência fornecida para níveis de radiação $\in [600;699] \text{ W/m}^2$	57
Figura 43 – Esquema da chaminé criada para a promoção da convecção natural.....	64
Figura 44 – Esquema do sistema de arrefecimento ativo proposto.....	65
Figura 45 – Sensor de pressão BMP280.....	67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de temperatura obtidos para os diferentes intervalos de radiação solar incidente	58
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas, abreviaturas e acrónimos

AC/DC	Corrente alternada/corrente contínua;
BIPV	Building Integrated Photovoltaics
CS	Chip Select;
CSV	Comma-Separated Values;
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho;
I2C	Inter-Integrated Circuit;
IDE	Integrated Development Environment;
ISO	International Organization of Standardization;
MPPT	Maximum Power Point Tracking;
PCM	Phase Change Materials;
PV	Fotovoltaicos;
RTC	Real-Time Clock;
SCK	Serial Clock;
SD	Secure Digital;
SO	Serial Out
SPI	Serial Peripheral Interface;
SRAM	Static Random Access Memory;
TMS	Thin Sheet Metal
UML	Unified Modeling Language;
USB	Universal Serial Bus;

Nomenclatura

A	área da secção transversal (m^2);
ΔP	diferença de pressão (Pa);
I	corrente elétrica (A);
$\dot{m}$	caudal mássico (kg/s);
P	potência elétrica (W);
P	pressão dinâmica do ar (Pa);
Q	caudal volumétrico (m^3/s);
R	resistência elétrica (Ω);
Re	número de Reynolds;
U	tensão elétrica (V);
v	velocidade do ar (m/s);
V_{out}	tensão lida pelo Arduino (V);
V_{in}	tensão debitada pelo módulo PV (V);
γ	coeficiente de temperatura (W/°C ou %/°C);
ρ	massa volúmica (kg/ m^3);

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a transição para fontes de energia renovável tem recebido atenção significativa em resposta aos desafios impostos pelas alterações climáticas e à necessidade de reduzir as emissões de carbono. Entre as várias fontes de energia renovável, a energia solar fotovoltaica destaca-se como uma solução promissora devido à sua capacidade de converter a radiação solar em eletricidade e calor (Zhao et al., 2011). Este crescimento tem sido impulsionado por avanços tecnológicos que reduziram custos e aumentaram a eficiência dos sistemas fotovoltaicos, levando a uma expansão considerável da capacidade instalada globalmente (Masson et al., 2024). Contudo, para garantir a eficiência a longo prazo e mitigar problemas decorrentes do sobreaquecimento e da degradação térmica, torna-se indispensável desenvolver sistemas eficazes de monitorização e arrefecimento dos módulos fotovoltaicos (Ansari et al., 2021a). As células fotovoltaicas convertem apenas uma fração da energia solar recebida em eletricidade – tipicamente cerca de 15 % a 20 % – enquanto a maior parte é dissipada como calor. Este calor residual eleva a temperatura dos módulos, causando uma redução significativa na eficiência de conversão e acelerando a sua degradação (Amin et al., 2009). Estudos indicam que a temperatura dos módulos pode exceder em até 30°C a temperatura ambiente em dias de elevada radiação solar, o que se traduz em perdas consideráveis na produção de energia elétrica (Oh et al., 2018). Para enfrentar este problema, diversas técnicas de arrefecimento têm sido investigadas, incluindo métodos que utilizam ar e água como fluidos de refrigeração, sistemas híbridos e abordagens inovadoras como a utilização de materiais de mudança de fase (Maleki et al., 2020). Estas soluções têm como objetivo reduzir a temperatura de operação, aumentar a potência fornecida pelos módulos e prolongar a sua vida útil. Entre as técnicas de arrefecimento, os sistemas baseados em ar apresentam vantagens significativas, especialmente pela sua simplicidade e menor custo (Chandrasekar et al., 2013).

Paralelamente, os sistemas de monitorização desempenham um papel central na gestão e operação de sistemas fotovoltaicos (Madeti e Singh, 2017). A monitorização em tempo real de variáveis críticas, como temperatura, corrente, tensão e radiação solar, fornece dados essenciais para avaliar a eficiência energética dos módulos fotovoltaicos e identificar potenciais problemas, como degradação ou falhas nos sistemas (Paredes-Parra et al., 2018). Avanços recentes em tecnologias de monitorização, incluindo o uso de sensores inteligentes e algoritmos baseados em inteligência artificial, têm permitido melhorar significativamente a precisão na previsão da produção de energia e na deteção de falhas (Ansari et al., 2021). Contudo, a maioria dos sistemas convencionais de monitorização depende de fontes

externas de energia, como baterias ou ligações à rede elétrica, o que aumenta a complexidade e os custos operacionais (Lee e Park 2024).

Em paralelo com os avanços tecnológicos, o contexto português tem vindo a proporcionar condições favoráveis à integração de sistemas fotovoltaicos. Através de instrumentos regulatórios como as Unidades de Produção para Autoconsumo (UPACs) e as Unidades de Pequena Produção (UPPs), promove-se a descentralização da produção de energia, permitindo aos consumidores produzir e consumir a sua própria eletricidade. Estes modelos contribuem para a redução da dependência energética e para uma maior eficiência no aproveitamento dos recursos solares disponíveis. De acordo com a Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG), a potência total instalada em sistemas solares fotovoltaicos em Portugal ultrapassava os 3,3 GW no final de 2023, com uma crescente percentagem proveniente de instalações de autoconsumo. Neste cenário, a investigação de soluções acessíveis, autónomas e eficazes para monitorização e arrefecimento dos módulos fotovoltaicos torna-se particularmente relevante, promovendo a sustentabilidade e a viabilidade técnica de instalações solares a pequena e média escala.

1.1. OBJETIVOS

Considerando o aumento do interesse da produção de energia elétrica a partir da conversão da radiação solar e todas as limitações associadas a este tipo de sistemas, o principal objetivo deste estudo é investigar e caracterizar o comportamento térmico e energético de uma instalação fotovoltaica, desenvolvida em condições ambientais reais. Deste modo, os objetivos específicos para este projeto incluem:

- Desenvolvimento de um sistema de monitorização *open-source*: Implementação de um sistema de baixo custo para recolha, análise e armazenamento de dados relativos à operação dos módulos fotovoltaicos, utilizando sensores de temperatura, corrente, tensão e radiação solar.
- Caracterização do comportamento térmico dos módulos fotovoltaicos: Análise do impacto das condições ambientais, como a radiação solar e a temperatura ambiente, na temperatura de operação do sistema fotovoltaico.
- Avaliação do impacto da temperatura na potência fornecida pelo painel fotovoltaico: Identificação de padrões e relações entre o aumento da temperatura dos módulos e a redução da potência fornecida, utilizando os dados recolhidos pelo sistema de monitorização desenvolvido.

- Exploração de estratégias de arrefecimento: Idealização de dois sistemas de arrefecimento – passivo e ativo – como soluções para mitigar os efeitos do sobreaquecimento.
- Avaliação do potencial de expansão do sistema de monitorização desenvolvido: Inclusão de novos sensores que permitam analisar a eficiência dos sistemas de arrefecimento propostos.

1.2. GUIA DE LEITURA

Esta dissertação foca-se no desenvolvimento e aplicação de um sistema de monitorização *open source* para avaliar o desempenho térmico e energético de uma instalação fotovoltaica em condições ambientais reais. Além disso, é apresentada a idealização de dois sistemas de arrefecimento, enfatizando a integração futura de sensores adicionais para monitorização térmica mais detalhada. Para organizar este trabalho, a dissertação está estruturada em seis capítulos principais.

O primeiro capítulo apresenta a motivação e os principais objetivos deste estudo. É destacada a importância de sistemas de monitorização em instalações fotovoltaicas para avaliar e otimizar a eficiência energética, bem como para identificar soluções de arrefecimento que possam mitigar os efeitos térmicos adversos.

O segundo capítulo é dedicado à revisão da literatura no contexto desta dissertação. Inicialmente, é descrito o estado da arte de sistemas fotovoltaicos, incluindo tipo de células fotovoltaicas, tipo de instalações e formas de transferência de calor existentes. Posteriormente, é analisada a literatura sobre métodos de arrefecimento, focando especificamente nos sistemas de arrefecimento a ar, tanto passivos quanto ativos, abordando os princípios de funcionamento, eficiência térmica e integração em sistemas fotovoltaicos. Por fim, é também realizada uma breve revisão sobre sistemas de monitorização em instalações fotovoltaicas, abordando a sua evolução, arquitetura, principais tecnologias utilizadas e diferenças entre soluções comerciais e de baixo custo.

O terceiro capítulo descreve o sistema de monitorização desenvolvido, todos os componentes utilizados e os métodos de recolha e análise de dados. Também são detalhados os procedimentos experimentais realizados, os métodos adotados, os softwares utilizados e as condições de funcionamento da instalação fotovoltaica monitorizada.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados da análise térmica e energética do sistema fotovoltaico monitorizado. É analisado o comportamento geral do painel em dias típicos e a relação entre a temperatura de operação dos módulos e a potência fornecida, utilizando os dados recolhidos pelo

sistema desenvolvido. Também é realizada uma comparação entre as diferentes faixas de radiação solar e seus efeitos na potência fornecida pelo sistema.

O quinto capítulo aborda a idealização de dois sistemas de arrefecimento – passivo e ativo – baseados nos princípios de convecção natural e forçada. São apresentados os princípios de funcionamento de cada solução e é discutida a expansão do sistema de monitorização com a integração de sensores adicionais para avaliação do desempenho dos sistemas de arrefecimento.

Finalmente, o sexto capítulo fornece as conclusões mais relevantes deste estudo e as diferentes perspectivas para futura investigação nesta área.

2. ESTADO DA ARTE E REVISÃO DE LITERATURA

2.1. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos representam uma das principais tecnologias no campo das energias renováveis, com crescente aplicação em diversas áreas devido à sua capacidade de converter diretamente a radiação solar em eletricidade. Esta conversão ocorre através do efeito fotovoltaico, um fenômeno físico observado em materiais semicondutores que, quando expostos à luz, geram uma corrente elétrica. Compostos por células fotovoltaicas, os painéis captam a energia solar e transformam-na em corrente elétrica contínua (DC), que pode ser utilizada diretamente em sistemas isolados ou convertida em corrente alternada (AC) para ser integrada à rede elétrica. A eficiência na conversão de energia, a durabilidade dos materiais e o custo de instalação são alguns dos fatores que influenciam a viabilidade e o desempenho dos painéis fotovoltaicos (Reinders Angèle et al., 2017).

Além de contribuírem para a redução das emissões de gases de efeito estufa, os painéis fotovoltaicos têm se destacado pela sua flexibilidade de aplicação, desde pequenos sistemas em residências até grandes plantas solares em escala industrial. A contínua evolução tecnológica tem permitido o aumento da potência elétrica fornecida pelo painel, e consequente aumento do rendimento energético, e a diminuição dos custos de produção, tornando essa solução uma escolha atrativa para atender à procura crescente por fontes de energia sustentáveis (Shubbak. 2019).

2.1.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Os painéis fotovoltaicos são constituídos por módulos de células fotovoltaicas que contêm materiais semicondutores (silício, o arsenieto de gálio, telurieto de cádmio ou disselenieto de cobre, índio e selênio) (Maiti et al., 2020). O tipo de células mais utilizados são as de silício cristalino que está presente em mais de 90 % de todas as células solares existentes no mundo (Serra Borges, 2024). A célula fotovoltaica é composta por duas camadas de material semicondutor constituídas de formas diferentes:

- Na camada N (negativa), existe um excesso de elétrons periféricos.
- Na camada P (positiva), existe um déficit de elétrons.

Desta forma, existe uma diferença de potencial entre as duas camadas. Os elétrons periféricos da camada N, ao captarem a energia dos fótons de luz provenientes do Sol, saltam a barreira de potencial e criam uma corrente contínua. Para conduzir esta corrente, existem dois elétrodos nas camadas de

semicondutor, onde o elétron superior é em forma de grelha para ser possível a passagem dos raios luminosos. Adicionalmente, uma camada antirreflexo é depositada sobre este elétron com o intuito de maximizar a quantidade de luz absorvida. (Labrique s.d.)

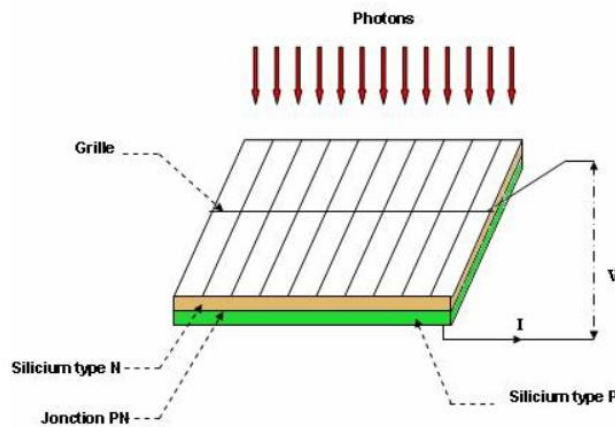


Figura 1 – Esquema do interior de uma célula fotovoltaica (Labrique, s.d.)

2.1.2. TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

As células fotovoltaicas presentemente mais disseminadas no mercado podem ser agrupadas em três grandes categorias: células de silício cristalino (monocristalinas ou policristalinas), células de película fina e células híbridas.

As células monocristalinas são constituídas por um único cristal de silício e têm uma aparência homogênea. Geralmente, têm um custo superior aos outros tipos de células, devido ao seu processo de fabricação, mas possuem uma eficiência mais elevada. São um dos tipos de células mais utilizadas no setor fotovoltaico e o seu rendimento típico varia entre 15 % e 20 % (Kant e Singh 2022).

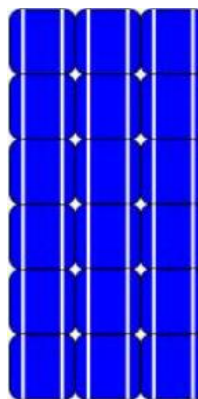


Figura 2 – Célula fotovoltaica monocristalina (Labrique, s.d.)

As células policristalinas são constituídas por múltiplos cristais de silício e têm uma aparência mais irregular. O processo de fabricação é mais simples do que o das células monocristalinas, o que as

torna mais acessíveis em termos de custo, mas menos eficientes. O rendimento típico destas células varia entre 13 % e 16 % (Kant e Singh 2022).

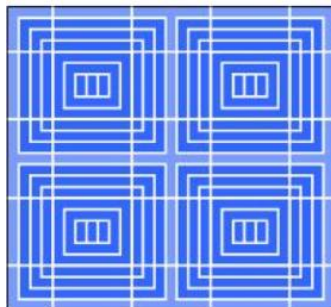


Figura 3 – Célula fotovoltaica policristalina (Labrique, s.d.)

As células de película fina são constituídas por materiais semicondutores amorfos ou microcristalinos aplicados em camadas finas. Os materiais utilizados, como o silício amorfo, o disselenieto de cobre, índio e selênio (CIS), e o telurieto de cádmio (CdTe), conferem uma maior flexibilidade, permitindo a sua utilização em superfícies curvas. O processo de fabricação é mais simples e usa menos material semicondutor, reduzindo o custo de produção. No entanto, são o tipo de célula com menor eficiência, entre 7 % e 13 % (M. A. Green 2003).



Figura 4 – Módulo de células fotovoltaicas de filme fino (Labrique s.d.)

As células híbridas são uma combinação de células cristalinas com células de película fina, oferecendo um equilíbrio entre flexibilidade e eficiência, que ronda os 15 a 20 % (M. A. Green 2003).

Para além destas tecnologias, nos últimos anos, têm sido desenvolvidos novos tipos de células fotovoltaicas, com o objetivo de aumentar a eficiência relativamente às existentes. Um exemplo disso são as células perovskita que se destacam devido ao baixo custo de fabricação e rápidos progressos. Em

menos de dez anos, as eficiências de conversão de este tipo de células aumentaram significativamente, de 4 % para 26 % (Robles Montes et al., 2022).

2.1.3. COMPONENTES DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Além das células fotovoltaicas, um sistema fotovoltaico é composto por uma série de componentes essenciais para garantir um funcionamento eficiente: módulos fotovoltaicos, inversores, baterias, controladores de carga, materiais elétricos e estruturas de suporte.

O módulo fotovoltaico é o componente responsável por converter a radiação solar em energia elétrica a partir da incidência solar sobre as células solares que, através do efeito fotovoltaico, produzem corrente elétrica, circulando a energia para os restantes componentes do sistema. Para além das células, o módulo é composto por outros componentes, listados a seguir (Silva et al., 2018):

- Estrutura de Alumínio: com cerca de 4 cm de espessura, tem como objetivo garantir a integridade do painel em condições adversas, protegendo-o durante a instalação.
- Vidro Especial: Geralmente com espessura de entre 3-4 mm, apresenta um baixo teor de ferro, resultando numa reduzida reflexão e permitindo a máxima passagem de luz, além de resistir a chuvas fortes e granizo.
- Encapsulante EVA: O Acetato-vinilo de etileno, conhecido como EVA, protege as células contra radiação ultravioleta, humidade e extremas variações de temperatura.
- Back cover: Um filme branco composto por três camadas, que é colocado na parte traseira do painel solar. Sua principal função é proteger as células fotovoltaicas e atuar como isolante elétrico.
- Caixa de Junção: Fixada na parte traseira do painel, onde as células fotovoltaicas são conectadas em série, normalmente chamadas de strings.

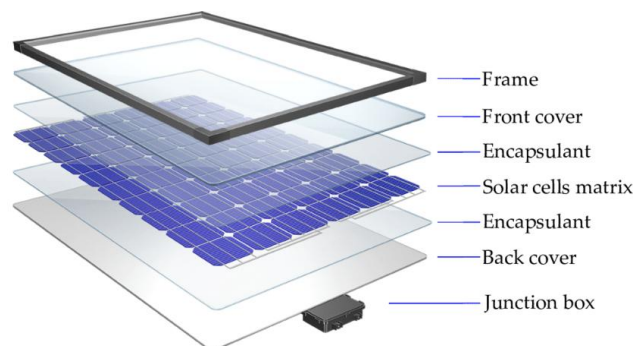


Figura 5 – Módulo fotovoltaico e componentes (Arabach 2019)

O inversor tem a função de converter corrente elétrica contínua, previamente fornecida pelo módulo fotovoltaico, em corrente alternada, sincronizando-a com a rede elétrica e com os equipamentos

elétricos conectados. Esta conversão garante que o sistema fotovoltaico seja capaz de fornecer energia de forma eficaz e segura, visto que não é possível consumir domesticamente corrente contínua. Para além de desempenhar esta importante função, o inversor otimiza e monitoriza a produção de energia produzida pelos painéis com o objetivo de obter o máximo desempenho possível do sistema. Os inversores fotovoltaicos podem ser classificados como monofásicos ou trifásicos, dependendo da configuração da rede elétrica em que serão conectados (Zeb et al., 2018). A escolha entre inversores monofásicos e trifásicos depende da configuração da rede elétrica em que o sistema fotovoltaico será conectado. Residências e pequenos estabelecimentos comerciais geralmente utilizam inversores monofásicos, enquanto instalações comerciais e industriais maiores podem requerer inversores trifásicos para atender às necessidades e à configuração da rede elétrica (Queirós, 2024).



Figura 6 – Micro-inversor fotovoltaico (Paulo 2019)

As baterias são um componente essencial nos sistemas fotovoltaicos autónomos, abordados no capítulo seguinte, porque permitem o armazenamento da energia elétrica, para ser possível a sua utilização num momento posterior ao da produção. Embora os painéis fotovoltaicos sejam capazes de produzir energia sem a presença de baterias, a sua integração no sistema é extremamente relevante, pois aumenta significativamente o nível de autoconsumo e evita o desperdício de energia excedente.

Existem diferentes tipos de baterias disponíveis para aplicações solares, destacando-se duas pelas suas características e ampla utilização no setor (Queirós, 2024):

- Baterias de chumbo-ácido: estas baterias são uma tecnologia amplamente utilizada devido ao seu baixo custo e fiabilidade. Apesar de apresentarem uma vida útil limitada, variando entre 300 e 500 ciclos de carga e descarga, continuam a ser uma solução acessível para sistemas de menor dimensão e aplicações em locais remotos.

- Baterias de lítio: representam a tecnologia mais avançada atualmente, oferecendo uma vida útil muito superior, até 6000 ciclos de carga e descarga, e limites de descarga próximos dos 100 %. Estas baterias são significativamente mais leves, facilitando o transporte e a instalação, mas apresentam custos mais elevados quando comparadas com outros tipos de baterias.

A escolha entre estas e outras opções depende das necessidades específicas da instalação, como a capacidade de armazenamento desejada, o orçamento disponível e os requisitos de durabilidade.



Figura 7 – Bateria de chumbo-ácido

O controlador de carga é um componente obrigatório dos sistemas autónomos, responsável por gerir o fluxo de energia entre os painéis fotovoltaicos, as baterias e a carga conectada. Este dispositivo regula a corrente e a tensão provenientes dos painéis solares, garantindo que a bateria seja carregada de forma eficiente e protegendo-a contra sobrecarga e descarga profunda. Além disso, o controlador compensa os diferentes fluxos de energia que ocorrem quando a bateria está simultaneamente a ser carregada e utilizada, preservando o seu bom funcionamento e prolongando a sua vida útil. Também permite medir a temperatura e a pressão do sistema, o que permite monitorizar o sobreaquecimento e evitar danos ao sistema (LokeshReddy et al., 2017).



Figura 8 – Controlador de carga

Os materiais elétricos têm de cumprir uma série de requisitos para a sua implementação num sistema fotovoltaico. Durante o dimensionamento, é imprescindível que esses componentes atendam a

padrões elevados de qualidade e segurança. O isolamento adequado é crucial para suportar as altas temperaturas decorrentes da incidência solar, preservando a eficiência do sistema e a durabilidade dos equipamentos. Além disso, os materiais elétricos devem ser capazes de suportar as tensões específicas da instalação. Estes materiais incluem cabos elétricos, que interligam os componentes, disjuntores de proteção contra sobrecargas em correntes contínuas e alternadas, e conectores especialmente projetados para módulos fotovoltaicos, que garantem conexões estáveis e seguras com baixa resistência elétrica.

A estrutura de suporte permite a instalação dos módulos fotovoltaicos na inclinação e orientação ideais para maximizar a captação de radiação solar. Fabricadas predominantemente em alumínio e aço inoxidável, estas estruturas oferecem elevada resistência às condições climáticas adversas, contribuindo para a longevidade do sistema e a sua estabilidade mecânica.

Deste modo, todos os componentes de um sistema fotovoltaico são fundamentais para garantir a eficiência, durabilidade e segurança da instalação, sendo que cada um desempenha um papel específico na otimização de produção e utilização de energia

2.1.4. CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Existem três formas de funcionamento dos sistemas fotovoltaicos – *on-grid* (ligados à rede), *off-grid* (autónomos) e híbridos. São escolhidos consoante as necessidades do consumidor, tendo em conta a localização e outros fatores (Sharma, 2022). Os sistemas *on-grid* estão conectados à rede elétrica pública, permitindo o consumo direto da energia solar e a injeção da energia excedente na rede. Os sistemas *off-grid* operam de forma independente, armazenando a energia produzida em baterias para garantir o abastecimento mesmo à noite ou em dias nublados, sendo ideais para locais sem acesso à rede pública. Já os sistemas híbridos combinam as duas abordagens, utilizando baterias para garantir autonomia energética, mas mantendo a conexão com a rede elétrica como fonte de backup.

De seguida, cada um destes sistemas será descrito com mais pormenor e detalhe, destacando as suas características, vantagens e limitações.

2.1.4.1. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS *ON-GRID*

Os sistemas fotovoltaicos *on-grid* são sistemas fotovoltaicos que estão conectados à rede elétrica, permitindo que a energia excedente produzida seja injetada na rede pública e compensada em períodos de baixa produção solar. Estes sistemas utilizam inversores de corrente para sincronizar a energia produzida com a rede elétrica.

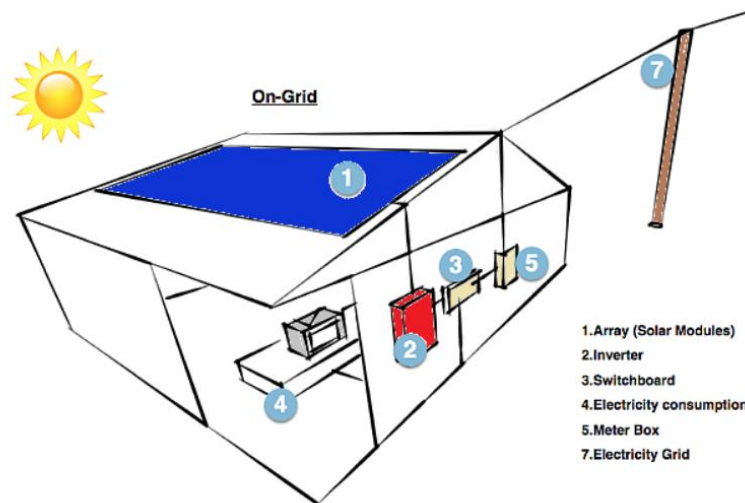


Figura 9 – Componentes de um sistema fotovoltaico on-grid (Svarc, 2020)

A instalação representada na figura 9 inclui uma *meter box*, que permite monitorizar a energia produzida e consumida, permitindo ao utilizador acompanhar o desempenho do sistema, e uma *switchboard*, ou quadro elétrico, que permite distribuir a eletricidade proveniente do inversor para alimentar os vários equipamentos elétricos. Este tipo de instalação apresenta várias vantagens, como a fácil instalação e baixa manutenção. É um sistema mais económico visto que não exige a utilização de baterias e a energia solar excedente não é desperdiçada, mas sim vendida, o que contribui para um retorno do investimento realizado na instalação. Outra vantagem é a possibilidade de as necessidades serem satisfeitas pela rede quando existe fraca radiação solar. No entanto, o sistema on-grid apresenta desvantagens, como a incapacidade de armazenar energia elétrica e a dependência total da rede. Durante falhas de energia, o sistema torna-se inoperante, mesmo com produção solar disponível.

2.1.4.2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS OFF-GRID

Os sistemas fotovoltaicos *off-grid*, ou autónomos, são independentes da rede elétrica, sendo utilizados principalmente em locais remotos onde o acesso à rede pública é difícil ou economicamente desvantajoso. Estes sistemas requerem baterias para armazenar a energia produzida, garantindo o abastecimento energético em períodos de baixa produção solar.

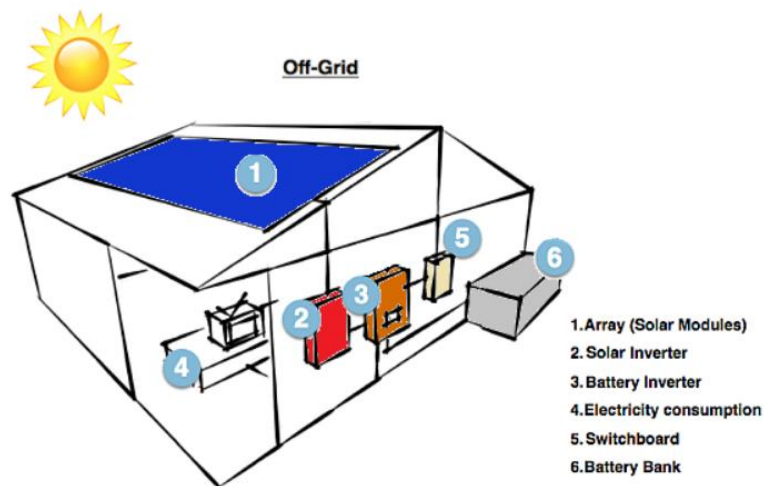


Figura 10 – Componentes de um sistema fotovoltaico *off-grid* (Svarc, 2020)

Para assegurar a eficiência deste tipo de sistema, é fundamental projetá-lo de forma a produzir energia suficiente ao longo do ano e dispor de capacidade de armazenamento adequada para satisfazer as necessidades do consumidor, mesmo durante o inverno, quando a radiação solar é menor.

As principais vantagens deste tipo de sistemas são autossuficiência energética, o armazenamento da eletricidade para uso posterior à produção e a proteção contra cortes de energia e falhas da rede pública. No entanto, a necessidade de baterias aumenta significativamente os custos da instalação e quando estão carregadas e a energia produzida não está a ser consumida, existe um desperdício da energia excedente (Sharma, 2022).

2.1.4.3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS HÍBRIDOS

Os sistemas fotovoltaicos híbridos são uma combinação dos *on-grid* e dos *off-grid*, ou seja, estão ligados à rede elétrica e, em simultâneo, utilizam baterias para armazenamento da energia excedente (Tang et al., 2023). Deste modo, quando a energia da rede está disponível o inversor funciona como um inversor ligado à rede e em caso de falha de energia, o inversor solar passa a funcionar como um inversor *off-grid*, garantindo um fornecimento energético contínuo, em qualquer situação.

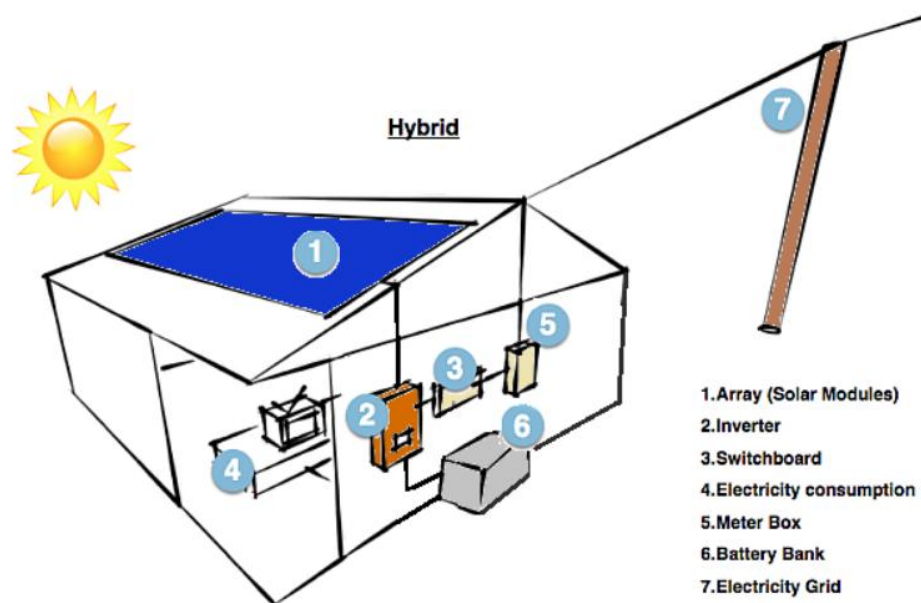


Figura 11 – Componentes de um sistema fotovoltaico híbrido (Svarc, 2020)

Este tipo de instalação fotovoltaica apresenta todas as vantagens dos outros tipos de sistemas, mas têm um custo mais elevado. Muitas vezes, os sistemas híbridos conjugam a produção de energia a partir de painéis fotovoltaicos com outras fontes de energia renovável, como a energia eólica. Os sistemas híbridos solar-eólico têm como principal vantagem a forma como se complementam. O comportamento da radiação solar ao longo do dia segue um padrão de produção aproximadamente constante, atingindo o seu pico a meio do dia, que vai diminuindo até ao pôr-do-sol. Por outro lado, a turbina eólica, devido ao comportamento do vento, consegue produzir energia num período de radiação solar baixa ou inexistente, servindo, desta forma, de complemento ao sistema solar fotovoltaico.

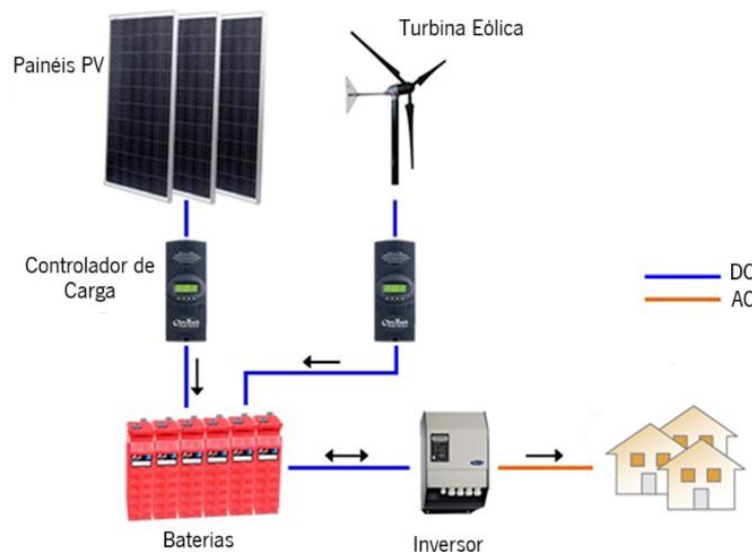


Figura 12 – Esquema de um sistema híbrido solar-eólico

2.1.5. TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

O calor é uma forma de energia que pode ser transferido de um corpo para o outro quando há diferença de temperatura entre eles. A transferência de calor engloba todos os mecanismos que transportem energia de um local para outro, devido à diferença de temperatura entre os mesmos. Os mecanismos de transferência de calor existentes são a condução, a convecção e a radiação (Baudouy, 2015).

No caso de um painel fotovoltaico, a radiação solar incidente é parcialmente convertida em eletricidade, enquanto a restante é refletida ou absorvida como calor, resultando no aumento de temperatura da superfície fotovoltaica. Este aumento é influenciado pelos mecanismos de condução, convecção e radiação, que transferem calor entre o painel e o ambiente. A caracterização detalhada desses mecanismos é essencial para compreender os desafios térmicos associados a esses sistemas (Leow et al., 2016).

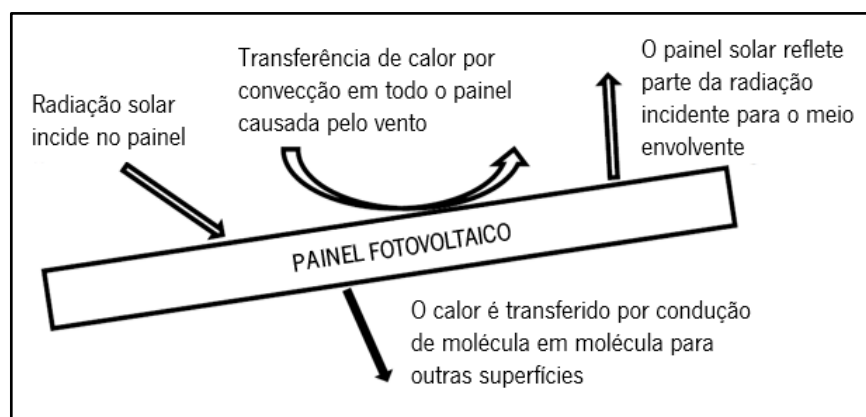


Figura 13 – Transferência de calor num painel solar fotovoltaico

2.1.5.1. CONDUÇÃO

O mecanismo de transferência de calor por condução é aplicado no caso de dois corpos em contacto. O calor é transferido do corpo a temperatura mais alta para o de temperatura mais baixa (Cengel, 2002). As perdas de calor por condução num painel fotovoltaico acontecem devido aos gradientes térmicos entre o painel e o meio envolvente onde o sistema solar está instalado.

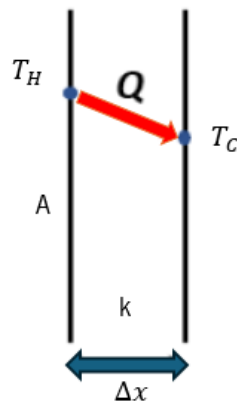


Figura 14 – Transferência de calor por condução (Cengel, 2002)

No caso de uma condução de calor unidimensional, a taxa de transferência de calor é dada pela Lei de Fourier, apresentada pela equação (1) (Green and Perry, 2008):

$$Q = kA \frac{T_H - T_C}{\Delta x} \quad (1)$$

onde, Q representa a taxa de transferência de calor, k é a condutividade térmica, A é a área da superfície em contacto de cada corpo, T_H é a temperatura a que se encontra a superfície mais quente, T_C é a temperatura a que superfície mais fria se encontra e Δx é a espessura do corpo onde ocorre transferência de calor.

2.1.5.2. CONVECÇÃO

A transferência de calor por convecção é um mecanismo que ocorre pela movimentação de um fluido de uma região de temperatura mais alta para uma região de temperatura mais baixa, em meios líquidos ou gasosos (Baudouy, 2015). A convecção é impulsionada pelas diferenças de massa volúmica do fluido, que são causadas por um gradiente térmico. A massa de fluido aquecida ocupa um maior volume e por consequência ocorre uma diminuição da massa volúmica que provoca um movimento ascendente nesta massa menos densa. Por outro lado, a massa mais fria e mais densa desce e aproxima-se da fonte de calor, o que resulta no seu aquecimento, enquanto a massa mais quente arrefecerá devido ao aumento da distância da fonte de calor. Este processo acontece repetidamente originando correntes de convecção.

A transferência de calor por convecção pode ser dividida em dois tipos principais: convecção natural e convecção forçada. A convecção natural ocorre devido às diferenças de temperatura que provocam diferenças de densidade do fluido e à força de gravidade, sem a necessidade de qualquer fonte externa de força (Letizia Garcia et al., 2020). Por exemplo, num painel fotovoltaico sem sistema de arrefecimento ativo, apenas ocorre convecção natural. A convecção forçada resulta da influência de uma

fonte externa no movimento do fluido. Fontes externas como bombas ou ventiladores forçam o fluido a escoar sob uma determinada superfície, a determinada velocidade. Este método, comparado à convecção natural, é muito mais eficiente no arrefecimento de objetos sobreaquecidos, porque ao aumentar a velocidade do fluido de arrefecimento, aumenta também a taxa de transferência de calor. (Vlachopoulos e Strutt, 2002)

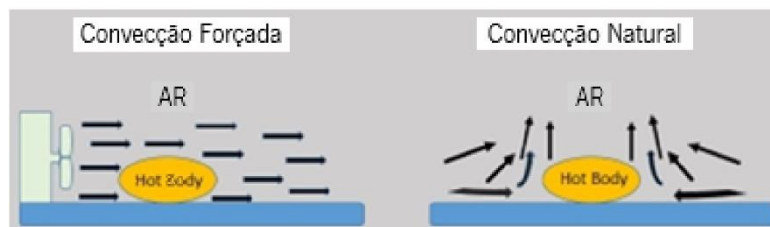


Figura 15 – Representação esquemática da convecção forçada e natural (Mathieu, 2018)

A lei do arrefecimento de Newton estabelece que a taxa de transferência de calor por convecção pode ser calculada pela equação (2) (Tien-Mo Shih, 2012):

$$Q = h A (T_s - T_f) \quad (2)$$

onde, Q representa a taxa de transferência de calor, h é o coeficiente de convecção, A é a área de transferência de calor, T_s é a temperatura da superfície e T_f é a temperatura do fluido.

2.1.5.3. RADIAÇÃO

Enquanto a condução e a convecção envolvem a transferência de calor a partir da interação entre moléculas, a radiação acontece a partir da emissão e absorção de ondas eletromagnéticas (D.H. Bacon 1989). A radiação térmica é emitida por toda a matéria com temperatura superior a 0 K e, quando atinge um corpo, pode ser absorvida, refletida e transmitida pelo corpo, caso este seja semitransparente. A intensidade da radiação emitida por um corpo depende diretamente da sua temperatura. Corpos mais quentes emitem mais radiação eletromagnética do que corpos mais frios. A lei de Stefan-Boltzmann estabelece que o balanço de radiação trocada entre dois corpos com temperaturas de superfície distintas, uniformes ao longo do tempo, é descrito de acordo com a equação (3) (Howell, Menguc, e Siegel 2010):

$$Q = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{ss}^4) \quad (3)$$

onde existe um corpo pequeno de superfície de temperatura T_s com emissividade ε e área A e outro corpo com uma superfície muito maior, de temperatura T_{ss} . Note-se, que neste contexto a emissividade é a mesma para ambos, sendo que este fator varia entre 0 (corpo totalmente refletor) e 1 (corpo negro), e σ representa a constante de Stefan-Boltzman.

Nos painéis fotovoltaicos, a radiação solar incidente é convertida em energia elétrica, refletida, dissipada e absorvida na forma de calor. O calor absorvido aumenta a temperatura do painel, contribuindo para o sobreaquecimento das células fotovoltaicas, afetando diretamente as suas propriedades elétricas e reduzindo a tensão do circuito. Este decréscimo ocorre porque o aumento da temperatura diminui a diferença de potencial entre as bandas de condução e valência do semicondutor, com uma redução típica de aproximadamente 2 mV/°C em células de silício. Como resultado, a potência fornecida pelo painel diminui de forma significativa à medida que a temperatura das células aumenta, condicionando a produção de energia elétrica (Grover e Li, 2015).

Existem métodos para ajudar na diminuição da energia térmica absorvida e na consequente diminuição de temperatura das células como o uso de materiais refletores da radiação solar na constituição de um painel fotovoltaico. No entanto, nos últimos anos têm vindo a ser desenvolvidas tecnologias que permitem o arrefecimento, ativo ou passivo, das células fotovoltaicas com maior eficácia. Estas abordagens serão detalhadas no capítulo seguinte, onde se exploram diferentes métodos para controlar e diminuir a temperatura de operação dos painéis fotovoltaicos.

2.2. MÉTODOS DE ARREFECIMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

A utilização de painéis fotovoltaicos para produção energética é particularmente atrativa em regiões áridas e quentes com alta exposição à radiação solar, pois, nestas condições, pode fornecer eletricidade abundantemente (Pourasl et al., 2023). No entanto, existem alguns desafios associados à implementação da energia solar nestas regiões. O clima, caracterizado por ar quente e seco, com temperaturas que podem exceder os 50 °C durante o dia e caírem para 10-20 °C durante a noite, submete as instalações fotovoltaicas a grandes esforços térmicos ao longo do dia, prejudicando o seu desempenho, reduzindo a vida útil e até podendo causar danos irreversíveis (Du et al., 2016). Além disso, a poeira e a areia em suspensão no ar podem-se ir acumulando na superfície dos módulos fotovoltaicos, reduzindo e obstruindo a área de captação de radiação e, consequentemente, reduzindo a potência fornecida pelo sistema. A logística de instalação e manutenção em regiões desertas também é um desafio, devido ao isolamento geográfico e à falta de infraestruturas adequadas. É, por isso, crucial adotar técnicas de arrefecimento adequadas para essas condições ambientais extremas, para proteger os módulos fotovoltaicos do sobreaquecimento e degradação e melhorar o seu desempenho (Sheik et al., 2022).

Vários estudos mostram que os painéis fotovoltaicos geralmente convertem cerca de 20 % da energia solar em eletricidade, enquanto os restantes 80 % são transformados em calor. Este excesso de

calor eleva a temperatura das células, reduzindo a produção elétrica e aumentando a produção de calor, o que afeta negativamente a eficiência da conversão fotovoltaica (Badi et al., 2023). Um aumento de 1°C pode resultar numa diminuição de 0,5 % da eficiência da conversão (Mafat, Patel, e Saxena, 2023).

Para prevenir uma redução da eficiência, é crucial manter a temperatura das células fotovoltaicas o mais baixa possível, o que pode ser alcançado implementando soluções de arrefecimento ou sistemas de gestão térmica. Os métodos de arrefecimento existentes são geralmente classificados em três principais categorias: ativos, passivos e híbridos, cada um com as suas vantagens e limitações (Dwivedi et al., 2020).

Métodos de arrefecimento passivos utilizam processos naturais, como a convecção do ar, fluxos de água ou a condução térmica, para dissipar calor sem consumo adicional de energia. Estas técnicas incluem materiais de mudança de fase (PCM), imersão líquida, tubos de calor, microcanais, jatos de impacto, folhas de evaporação microporosa e pavios de algodão. Por outro lado, métodos de arrefecimento ativos exigem equipamentos extra como ventiladores e bombas de ar, para remover o calor e forçar a circulação de fluidos de arrefecimento como ar, água ou nanofluidos (Sheik et al., 2022). Embora estes métodos de circulação forçada sejam mais eficazes em manter aceitável a temperatura das células, o equipamento adicional e o respetivo consumo energético pode tornar esta abordagem mais cara e complexa (Dwivedi et al., 2020). A água é o fluido mais comum para este tipo de sistemas de arrefecimento, enquanto o ar é o fluido mais utilizado em técnicas de arrefecimento passivo, apesar da sua baixa condutividade térmica e baixa taxa de transferência de calor. Os sistemas híbridos têm-se tornado a tendência líder na investigação de técnicas de arrefecimento de painéis fotovoltaicos (Maleki et al., 2020). Estas abordagens inovadoras combinam diversas técnicas de gestão térmica, incluindo métodos de arrefecimento ativos e passivos. Exemplos de sistemas híbridos incluem arrefecimento a ar-água, arrefecimento com PCM combinados com água ou ar, dissipadores térmicos com PCM, espuma metálica com PCM, entre outros (Jiao e Li, 2023).

Embora menos eficazes do que outras abordagens na dissipação de calor, os métodos passivos destacam-se pela sua simplicidade e menor custo. Além disso, técnicas de arrefecimento passivo podem ser otimizadas com a utilização de difusores de radiação solar ou dissipadores de calor. À medida que a eficiência térmica das tecnologias de arrefecimento passivo melhora, estas vão-se tornando opções mais favoráveis para a energia solar ser aproveitada de forma eficiente (Mahdavi et al., 2022).

A literatura científica conta com uma vasta e diversa quantidade de estudos que exploram diferentes métodos de arrefecimento para painéis fotovoltaicos incluindo técnicas ativas, passivas e

híbridas. No contexto desta dissertação, o foco recai sobre os métodos de arrefecimento a ar, passivos e ativos, dada a sua relevância direta para os objetivos propostos.

2.2.1. ARREFECIMENTO PASSIVO

O método mais económico e simples para arrefecer módulos fotovoltaicos consiste em utilizar o fluxo de ar por convecção natural sob os painéis. Esta técnica baseia-se no efeito chaminé para conduzir o ar quente através de um canal localizado atrás dos módulos fotovoltaicos. No entanto, a eficácia desta abordagem é limitada pela baixa taxa de transferência de calor da convecção natural, bem como pela baixa condutividade térmica e capacidade de calor específica do ar (Eryener e Kuscü, 2018). Sistemas térmico-fotovoltaicos arrefecidos a ar, bem como sistemas fotovoltaicos integrados em edifícios (BIPV), são exemplos concretos de métodos de arrefecimento por convecção natural do ar que apresentam uma eficiência energética razoável. Nos sistemas BIPV, os painéis são integrados em telhados inclinados ou fachadas de edifícios, onde uma camada de ar circula sob os módulos fotovoltaicos, permitindo o seu arrefecimento. Sistemas térmico-fotovoltaicos ventilados destacam-se como uma solução viável e económica para fornecer energia elétrica, ar quente e água quente em edifícios, pois o ar quente resultante do arrefecimento pode ser aproveitado para atender às necessidades térmicas do edifício mencionadas. A camada de ar nos sistemas BIPV comporta-se como um fluxo natural de ar, impulsionado por forças naturais, como a flutuação e as diferenças de pressão induzidas pelo vento. Vários estudos reportam que as velocidades do ar induzidas em canais atrás dos módulos fotovoltaicos são frequentemente baixas, inferiores a 0,5 m/s, justificando que o fluxo nestes canais é, em grande parte, laminar (Agathokleous e Kalogirou, 2018).

Brinkworth et al. (1997) investigaram um método para reduzir a temperatura das células fotovoltaicas utilizando o fluxo de ar por convecção natural num canal criado na parte traseira dos painéis. Simulações determinaram parâmetros fundamentais, como a altura e a profundidade do canal de arrefecimento, que se mostraram eficazes na redução da temperatura das células solares em 15 a 20 °C. Esta técnica demonstrou-se eficiente o aumento da produção energética de painéis fotovoltaicos utilizados como revestimento em paredes e telhados de edifícios (Brinkworth et al., 1997) .

Tripanagnostopoulos e Themelis (2010) testaram experimentalmente três sistemas passivos para o arrefecimento de painéis fotovoltaicos através de convecção natural. O primeiro sistema era composto por um canal de ar na parte traseira do painel fotovoltaico; o segundo sistema utilizava um canal semelhante, mas com a adição de uma fina chapa metálica (TMS) para aumentar o processo de arrefecimento; e o terceiro sistema incorporava alhetas metálicas na traseira do painel para aumentar a

superfície de permuta térmica. Os resultados dos testes indicaram que o sistema com alhetas foi o mais eficiente, seguido pela solução com a chapa metálica e, por último, pelo canal de ar simples (Tanagnostopoulos et al., 2010).

Baloch et al. (2025) realizaram um experimento em que compararam o desempenho de dois painéis fotovoltaicos num clima quente e seco na Arábia Saudita. Um dos painéis foi colocado numa estrutura normal, enquanto o outro foi arrefecido através de um canal de ar. O estudo, conduzido no segundo semestre do ano, mostrou que a temperatura do painel arrefecido diminui de 71 °C para 48 °C em junho e de 45 °C para 36 °C em dezembro. Este sistema de arrefecimento proporcionou um aumento médio superior a 35 % da produção energética (Baloch et al., 2015).

Para tentar prevenir o sobreaquecimento dos painéis fotovoltaicos em climas quentes, Abd-Elhady et al. (2018) propuseram uma solução de arrefecimento passivo baseada na convecção natural. O método consiste em perfurar o painel com orifícios que permitiam o ar quente acumulado sob os painéis seja dissipado, sendo substituído por ar ambiente mais frio. Testes experimentais validaram o conceito, seguidos por simulações que exploraram os efeitos do tamanho e da quantidade dos orifícios. Foi identificado um diâmetro crítico dos orifícios, além do qual orifícios menores resultaram num aumento da temperatura do painel (Abd-Elhady, Serag, e Kandil, 2018).

Glick et al. (2020) conduziram uma pesquisa diferente da maioria dos estudos anteriores, que se concentravam na determinação do ângulo de inclinação ideal para maximizar a absorção de luz solar nos painéis fotovoltaicos. Neste caso, o foco foi no impacto da organização dos painéis na corrente de vento incidente. Ao variar o ângulo de inclinação dos painéis e calcular os coeficientes de transferência de calor das superfícies fotovoltaicas, descobriram que um ângulo de inclinação de 30° resultou na maior taxa de transferência de calor na superfície inferior. Como resultado, sugeriram melhorias no fluxo de ar sob os painéis a partir da otimização da altura ou da implementação de defletores, para prolongar a vida útil e aumentar a eficácia dos painéis fotovoltaicos (Glick et al., 2020).

Sutanto et al. (2022), investigaram o desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos flutuantes com arrefecimento passivo utilizando termossifões para aumentar a produção de energia. Os resultados demonstraram que a produção energética em sistemas fotovoltaicos flutuantes é cerca de 4,52 % superior à de instalações fixadas ao solo. A introdução do sistema de arrefecimento por termossifão aumentou a potência fornecida dos painéis fotovoltaicos flutuantes em aproximadamente 7,86 % em comparação com a instalação fixada ao solo e 3,34 % em comparação com os sistemas flutuantes sem arrefecimento (Sutanto et al., 2022). Os resultados deste estudo destacam o potencial do uso de sistemas fotovoltaicos flutuantes com arrefecimento passivo para abordar o problema da disponibilidade

limitada de terrenos, enquanto minimizam os impactos ambientais e atendem à crescente necessidade energética global.

Panda et al. (2023) realizaram experiências para investigar o efeito do arrefecimento na parte da frente e na parte traseira de um módulo fotovoltaico, no seu desempenho. O arrefecimento frontal dos módulos foi realizado a partir da circulação de água a um caudal mássico específico, enquanto o arrefecimento na parte traseira foi realizado utilizando relva húmida. A redução média da temperatura do painel foi de 21,23 °C, resultando num aumento de 28,6 % na potência fornecida e uma eficiência média de 34,96 %. Ambos os métodos de arrefecimento mostraram-se eficazes, mas o arrefecimento na parte frontal revelou ser o mais eficiente (Panda et al., 2023).

Embora os métodos passivos de arrefecimento a ar ofereçam soluções simples, económicas e de baixa manutenção, a sua eficácia é limitada pela capacidade natural do ar em dissipar calor. Em situações onde a convecção natural não é suficiente para mitigar o sobreaquecimento dos painéis fotovoltaicos, torna-se necessário recorrer a tecnologias de arrefecimento ativo, que utilizam ventiladores ou outros dispositivos para forçar a circulação do ar e aumentar a transferência de calor. A secção seguinte explora estas tecnologias ativas de arrefecimento a ar, analisando os seus princípios de funcionamento, desempenho e viabilidade para aplicações fotovoltaicas, com base na literatura mais recente.

2.2.2. ARREFECIMENTO ATIVO

À semelhança dos métodos de arrefecimento passivos, uma das maiores vantagens do arrefecimento ativo com ar é o facto deste fluido não exigir grandes investimentos financeiros. Apenas o equipamento utilizado para forçar a circulação do ar envolve custos adicionais, como o seu desenvolvimento e a eletricidade consumida durante o funcionamento, fator que deve ser considerado ao estimar a eficiência do sistema.

Elminshawy et al. (2019) propuseram um método ativo que utiliza ar ambiente, previamente arrefecido por um permutador de calor ar-solo. Esse ar é utilizado como fluido refrigerante na traseira dos módulos fotovoltaicos. O sistema de arrefecimento foi construído a partir da conexão dos painéis ao permutador enterrado. Foi utilizado um simulador de ar ambiente composto por um ventilador centrífugo e uma câmara de aquecimento de ar com temperatura ajustável, para replicar condições próximas às recorrentes em regiões áridas e quentes. Os resultados mostraram que a utilização deste sistema, a um caudal de ar ótimo de 0,0288 m³/s, reduziu a temperatura do módulo fotovoltaico cerca de 13 °C, melhorando a potência debitada pelo painel em 20 % (Elminshawy et al., 2019).



Figura 16 – Instalação fotovoltaica incorporada com sistema de arrefecimento com ar geotérmico (Elminshawy et al., 2019)

Tonui and Tripanagnostopoulos (2007) também propuseram uma tecnologia de arrefecimento a ar, a partir da montagem de um canal com alhetas na parte traseira do módulo fotovoltaico, onde circula o fluido refrigerante, forçado por uma bomba. Além disso, a parte frontal dos painéis foi equipada com uma camada adicional de vidro. Esta abordagem resultou num decréscimo da temperatura celular até 52 %, o que se converteu num aumento de 9% de produção elétrica, em condições de estado estacionário (Tonui e Tripanagnostopoulos, 2007).

Rahimi et al. (2014) desenvolveram um dispositivo eólico baseado num túnel cónico para desempenhar duas funções em escala laboratorial. A primeira consistia no arrefecimento das células fotovoltaicas e a segunda destinava-se à produção de eletricidade, combinando a produção energética fotovoltaica com a eólica. Uma estrutura vertical que funciona como um sistema de auto-pilotagem eólico foi instalado no topo do túnel de ar para determinar a direção do vento. Neste caso, a altura a que o sistema de arrefecimento é colocado desempenha um papel importante para facilitar o movimento da estrutura vertical e registar com precisão a direção do vento. Quando o vento atinge a cauda estreita e vertical, esta roda perpendicularmente à direção do vento, ajustando a câmara nesse sentido. O vento entra na câmara de admissão, com paredes de 1 mm de espessura e cantos arredondados. Os testes demonstraram que esta solução tem grande potencial para desenvolvimento futuro, sendo que o aumento total na potência debitada pelo painel foi de 36 %, considerando a produção de energia combinada do sistema fotovoltaico e da turbina eólica (Rahimi et al., 2014).

No mesmo ano, Arcuri et al. (2014) propuseram uma solução que envolve um sistema de canais de arrefecimento em alumínio instalados na parte traseira dos painéis fotovoltaicos. As aberturas de entrada e saída, com secção transversal quadrada, foram posicionadas em lados opostos ao longo da borda mais longa do painel, permitindo que o ar percorresse a maior área possível. Foi assumida uma

velocidade média de escoamento de 2,3 m/s que resultou numa eficiência média anual de 12,58 % (Arcuri, Reda, e De Simone, 2014).

Ibrahim et al. (2023) apresentaram um estudo experimental comparativo entre sistemas de arrefecimento a partir de convecção forçada e natural a ar, combinada com uma placa de alhetas. Foram considerados quatro protótipos: o primeiro consistiu num módulo fotovoltaico sem qualquer tecnologia de arrefecimento; o segundo utilizou um painel PV com uma placa com alhetas retangulares acoplada à sua superfície traseira, arrefecida por convecção natural; o terceiro composto por um painel PV arrefecido por convecção forçada, utilizando três ventoinhas axiais; e o quarto protótipo combinou a placa com alhetas retangulares acoplada à superfície traseira do painel com o arrefecimento por convecção forçada, também com três ventoinhas axiais. Os resultados demonstraram que o painel PV com alhetas e convecção forçada apresentou um aumento de 3,01 % na eficiência, enquanto o painel com alhetas e convecção livre apresentou um aumento de 2,55 %, e o painel PV arrefecido apenas por convecção forçada exibiu um aumento de 2,10 % na eficiência (Ibrahim et al., 2023).

Deste modo, os métodos de arrefecimento ativo a ar apresentam soluções mais complexas, relativamente aos métodos passivos, mas, geralmente, com melhor eficácia e otimização de desempenho dos sistemas fotovoltaicos.

Esta revisão apresenta uma visão abrangente sobre o estado da arte em técnicas de arrefecimento para painéis fotovoltaicos, com foco nos métodos que utilizam ar como fluido de arrefecimento, tanto em instalações passivas como ativas. Vários estudos analisados demonstraram que estas abordagens desempenham um papel fundamental na redução da temperatura de operação dos painéis, ajudando a manter os valores dentro da faixa operacional nominal especificada pelo fabricante e, consequentemente, melhorando o desempenho e a eficiência dos sistemas fotovoltaicos.

Os métodos de arrefecimento ativo destacam-se pela sua eficácia em promover a transferência de calor e melhorar a potência debitada pelo painel. Contudo, dependem de fontes de energia externas, o que reduz a potência líquida gerada pelo sistema. Além disso, apresentam maiores custos iniciais e de manutenção, mas podem ser vantajosos em aplicações domésticas ou comerciais onde o calor residual seja aproveitado.

Por outro lado, os métodos de arrefecimento passivo são simples, económicos e de fácil implementação. Apesar de oferecerem menor taxa de transferência de calor, são ideais para condições em que a eficiência térmica não é crítica. As combinações destes métodos com outros elementos, como PCM, nanopartículas e microcanais, têm mostrado grande potencial, mas ainda requerem investigação para superar limitações, como a baixa condutividade térmica.

A avaliação da eficácia destas soluções depende de uma monitorização precisa e contínua das variáveis térmicas e elétricas associadas ao funcionamento dos módulos fotovoltaicos. No entanto, antes de comparar diferentes estratégias térmicas, é essencial estabelecer uma linha de base que permita caracterizar o desempenho do painel sem qualquer mecanismo de arrefecimento. Nesse sentido, é necessário o desenvolvimento de um sistema de monitorização que registe, em tempo real, parâmetros como temperatura, radiação solar, tensão e corrente elétrica. Esta monitorização, como a realizada no presente estudo, fornece dados de referência fundamentais, permitindo compreender a relação entre as condições ambientais e o comportamento térmico e energético do painel. Só após a obtenção desses dados iniciais é possível expandir o sistema de monitorização, integrando sensores adicionais para avaliar o impacto das soluções de arrefecimento. Dessa forma, a monitorização do desempenho dos sistemas fotovoltaicos passa a ter um papel duplo: identificar padrões de funcionamento e perdas térmicas sem arrefecimento e, numa fase posterior, avaliar comparativamente a eficiência dos métodos de mitigação térmica adotados. A recolha e análise contínua de dados permitirão, assim, não apenas identificar a necessidade de arrefecimento, mas também determinar qual o método mais adequado às condições específicas de operação do painel (Shariff et al., 2015). Desta forma, seguidamente, será apresentada uma breve revisão sobre sistemas de monitorização em instalações fotovoltaicas, abordando diferentes metodologias e tecnologias disponíveis para a aquisição, processamento e análise de dados.

2.3. MONITORIZAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

O aumento de produção de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos tem despertado um interesse crescente no desenvolvimento de sistemas de monitorização que permitam avaliar em tempo real o desempenho dos módulos fotovoltaicos e diagnosticar potenciais falhas durante o seu funcionamento. A monitorização eficiente destes sistemas é essencial para compreender em que condições os módulos fotovoltaicos têm melhor desempenho e otimizar a operação das instalações solares, em diferentes ambientes (Madeti e Singh, 2017). A implementação de sensores e dispositivos de aquisição de dados permite recolher informações relativas aos parâmetros críticos de funcionamento, como a temperatura dos módulos PV, a radiação solar incidente, a corrente e a tensão elétricas, possibilitando a análise detalhada do impacto das condições ambientais na potência fornecida pelo sistema fotovoltaico (Paredes-Parra et al., 2018).

Historicamente, os primeiros sistemas de monitorização eram desenvolvidos com tecnologia de alto custo, limitando a sua aplicabilidade a projetos de grande escala (Nippes De Oliveira, 2019). No entanto, nos últimos anos, o desenvolvimento de plataformas *open-source* e de *hardware* acessível, como

Arduino e Raspberry Pi, tem facilitado a implementação de soluções de monitorização de baixo custo para aplicações residenciais e comerciais de pequena escala (Mostofa e Islam, 2022).

Nos últimos anos, surgiram diferentes tipos de soluções comerciais para monitorizar sistemas fotovoltaicos, em pequena ou grande escala. Empresas como Victron Energy, SMA Solar Technologies e SolarMax desenvolvem esse tipo de soluções onde disponibilizam *software* como um serviço (SaaS) que oferece funcionalidades via *web* (S. M. et al., 2015). A partir desses *softwares*, é possível observar fenómenos em tempo real e o histórico de dados da produção fotovoltaica. Além disso, algumas plataformas mais avançadas incluem o envio de alertas e notificações para o utilizador caso surja o aparecimento de falhas súbitas ou de condições operacionais críticas (Rao et al., 2024). No entanto, soluções comerciais apresentam algumas desvantagens, como o elevado consumo energético dos sensores utilizados na recolha de dados, a necessidade de grande capacidade de armazenamento de informação e a limitação na adaptação a todas as instalações fotovoltaicas e na personalização de funcionalidades, impedindo por exemplo a adição de algoritmos personalizados para a avaliação de desempenho ou previsão de produção (Martínez et al., 2010).

Um sistema de monitorização adequado exige a realização de diversas etapas. Inicialmente, é necessário um conjunto de sensores com ou sem fio para recolher dados relativamente a variáveis ambientais e parâmetros elétricos dos diferentes componentes do sistema fotovoltaico. Os dados recolhidos são armazenados num *data logger* e depois transferidos para computadores ou plataformas *web*. Toda a informação recolhida pelos sensores tem de ser processada, armazenada e apresentada de forma estruturada em relatórios periódicos que facilitam a análise dos utilizadores.

Segundo a arquitetura moderna, um sistema de monitorização pode ser dividido em três camadas principais, como apresentado na Figura 17.

- Aquisição: recolha dos sinais enviados pelos sensores instalados ao longo da instalação fotovoltaica. As ligações à camada seguinte podem ser estabelecidas por Bluetooth, Wi-Fi ou por cabos elétricos, onde os dados são enviados para a etapa de processamento e registo.
- Processamento e Registo: os dados provenientes da rede de sensores são processados e registados temporariamente num microcontrolador, *data logger* ou servidor de processamento, enquanto são transferidos periodicamente para o armazenamento final.

- Armazenamento e Acesso: armazenamento final dos dados adquiridos. Estes podem ser mantidos localmente, em cartões SD, ou transferidos para servidores em nuvem. Esta etapa também inclui interfaces gráficas para visualização dos dados, seja em dispositivos de monitorização locais, como computadores ou via internet. Os sistemas mais recentes oferecem *dashboards* interativas que permitem a leitura de relatórios e estatísticas personalizadas para os utilizadores finais.



Figura 17 – Arquitetura de sistemas de monitorização

Diversos estudos, com diferentes abordagens, metodologias e tecnologias de aquisição, processamento e armazenamento, têm sido desenvolvidos com foco na monitorização de sistemas fotovoltaicos. Embora existam variações nos métodos utilizados, o fluxo de trabalho destes sistemas é, em grande medida, semelhante, seguindo a arquitetura de monitorização previamente descrita. O objetivo principal da monitorização mantém-se inalterado, englobando a aquisição, o processamento e o armazenamento dos dados.

Neste sentido, a presente dissertação propõe o desenvolvimento de um sistema de monitorização de baixo custo, utilizando o microcontrolador Arduino e sensores acessíveis, para analisar a influência da temperatura na potência debitada pelos painéis fotovoltaicos. A simplicidade e a acessibilidade da solução permitem que seja implementada em aplicações experimentais e instalações de pequena escala, tornando a monitorização de sistemas fotovoltaicos uma ferramenta mais acessível e eficiente. No capítulo seguinte, serão apresentados em detalhe os métodos, componentes e materiais utilizados no desenvolvimento do sistema de monitorização proposto.

3. MATERIAIS E MÉTODOS DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

Para avaliar a forma como a temperatura de operação de um painel fotovoltaico influencia o seu desempenho concebeu-se e implementou-se um sistema de registo de dados baseado em Arduino para a monitorização de um sistema PV *off-grid*. O sistema integra uma variedade de sensores para recolher dados sobre a radiação solar, temperatura da superfície do painel e tensão e corrente elétricas. Os dados recolhidos são registados em tempo real num ficheiro de texto, permitindo uma análise abrangente do desempenho do sistema PV ao longo do tempo

Nas secções seguintes deste capítulo, serão apresentados os parâmetros em estudo, os componentes e funcionamento do sistema, o design de hardware, a implementação de software, a instalação experimental, os resultados e a sua análise, proporcionando uma visão abrangente do sistema de registo de dados baseado em Arduino para a monitorização de sistemas PV.

3.1. PARÂMETROS

O principal objetivo deste sistema é monitorizar as condições de operação de um sistema fotovoltaico ao longo do tempo e sob diferentes condições ambientais. Para isso, foram determinados os parâmetros que influenciam a produção de eletricidade e a potência do painel fotovoltaico:

- Temperatura [°C]: como mencionado previamente, a temperatura é um fator crítico neste estudo, pois afeta diretamente a eficiência da conversão de energia solar em elétrica. Quanto maior a temperatura, menor o rendimento do sistema e, consequentemente, menor a quantidade de energia elétrica produzida. Daí a importância da monitorização da temperatura e da relação com a potência do sistema.
- Tensão elétrica [V]: a tensão gerada por um painel fotovoltaico é crucial para determinar a sua capacidade de produzir eletricidade de forma eficiente. Ao monitorizar a tensão, podem-se detetar quedas de desempenho devido à temperatura ou baixa radiação solar incidente, bem como perceber se o painel está a funcionar perto do seu ponto de máxima potência, a partir da relação com a corrente elétrica.

- Corrente elétrica [A]: é o fluxo de eletrões gerado pela conversão da energia solar em energia elétrica. Quanto maior a intensidade da luz solar, maior a quantidade de fótons incidentes e de eletrões libertados e, consequentemente, maior a intensidade da corrente elétrica gerada. Monitorizar a corrente permite avaliar a eficiência deste processo que também é prejudicado pelo aumento da temperatura das células fotovoltaicas.
- Radiação Solar [W/m^2]: A radiação solar incidente no painel é o principal fator que determina a quantidade de energia que pode ser convertida em eletricidade. Monitorizar a radiação permite relacionar a produção de energia do sistema com as condições solares reais e entender a influência da radiação na variação da temperatura do painel fotovoltaico.

3.2. COMPONENTES E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

O sistema projetado no âmbito do presente estudo consiste, de forma geral, numa componente de *hardware* e outra de *software*, esquematicamente apresentados na Figura 18.

O *hardware* inclui todos os componentes físicos que constituem o sistema de monitorização. Este é composto por um Arduino Mega 2560, um dos componentes centrais ao qual estão conectados todos os outros dispositivos físicos, sendo estes o sensor de temperatura, o divisor de tensão e o sensor de corrente, e também um *data logging shield* com um cartão SD incorporado. O outro componente central é o sensor de radiação solar, ou piranómetro, SPN1 da Delta-T Devices, que conectado ao *datalogger* GP1, da mesma empresa, permite a leitura e armazenamento da intensidade da radiação solar ao longo do tempo.

O *software* utilizado neste projeto foram o Arduino IDE e o DeltaLINK. O Arduino IDE foi utilizado para desenvolver, compilar e carregar o código de programação para o Arduino, permitindo o controlo dos sensores de temperatura, tensão e corrente elétricas. O DeltaLINK foi utilizado para configurar os parâmetros de operação do *datalogger* GP1 e do SPN1, incluindo taxa de leitura, taxa de registo e duração da leitura dos dados. Também foi utilizado para realizar a transferência dos dados do GP1 para o computador, permitindo a visualização de toda a informação armazenada ao longo do tempo.

O sistema faz a leitura dos sensores e armazena os dados recolhidos localmente num cartão SD o que permite o acesso a todos os dados registados a partir de um computador. A parte física do sistema é alimentada a partir de uma simples tomada e de um transformador que permite converter a tensão de entrada de 220 V numa tensão de saída de 5 V, que permite a alimentação do Arduino e do sensor de

radiação. Todos os sensores e componentes do sistema de monitorização foram calibrados antes da recolha de dados para garantir precisão e consistência nas medições. Os procedimentos de calibração envolvem ajustar os parâmetros dos sensores, compensar fatores ambientais e validar as leituras dos sensores com base em valores de referência conhecidos. A arquitetura e direção de fluxo de informação encontram-se representados na Figura 188.

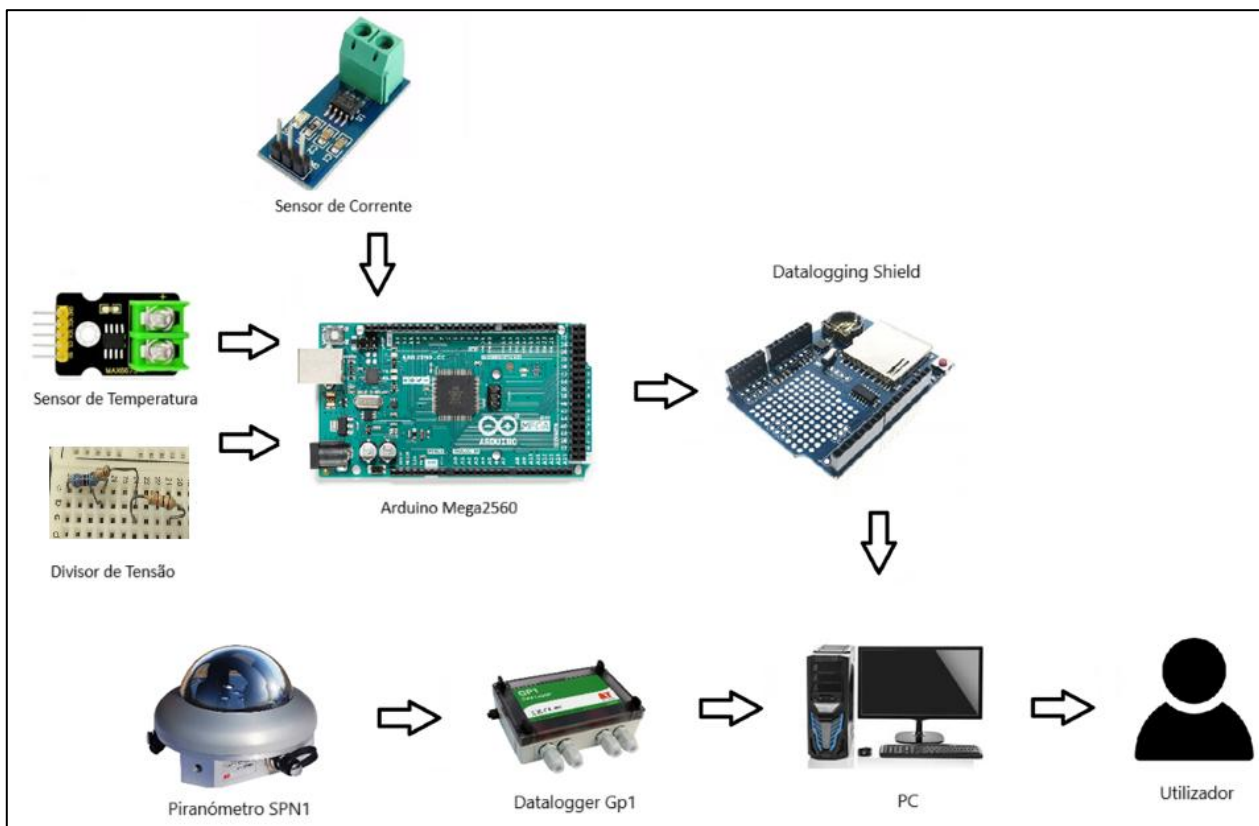


Figura 18 – Diagrama da arquitetura do sistema e direção do fluxo de informação

3.3. HARDWARE

3.3.1. ARDUINO

O Arduino é uma plataforma *open source* de desenvolvimento e prototipagem constituído por uma parte de *hardware* e outra de *software*. O *hardware* tem por base um microcontrolador ATMega e consiste numa placa de circuito impresso com portas analógicas e digitais de entrada e saída, de comunicação e alimentação. O *software* consiste no programa Arduino IDE, que permite a descrição e edição de código para programação do microcontrolador e visualização de dados transmitidos pelo monitor série. O desenvolvimento do Arduino foi baseado no projeto Wiring, com o intuito de ser uma plataforma de baixo custo, flexível e de fácil utilização por principiantes, mas simultaneamente com complexidade suficiente

para que utilizadores experientes consigam tirar partido de todas as características e funções disponíveis. A flexibilidade deste tipo de plataformas deve-se ao facto de ser possível interagir com dispositivos externos, como sensores, computadores, motores a partir de protocolos de comunicação como o I2C (Inter-Integrated Circuit), SPI (Serial Peripheral Interface) e USB ou através de sinais analógicos. Deste modo, a natureza *open source*, versatilidade, diversidade de aplicações e o preço do Arduino, torna-o no componente ideal para ser o núcleo da parte física deste projeto.

O núcleo escolhido para o sistema de monitorização da instalação fotovoltaica foi o Arduino Mega 2560 R3, cujo microcontrolador é o ATmega2560. A tensão operacional são 5 V, sendo a tensão de entrada recomendada entre 7 e 12 V. Existem 54 pinos digitais de entrada/saída e 16 pinos analógicos de entrada. O Arduino escolhido foi o Mega 2560, em vez do Uno, devido às suas diferenças relativamente à memória SRAM. No projeto são realizadas leituras contínuas de corrente, tensão e temperatura a cada segundo, cujos dados são armazenados temporariamente na memória do Arduino. A cada 5 minutos são calculadas as médias dos valores lidos de cada variável durante esse intervalo de tempo e são essas médias que são posteriormente registadas no cartão SD. Esta abordagem exige uma quantidade considerável de memória SRAM para ser possível armazenar todas as amostras de dados lidos durante o intervalo de tempo. Segundo as especificações do fabricante, o Arduino Uno dispõe apenas 2 kB de SRAM, enquanto o Arduino Mega 2560 oferece 8 kB de SRAM, o que corresponde a quatro vezes mais espaço para armazenamento de dados temporários. Esta maior capacidade de memória no Mega é fundamental para evitar o esgotamento da SRAM durante o processo de recolha de dados, permitindo o armazenamento seguro de todas as amostras sem comprometer a estabilidade do programa. Assim, o Arduino Mega revela-se uma escolha mais adequada para este sistema de monitorização, uma vez que a capacidade de gerir o volume de dados recolhidos, aliada a um armazenamento eficiente, contribui decisivamente para a fiabilidade da monitorização.

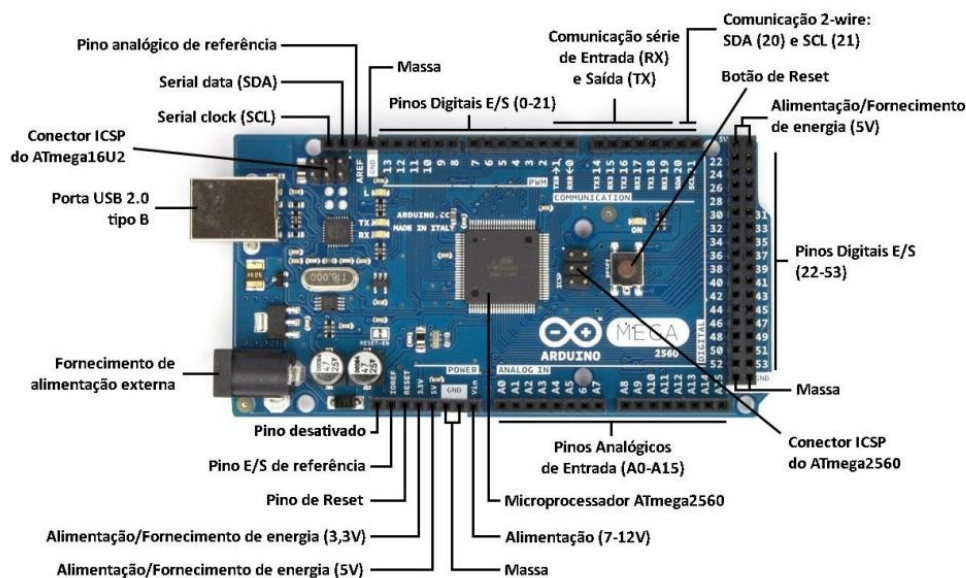


Figura 19 – Arduino Mega 2560 R3

3.3.2. ADAFRUIT DATALOGGER SHIELD

O *shield* utilizado no sistema de monitorização é o *Adafruit Datalogger Shield*, compatível com o Arduino utilizado. Este componente é essencial para a aquisição e armazenamento de dados, uma vez que inclui uma entrada para um cartão SD, o que permite registar os dados em tempo real. Além disso, o *shield* possui um relógio de tempo real (RTC) que garante a precisão temporal dos dados. Contudo, no caso específico deste projeto, verificou-se que o RTC do *shield* utilizado não estava a funcionar corretamente. Para solucionar este problema, adotou-se uma abordagem alternativa para garantir uma correta marcação temporal dos dados. Uma vez que os *timestamps* utilizados no registo de dados seguiam intervalos de 5 minutos (ou 300 segundos), para determinar a cronologia precisa da monitorização, apontou-se a hora exata de início e fim da operação. Com base na quantidade de linhas registadas no ficheiro gerado no cartão SD, foi possível calcular com precisão as horas correspondentes a cada linha de dados. Este método assegurou a integridade temporal do processo de monitorização, compensando, deste modo, a falha do RTC no *shield*. Este *shield* é alimentado por uma tensão de 5 V e comunica com o Arduino através da interface SPI. Estão disponíveis várias bibliotecas no software Arduino IDE compatíveis com este *shield*, tendo sido escolhida a biblioteca “SD” para a gestão do armazenamento no cartão SD e a biblioteca “SPI” para a comunicação com o Arduino.

Figura 20 – Adafruit *Datalogger shield*

3.3.3. SENSOR DE TEMPERATURA

O sensor de temperatura presente no sistema de monitorização utiliza um termopar tipo K acoplado a um módulo MAX6675, um circuito integrado especializado na leitura de termopares. O termopar tipo K é um dos mais comuns e versáteis, fabricado com dois tipos de metais diferentes: níquel-crómio (positivo) e níquel-alumínio (negativo). A sua principal vantagem é a capacidade de medir uma ampla gama de temperaturas, geralmente entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo adequado tanto para ambientes adversos, com uma alta resistência a temperaturas elevadas e à corrosão. Existe uma incerteza associada aos valores lidos pelo termopar, sendo tipicamente 0,75 % da leitura. O módulo MAX6675 (Figura 21) é um conversor digital de temperatura, ou seja, lê o sinal emitido pelo termopar e converte-o para um valor digital, compatível com o Arduino. Este componente facilita a leitura de temperaturas de forma precisa e simplificada, através do protocolo de comunicação SPI e apresenta uma ampla faixa de medição, entre 0 e $1024\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figura 21 – Termopar tipo K incorporado com módulo MAX6675

Para interagir com o módulo MAX6675, está disponível no Arduino IDE a biblioteca “MAX6675”. Depois da sua instalação, esta biblioteca oferece funções específicas que permitem a comunicação entre o Arduino e o módulo, como a leitura da temperatura de forma contínua. A utilização desta biblioteca requer a definição dos pinos de comunicação SPI (CS, SCK, SO) e facilita a leitura dos dados de temperatura com elevada precisão.

3.3.4. SENSOR DE CORRENTE

O sensor de corrente utilizado, o ACS712 de 20 A (Figura 22), é um sensor analógico que permite medir a corrente elétrica (AC ou DC) de forma precisa, convertendo a leitura num sinal de tensão analógica que pode ser lida pelo Arduino. Este sensor é amplamente utilizado em aplicações de monitorização de corrente elétrica, por ser eficiente, de fácil integração e com uma boa relação custo-benefício, sendo capaz de medir correntes elétricas numa faixa de -20 A a 20 A. Deste modo, torna-se uma opção válida para monitorizar o painel fotovoltaico utilizado na instalação de campo.

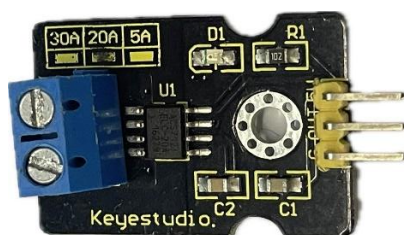


Figura 22 – Sensor de Corrente ACS712 de 20 A

O sensor emite um sinal analógico simples que é lido pelo Arduino a partir de uma porta analógica. Este sinal é uma tensão analógica proporcional à corrente medida. Quando o valor da corrente é 0, o sinal emitido é de aproximadamente 2,5 V (metade da tensão de referência de 5 V). Se corrente a fluir do painel para o controlador de carga, a tensão emitida é superior a 2,5 V. No caso contrário, a tensão emitida é inferior a 2,5 V. Neste sensor em específico, a sensibilidade é de aproximadamente 100 mV por ampere medido. Isso significa que para cada ampere que flui pelo sensor, a saída muda em 100 mV. Por exemplo, se o sensor estiver a medir 5 A, o valor da tensão emitida pelo sensor ao Arduino será de 2,5 V + 0,5 V = 3 V.

3.3.5. DIVISOR DE TENSÃO

Para monitorizar a tensão debitada pelos terminais do painel fotovoltaico, foi incorporado um divisor de tensão, um circuito de resistências em série que permite reduzir a tensão debitada pelo painel para um valor na faixa dos 0-5 V, a mesma faixa de leitura analógica do Arduino. O divisor de tensão funciona com base na Lei de Ohm e na relação entre as resistências em série, de acordo com a equação (4) (Zico Winter 2022):

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (4)$$

onde V_{out} é a tensão lida pelo Arduino, V_{in} é a tensão que se pretende medir, debitada pelos terminais do painel, R_1 e R_2 são as resistências que constituem o divisor de tensão.

A tensão máxima de saída do painel fotovoltaico monitorizado é ligeiramente inferior a 50 V. Para a monitorização ocorrer de forma segura foi necessário dimensionar o divisor de tensão, escolhendo resistências que permitam reduzir a tensão de saída a um máximo de 5 V, limite máximo suportado pelos pinos analógicos do Arduino. Esta condição implica que R_1 deve ser aproximadamente nove vezes superior a R_2 , de forma a cumprir os requisitos de segurança, tal como apresentado na equação (5):

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{5}{50} \Leftrightarrow \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{10} \Leftrightarrow R_1 = 9R_2 \quad (5)$$

Com base nessa relação e nas resistências disponíveis no laboratório, foram escolhidas três resistências, sendo que duas, ligadas em série, constituem R_2 , resultando em:

$$R_2 = R_{2a} + R_{2b} = 10000 \, \Omega + 1000 \, \Omega = 11000 \, \Omega$$

Para R_1 , foi escolhida uma resistência de 100000 Ω , cerca de 9 vezes superior a R_2 . Deste modo, o Arduino faz a leitura da tensão que entra no pino analógico ligado ao divisor e o valor lido é convertido de volta para o valor da tensão fornecida pelo painel a partir da utilização da equação (6) no código desenvolvido no *software* Arduino IDE:

$$V_{in} = V_{out} \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (6)$$

Deste modo, é possível obter a tensão debitada pelo painel fotovoltaico em cada instante e, posteriormente, registar e armazenar esses valores de acordo com os *timestamps* estipulados.

3.3.6. PIRANÓMETRO SPN1 E DATALOGGER GP1

O piranómetro SPN1 é um sensor meteorológico utilizado para medir radiação solar global e difusa sem a necessidade de dispositivos de sombreamento adicionais, como muitos piranómetros tradicionais que exigem outros componentes para a medição da radiação difusa. O SPN1, ilustrado na Figura 23, foi projetado para suportar condições climáticas adversas, sendo particularmente adequado para o uso ao ar livre, e tem um campo de visão hemisférico, o que significa que capta a radiação solar proveniente de todas as direções acima do plano horizontal onde está instalado, sendo capaz de medir radiação numa faixa típica entre 0 e 2000 W/m². Também inclui compensação de temperatura, com sensores internos que garantem medições precisas mesmo com variações de temperatura ambiente, minimizando os erros de leitura.



Figura 23 – Piranómetro SPN1 da Delta-T Devices

Embora o piranómetro SPN1 tenha sido utilizado no sistema de monitorização, é importante esclarecer que este sensor não foi integrado diretamente no sistema baseado em Arduino, como os sensores abordados previamente. Em vez disso, a aquisição de dados do SPN1 foi realizada utilizando o *datalogger* GP1 da Delta-T Devices, representado na Figura 24, um equipamento especializado em recolha de dados meteorológicos. O GP1 foi escolhido devido à sua capacidade de integrar facilmente sensores como o SPN1 e ser adequado para instalações expostas ao ambiente exterior, proporcionando maior precisão na aquisição de dados de radiação solar.



Figura 24 – Datalogger GP1 da Delta-T Devices

A estratégia utilizada na aquisição dos valores de radiação solar foi a mesma da aquisição dos valores de tensão, corrente e temperatura obtidos pelo Arduino. Foram lidos os valores de radiação solar incidente no painel em todos os segundos, mas apenas se registou a média desses valores de 5 em 5 minutos. O *software* utilizado foi o DeltaLINK que permite definir a frequência de amostragem, as unidades de medida e a visualização em tempo real, sendo esta última característica útil para assegurar o funcionamento correto do piranómetro SPN1 durante a monitorização.

3.4. SOFTWARE

3.4.1. ARDUINO IDE

O Arduino IDE é uma aplicação *open-source* que consiste num editor de código com ferramentas de compilação, utilizado para desenvolver *sketches* para, posteriormente, os carregar para o microcontrolador utilizado, mais precisamente o Arduino. A linguagem implementada para a programação consiste num conjunto de funções C++ que permite o controlo de todos os sensores utilizados na monitorização. Através do *serial monitor*, ou monitor série, uma interface gráfica de comunicação com o Arduino, é possível a visualização em tempo real dos valores obtidos pelo microcontrolador, o que também permite assegurar o funcionamento correto do sistema de monitorização. Como mencionado previamente, o Arduino IDE suporta o uso de bibliotecas que proporcionam funcionalidades extras e permitem a execução de tarefas complexas a partir de funções de fácil e simples utilização num *sketch*.

3.4.2. DELTALINK

O *software* DeltaLINK, desenvolvido pela Delta-T Devices, permite a configuração, recolha e visualização de dados de dispositivos de monitorização ambiental como o piranómetro SPN1, a partir de *dataloggers* como o GP1. Permite definir os parâmetros de medição e as unidades de medida do sensor em utilização, monitorizar as leituras em tempo real e armazenar os dados registados com a frequência de registo definida pelo utilizador. A interface gráfica deste *software* também permite a observação e monitorização dos dados recolhidos em tempo real e permite detetar possíveis anomalias nos sensores e sistemas de aquisição associados ao sistema.

3.5. APLICAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

Neste capítulo será apresentada a abordagem detalhada em cada uma das etapas envolvidas na conceção e aplicação do sistema de monitorização. As etapas do processo são o desenvolvimento das instalações exterior e interior, e a explicação do código desenvolvido, com base num algoritmo que mostra a sua estrutura e descreve simplifadamente a sua lógica.

O sistema tem como principal objetivo monitorizar a relação da eficiência do painel fotovoltaico utilizado com a temperatura da superfície do painel, recolhendo dados sobre tensão, corrente, temperatura e radiação solar incidente. Os dados são lidos a cada segundo para cada uma das variáveis

e, de 5 em 5 minutos, é calculada a média dos 300 segundos anteriores e registada num ficheiro de texto, para posterior acesso.

3.5.1. INSTALAÇÃO EXTERIOR

O painel fotovoltaico utilizado, da marca BP SOLAR, é composto por células de silício monocristalino. Apresenta uma área de $2,4 \text{ m}^2$, uma potência máxima de 260 W e tensão máxima em circuito aberto igual a 44,2 V, em condições ideais de funcionamento (temperatura das células = 25°C). Como é possível observar na figura seguinte, o painel em monitorização foi instalado sobre um coletor solar que não estava em funcionamento, no telhado do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM). Atrás do painel, foi aparafusada uma estrutura metálica ajustada de modo a garantir a inclinação ideal para maximizar a captação de radiação solar. Esta estrutura foi fixada a quatro blocos de betão para garantir a estabilidade mecânica e evitar deslocamentos. Optou-se por este tipo de suporte para evitar perfurações e intervenções permanentes no telhado devido ao curto período de monitorização aplicado ao sistema fotovoltaico, tal como apresentado na Figura 25.

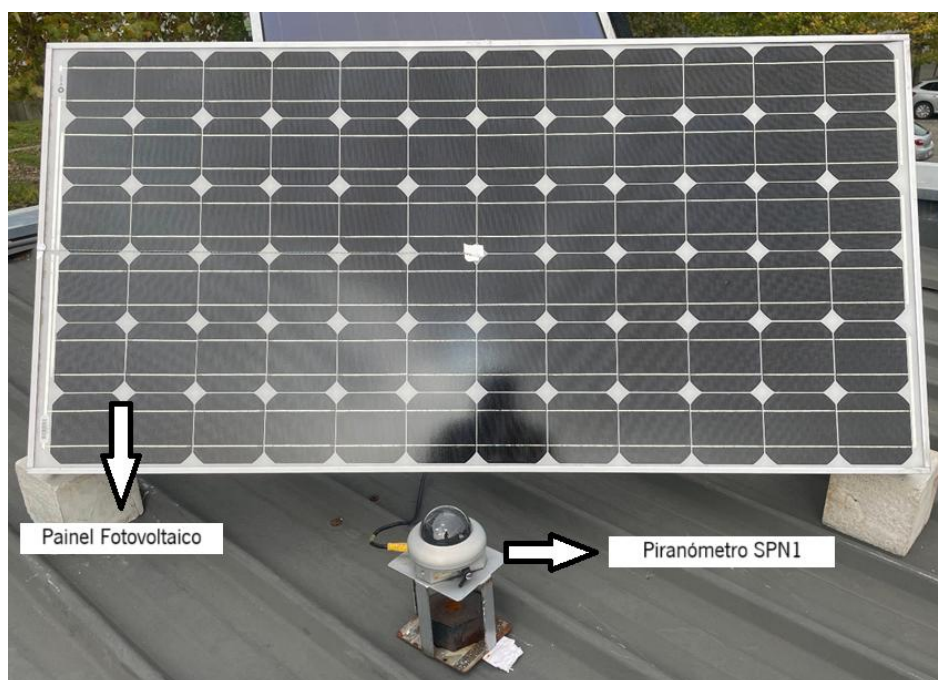


Figura 25 – Componentes da instalação exterior no telhado do DEM

Os terminais do painel fotovoltaico foram prolongados, através da utilização de cabos solares, até ao interior do edifício, onde se encontra o controlador de carga, destino final dos terminais.

Além do painel fotovoltaico, também se instalaram no exterior ambos os componentes que permitem monitorizar a radiação solar incidente, o piranómetro SPN1 e o respetivo *datalogger* GP1.

Devido ao comprimento limitado do cabo que conecta estes componentes e ao facto de ser o GP1 a alimentar o SPN1, o *data logger* foi posicionado também no telhado, sendo alimentado a partir do interior do edifício, através de uma extensão USB. Na Figura 25, o *data logger* não está visível porque se encontra atrás do painel fotovoltaico, como é perceptível pelo prolongamento do cabo que está conectado ao piranómetro.

No centro da superfície do painel fotovoltaico, tal como ilustrado na Figura 26, a ponta da extensão de termopar utilizada para medir a temperatura de funcionamento das células fotovoltaicas foi fixada com fita adesiva de folha de alumínio. A extensão parte do módulo MAX6675, que permanece no interior do edifício em comunicação com o Arduino. A escolha da fita de folha de alumínio considerou-se adequada devido à sua resistência a condições ambientais e capacidade de assegurar uma boa fixação sem interferência relevante nas leituras de temperatura.

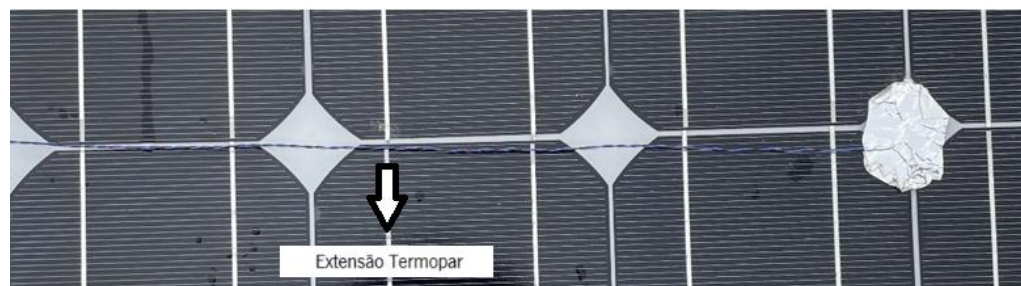


Figura 26 – Fixação do termopar tipo K ao painel fotovoltaico

Deste modo, todos os componentes utilizados no exterior têm ligação direta – os terminais fotovoltaicos ao controlador de carga, o termopar ao módulo MAX6675 e o sensor de radiação à fonte de alimentação – ao laboratório de Fluidos e Calor do DEM, local onde se encontra a instalação interior.

3.5.2. INSTALAÇÃO INTERIOR

A instalação interior envolve a conceção e aplicação do sistema de monitorização de tensão, corrente e temperatura do painel, o processamento e armazenamento de todos os dados obtidos e ainda a gestão da energia produzida pelo sistema fotovoltaico.

Como mencionado previamente, os terminais fotovoltaicos foram estendidos até ao controlador de carga do circuito concebido. O controlador de carga é do tipo MPPT, o que permite a otimização da potência debitada pelo painel e assegurar a estabilidade de todo o circuito, limitando a energia fornecida para a bateria e dissipando a energia excedentária.

Antes da ligação do painel ao controlador de carga, ambos os terminais fotovoltaicos foram intercetados. O divisor de tensão foi ligado, em paralelo, aos dois terminais, positivo e negativo, e

conectou-se o sensor de corrente, em série, apenas ao terminal positivo do painel. Deste modo, foi possível fazer a monitorização da tensão e corrente e ,consequentemente, da potência debitada pelo painel. A Figura 27 mostra todos os componentes presentes na instalação interior, nomeadamente os sensores, o controlador de carga, a bateria, a carga do sistema e o cabo de alimentação.

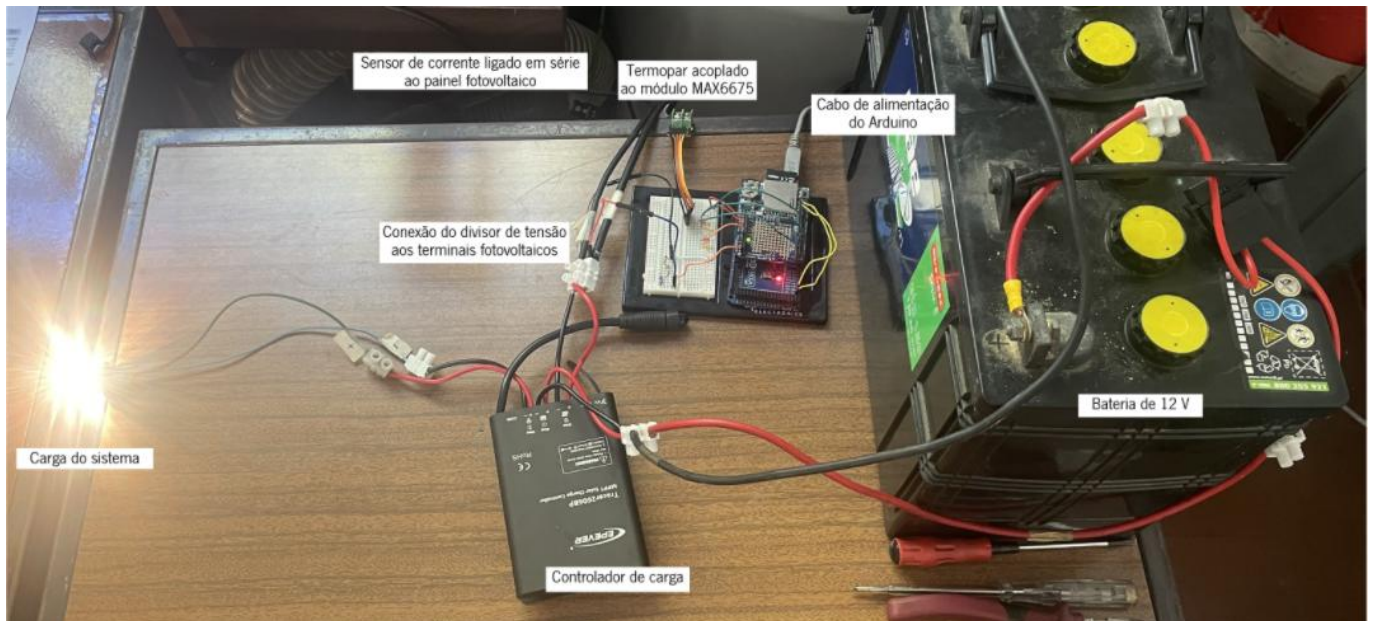


Figura 27 – Componentes presentes na instalação interior

A carga associada ao sistema é uma lâmpada halógena de 12 V que, estando continuamente conectada ao controlador MPPT, consome a energia produzida pelo painel e a que está armazenada na bateria. Durante o dia, o controlador de carga garante que parte da energia produzida pelo painel é direcionada para alimentar a carga. A energia excedente é utilizada para carregar a bateria. Quando a produção de energia do painel não é suficiente para suprir a necessidade energética da carga – durante a noite ou em períodos de baixa radiação solar – é a bateria, previamente carregada, que mantém a carga alimentada.

O Arduino, previamente soldado ao *datalogging shield* e através das conexões entre os sensores, *breadboard* e controlador (Figura 28), realiza o processamento e armazenamento das leituras de valores de tensão, corrente e temperatura. Os valores são registados a cada segundo, sendo que, a cada 5 minutos, a média das leituras dos 300 segundos anteriores é armazenada no cartão SD. Deste modo, é otimizada a quantidade de dados recolhidos garantindo uma representação precisa do sistema ao longo do tempo.

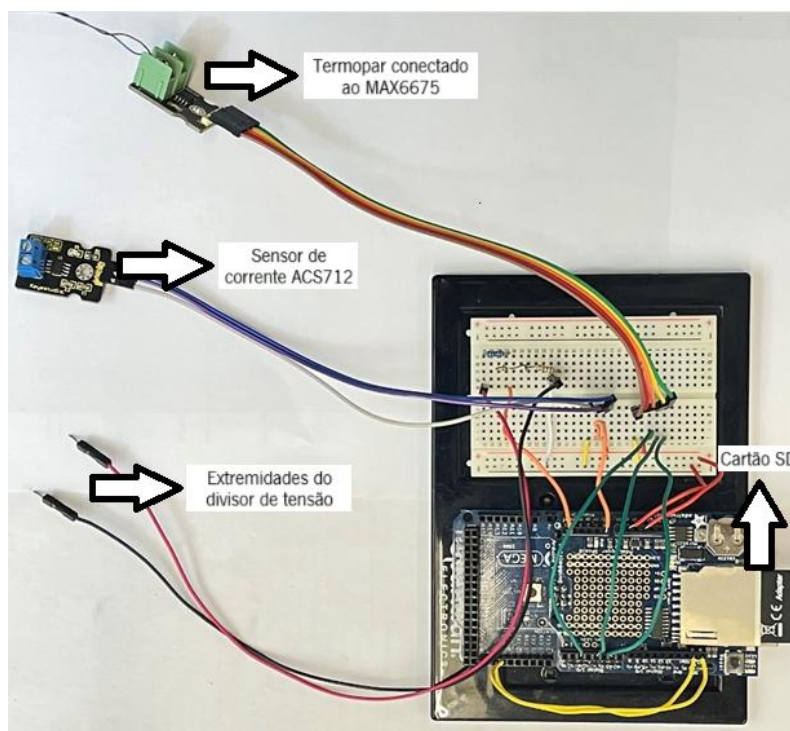


Figura 28 – Close-up das Interações Arduino - Datalogging Shield - Sensores

Todo o sistema é alimentado a partir de dois transformadores de 5 V conectados a uma tomada elétrica no interior do laboratório, o que assegura o funcionamento contínuo do sistema. Um transformador alimenta o sistema de aquisição de dados de radiação, localizado no telhado, através de uma extensão USB de 10 metros e o outro transformador alimenta o Arduino através do cabo USB cinzento visível na Figura 28.

3.5.3. CÓDIGO DO ARDUINO

O *datalogger* GP1, que armazena os valores de radiação solar, é controlado a partir do software DELTALINK, que permite fazer a leitura e o registo dos dados de acordo com as necessidades do utilizador. No entanto, para a monitorização da tensão, corrente e temperatura do painel funcionar é necessário que o Arduino receba ordens, para este interagir e controlar o funcionamento do *hardware*. Consequentemente, desenvolveu-se um código no Arduino IDE que permite a comunicação e o envio de comandos a todos os dispositivos ligados ao Arduino. O código escrito consiste, de forma geral, em duas rotinas principais, o *setup* e o *loop*. A rotina *setup* marca o início da execução do código e corre uma vez, a rotina *loop* repete-se continuamente. Outra parte importante do código encontra-se no início, antes da rotina *setup*, onde se incluem as diretivas de pré-processamento e se declaram as variáveis globais. O código desenvolvido para este projeto (Anexo A) está representado sob forma de diagrama de atividades na Figura 29.

Arrefecimento Convectivo de Painéis Fotovoltaicos

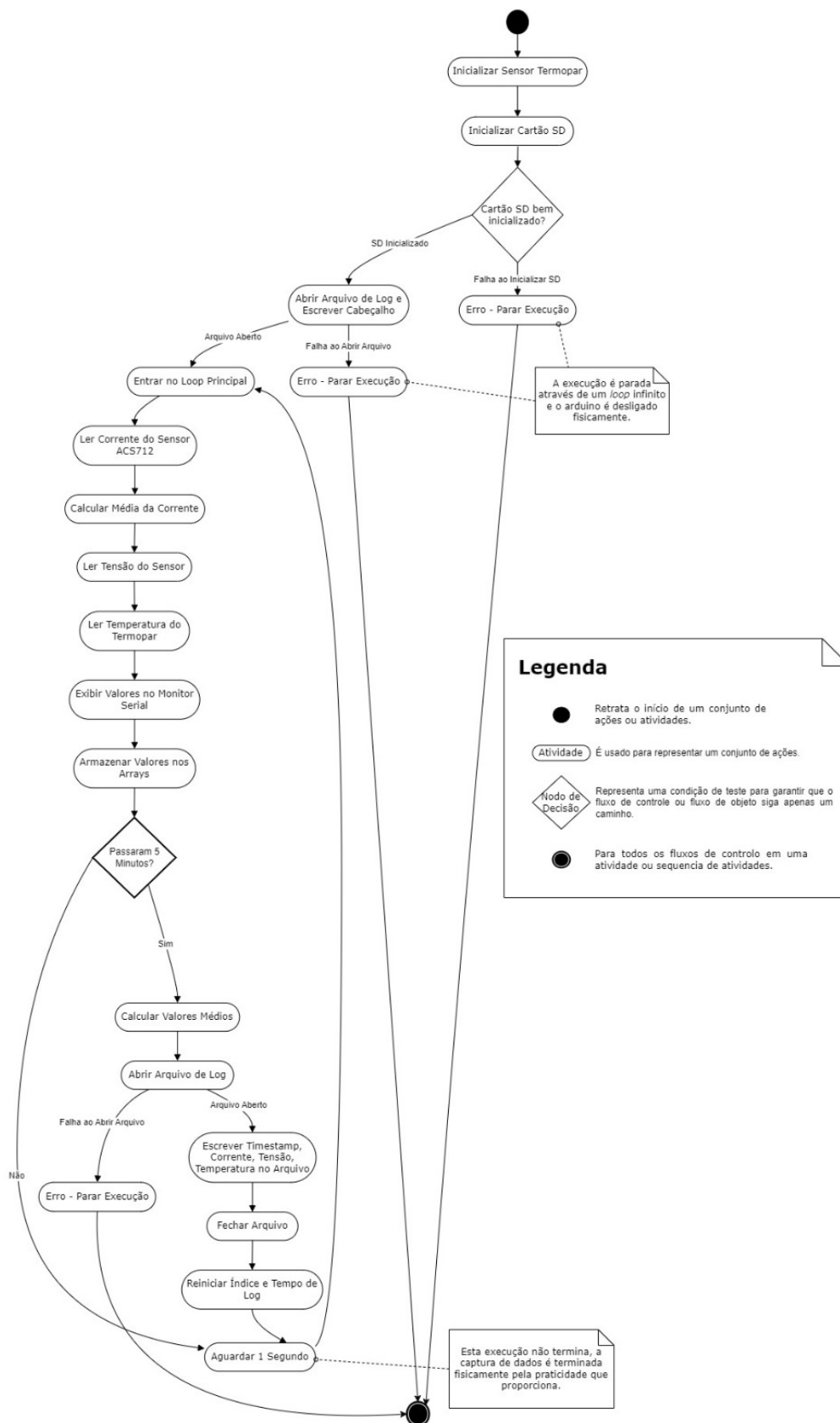


Figura 29 –Algoritmo do código utilizado no Arduino IDE

O algoritmo descreve as principais etapas de inicialização de dispositivos, recolha de dados e posterior armazenamento, sendo que a cada atividade representa uma ação, um nó de decisão ou um fluxo de controlo. O sistema começa com a inicialização do termopar, cartão SD e correspondentes bibliotecas. A validação do cartão SD é um nó de decisão importante. Caso falhe, a execução do sistema é encerrada, o que evita a recolha de dados sem capacidade de armazenamento. Os sensores de tensão e corrente não precisam de ser inicializados porque são sensores analógicos que fornecem um sinal de tensão lido diretamente pelo Arduino, sem a necessidade de recorrer a bibliotecas.

Depois da inicialização, o sistema entra no *loop* principal de execução, onde os três parâmetros são medidos pelos respetivos sensores. Após a recolha dos dados, os valores são exibidos no monitor série e armazenados em *arrays* temporários para, posteriormente, serem calculadas as médias de cada parâmetro entre intervalos de cinco minutos. O registo, efetuado imediatamente após o cálculo das médias, é realizado em formato de ficheiro de texto, no cartão SD.

O algoritmo foi modelado segundo UML por ser uma das linguagens de modelação mais utilizadas e ser reconhecida pela ISO.

3.6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.6.1. PERÍODO E CONDIÇÕES DE MONITORIZAÇÃO

A monitorização da instalação fotovoltaica decorreu entre os dias 23 de outubro e 11 de novembro de 2024, em ambiente exterior, no telhado do DEM da Universidade do Minho. Foram recolhidos dados continuamente relativos a tensão e correntes elétricas, temperatura do painel e radiação solar incidente, registando-se valores médios a cada 5 minutos. Ao longo do período de monitorização, verificaram-se diferentes condições atmosféricas, permitindo a análise do comportamento do painel em dias de céu limpo, parcialmente nublado e completamente nublado.

Como se pode verificar nas Figura 30 e 31, durante o fim de outubro e o início de novembro, em Guimarães, a temperatura ambiente oscilou entre os 10 e 20 °C, com uma considerável humidade relativa, entre os 60% e 85%. No entanto, foram dias de pouca precipitação e com várias oscilações na percentagem de cobertura de nuvens, existindo dias de céu limpo e dias completamente ou parcialmente nublados. A direção do vento manteve-se praticamente constante, nos dias monitorizados, sempre com velocidades baixas, entre 5 e 15 km/h.

Arrefecimento Convectivo de Painéis Fotovoltaicos

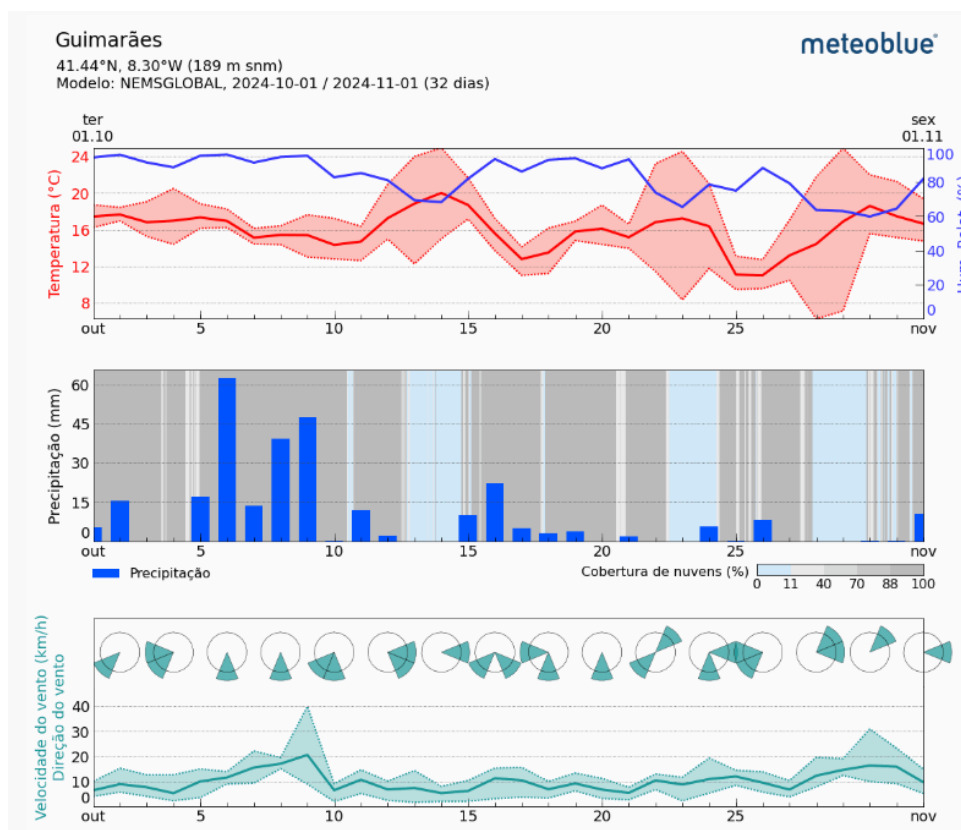


Figura 30 – Condições meteorológicas durante o mês de outubro, em Guimarães
(fonte: https://www.meteoblue.com/pt/tempo/semana/guimarães_portugal_2738752)

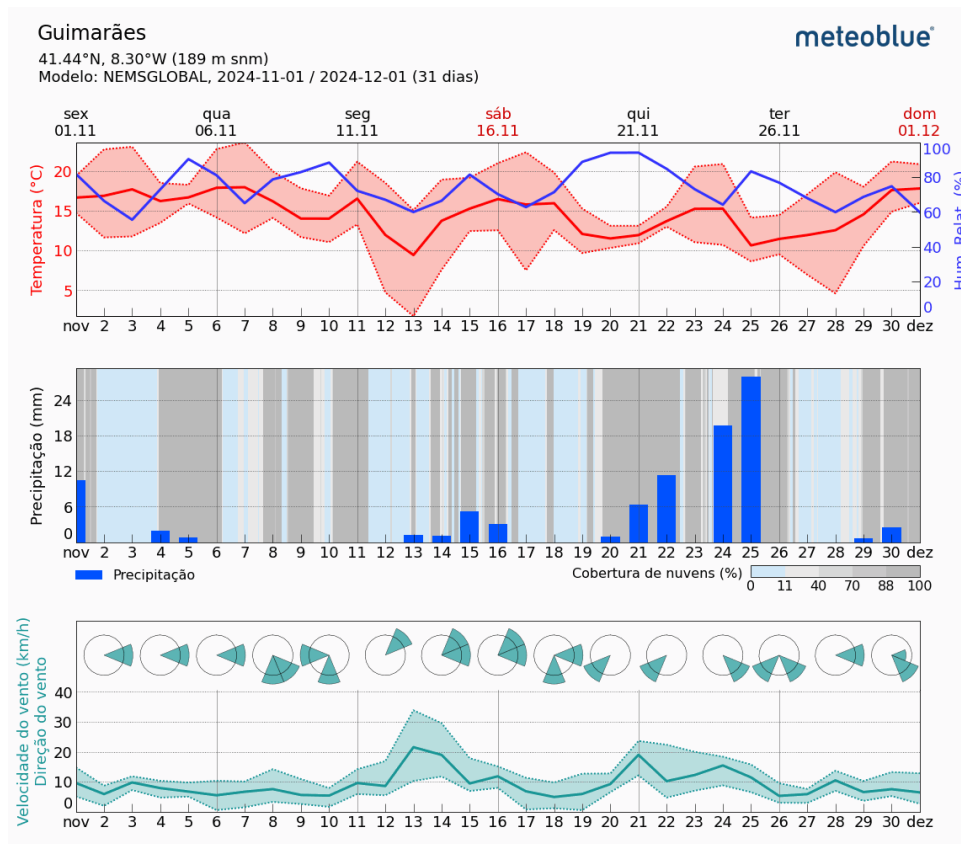


Figura 31 – Condições meteorológicas durante o mês de novembro, em Guimarães
(fonte: https://www.meteoblue.com/pt/tempo/semana/guimarães_portugal_2738752)

3.6.2. MÉTODO EXPERIMENTAL

O sistema de monitorização foi desenvolvido para analisar detalhadamente a influência da temperatura de operação do painel fotovoltaico, um dos parâmetros críticos que prejudica o seu desempenho. A partir da recolha de dados em tempo real, quantificou-se o impacto da temperatura na potência debitada pelo painel, fornecendo uma base sólida para a implementação de estratégias de mitigação, como sistemas de arrefecimento. A potência elétrica, que representa a quantidade de energia produzida por segundo, é calculada a partir da multiplicação entre a tensão e corrente elétricas:

$$P = UI \quad (7)$$

Sendo um indicador direto da eficiência do sistema fotovoltaico e sensível a variações das condições ambientais e operacionais, como a temperatura do painel e a intensidade da radiação solar, o cálculo e a análise da potência debitada pelo painel permitem relacionar o impacto destas variáveis e identificar os cenários em que o sistema apresenta melhor ou pior desempenho.

Para avaliar o impacto térmico de forma precisa, isolou-se o fator radiação, visto que este é o mais determinante na performance do sistema, pois fornece a energia primária, posteriormente convertida pelo painel em eletricidade. No entanto, em condições de radiação inferior a 200 W/m², o desempenho do painel torna-se incerto e pouco preciso, resultando em valores reduzidos de tensão e corrente elétricas, o que limita a produção energética e dificulta a avaliação do impacto térmico. Por este motivo, os dados recolhidos durante os 16 dias de monitorização foram filtrados para incluir apenas os períodos em que a radiação solar ultrapassou os 200 W/m² onde o funcionamento do painel é mais consistente e representativo do seu desempenho em condições reais. Depois de filtrados, foram organizados em intervalos de radiação predefinidos (200-299 W/m², 300-399 W/m², etc.), para assegurar que as comparações fossem realizadas em condições de radiação semelhantes.

Para cada faixa de radiação, elaboraram-se gráficos de dispersão que permitem analisar o impacto térmico isolado e calculou-se o coeficiente de temperatura da potência máxima, quantificando numericamente a influência da temperatura na potência fornecida pelo painel. Este coeficiente, representado pela letra γ , é expresso em W/°C, e representa a diminuição da potência máxima fornecida por cada grau Celsius de aumento na temperatura do painel. Para calcular o coeficiente de temperatura em W/°C foi aplicada a equação (8):

$$\gamma = \frac{P_{Tmín} - P_{Tmáx}}{T_{máx} - T_{mín}} \quad (8)$$

Onde:

- $T_{m\acute{a}x}$ e $T_{m\acute{i}n}$: temperaturas máxima e mínima atingidas pelo painel no intervalo de radiação em análise;
- $P_{Tm\acute{i}n}$: potência fornecida pelo painel no instante $T_{m\acute{i}n}$, geralmente correspondente  potência máxima do intervalo.
- $P_{Tm\acute{a}x}$: potência fornecida pelo painel no instante $T_{m\acute{a}x}$, geralmente correspondente  potência mínima do intervalo.

Em alguns intervalos de radiação solar incidente, verificam-se alguns desvios ocasionais entre os instantes em que a temperatura máxima e a potência mínima foram registadas, assim como entre a temperatura mínima e potência máxima. Este comportamento reflete a variabilidade natural das condições reais, como pequenas flutuações na radiação dentro da mesma faixa, da a utilização da potência registada nos instantes em que a temperatura máxima e mínima que, em maior parte dos intervalos analisados, corresponde à potência mínima e máxima, respetivamente.

O coeficiente de temperatura também pode ser expresso em %/C (equação 9) indicando a percentagem de perda relativa de potência por grau Celsius em relação  potência máxima medida em cada faixa de radiação:

$$\gamma = \frac{P_{Tm\acute{i}n} - P_{Tm\acute{a}x}}{P_{Tm\acute{i}n}(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})} \times 100 \quad (9)$$

Este coeficiente permite quantificar objetivamente o impacto térmico no desempenho do painel e identificar padrões consistentes de perda de potência associados ao aumento de temperatura. Deste modo, nas secções seguintes, é realizada a análise gráfica e o cáculo do coeficiente de temperatura para diferentes gamas de radiação solar, permitindo uma avaliação mais detalhada do impacto térmico na potência fornecida pelo painel fotovoltaico.

O *software* utilizado para o tratamento e análise dos dados recolhidos foi o Microsoft Excel, onde foram realizados a organização dos dados, o cáculo de estatísticas descritivas e a criação de gráficos que permitiram relacionar as diferentes varáveis monitorizadas.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

Nesta secção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o período de monitorização do sistema fotovoltaico. O estudo foi realizado com o objetivo de avaliar a influência da temperatura de operação do painel fotovoltaico no seu desempenho energético, analisando a relação entre a potência fornecida e as variáveis ambientais e elétricas monitorizadas.

Inicialmente, é feita uma análise geral do comportamento do sistema ao longo do período experimental, destacando os padrões diários de radiação solar, temperatura do painel e potência elétrica gerada, onde são comparadas três condições atmosféricas distintas – céu limpo, céu parcialmente nublado e céu completamente nublado – de modo a ilustrar como as variações meteorológicas influenciam a potência fornecida pelo painel fotovoltaico. Além disso, são apresentados os cálculos dos diferentes coeficientes de temperatura da potência máxima em cada intervalo de radiação analisado, um parâmetro fundamental para quantificar o impacto térmico no desempenho do painel.

Por fim, discutem-se as principais limitações do sistema de monitorização e os desafios inerentes à análise dos dados experimentais, incluindo potenciais melhorias futuras. A interpretação dos resultados permitirá fundamentar a necessidade da implementação de sistemas de arrefecimento, tema explorado no capítulo 5.

Antes da apresentação dos resultados obtidos, importa referir que, apesar do cuidado na implementação do sistema de monitorização, alguns dados podem apresentar desvios em relação ao comportamento esperado, nomeadamente no que respeita às curvas de potência elétrica em dias de céu limpo. Estes desvios poderão dever-se a possíveis limitações nos sensores utilizados, falhas pontuais na aquisição de dados ou outros fatores não identificados durante o período experimental. Por esse motivo, a interpretação dos resultados deve ser feita com cautela, reconhecendo-se a possibilidade de imprecisões em determinadas medições.

4.1. COMPORTAMENTO GERAL DO SISTEMA

Para ilustrar o comportamento geral da instalação em diferentes condições climáticas, selecionaram-se três dias representativos, um de céu limpo, um de céu parcialmente nublado e um de céu completamente nublado, para analisar e comparar a variação da radiação solar, da temperatura do painel e da potência gerada ao longo do tempo.

As variáveis monitorizadas apresentam padrões diários consistentes. Geralmente, a radiação solar e a temperatura do painel atingem os seus picos entre as 12h e 14h, e a potência fornecida segue este comportamento, com reduções observadas em períodos de alta temperatura. No entanto, em dias parcialmente ou totalmente nublados, a radiação solar flutua, o que resulta em variações significativas da tensão e corrente elétricas do painel. Por outro lado, a temperatura de operação do painel é mais baixa nestes dias, o que, em determinados intervalos de radiação, favorece o desempenho do sistema fotovoltaico.

4.1.1. CÉU LIMPO

Os gráficos apresentados nas Figuras 32 e 33 demonstram a evolução típica da radiação solar ao longo de um dia de céu limpo em outubro, com um aumento gradual pela manhã, atingido o pico (622,87 W/m²) às 13h10m, e um declínio durante a tarde.

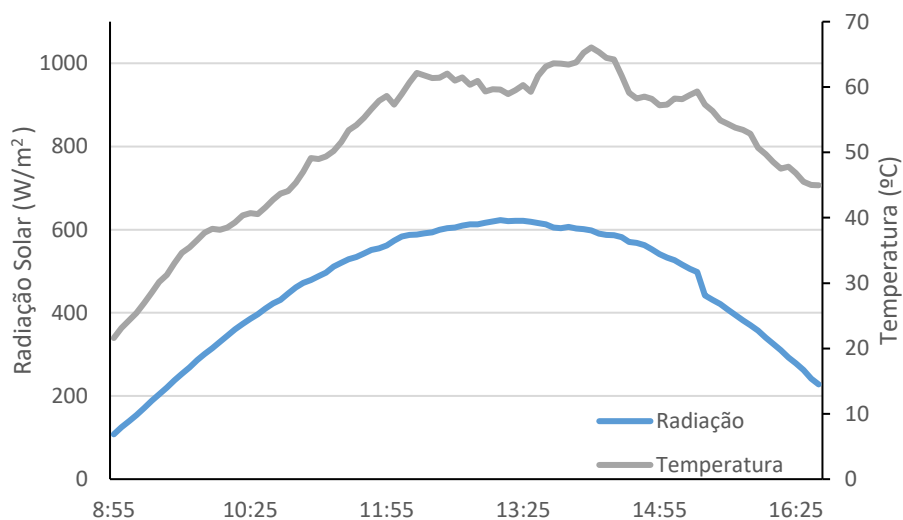


Figura 32 –Variação da radiação solar e da temperatura do painel ao longo de um dia de céu limpo (23/10/2024)

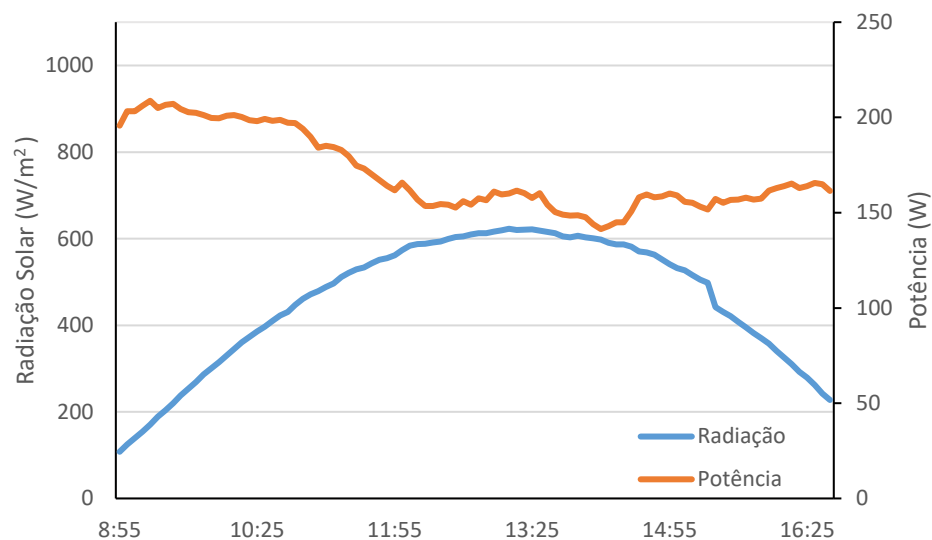


Figura 33 – Variação da radiação solar e da potência do painel ao longo de um dia de céu limpo (23/10/2024)

Na Figura 32, verifica-se que a temperatura do painel segue uma tendência similar à da radiação solar, com um ligeiro atraso devido à inércia térmica, apresentando uma média de 51,20 °C e atingindo um valor máximo de 66,06 °C, às 14h10m. Por outro lado, como ilustrado na Figura 33, a potência fornecida pelo painel apresenta um comportamento que se desvia do esperado, com valores elevados nas primeiras horas do dia, mesmo quando a radiação ainda é relativamente baixa. Com o aumento gradual da radiação e da temperatura do painel, a potência tende a diminuir, o que, à primeira vista, poderia ser interpretado como consequência do impacto térmico na eficiência do sistema fotovoltaico.

No entanto, a discrepância observada entre a curva de potência e a de radiação solar, sobretudo em condições de céu limpo, sugere que este efeito poderá não ser inteiramente justificado apenas pela influência térmica. A magnitude da variação de potência observada excede o que seria esperado para um sistema em funcionamento normal. Assim, considera-se que estas anomalias possam estar associadas a limitações no sistema de aquisição de dados, nomeadamente a possíveis imprecisões nos sensores de corrente ou tensão, interferências no registo, ou outros fatores não identificados durante a monitorização.

4.1.2. CÉU PARCIALMENTE NUBLADO

Nos gráficos apresentados nas Figuras 34 e 35, observa-se que, no dia de céu parcialmente nublado, a radiação solar apresenta oscilações significativas ao longo do dia, refletindo a cobertura intermitente de nuvens. A radiação atingiu o pico de 478,58 W/m² às 12h25m, sendo a média diária igual a 204,50 W/m².

Arrefecimento Convectivo de Painéis Fotovoltaicos

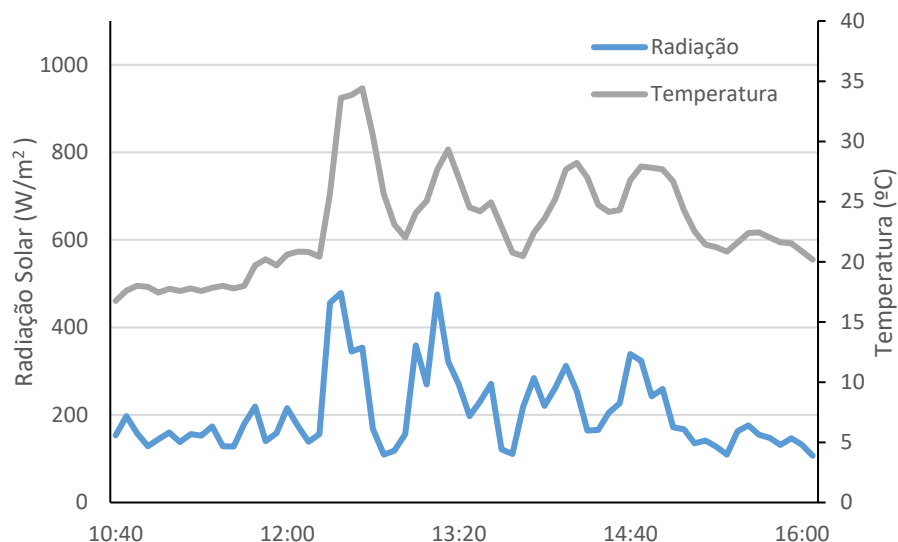


Figura 34 – Variação da radiação solar e da temperatura do painel ao longo de um dia de céu parcialmente nublado (26/10/2024)

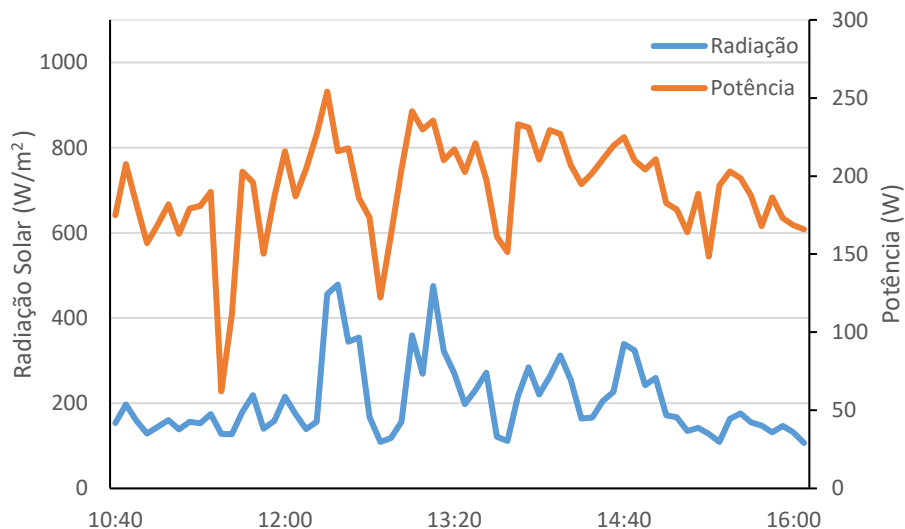


Figura 35 – Variação da radiação solar e da potência do painel ao longo de um dia de céu parcialmente nublado (26/10/2024)

Na Figura 34, verifica-se que a temperatura do painel acompanha as variações da radiação, apresentando uma média diária de 23,01 $^{\circ}C$. A temperatura máxima foram 34,41 $^{\circ}C$, valor muito mais baixo do que os atingidos no dia de céu limpo. Na Figura 35, observa-se que a potência gerada pelo painel é altamente sensível às flutuações de radiação, apresentando um comportamento irregular ao longo do dia. No entanto, devido à temperatura média mais baixa do painel, a média de potência fornecida ao longo deste dia (191,73 W) foi superior à média do dia de céu limpo (170,75 W), o que demonstra que, em condições de alta radiação, a eficiência do painel é significativamente prejudicada pelo aumento da temperatura de operação.

4.1.3. CÉU COMPLETAMENTE NUBLADO

Nas Figuras 36 e 37, verifica-se que, no dia de céu completamente nublado, o pico da radiação solar ocorreu logo no início do dia onde atinge um pico de $544,62 \text{ W/m}^2$, às 10h05m. No entanto, ao longo do fim da manhã e durante a tarde, a radiação mantém-se consistentemente baixa, sendo a média diária de $161,93 \text{ W/m}^2$.

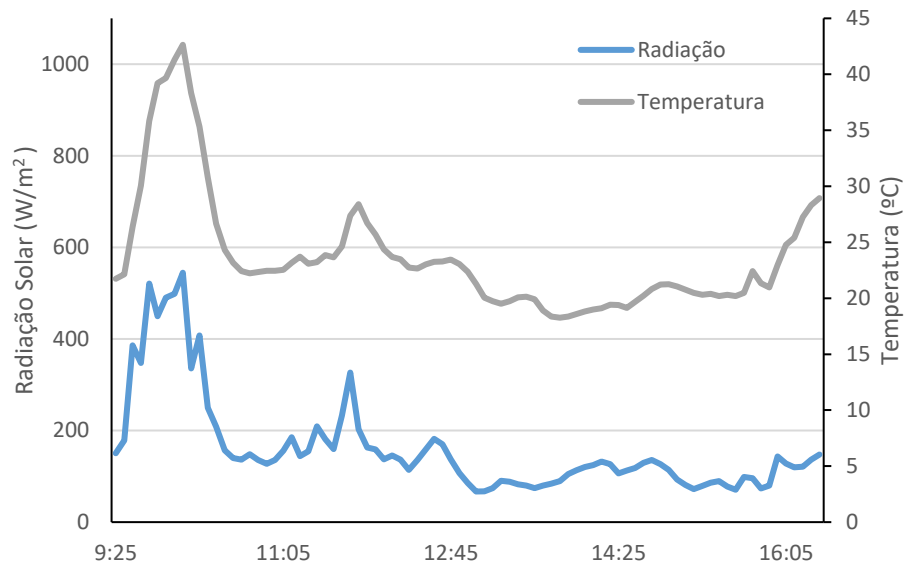


Figura 36 – Variação da radiação solar e da temperatura do painel ao longo de um dia de céu completamente nublado (01/11/2024)

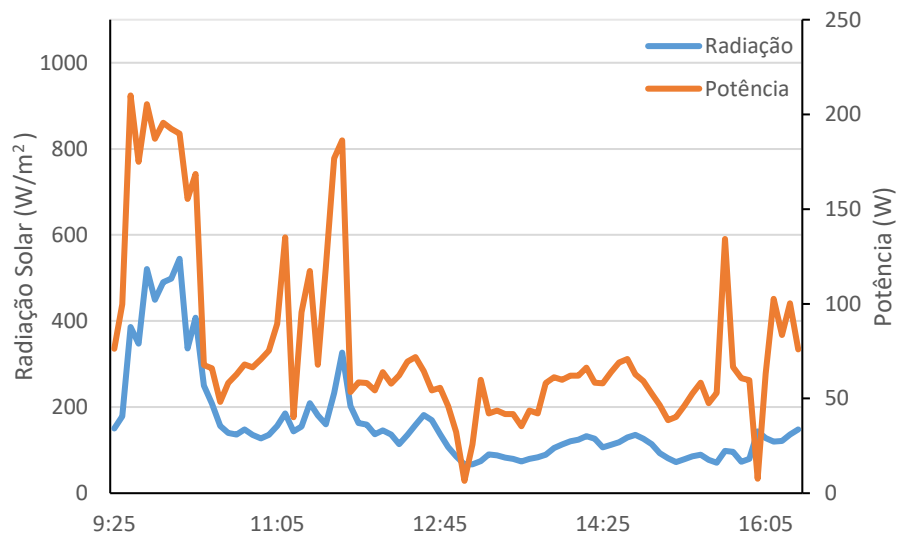


Figura 37 – Variação da radiação solar e da potência do painel ao longo de um dia de céu completamente nublado (01/11/2024)

A temperatura do painel, como em todos os casos, acompanha a radiação solar, e atinge o seu pico ($42,64^{\circ}\text{C}$) à mesma hora do pico de radiação, mas ao longo do dia vai diminuindo e resulta numa média diária de $23,74^{\circ}\text{C}$, semelhante à do dia parcialmente nublado. Na Figura 37, observa-se que a

potência fornecida após o início da manhã é limitada pela radiação incidente, o que resultou numa média de 78,27 W, valor significativamente inferior aos dias anteriores. No entanto, é possível notar em determinados intervalos de tempo, que ligeiros aumentos da radiação incidente (para a faixa dos 200-300 W/m²) resultam em grandes aumentos na potência debitada pelo painel. Este comportamento evidencia que o sistema pode operar perto da sua eficiência máxima mesmo com valores médios de radiação, desde que a temperatura de funcionamento seja favorável.

Deste modo, a análise do comportamento geral do sistema demonstrou que o seu desempenho é dependente da radiação solar incidente, mas também da temperatura de operação. O aumento desta temperatura tem um impacto significativo na eficiência de conversão de energia do painel, limitando a potência gerada em dias de níveis altos de radiação. Por outro lado, temperaturas mais baixas permitem uma maior eficiência, mesmo com níveis moderados de radiação. No próximo capítulo, será explorado com maior detalhe este impacto térmico, avaliando a relação direta entre a temperatura do painel e a potência fornecida pelo sistema.

4.2. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA POTÊNCIA FORNECIDA

4.2.1. ANÁLISE GRÁFICA E CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE TEMPERATURA

Para quantificar detalhadamente esse impacto térmico, é essencial determinar os coeficientes de temperatura, que expressam a variação da potência do painel em função da temperatura para diferentes níveis de radiação solar.

De seguida, será apresentada uma análise gráfica baseada nos dados experimentais recolhidos, permitindo visualizar a relação entre temperatura e potência elétrica fornecida pelo painel, por gama de radiação solar. A partir destes resultados, serão calculados os coeficientes de temperatura da potência máxima para diferentes intervalos de radiação, possibilitando uma avaliação quantitativa da perda de desempenho térmico do sistema fotovoltaico.

4.2.1.1. INTERVALO DE RADIAÇÃO: 200-299 W/m²

O gráfico da Figura 38 mostra a relação inversa entre a temperatura do painel e a potência debitada pelo mesmo para uma faixa de radiação entre 200 e 299 W/m².

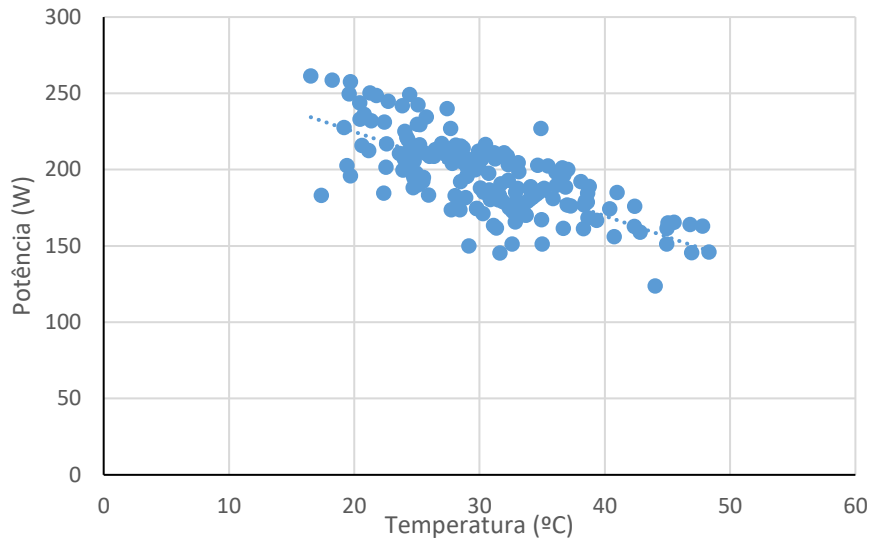


Figura 38 – Relação entre a temperatura do painel e a potência fornecida para níveis de radiação $\in [200;299]$ W/m²

Verifica-se que, à medida que a temperatura do painel aumenta, a potência fornecida diminui de forma clara e consistente, evidenciando o impacto negativo do aumento térmico no desempenho do sistema. Entre esta faixa de radiação, a potência máxima atingida (261,37 W) coincide com o momento em que a temperatura do painel foi menor (16,53 °C). Com o aumento da temperatura para valores superiores a 35 °C, a potência diminui significativamente, para valores próximos de 150 W, indicando uma quebra significativa de performance do painel fotovoltaico.

Neste intervalo, os valores utilizados para o cálculo do coeficiente de temperatura foram:

- $T_{máx} = 48,30$ °C
- $P_{Tmáx} = 145,94$ W
- $T_{mín} = 16,53$ °C
- $P_{Tmín} = 261,37$ W

Substituindo os valores nas equações (8) e (9), obtemos:

$$\gamma = \frac{261,37 - 145,94}{48,30 - 16,53} = 3,63 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

$$\gamma = \frac{261,37 - 145,94}{261,37(48,30 - 16,53)} \times 100 = 1,39 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$$

Estes valores indicam que, neste intervalo radiação, para cada grau Celsius de aumento na temperatura do painel, a potência máxima fornecida diminui, em média, 3,63 W ou 1,39 %.

Comparativamente às próximas faixas de radiação, a dispersão dos dados é relativamente elevada devido ao número reduzido de dados recolhidos e à menor estabilidade nas condições de operação do painel em baixos níveis de radiação, nomeadamente em valores mais próximos de 200 W/m².

4.2.1.2. INTERVALO DE RADIAÇÃO: 300-399 W/m²

Na Figura 39, também se observa que, no intervalo de radiação entre 300 e 399 W/m², existe um claro padrão de diminuição da potência fornecida pelo painel à medida que a sua temperatura aumenta,

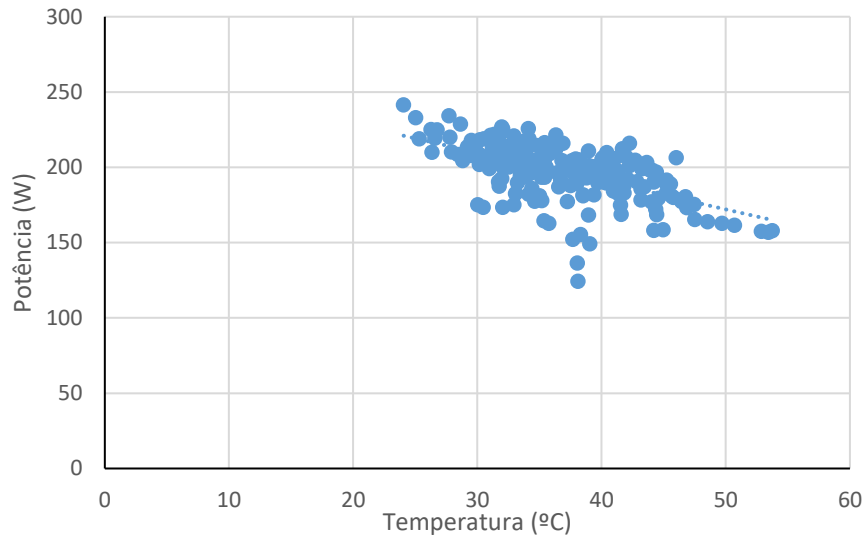


Figura 39 – Relação entre a temperatura do painel e a potência fornecida para níveis de radiação $\in [300;399]$ W/m²

À semelhança da faixa de radiação anterior, a potência máxima (241,48 W) e a temperatura mínima (24,06 °C) foram registadas no mesmo *timestamp*, enquanto, em temperaturas superiores a 40 °C, a potência, geralmente, cai para valores inferiores a 200 W.

Neste intervalo, os valores utilizados para o cálculo do coeficiente de temperatura foram:

- $T_{m\acute{a}x} = 53,76$ °C
- $P_{Tm\acute{a}x} = 157,81$ W
- $T_{m\acute{i}n} = 24,06$ °C
- $P_{Tm\acute{i}n} = 241,48$ W

Substituindo os valores nas equações (8) e (9), obtemos:

$$\gamma = \frac{241,48 - 157,81}{53,76 - 24,06} = 2,82 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

$$\gamma = \frac{241,48 - 157,81}{241,48(53,76 - 24,06)} \times 100 = 1,17 \text{ \%/}^{\circ}\text{C}$$

Estes valores indicam que, neste intervalo, para cada grau Celsius de aumento na temperatura da superfície do painel, a potência máxima fornecida diminui, em média, 2,82 W ou 1,17 %.

A dispersão dos dados é moderada visto que, apesar de algumas variabilidades, os valores seguem um padrão consistente neste intervalo de radiação solar, reafirmando o impacto negativo do coeficiente térmico.

4.2.1.3. INTERVALO DE RADIAÇÃO: 400-499 W/m²

Na Figura 40, observa-se que, para valores de radiação entre 400 e 499 W/m², o comportamento térmico do sistema fotovoltaico é idêntico às faixas anteriores, sendo atingidas temperaturas superiores.

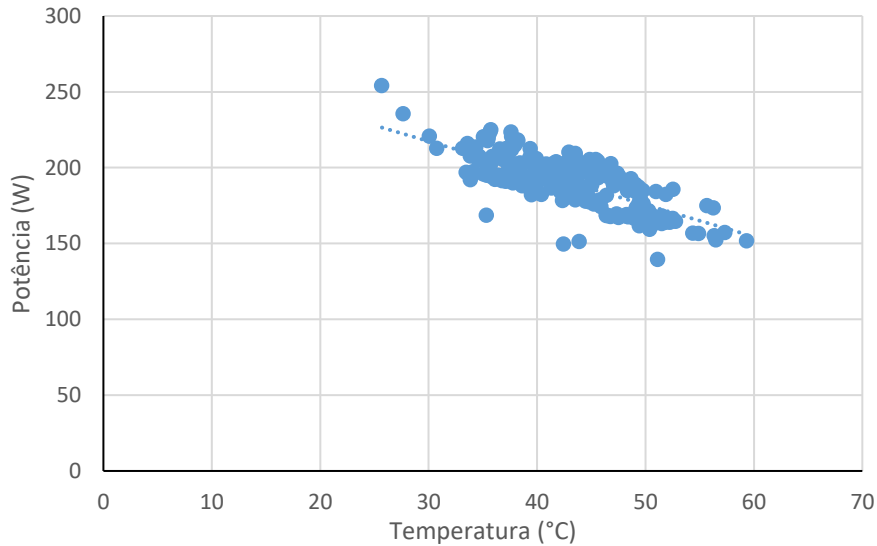


Figura 40 – Relação entre a temperatura do painel e a potência fornecida para níveis de radiação $\in [400;499]$ W/m²

A potência máxima (254,09 W) e a temperatura mínima (25,69 °C) foram novamente registradas no mesmo *timestamp*. Em temperaturas superiores a 50 °C, a potência fornecida nunca atingiu os 200 W.

Neste intervalo, os valores utilizados para o cálculo do coeficiente de temperatura foram:

- $T_{máx} = 59,32$ °C
- $P_{Tmáx} = 151,72$ W
- $T_{mín} = 25,69$ °C
- $P_{Tmín} = 254,09$ W

Substituindo os valores nas equações (8) e (9), obtemos:

$$\gamma = \frac{254,09 - 151,72}{59,32 - 25,69} = 3,04 \text{ W/°C}$$

$$\gamma = \frac{254,09 - 151,72}{254,09(59,32 - 25,69)} \times 100 = 1,20 \text{ \%/°C}$$

Estes valores indicam que, nesta faixa, para cada grau Celsius de aumento na temperatura da superfície do painel, a potência máxima fornecida diminui, em média, 3,04 W ou 1,20 %.

A dispersão dos valores recolhidos é semelhante à da faixa anterior, sugerindo que o impacto da temperatura pode ser influenciado por pequenas flutuações na radiação solar dentro do mesmo intervalo de radiação.

4.2.1.4. INTERVALO DE RADIAÇÃO: 500-599 W/m²

Neste intervalo de radiação solar, o declive da linha de tendência da relação entre a temperatura do painel e a potência fornecida é ligeiramente mais acentuado, como se verifica na Figura 41, ficando ainda melhor evidenciada a influência da temperatura durante o funcionamento do sistema fotovoltaico.

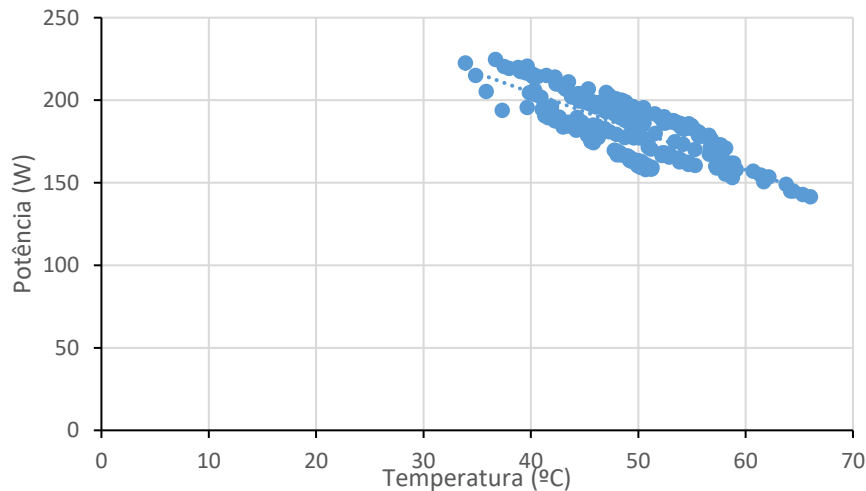


Figura 41 – Relação entre a temperatura do painel e a potência fornecida para níveis de radiação $\in [500;599]$ W/m²

O facto da potência máxima atingida (224,58 W) ser consideravelmente menor que nas faixas anteriores está relacionada com a ausência de produção de energia pelo painel em condições ideais (25 °C), visto que a temperatura mínima registada neste intervalo foi de 33,90 °C. Em casos de temperaturas muito elevadas, superiores a 60 °C, a potência fornecida pelo painel ronda sempre os 150 W, valor muito inferior ao esperado em condições ideais de funcionamento.

Neste intervalo, os valores utilizados para o cálculo do coeficiente de temperatura foram:

- $T_{máx} = 66,06$ °C
- $P_{Tmáx} = 141,41$ W
- $T_{mín} = 33,90$ °C
- $P_{Tmín} = 222,48$ W

Substituindo os valores nas equações (8) e (9), obtemos:

$$\gamma = \frac{222,48 - 141,41}{66,06 - 33,90} = 2,52 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

$$\gamma = \frac{222,48 - 141,41}{222,48(66,06 - 33,90)} \times 100 = 1,13 \text{ \%/}^{\circ}\text{C}$$

Estes valores indicam que, neste intervalo, para cada grau Celsius de aumento na temperatura da superfície do painel, a potência máxima fornecida diminui, em média, 2,52 W ou 1,13 %.

A grande quantidade de dados recolhidos e precisão na relação entre temperatura e potência levou a uma dispersão reduzida de dados para esta faixa de radiação solar.

4.2.1.5. INTERVALO DE RADIAÇÃO: 600-699 W/m²

A Figura 42 apresenta a relação entre a temperatura e a potência fornecida, para radiações solares na gama dos 600-699 W/m².

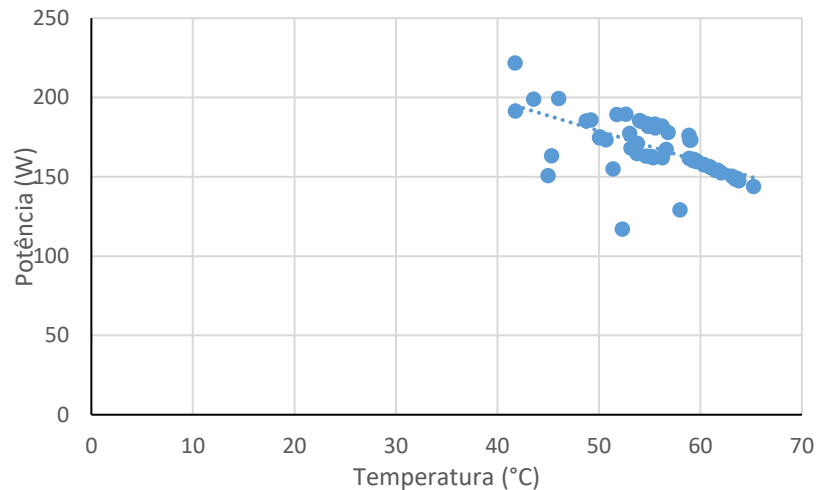


Figura 42 – Relação entre a temperatura do painel e a potência fornecida para níveis de radiação $\in [600;699]$ W/m²

Para este intervalo, observa-se uma continuidade no padrão de redução da potência com o aumento da temperatura. Também nesta faixa de radiação, o valor de potência máxima (221,76 W) coincide com a temperaturas mínima registada (41,74 °C), sendo esta consideravelmente inferior à temperatura ideal de funcionamento do sistema.

Neste intervalo, os valores utilizados para o cálculo do coeficiente de temperatura foram:

- $T_{máx} = 65,23$ °C
- $P_{Tmáx} = 143,86$ W
- $T_{mín} = 41,74$ °C
- $P_{Tmín} = 221,76$ W

Substituindo os valores nas equações (8) e (9), obtemos:

$$\gamma = \frac{221,76 - 143,86}{65,23 - 41,74} = 3,32 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

$$\gamma = \frac{221,76 - 143,86}{221,76(66,06 - 41,74)} \times 100 = 1,44 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$$

Estes valores indicam que, nesta gama, para cada grau Celsius de aumento na temperatura da superfície do painel, a potência máxima fornecida diminui, em média, 3,32 W ou 1,44 %.

Devido à reduzida quantidade de dados recolhidos, as pequenas flutuações nos valores de radiação dentro do intervalo em análise e à alta temperatura de funcionamento do painel, a dispersão dos dados é relativamente elevada. Este é o último intervalo analisado visto que a radiação solar incidente no painel só atingiu valores superiores a 699 W/m^2 em escassos instantes, insuficientes para a realização de um gráfico de dispersão, com uma clara linha de tendência, como se verifica nos casos anteriores.

4.2.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos confirmam que o impacto térmico é um dos fatores mais determinantes no desempenho dos painéis fotovoltaicos. A análise dos resultados e o cálculo dos coeficientes de temperatura revelaram que à medida que a temperatura do painel aumenta, a potência fornecida pelo mesmo diminui, independentemente da faixa de radiação solar. Contudo, a magnitude deste impacto varia consoante a intensidade da radiação, evidenciando dinâmicas operacionais e físicas que merecem uma discussão detalhada. Além disso, a interpretação destes resultados em contextos reais de instalação oferece uma visão prática sobre a eficiência e sustentabilidade dos sistemas fotovoltaicos em diferentes cenários climáticos e de operação. Os coeficientes de temperatura calculados para os diferentes intervalos de radiação estão sumarizados na Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficiente de temperatura obtidos para os diferentes intervalos de radiação solar incidente

Intervalo de Radiação (W/m^2)	γ ($\text{W}/^\circ\text{C}$)	γ ($\text{\%}/^\circ\text{C}$)
[200;299]	3,63	1,39
[300;399]	2,82	1,17
[400;499]	3,04	1,20
[500;599]	2,52	1,13
[600;699]	3,32	1,44

Comparando os intervalos analisados, observa-se que, nas condições de mínima (200-299 W/m^2) e máxima radiação (600-699 W/m^2), o impacto térmico é mais acentuado, resultando nos maiores coeficientes de temperatura. Em condições de baixa radiação, este comportamento reflete maiores perdas térmicas relativamente à potência total disponível, visto que a energia produzida pelo painel é intrinsecamente limitada. Em condições de alta radiação, apesar da esperada produção energética elevada, esta é comprometida devido ao sobreaquecimento do sistema. Esse efeito é amplificado pela exposição constante a níveis elevados de radiação, que se traduz num rápido aumento da temperatura de operação do painel, exacerbado pelas limitações dos mecanismos passivos de dissipação de calor,

como a convecção natural e a radiação térmica. O aumento da temperatura nas células do painel reduz a eficiência da transferência de calor, dificultando o efeito fotovoltaico ao diminuir a diferença de potencial entre as bandas de condução e valência nos materiais semicondutores. Consequentemente, a taxa de conversão de energia solar em eletricidade é reduzida, comprometendo a produção energética. Adicionalmente, a considerável dispersão dos dados observada nestes intervalos é atribuída às flutuações momentâneas de radiação, bem como à inércia térmica do painel, que retém calor mesmo em variações atípicas da radiação.

Por outro lado, nos intervalos de radiação média (300–399 W/m², 400–499 W/m² e 500–599 W/m²), os coeficientes de temperatura apresentam valores relativamente consistentes e menores em comparação com as condições de mínima e máxima radiação. Este comportamento reflete um equilíbrio operacional, em que a radiação incidente é suficiente para garantir uma produção energética significativa, mas sem induzir um sobreaquecimento tão acentuado quanto no intervalo de máxima radiação. Nessas condições, a perda térmica em relação à potência total disponível é menos pronunciada devido à capacidade do painel de dissipar calor de forma mais eficiente antes de atingir temperaturas críticas, conferindo maior estabilidade no funcionamento do sistema e, consequentemente, um desempenho superior durante o funcionamento do sistema. No entanto, nestes intervalos, a potência fornecida pelo painel ainda é afetada negativamente pelo aumento da temperatura, o que compromete a melhor taxa de produção energética possível para o sistema fotovoltaico.

Os coeficientes de temperatura obtidos, variando entre 1,13 %/°C e 1,44 %/°C, são ligeiramente superiores aos reportados em estudos como os de Detzel e Gasparin (2018) e Mafat, Patel e Saxena (2023), que indicam coeficientes típicos entre 0,40 %/°C e 0,50 %/°C para a potência máxima fornecida em módulos de silício monocristalino. Esta discrepância pode ser justificada por variações nas condições experimentais. Enquanto os estudos mencionados foram conduzidos em ambientes laboratoriais controlados, este projeto foi realizado em campo, onde o painel está sujeito a condições ambientais reais, como flutuações de radiação solar, velocidades de vento irregulares e a consequente variação térmica. Estas condições contribuem para um aumento mais consistente e prolongado da temperatura da superfície do painel, acentuando o impacto térmico no desempenho energético. Além disso, (Detzel e Gasparin 2018) destacam que a operação dos sistemas fotovoltaicos em regimes térmicos elevados não só reduz a potência fornecida, mas também acelera a degradação dos módulos a longo prazo. Este fenómeno torna-se particularmente relevante em intervalos de alta radiação solar, superior a 600 W/m², onde o coeficiente de temperatura atinge maiores valores devido à rápida acumulação de calor nas células fotovoltaicas. Deste modo, os padrões observados na relação temperatura/potência fornecida

evidenciam que o impacto térmico em condições reais de operação é um desafio significativo e que a sua mitigação é essencial para garantir o desempenho estável e eficiente dos sistemas fotovoltaicos.

Além das diferenças identificadas entre os resultados experimentais obtidos em campo e os valores reportados na literatura, é relevante destacar o impacto direto da temperatura na produção energética em situações concretas. Para ilustrar esta influência, analisou-se a faixa de radiação 500-599 W/m², que apresentou o menor coeficiente de temperatura calculado (2,52 W/°C e 1,13 %/°C). Mesmo com um coeficiente relativamente baixo, observou-se uma perda significativa no desempenho energético do painel. Nesta faixa, a temperatura mínima registada foi de 33,90 °C, correspondendo a uma potência fornecida de 224,58 W. À medida que a temperatura aumentou, verificou-se que um incremento de 10 °C resultou numa perda aproximada de 25 W, enquanto um aumento de 30 °C reduziu a potência para cerca de 149 W, representando uma queda de desempenho de aproximadamente 33% relativamente ao valor inicial. Este exemplo evidencia que mesmo em níveis de radiação favoráveis, o sobreaquecimento do painel compromete significativamente a produção de eletricidade. Tal comportamento é particularmente relevante em cenários reais de instalação, onde as temperaturas de operação frequentemente excedem os valores ideais recomendados, mesmo em dias com temperaturas ambiente moderadas (15-20 °C), como as registadas no presente estudo. Estas perdas térmicas acumuladas ao longo do tempo traduzem-se não só numa redução imediata da eficiência, mas também em impactos económicos a longo prazo, afetando o retorno do investimento e a viabilidade operacional do sistema, destacando-se assim a necessidade de recorrer a sistemas de arrefecimento.

4.3. LIMITAÇÕES E DESAFIOS ASSOCIADOS AO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

A monitorização desenvolvida neste estudo proporcionou dados fundamentais para compreender a influência da temperatura no desempenho energético do painel fotovoltaico. No entanto, algumas limitações e desafios técnicos surgiram durante o processo de recolha e análise, os quais podem ter tido impacto, ainda que de forma controlada, na precisão e continuidade das medições realizadas. Um dos principais desafios esteve relacionado com a precisão dos sensores utilizados. Apesar de devidamente calibrados no início da monitorização, os sensores de temperatura, radiação solar e corrente/tensão elétrica podem ter apresentado desvios pontuais ao longo do período de estudo devido à alta sensibilidade ou desgaste natural dos equipamentos. Esta situação foi particularmente evidente no caso do primeiro termopar utilizado, que em setembro apresentou leituras inconsistentes e crescentemente desfasadas em relação à temperatura real do painel. Inicialmente, o termopar foi calibrado e apresentava valores fiáveis, contudo, com o tempo, descalibrou de forma não linear, o que impossibilitou a correção dos

dados. Como resultado, os dados recolhidos em setembro foram descartados, pois não foi possível determinar com precisão o quão erradas eram as medições. Outro fator limitante foi a frequência de recolha de dados, especialmente no caso do datalogger GP1 responsável pelo registo das medições de radiação solar. Este dispositivo, embora eficiente, possuía um tempo operacional limitado a 5 dias consecutivos, obrigando à substituição frequente da pilha. Esta necessidade operacional implicou deslocações regulares ao telhado do edifício do DEM, interrompendo temporariamente a continuidade da recolha de dados e exigindo um controlo rigoroso do processo para minimizar a perda de informação relevante. A localização da fonte de alimentação do sistema, instalada no interior do edifício, também representou um desafio técnico. O uso de cabos longos, nomeadamente para o termopar, pode ter introduzido atrasos térmicos e interferências nos sinais transmitidos, afetando a precisão das medições. O comprimento excessivo dos cabos resultou numa possível atenuação do sinal elétrico e em pequenas diferenças nas temperaturas registadas em comparação com os valores reais na superfície do painel. Embora estes desvios possam ser considerados marginais, é importante reconhecer a sua potencial influência nos cálculos efetuados, como os coeficientes de temperatura e a análise da potência fornecida. Adicionalmente, verificou-se que, em dias de céu limpo, a curva da potência elétrica apresentou um comportamento inesperado, não acompanhando a tendência da radiação solar de forma consistente. Em particular, registaram-se valores de potência superiores no início do dia e uma redução acentuada nos períodos de máxima radiação. Este comportamento não é compatível com o impacto térmico esperado, o qual, embora relevante, não justificaria oscilações tão pronunciadas. Assim, considera-se que estes desvios possam resultar de imprecisões nos sensores de corrente ou tensão, falhas pontuais na aquisição de dados ou interferências no sistema de registo. Esta limitação reforça a necessidade de validação contínua dos sensores e de maior redundância na monitorização.

As condições climáticas locais constituíram outro fator importante a considerar. Durante o período de monitorização, registaram-se variações bruscas de radiação solar e temperaturas ambiente relativamente amenas, entre 15 °C e 20 °C. Apesar destas temperaturas moderadas, as células fotovoltaicas atingiram valores próximos dos 60 °C, demonstrando a ineficiência dos mecanismos passivos de dissipação de calor em condições reais. Além disso, flutuações momentâneas de radiação solar causaram dispersões pontuais nos dados recolhidos, afetando a estabilidade de algumas medições e introduzindo incerteza na análise dos resultados. Adicionalmente, a duração limitada da monitorização, que decorreu ao longo de 16 dias, representou uma restrição em termos do número total de amostras recolhidas. Embora este período tenha permitido identificar padrões claros de comportamento térmico e energético do painel, uma monitorização mais extensa poderia fornecer uma base de dados mais

robusta, cobrindo uma gama maior de condições climáticas, como períodos de temperaturas extremas ou variações sazonais. Por fim, destaca-se a ausência de monitorização de variáveis complementares, como a velocidade do vento ou a humidade relativa do ar, que poderiam fornecer uma análise mais abrangente do impacto das condições ambientais no desempenho do painel. A velocidade do vento, em particular, influencia diretamente os mecanismos de arrefecimento por convecção, enquanto a humidade afeta a atenuação da radiação solar. A inclusão destas variáveis no estudo poderia ter permitido uma compreensão mais detalhada das perdas térmicas e das suas interações com o ambiente externo.

Apesar destas limitações, as medidas adotadas para mitigar os desafios enfrentados, como o controlo regular dos sensores e a substituição atempada dos componentes de monitorização, asseguraram que os dados recolhidos fossem, na sua maioria, fiáveis e representativos. No entanto, a identificação destas limitações reforça a importância de futuras melhorias no sistema de monitorização, nomeadamente através da utilização de dispositivos mais robustos, recolha contínua de dados e monitorização de variáveis adicionais, de modo a obter uma análise mais completa e precisa.

5. PROJETO DOS SISTEMAS DE ARREFECIMENTO

A partir dos resultados obtidos no capítulo anterior, que demonstraram a influência negativa do aumento da temperatura de operação no desempenho do painel fotovoltaico em estudo, aparece a necessidade de sistemas de arrefecimento que controlem e minimizem os efeitos do sobreaquecimento. Neste contexto, o presente capítulo aborda a idealização de dois sistemas de arrefecimento: um sistema passivo, a partir da promoção da convecção natural e outro sistema ativo, a partir da convecção forçada. Ambos os sistemas visam mitigar o impacto térmico, promovendo um ambiente de operação mais próximo das condições ideais e deste modo, aumentar a potência fornecida pelo painel fotovoltaico. Além disso, a integração dos sistemas de arrefecimento também tem como objetivo permitir continuar a avaliação do desempenho do sistema fotovoltaico com o sistema de monitorização previamente desenvolvido, bem como a integração de novos sensores que permitam monitorizar a influência do arrefecimento na potência fornecida pelo painel.

Desta forma, neste capítulo, são detalhados os princípios de funcionamento de ambos os sistemas, especificação técnica e as variáveis de controlo necessárias para cada abordagem. Deve-se salientar que, no âmbito desta dissertação, o sistema será apenas idealizado, ou seja, não serão realizadas simulações para avaliação do seu possível desempenho nem será incluída a análise da viabilidade económica dos sistemas. Questões relacionadas à validação e análise experimental e à relação entre o consumo energético do sistema de arrefecimento e os ganhos em eficiência energética serão abordados em trabalhos futuros.

5.1. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

5.1.1. ARREFECIMENTO PASSIVO: CONVECÇÃO NATURAL

O sistema de arrefecimento passivo proposto baseia-se na implementação de uma chaminé na parte traseira do módulo fotovoltaico para consequente promoção da circulação natural de ar, utilizando a convecção natural como mecanismo primário de dissipação de calor. Quando a superfície do painel é aquecida, devido à contínua exposição à radiação solar, o ar adjacente torna-se menos denso e ascende através da chaminé, movimento amplificado pela sua inclinação, que cria uma diferença de pressão. Essa diferença de pressão promove a entrada de ar ambiente mais fresco pela base da chaminé, estabelecendo um fluxo contínuo de ar no seu interior, que promove a redução da temperatura do painel e, consequentemente, das células fotovoltaicas. Este ciclo contínuo cria uma circulação natural de ar que

dissipa o calor acumulado no painel e torna possível alcançar um ambiente de operação mais eficaz e aumentar a média de potência fornecida pelo painel ao longo do tempo.

O esquema ilustrado na Figura 43 apresenta a configuração geométrica básica do sistema de arrefecimento, sendo a superfície superior o painel fotovoltaico e a inferior uma parede adiabática.

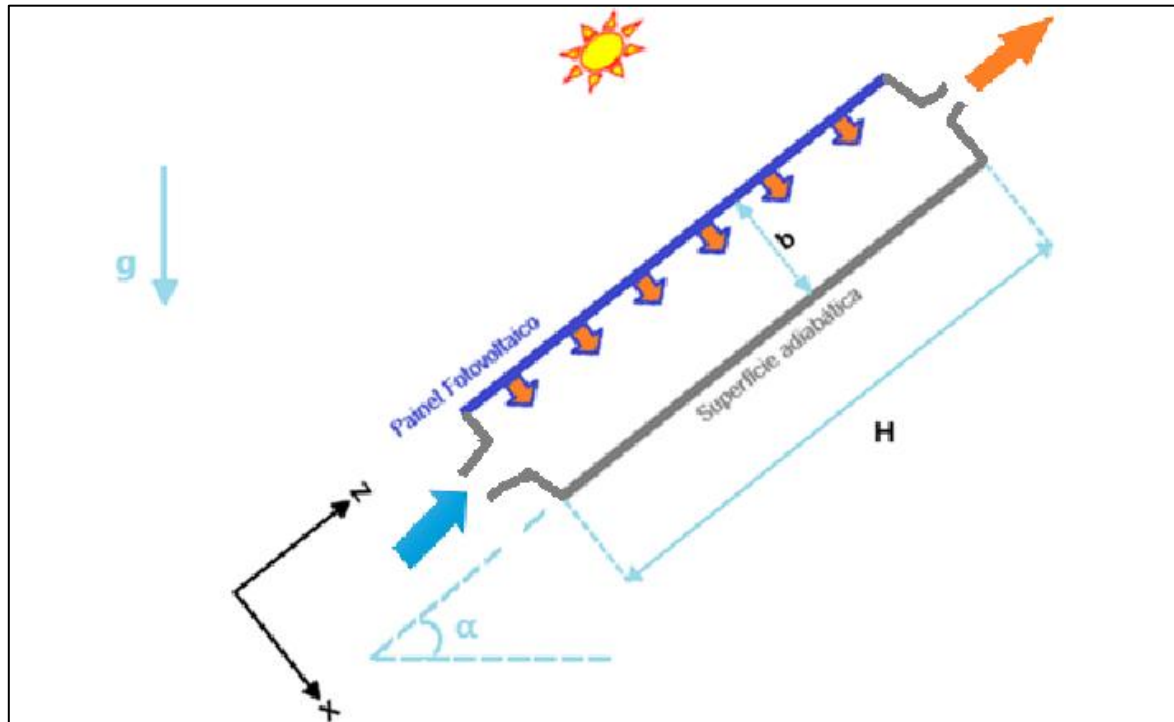


Figura 43 – Esquema da chaminé criada para a promoção da convecção natural

A chaminé apresenta uma inclinação próxima à do painel (cerca de 30°) para maximizar o efeito de convecção natural e a secção transversal é retangular, garantindo um fluxo de ar uniforme e uma baixa resistência ao movimento do fluido. A razão geométrica ($Ar = H/b$) entre o comprimento do canal, H , e a largura do canal, b , é um parâmetro crítico. Alguns estudos revistos na literatura indica que uma razão próxima a 10/1 é a ideal para a promoção da circulação natural, minimizar perdas térmicas e garantir uma diferença de pressão que sustente o movimento contínuo do fluido de refrigeração.

Devido à dificuldade do desenvolvimento de uma superfície completamente adiabática para este fim, a superfície inferior deve ser termicamente isolada para impedir a perda de calor para o ambiente externo e concentrar o calor na parte superior da chaminé. Deste modo, é criado um gradiente térmico mais acentuado, impulsionando a convecção natural de forma mais eficiente. Quanto maior a diferença de temperatura na chaminé, maior o caudal de ar ascendente, o que melhora a dissipação do calor existente devido à contínua exposição solar.

5.1.2. ARREFECIMENTO ATIVO: CONVECÇÃO FORÇADA

O sistema de arrefecimento ativo proposto é composto por uma estrutura intermutável semelhante a uma chaminé, com a inclusão de um ventilador na abertura superior para forçar a circulação do ar. A estrutura intermutável permite a utilização e fácil substituição de uma placa perfurada, posicionada atrás do painel fotovoltaico. Deste modo, a matriz de furos da placa torna-se ajustável, podendo-se optar por diâmetros e espaçamentos entre orifícios diferentes, permitindo a otimização do caudal de ar consoante diferentes condições de operação.

O ventilador, localizado na abertura superior da chaminé, exerce uma força de sucção sobre o ar que flui através dos orifícios da placa perfurada, localizada na parte traseira do painel. Ao atravessar os diferentes furos da placa, aumenta a velocidade de escoamento do ar, gerando-se jatos de ar que aumentam consideravelmente a capacidade de dissipação de calor do sistema fotovoltaico. O ar aquecido é continuamente removido pela abertura superior, sendo assim criado um fluxo constante de ar ambiente. Para diferentes valores de potência utilizados pelo ventilador, são obtidos diferentes caudais de ar na chaminé e, conseqüentemente, diferentes coeficientes de transferência de calor. No capítulo que aborda a monitorização destes sistemas, esta variação é avaliada com mais detalhe.

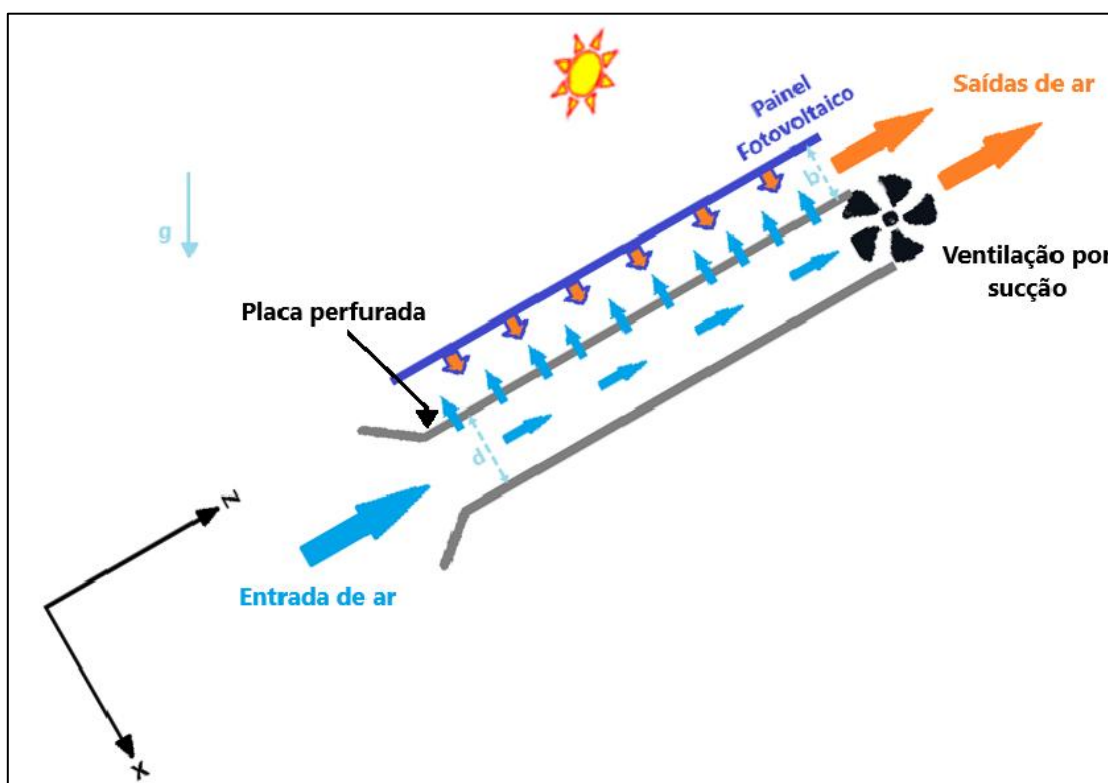


Figura 44 – Esquema do sistema de arrefecimento ativo proposto

Os orifícios da placa perfurada permitem que o ar ambiente seja aspirado para dentro do canal formado pela traseira do painel e a placa, otimizando a transferência de calor entre o módulo fotovoltaico e o ar circulante. A placa deve ser fabricada em materiais de elevada condutividade térmica, como o alumínio, para assegurar a durabilidade e eficiência do sistema.

O esquema apresentado na Figura 44 ilustra o funcionamento do sistema, destacando os seus principais componentes: o ventilador de sucção, que assegura a circulação contínua do ar ambiente e a placa perfurada que regula a entrada de ar incidente na traseira do painel. As setas no esquema indicam a direção de fluxo do ar, que é aspirado pela entrada, atravessa o canal e os furos da placa e é expelido pelas saídas apontadas.

5.2. MONITORIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE ARREFECIMENTO

Como mencionado anteriormente, a monitorização deste tipo de sistemas é um elemento essencial para uma avaliação precisa do seu desempenho. A análise detalhada de variáveis, como a temperatura e a velocidade de escoamento do fluido de arrefecimento, garante o bom funcionamento e a otimização dos sistemas propostos. A recolha de dados em tempo real é útil para ajustar parâmetros operacionais dos sistemas de arrefecimento e ajuda a diagnosticar possíveis falhas no sistema, como a diminuição da eficiência do ventilador. A posterior análise dos dados recolhidos permite identificar padrões de variação de temperatura e de pressão do fluido e, deste modo, avaliar com mais precisão o efeito do arrefecimento na produção fotovoltaica. Nesta secção, são apresentados os componentes necessários para uma monitorização eficaz, bem como a sua integração com o sistema de monitorização previamente desenvolvido no âmbito da presente dissertação.

Para avaliar o comportamento dos sistemas de arrefecimento foram identificadas duas variáveis críticas, a temperatura e a pressão do ar. A temperatura deve ser medida na entrada e nas saídas de ar, para avaliar a diferença térmica do fluido antes e depois do arrefecimento e, consequentemente, a sua eficiência. À semelhança do sistema de monitorização desenvolvido, os componentes utilizados para a medição de temperatura do ar são termopares tipo K, visto que têm um grande alcance (0 a 1024 °C) e são de fácil integração no sistema baseado em Arduino implementado.

Para ler e registar a pressão nas entrada e saídas dos sistemas de arrefecimento, são utilizados sensores BMP280 da Adafruit, da figura seguinte, devido à alta precisão, baixo consumo de energia e fácil integração com sistemas Arduino, permitindo a aquisição de dados em tempo real.

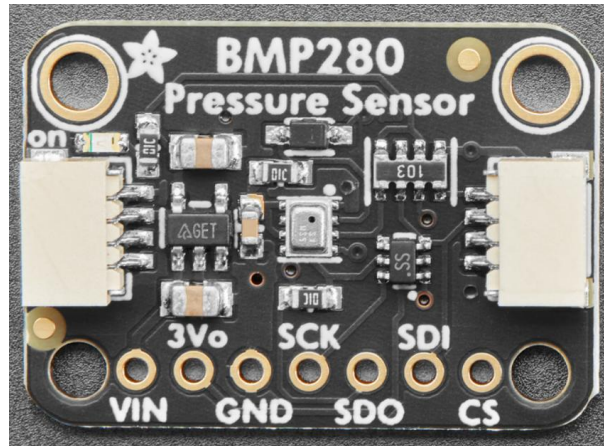


Figura 45 – Sensor de pressão BMP280

Com o registo dos valores de pressão nos locais designados, é possível calcular a velocidade do ar, a partir da equação de Bernoulli (10):

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho v^2 \Leftrightarrow v = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (10)$$

onde ΔP é a diferença de pressão entre aberturas da chaminé (em Pa), ρ é a massa volúmica do ar (em kg/m³) e v é a velocidade do ar (em m/s).

Com a velocidade do ar, é possível calcular o caudal volumétrico Q (em m³/s), multiplicando a velocidade pela área da secção transversal A (em m²) da entrada ou saída da chaminé.

$$Q = vA \quad (11)$$

Desta forma, é possível obter o caudal mássico $\dot{m}$ (em kg/s), a partir da equação (12):

$$\dot{m} = \rho Q \quad (12)$$

Neste contexto, o caudal mássico permite quantificar o ar que circula na chaminé e avaliar se é suficiente para alcançar o nível de arrefecimento pretendido e se é necessário ajustar determinados parâmetros do sistema, como a potência do ventilador ou a matriz de furos da placa, para melhorar o desempenho da instalação.

O sistema de monitorização previamente desenvolvido no âmbito da presente dissertação deve ser expandido para a inclusão destes novos sensores. Estes sensores são conectados ao Arduino utilizado que recebe os valores fornecidos, processando-os e registando-os em tempo real e o código desenvolvido é adaptado para integrar estes sensores, implementando os cálculos necessários ao cálculo do caudal mássico ao longo do tempo. Os dados são posteriormente armazenados num cartão SD, para ser realizada uma análise detalhada a todas as variáveis críticas no desempenho do conjunto sistema fotovoltaico - sistema de arrefecimento. Deste modo, os resultados obtidos permitem compreender as

dinâmicas térmicas dos sistemas passivo e ativo e podem ser utilizados para validar os sistemas propostos e perceber de que forma deve ser feito o ajuste do design dos sistemas, para estes se tornarem mais eficientes em termos de transferência de calor e consumo energético.

5.3. LIMITAÇÕES ASSOCIADAS AOS SISTEMAS DE ARREFECIMENTO

Apesar de ambos os sistemas propostos apresentarem possíveis benefícios para o controlo térmico de painéis fotovoltaicos, cada abordagem possui limitações inerentes que devem ser consideradas durante o desenvolvimento e aplicação das tecnologias de arrefecimento.

No caso do sistema passivo, apesar de não consumir energia e ser economicamente atrativo, devido à sua simplicidade no fabrico, a capacidade de transferência de calor é limitada. A eficiência da refrigeração passiva é altamente dependente de certas condições climáticas, como a velocidade do vento e a temperatura ambiente. Em regiões ou dias com temperaturas elevadas, o ar ambiente torna-se incapaz de remover eficientemente o calor acumulado na superfície do painel fotovoltaico. Este problema é amplificado quando a radiação solar é intensa, resultando em temperaturas de operação que ultrapassam significativamente os 60 °C. Nessas condições, a convecção natural não consegue reduzir a temperatura do painel para valores próximos do ideal, comprometendo a potência fornecida. Contudo, com base na monitorização realizada durante os meses de outubro e novembro, verificou-se que em determinados dias com temperaturas ambientais moderadas, em torno de 20 °C, e níveis de radiação mais baixos, a temperatura do painel oscilava entre a faixa dos 30 a 40 °C. Nestes casos, a convecção natural pode revelar-se uma solução eficaz, uma vez que não é necessário um arrefecimento significativo para manter a temperatura do painel dentro de uma faixa de operação razoável, mais próxima dos 25 °C. Os resultados da monitorização demonstram que, por cada grau que a temperatura do painel é reduzida, a produção energética pode aumentar em cerca de 1 %. Assim, mesmo uma redução de apenas 5 °C na temperatura do painel, possível com a convecção natural, pode traduzir-se num aumento de potência fornecida de 5 % a 10 % ao longo do dia. Em locais e épocas do ano com condições climáticas semelhantes às monitorizadas, o sistema passivo pode ser uma solução eficaz e económica.

Por outro lado, o sistema ativo, ao utilizar um ventilador para forçar a circulação de ar, consegue ultrapassar as limitações de dependência ambiental do sistema passivo. Mesmo em condições de altas temperaturas ambientais, a convecção forçada garante uma maior dissipação térmica, podendo conseguir reduzir a temperatura do painel para níveis ideais de operação. No entanto o consumo de energético do ventilador reduz a eficiência líquida do sistema, e a presença de componentes mecânicos, como a placa perfurada, adiciona custos de instalação e manutenção. Estes fatores tornam o sistema

ativo menos atrativo para situações onde a redução de temperatura necessária é menor, como as verificadas durante os períodos monitorizados com temperaturas e radiações mais moderadas. No entanto, em climas extremos, os dados reforçam que apenas o sistema ativo pode garantir a remoção de calor necessária para evitar perdas de desempenho do painel fotovoltaico. Também durante a monitorização do desempenho fotovoltaico, verificou-se que, apesar das temperaturas ambientes amenas, existiram períodos de elevada radiação solar que resultaram no sobreaquecimento do painel, atingindo temperaturas superiores a 50 °C. Este comportamento térmico demonstra que, mesmo em meses como outubro e novembro, no clima típico português, um sistema ativo de arrefecimento poderia ser atrativo, especialmente durante as horas de maior radiação. Nestas condições, o sobreaquecimento reduz a potência fornecida pelo painel em mais de 40 %, logo a utilização de um sistema ativo poderia não apenas mitigar estas perdas, mas também compensar o consumo energético necessário para o funcionamento do ventilador.

Portanto, embora ambos os sistemas apresentem limitações claras, a escolha entre um sistema passivo ou ativo deve considerar o contexto climático e operacional. Em condições moderadas, a simplicidade e o baixo custo do sistema passivo podem ser vantajosos. Contudo, em climas quentes e com elevada radiação solar, o sistema ativo torna-se essencial para mitigar os efeitos negativos do sobreaquecimento e garantir uma operação eficiente dos painéis fotovoltaicos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação abordou o desenvolvimento e teste de um sistema de monitorização de natureza *open source* para um sistema fotovoltaico autónomo, com o objetivo de quantificar a influência da temperatura das células na potência fornecida pelo painel fotovoltaico. Ao longo do trabalho, foram estudados comportamentos típicos do sistema em condições ambientais reais e o respetivo impacto térmico, para diferentes intervalos de radiação solar. A construção do sistema de monitorização foi realizada com materiais de fácil acesso e custo reduzido, sendo que a utilização dos diferentes sensores e dos sistemas de aquisição de dados permitiu monitorizar variáveis críticas na avaliação do desempenho de um painel fotovoltaico, nomeadamente a intensidade da radiação solar, a temperatura e a potência elétrica.

Após o estudo detalhado do comportamento térmico do sistema fotovoltaico, foram idealizados dois sistemas de arrefecimento, um ativo e outro passivo, com diferentes princípios de funcionamento e aplicações. Adicionalmente, explorou-se a possibilidade integração de novos sensores no sistema de monitorização desenvolvido que permitam estudar e quantificar, simultaneamente, a eficácia dos sistemas de arrefecimento propostos e o comportamento térmico do sistema fotovoltaico.

6.1. CONCLUSÕES

Os resultados experimentais obtidos evidenciaram a influência significativa da temperatura de operação no desempenho energético de módulos fotovoltaicos, comprovando que o aumento da temperatura das células está diretamente relacionado com a redução da potência fornecida pelo sistema. A análise experimental demonstrou que, em condições de radiação solar média-alta, a superfície fotovoltaica alcançou temperaturas superiores a 60 °C, que resultaram numa perda de potência fornecida em cerca de 20-30 %. Por outro lado, durante períodos de baixa radiação solar, foi possível verificar uma menor influência da temperatura e até potências fornecidas superiores às obtidas em condições de maior radiação e consequentemente, maior temperatura de funcionamento. Para os diferentes intervalos de radiação solar analisados, resultaram coeficientes de temperatura entre 1 % e 1,5 % por grau Celsius. Isto significa que, por 1 °C de aumento de temperatura do painel fotovoltaico, perdeu-se entre 1-1,5% de potência relativamente à potência máxima obtida em cada intervalo analisado.

A implementação de um sistema de monitorização *open source* com sensores de temperatura, tensão, corrente e radiação solar demonstrou ser uma solução eficiente para a contínua recolha e análise de dados sobre performance fotovoltaica, permitindo identificar padrões de comportamento térmico e

energético do painel em condições ambientais reais. Além disso, a modularidade do sistema leva a uma elevada adaptabilidade, possibilitando futuras expansões para incluir a análise de variáveis adicionais, como a humidade e o vento sentidos no local da instalação. Importa referir que a monitorização foi realizada nos meses de outubro e novembro, período em que, apesar das temperaturas ambiente moderadas, se verificaram valores significativos de aquecimento nos módulos, revelando a necessidade de soluções de arrefecimento mesmo fora dos meses de verão.

A idealização de dois sistemas de arrefecimento, um passivo e outro ativo, surge na sequência dos resultados obtidos durante a monitorização e nas condições típicas de operação do painel. O sistema passivo é focado na promoção convecção natural de ar na traseira do painel, adequado para cenários com temperatura ambiente e radiação solar moderadas. O sistema ativo proposto utiliza um ventilador de sucção para promover a convecção forçada através de jatos de ar, sendo mais adequado para condições de alta radiação e temperaturas elevadas, onde o arrefecimento torna-se fundamental para mitigar as perdas de potência. Apesar de não terem sido implementados no âmbito desta dissertação, os sistemas propostos oferecem soluções viáveis para reduzir os efeitos do sobreaquecimento e melhorar o desempenho dos módulos fotovoltaicos.

O trabalho enfrentou algumas limitações inerentes à escala do sistema e ao tempo disponível para execução da investigação. A impossibilidade de realizar testes experimentais nos sistemas de arrefecimento propostos impediu uma avaliação prática da sua eficácia. Além disso, a análise foi limitada a um único tipo de painel fotovoltaico, restringindo a generalização dos resultados a outros módulos ou tecnologias. Apesar disso, os resultados obtidos confirmam a relevância do sistema de monitorização desenvolvido e evidenciam o potencial de estratégias complementares para melhorar a eficiência energética dos sistemas fotovoltaicos. Este estudo não só contribui para a compreensão detalhada da influência da temperatura em módulos fotovoltaicos, como também serve como uma base para futuras revisões literárias no contexto do impacto térmico na potência fornecida por sistemas fotovoltaicos, reforçando a importância de integrar ferramentas de monitorização e soluções de arrefecimento para maximizar a eficiência e a sustentabilidade dos sistemas de energia solar.

6.2. PERSPETIVAS E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados deste trabalho abrem caminho para várias linhas de investigação futura. A partir do sistema de monitorização desenvolvido e após a implementação prática dos sistemas de arrefecimento idealizados, podem ser avaliadas novas variáveis e abordagens, tais como:

- Extensão do período de monitorização para os meses de verão, nomeadamente junho, julho e agosto, de forma a captar os efeitos térmicos mais acentuados sobre o desempenho fotovoltaico e validar a eficácia dos sistemas de arrefecimento em condições extremas. Esta abordagem permitiria uma caracterização mais abrangente do comportamento térmico dos módulos ao longo do ano.
- Integração de novos sensores no sistema de monitorização desenvolvido para instalações fotovoltaicas, que permitam analisar o comportamento destes sistemas com ainda mais detalhe, por exemplo, com sensores de humidade e vento no local da instalação em estudo.
- Construção dos sistemas de arrefecimento propostos e realização de ensaios laboratoriais para avaliação da eficácia na redução da temperatura do painel fotovoltaico, determinando as condições em que cada sistema, ativo e passivo, apresenta o melhor desempenho.
- Realização de simulações computacionais a partir de ferramentas de modelação térmica e dinâmica de fluidos para previsão do comportamento dos sistemas de arrefecimento em diferentes cenários e configurações, para otimização do design idealizado.
- Expansão do sistema de monitorização desenvolvido para avaliação da eficiência do arrefecimento, a partir da integração de termopares e sensores de pressão nas entradas e saídas de ar dos sistemas propostos.
- Desenvolvimento de um sistema de controlo inteligente acoplado ao sistema de monitorização, que permita acionar os mecanismos de arrefecimento de forma automática e apenas quando necessário. Tal sistema poderia basear-se em algoritmos de decisão suportados em variáveis críticas como a temperatura do painel, a radiação incidente e a eficiência instantânea, otimizando o consumo energético associado ao arrefecimento e maximizando o rendimento do sistema fotovoltaico.
- Análise da viabilidade económica das soluções de monitorização e arrefecimento propostas, considerando o impacto na eficiência energética e a recuperação do investimento ao longo da vida útil do sistema.

Em síntese, esta dissertação demonstrou a eficácia de um sistema de monitorização *open source* na análise do comportamento térmico e energético de sistemas fotovoltaicos, além de apresentar soluções inovadoras para mitigar os impactos térmicos. As perspetivas delineadas visam consolidar os avanços alcançados, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos mais eficientes e sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd-Elhady, M.S., Z. Serag, e H.A. Kandil. 2018. «An innovative solution to the overheating problem of PV panels». *Energy Conversion and Management* 157 (Fevereiro):452–59. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.017>.
- Agathokleous, Rafaela A., e Soteris A. Kalogirou. 2018. «Part I: Thermal analysis of naturally ventilated BIPV system: Experimental investigation and convective heat transfer coefficients estimation». *Solar Energy* 169 (Julho):673–81. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.048>.
- Amin, Nowshad, Chin Wen Lung, e Kamaruzzaman Sopian. 2009. «A practical field study of various solar cells on their performance in Malaysia». *Renewable Energy* 34 (8): 1939–46. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.12.005>.
- Ansari, Shaheer, Afida Ayob, Molla S. Hossain Lipu, Mohamad Hanif Md Saad, e Aini Hussain. 2021a. «A Review of Monitoring Technologies for Solar PV Systems Using Data Processing Modules and Transmission Protocols: Progress, Challenges and Prospects». *Sustainability* 13 (15): 8120. <https://doi.org/10.3390/su13158120>.
- . 2021b. «A Review of Monitoring Technologies for Solar PV Systems Using Data Processing Modules and Transmission Protocols: Progress, Challenges and Prospects». *Sustainability* 13 (15): 8120. <https://doi.org/10.3390/su13158120>.
- Arabach, Jorge. 2019. «Development of a c-Si Photovoltaic Module for Desert Climates».
- Arcuri, Natale, Francesco Reda, e Marilena De Simone. 2014. «Energy and thermo-fluid-dynamics evaluations of photovoltaic panels cooled by water and air». *Solar Energy* 105 (Julho):147–56. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.03.034>.
- Badi, Nacer, Saleh A. Alghamdi, Hazem M. El-Hageen, e Hani Albalawi. 2023. «Onsite enhancement of REEEC solar photovoltaic performance through PCM cooling technique». *PLOS ONE* 18 (3): e0281391. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281391>.
- Baloch, Ahmer A.B., Haitham M.S. Bahaidarah, Palanichamy Gandhidasan, e Fahad A. Al-Sulaiman. 2015. «Experimental and numerical performance analysis of a converging channel heat exchanger for PV cooling». *Energy Conversion and Management* 103 (Outubro):14–27. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.018>.
- Baudouy, B. 2015. «Heat Transfer and Cooling Techniques at Low Temperature», Janeiro. <https://doi.org/10.5170/CERN-2014-005.329>.

- Brinkworth, B.J, B.M Cross, R.H Marshall, e Hongxing Yang. 1997. «Thermal regulation of photovoltaic cladding». *Solar Energy* 61 (3): 169–78. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00044-3](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00044-3).
- Cengel, Yunus A. 2002. *Heat Transfer: A Pratical Approach*. Editado por McGraw-Hill. 2nd ed. New York.
- Chandrasekar, M., S. Suresh, T. Senthilkumar, e M. Ganesh karthikeyan. 2013. «Passive cooling of standalone flat PV module with cotton wick structures». *Energy Conversion and Management* 71 (Julho):43–50. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.03.012>.
- Detzel, Felipe, e Fabiano Perin Gasparin. 2018. «ANÁLISE DA VARIAÇÃO DOS COEFICIENTES TÉRMICOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS COM A IRRADIÂNCIA».
- D.H. Bacon. 1989. *Basic Heat Transfer*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-00888-2>.
- Du, Yanping, Christopher J. Fell, Benjamin Duck, Dong Chen, Kurt Liffman, Yinan Zhang, Min Gu, e Yonggang Zhu. 2016. «Evaluation of photovoltaic panel temperature in realistic scenarios». *Energy Conversion and Management* 108 (Janeiro):60–67. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.065>.
- Dwivedi, Pushpendu, K. Sudhakar, Archana Soni, E Solomin, e I Kirpichnikova. 2020. «Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art». *Case Studies in Thermal Engineering* 21 (Outubro):100674. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100674>.
- Elminshawy, Nabil A.S., A.M.I. Mohamed, K. Morad, Y. Elhenawy, e Abdulrahman A. Alrobaian. 2019. «Performance of PV panel coupled with geothermal air cooling system subjected to hot climatic». *Applied Thermal Engineering* 148 (Fevereiro):1–9. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.027>.
- Eryener, Dogan, e Hilmi Kuscü. 2018. «Hybrid transpired solar collector updraft tower». *Solar Energy* 159 (Janeiro):561–71. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.035>.
- Glick, Andrew, Naseem Ali, Juliaan Bossuyt, Marc Calaf, e Raúl Bayoán Cal. 2020. «Utility-scale solar PV performance enhancements through system-level modifications». *Scientific Reports* 10 (1): 10505. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66347-5>.
- Green, Don, e Robert Perry. 2008. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. Editado por Mc-Graw Hill. 8.ª ed. New York.
- Green, Martin A. 2003. «Crystalline and thin-film silicon solar cells: state of the art and future potential». *Solar Energy* 74 (3): 181–92. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00187-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00187-7).
- Grover, Sachit, e Jian V. Li. 2015. «Theory and analysis of temperature coefficient of open-circuit voltage (dVOC/dT) in heterojunction solar cells». Em *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 1–3. IEEE. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2015.7356039>.

- Henrique Tronco Silva, Pedro, Fabiana Florian, e Fernando Augusto Baptistini Pestana. 2018. «ESTUDO DE PERDAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS».
- Howell, John R., M. Pinar Menguc, e Robert Siegel. 2010. *Thermal Radiation Heat Transfer*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439894552>.
- Ibrahim, Tarek, Farouk Hachem, Mohamad Ramadan, Jalal Faraj, Georges El Achkar, e Mahmoud Khaled. 2023. «Cooling PV panels by free and forced convections: Experiments and comparative study». *AIMS Energy* 11 (5): 774–94. <https://doi.org/10.3934/energy.2023038>.
- Jiao, Cong, e Zeyu Li. 2023. «An Updated Review of Solar Cooling Systems Driven by Photovoltaic–Thermal Collectors». *Energies* 16 (14): 5331. <https://doi.org/10.3390/en16145331>.
- Kant, Neeraj, e Pushpendra Singh. 2022. «Review of next generation photovoltaic solar cell technology and comparative materialistic development». *Materials Today: Proceedings* 56:3460–70. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.116>.
- Labrique, Sophie. s.d. «Tecnologia das células fotovoltaicas».
- Lee, Yonghwan, e Nochang Park. 2024. «Self-powered wireless sensor system utilizing a thermoelectric generator for photovoltaic module monitoring application». *Solar Energy* 283 (Novembro):113026. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.113026>.
- Leow, Wai Zhe, Y. M. Irwan, M. Asri, M. Irwanto, A. B. Amelia, Z. Syafiqah, e Ibrahim Safwati. 2016. «Investigation of solar panel performance based on different wind velocity using ANSYS». *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science* 1 (3): 456–63. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.6.5.938>.
- Letizia Garcia, RENATO, ROSELI Kuhn, VANESSA Kristine de Oliveira Schmidt, RAFAEL Aislan Amaral, e EDSON Abel dos Santos Chiamonte. 2020. «ESTUDO EXPERIMENTAL DA CONVECÇÃO NATURAL DO CALOR EM UMA PLACA DE GELO RETANGULAR». Em *Proceedings of the XLVIII Brazilian Congress of Engineering Education*. Associação Brasileira de Educação em Engenharia. <https://doi.org/10.37702/COBENGE.2020.3063>.
- LokeshReddy, M., P.J.R. Pavan Kumar, S. Aneel Manik Chandra, T. Sudhakar Babu, e N. Rajasekar. 2017. «Comparative study on charge controller techniques for solar PV system». *Energy Procedia* 117 (Junho):1070–77. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.230>.
- Madeti, Siva Ramakrishna, e S.N. Singh. 2017. «Monitoring system for photovoltaic plants: A review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67 (Janeiro):1180–1207. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.088>.

- Mafat, Iradat Hussain, Aarsh Patel, e Rajat Saxena. 2023. «Cooling technologies for efficiency enhancement of solar PV panels». Em *Handbook of Thermal Management Systems*, 557–74. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19017-9.00004-0>.
- Mahdavi, Arash, Mousa Farhadi, Mofid Gorji-Bandpy, e Amirhoushang Mahmoudi. 2022. «A review of passive cooling of photovoltaic devices». *Cleaner Engineering and Technology* 11 (Dezembro):100579. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100579>.
- Maiti, Sourav, Marco van der Laan, Deepika Poonia, Peter Schall, Sachin Kinge, e Laurens D. A. Siebbeles. 2020. «Emergence of New Materials for Exploiting Highly Efficient Carrier Multiplication in Photovoltaics», Agosto.
- Maleki, Akbar, Arman Haghighi, Mamdouh El Haj Assad, Ibrahim Mahariq, e Mohammad Alhuyi Nazari. 2020. «A review on the approaches employed for cooling PV cells». *Solar Energy* 209 (Outubro):170–85. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.083>.
- Martínez I, Mora L, Piliougine M, e Sidrach M. 2010. «Software para la monitorización y evaluación de instalaciones fotovoltaicas». Em . Proceedings of the IV conference Latino Americana de Energía Solar y XVII Simposio Peruano de Energía Solar.
- Masson, Gaëtan, Arnulf Jäger-Waldau, Izumi Kaizuka, Johan Lindahl, José Donoso, e Melodie de l'Epine. 2024. «A Snapshot of the Global PV Market». Em *2024 IEEE 52nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 0566–68. IEEE. <https://doi.org/10.1109/PVSC57443.2024.10749131>.
- Mathieu, Olivier. 2018. «Thermal Management A Broad Overview of Cooling Techniques». 1 de Dezembro de 2018.
- Mostofa, Kazi Zehad, e Mohammad Aminul Islam. 2022. «Development of Low-cost Real Time Solar PV Power Monitoring System using IoT». Em , 215–21. <https://doi.org/10.21467/proceedings.141.30>.
- Nippes De Oliveira, Guilherme. 2019. «Análise de custos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede e isolados». Rio de Janeiro.
- Oh, Jaewon, Balamurali Rammohan, Ashwini Pavgi, Sai Tatapudi, Govindasamy Tamizhmani, George Kelly, e Michael Bolen. 2018. «Reduction of PV Module Temperature Using Thermally Conductive Backsheets». *IEEE Journal of Photovoltaics* 8 (5): 1160–67. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2841511>.
- Panda, Sampurna, Babita Panda, Chitralekha Jena, Lipika Nanda, e Arjyadhara Pradhan. 2023. «Investigating the similarities and differences between front and back surface cooling for PV panels». *Materials Today: Proceedings* 74:358–63. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.424>.

- Paredes-Parra, José Miguel, Antonio Mateo-Aroca, Guillermo Silvente-Niñirola, María C. Bueso, e Ángel Molina-García. 2018a. «PV Module Monitoring System Based on Low-Cost Solutions: Wireless Raspberry Application and Assessment». *Energies* 11 (11): 3051. <https://doi.org/10.3390/en11113051>.
- . 2018b. «PV Module Monitoring System Based on Low-Cost Solutions: Wireless Raspberry Application and Assessment». *Energies* 11 (11): 3051. <https://doi.org/10.3390/en11113051>.
- Paulo, João. 2019. «10 passos para escolher o melhor microinversor», 27 de Março de 2019. www.ecorienergiasolar.com/artigo/10-passos-para-voce-escolher-o-melhor-microinversor.
- Pourasl, Hamed H., Reza Vatankhah Barenji, e Vahid M. Khojastehnezhad. 2023. «Solar energy status in the world: A comprehensive review». *Energy Reports* 10 (Novembro):3474–93. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.022>.
- Queirós, Duarte. 2024a. «Baterias para painéis solares: o que são e como funcionam?», 2024.
- . 2024b. «Inversor solar: o que é e como funciona?», 2024.
- Rahimi, Masoud, Peyvand Valeh-e-Sheyda, Mohammad Amin Parsamoghadam, Mohammad Moein Masahi, e Ammar Abdulaziz Alsairafi. 2014. «Design of a self-adjusted jet impingement system for cooling of photovoltaic cells». *Energy Conversion and Management* 83 (Julho):48–57. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.053>.
- Rao, Challa Krishna, Sarat Kumar Sahoo, e Franco Fernando Yanine. 2024. «A literature review on an IoT-based intelligent smart energy management systems for PV power generation». *Hybrid Advances* 5 (Abril):100136. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100136>.
- Reinders Angèle, Pierre J. Verlinden, van Sark Wilfried, e Freundlich Alexandre. 2017. *Photovoltaic Solar Energy: From Fundamentals to Applications*. First. Vol. 1. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd.
- Robles Montes, Fernando, Christopher Rosiles-Perez, Carlos Fabian Arias Ramos, Hailin Hu, José Luis Sosa Sánchez, e Antonio Esteban Jiménez González. 2022. «Study of DMSO concentration on the optical and structural properties of perovskite CH₃NH₃PbI₃ and its use in solar cells». *Journal of Solid State Chemistry* 312 (Agosto). <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2022.123158>.
- S. M., D. G., & A. R. 2015. «Evolución Tecnológica de los Sistemas Remotos de Monitoreo en las Instalaciones Fotovoltaicas». *Revista Politécnica*, 2015.
- Serra Borges, Miguel. 2024. «Guia para Painéis Fotovoltaicos», 2024.
- Shariff, Farihah, Nasrudin Abd Rahim, e Wooi Ping Hew. 2015. «Zigbee-based data acquisition system for online monitoring of grid-connected photovoltaic system». *Expert Systems with Applications* 42 (3): 1730–42. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.10.007>.

- Sharma, Nidhi. 2022. «On-Grid, Off-Grid & Hybrid: What They Are & How to Choose the Right One», Junho de 2022.
- Sheik, Mohammed Shoaib, Pallabi Kakati, Devendra Dandotiya, Udaya Ravi M, e Ramesh C S. 2022. «A comprehensive review on various cooling techniques to decrease an operating temperature of solar photovoltaic panels». *Energy Nexus* 8 (Dezembro):100161. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100161>.
- Shubbak, Mahmood H. 2019. «Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 115 (Novembro). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109383>.
- Sutanto, Bayu, Yuli Setyo Indartono, Agung Tri Wijayanta, e Hector Iacovides. 2022. «Enhancing the performance of floating photovoltaic system by using thermosiphon cooling method: Numerical and experimental analyses». *International Journal of Thermal Sciences* 180 (Outubro):107727. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107727>.
- Svarc, Jason. 2020. «Solar systems explained - On-grid, Off-grid & Hybrid», 22 de Janeiro de 2020.
- Tanagnostopoulos, Y., P. Themelis, Angelos Angelopoulos, e Takis Fildisis. 2010. «Natural Flow Air Cooled Photovoltaics». Em , 1013–18. <https://doi.org/10.1063/1.3322300>.
- Tang, Jian, Hao Ni, Run-Ling Peng, Ning Wang, e Lei Zuo. 2023. «A review on energy conversion using hybrid photovoltaic and thermoelectric systems». *Journal of Power Sources* 562 (Abril):232785. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.232785>.
- Tien-Mo Shih. 2012. *Heat Transfer: Lessons with Examples Solved by Matlab*. Vol. 1. Cognella, Incorporated.
- Tonui, J.K., e Y. Tripanagnostopoulos. 2007. «Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements». *Solar Energy* 81 (4): 498–511. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.08.002>.
- Vlachopoulos, John, e David Strutt. 2002. *BASIC HEAT TRANSFER AND SOME APPLICATIONS IN POLYMER PROCESSING*. Vol. 2.
- Zeb, Kamran, Waqar Uddin, Muhammad Adil Khan, Zunaib Ali, Muhammad Umair Ali, Nicholas Christofides, e H.J. Kim. 2018. «A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94 (Outubro):1120–41. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.053>.
- Zhao, Jiafei, Yongchen Song, Wei-Haur Lam, Weiguo Liu, Yu Liu, Yi Zhang, e DaYong Wang. 2011. «Solar radiation transfer and performance analysis of an optimum photovoltaic/thermal system». *Energy*

Conversion and Management 52 (2): 1343–53.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.09.032>.

Zico Winter. 2022. «Introduction to Voltage Divider Basic and Rules». *ASPENCORE*, 15 de Janeiro de 2022.

ANEXOS

ANEXO A: CÓDIGO DESENVOLVIDO PARA O SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

```

1  #include <max6675.h>
2  #include <SD.h>
3  #include <SPI.h>
4
5  const int currentSensorPin = A0;
6  const int voltageSensorPin = A5;
7
8  int thermoDO = 6;
9  int thermoCS = 4;
10 int thermoCLK = 2;
11
12 MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoDO);
13
14 const int chipSelect = 10;
15 File dataFile;
16
17 float currentValues[300];
18 float voltageValues[300];
19 float temperatureValues[300];
20 int currentIndex = 0;
21
22 unsigned long lastLogTime = 0;
23 unsigned long lastReadTime = 0;
24 const unsigned long readInterval = 1000;
25
26 const float sensitivity = 0.185;
27
28 const unsigned long logInterval = 300000;
29
30 const float R1 = 100000.0;
31 const float R2 = 11000.0;
32 const float Vref = 5.0;
33
34 void setup() {
35     Serial.begin(9600);
36     Serial.println("Starting data collection...");
37
38     delay(500);
39
40     if (!SD.begin(chipSelect)) {
41         Serial.println("Falha ao inicializar o cartão SD!");
42         while (1)
43             ;
44     }

```

```

45
46   dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
47   if (!dataFile) {
48       Serial.println("Erro ao abrir o arquivo datalog.txt");
49       while (1)
50           ;
51   }
52   dataFile.println("Timestamp (s), Corrente (A), Tensao (V), Temperatura (C)");
53   dataFile.close();
54
55   lastReadTime = millis();
56   lastLogTime = millis();
57 }
58
59 void loop() {
60     unsigned long currentTime = millis();
61
62
63     if (currentTime - lastReadTime >= readInterval) {
64         lastReadTime += readInterval;
65
66         float soma = 0.0;
67         float correnteMedia = 0.0;
68
69         for (int i = 0; i < 100; i++) {
70             int leituraADC = analogRead(currentSensorPin);
71             float tensao = (leituraADC / 1023.0) * Vref;
72
73
74             float corrente = (tensao - (Vref / 2)) / sensitivity;
75             soma += corrente;
76             delay(1);
77         }
78
79         correnteMedia = soma / 100;
80
81         int sensorValueVoltage = analogRead(voltageSensorPin);
82         float measuredVoltage = sensorValueVoltage * (Vref / 1023.0);
83         float inputVoltage = measuredVoltage * (R1 + R2) / R2;
84
85         float temperature = thermocouple.readCelsius() - 8;
86

```

```

87     Serial.print("Corrente: ");
88     Serial.print(correnteMedia, 3);
89     Serial.println(" A");
90
91     Serial.print("Tensão: ");
92     Serial.print(inputVoltage);
93     Serial.println(" V");
94
95     Serial.print("Temperatura: ");
96     Serial.print(temperature);
97     Serial.println(" °C");
98
99     currentValues[currentIndex] = correnteMedia;
100    voltageValues[currentIndex] = inputVoltage;
101    temperatureValues[currentIndex] = temperature;
102    currentIndex++;
103 }
104
105 if (currentTime - lastLogTime >= logInterval) {
106     lastLogTime += logInterval;
107
108     float avgCurrent = 0;
109     float avgVoltage = 0;
110     float avgTemperature = 0;
111
112     for (int i = 0; i < currentIndex; i++) {
113         avgCurrent += currentValues[i];
114         avgVoltage += voltageValues[i];
115         avgTemperature += temperatureValues[i];
116     }
117
118     if (currentIndex > 0) {
119         avgCurrent /= currentIndex;
120         avgVoltage /= currentIndex;
121         avgTemperature /= currentIndex;
122     }
123
124     dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
125     if (dataFile) {
126         unsigned long totalSeconds = currentTime / 1000; /
127         dataFile.print(totalSeconds);
128         dataFile.print(",      ");
129         dataFile.print(avgCurrent);
130         dataFile.print(",      ");

```

```
131         dataFile.print(avgVoltage);
132         dataFile.print(",      ");
133         dataFile.print(avgTemperature);
134         dataFile.println();
135         dataFile.close();
136     } else {
137         Serial.println("Erro ao abrir o arquivo datalog.txt para escrever!");
138     }
139 ferr
140     currentIndex = 0;
141 }
142 }
143
```

ANEXO B: VALORES REGISTRADOS PELO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1													
2		Intervalos de Radiação											
3		I ∈ [100;199]			I ∈ [200;299]			I ∈ [300;399]			I ∈ [400;499]		
4		Tensão (V)	Potência (W)	Tpainel (°C)	Tensão (V)	Potência (W)	Tpainel (°C)	Tensão (V)	Potência (W)	Tpainel (°C)	Tensão (V)	Potência (W)	Tpainel (°C)
5		40,18	195,68	21,60	40,75	206,60	30,15	40,42	199,67	37,72	40,38	198,27	41,60
6		40,58	203,31	23,11	40,77	207,11	31,23	40,41	199,63	38,31	40,40	198,77	42,76
7		40,58	203,31	24,31	40,64	204,42	33,07	40,49	200,83	38,17	40,32	197,16	43,67
8		40,72	206,04	25,43	40,56	202,80	34,65	40,49	201,24	38,50	40,31	197,12	44,09
9		40,85	208,74	26,92	40,56	202,39	35,45	40,45	200,23	39,29	40,17	194,02	45,38
10		40,66	204,93	28,58	40,48	201,19	36,60	40,36	198,57	40,38	39,95	189,76	47,02
11		39,62	176,31	23,50	38,79	162,92	47,80	40,35	198,12	40,73	39,66	184,02	49,14
12		40,18	187,24	26,14	38,86	163,99	46,81	40,41	199,22	40,55	39,71	185,05	48,98
13		38,48	155,07	25,90	38,95	165,54	45,52	38,49	157,81	53,76	39,68	184,51	49,39
14		39,34	170,74	27,24	38,91	164,98	45,04	38,45	156,88	53,44	38,12	151,72	59,32
15		38,77	158,96	28,57	38,72	161,46	44,97	38,50	157,47	52,87	38,16	157,22	57,33
16		39,91	180,39	28,20	36,61	123,74	44,01	38,73	161,50	50,71	38,23	155,21	56,35
17		38,09	147,79	28,03	39,91	181,59	28,90	38,78	162,88	49,71	38,40	156,67	54,91
18		38,30	152,05	27,39	41,05	203,20	32,29	38,85	163,95	48,55	38,44	156,84	54,38
19		38,34	152,59	26,50	38,29	151,25	35,00	38,91	165,37	47,52	40,61	194,93	38,32
20		38,39	153,94	26,15	38,29	151,25	32,60	40,24	187,92	37,52	39,93	182,08	39,49
21		38,45	154,95	26,09	37,96	145,39	31,63	39,22	168,25	38,96	41,25	217,80	35,45
22		38,53	156,05	26,10	39,59	174,59	29,78	38,34	152,21	37,70	40,23	197,93	40,41
23		38,63	158,38	25,99	40,22	186,62	30,79	40,74	196,37	36,43	38,84	181,77	46,40
24		38,50	155,16	25,81	40,86	198,58	33,13	39,66	177,28	37,26	37,71	149,71	42,46
25		39,54	176,35	16,06	39,33	171,09	30,28	39,69	177,81	35,19	40,60	205,44	45,43
26		39,59	176,97	16,89	39,46	173,62	28,44	39,55	175,21	32,96	39,25	179,37	49,53
27		41,02	205,10	18,42	39,95	182,97	28,05	40,34	190,40	31,71	37,11	139,53	51,12
28		41,15	207,81	20,39	41,15	205,75	29,61	41,39	220,19	31,26	42,92	254,09	25,69
29		37,27	142,74	15,78	38,90	163,38	31,11	38,96	173,37	32,04	40,96	215,86	33,60
30		36,64	131,17	14,67	38,16	149,97	29,14	40,45	201,04	42,27	42,00	235,62	27,65
31		39,07	175,03	14,28	39,68	177,27	33,50	40,70	206,35	46,02	40,83	217,62	38,22
32		41,49	221,97	15,01	39,74	178,43	33,68	39,87	190,18	44,22	40,88	218,30	38,21
33		39,20	178,75	15,88	39,79	179,59	33,86	38,41	162,86	35,77	40,99	220,53	37,65
34		40,23	195,52	15,52	39,85	180,75	34,05	36,27	124,41	38,12	40,70	214,90	37,95
35		42,30	237,73	20,70	39,91	181,91	34,23	36,90	136,53	38,06	41,16	223,50	37,61
36		41,44	220,46	22,34	39,97	183,08	34,41	40,30	199,08	30,96	39,15	182,44	51,90
37		41,02	212,89	21,50	40,03	184,25	34,59	41,07	217,67	33,85	38,78	174,90	55,66
38		36,56	129,79	30,23	40,09	185,43	34,78	39,39	185,92	34,41	38,73	173,51	56,25
39		42,36	239,33	17,15	40,15	186,60	34,96	38,73	173,51	30,48	37,62	152,36	56,50
40		34,89	101,53	30,88	40,21	187,78	35,14	42,29	241,48	24,06	38,39	166,61	52,51
41		42,75	246,67	16,81	39,51	174,63	28,07	40,66	210,21	29,32	39,33	185,64	52,54
42		39,86	190,53	19,95	40,44	202,60	19,41	41,42	224,91	26,76	39,92	200,00	45,16
43		40,09	196,44	21,36	39,40	183,21	17,37	40,65	210,16	27,93	39,98	201,10	44,88
44		40,47	207,61	17,60	42,88	249,56	19,59	41,69	234,30	27,73	39,84	198,00	45,91
45		39,11	181,86	18,00	42,12	234,61	25,75	41,31	226,79	31,97	39,82	197,11	46,62
46		37,78	157,16	17,93	40,42	201,29	29,94	41,25	225,64	34,11	40,01	200,45	45,47
47		38,42	168,66	17,45	40,29	199,03	29,18	41,03	221,56	36,33	40,07	201,55	45,25
48		39,09	181,77	17,76	40,37	200,64	29,04	40,42	204,93	35,41	39,81	196,26	47,41
49		38,09	163,03	17,57	39,94	192,11	28,49	40,91	216,00	42,25	39,63	192,60	48,68
50		38,96	179,22	17,78	41,09	214,08	28,68	39,18	181,80	38,53	39,73	194,28	46,75
51		39,05	180,80	17,56	40,12	195,79	28,99	38,04	189,44	38,04	40,23	204,37	45,60
52		39,54	189,79	17,83	39,71	188,23	24,71	40,10	200,10	39,86	40,28	205,43	44,86
53		32,02	62,12	17,99	41,00	212,38	21,16	40,23	202,76	32,89	40,48	209,28	43,53
54		35,40	111,16	17,79	42,25	236,18	20,79	37,91	158,08	44,21	40,20	203,81	43,07
55		40,30	202,71	18,01	42,40	239,98	27,41	41,45	225,49	32,05	40,27	204,97	43,68
56		37,48	150,29	20,20	38,34	161,79	31,35	40,71	212,10	36,32	40,13	202,66	46,83
57		39,44	186,95	19,71	39,50	183,28	25,92	40,32	204,42	37,65	39,28	184,22	50,98
58		39,43	186,90	20,85	41,22	216,82	22,57	40,32	204,83	38,22	40,77	212,82	30,74
59		40,36	204,63	20,81	42,54	242,48	25,09	40,29	203,87	37,79	40,79	212,52	39,39
60		41,54	226,81	20,41	41,72	226,96	34,90	39,88	196,21	38,42	40,67	210,26	42,96
61		38,16	162,18	23,09	42,80	249,10	24,42	41,61	233,02	25,04	40,01	197,25	46,76
62		40,39	204,37	22,02	41,74	227,48	19,18	41,21	225,01	26,29	39,86	194,12	47,58
63		38,08	161,08	22,90	42,55	243,81	20,44	40,92	219,74	31,42	39,68	190,86	48,52
64		37,57	151,41	20,76	39,54	184,65	22,35	40,62	213,66	35,71	39,60	188,89	49,09
65		39,85	194,87	26,99	39,92	196,01	19,69	40,48	210,90	38,97	39,50	187,23	49,39
66		40,24	202,00	24,73	40,96	215,86	20,61	40,42	209,78	40,43	39,55	187,47	48,22
67		39,21	182,72	26,68	41,70	229,77	25,04	40,27	206,99	41,98	39,50	186,44	48,59
68		39,00	178,62	24,28	41,03	217,05	26,98	40,09	203,26	43,66	39,41	184,83	49,72
69		38,24	164,05	22,53	40,27	202,56	24,51	40,19	201,35	40,87	39,42	184,88	49,78
70		39,55	188,65	21,42	41,23	220,99	24,19	40,37	204,68	42,73	39,50	186,05	49,12
71		37,38	148,40	21,22	40,02	197,70	24,94	39,51	188,86	45,56	39,44	184,97	48,34
72		39,84	194,02	20,85	41,85	233,10	20,46	38,95	175,28	47,47	41,08	218,55	35,38
73		40,29	203,06	21,59	41,72	231,13	22,41	39,79	191,39	45,26	41,17	220,26	35,06
74		40,05	198,65	22,39	40,66	210,62	23,59	39,70	189,77	45,16	41,15	219,74	35,51
75		39,47	187,48	22,44	41,64	229,44	25,23	39,34	182,93	45,22	41,34	223,24	35,65

Arrefecimento Convectivo de Painéis Fotovoltaicos

76	38,43	167,94	22,02	41,50	227,01	27,69	40,12	197,39	41,36	41,43	224,96	35,75
77	39,42	186,46	21,61	40,48	206,85	28,20	39,74	190,35	42,85	39,08	176,25	49,80
78	38,70	172,99	21,54	40,70	210,83	24,15	39,56	187,12	43,45	39,09	176,69	49,42
79	38,46	168,45	20,86	41,15	219,33	24,29	39,51	185,70	43,19	38,99	173,90	49,51
80	38,31	165,88	20,17	40,34	204,12	27,81	39,59	187,26	41,45	39,00	173,94	49,22
81	36,77	137,52	39,35	40,70	210,83	27,67	41,06	218,85	25,33	38,96	173,37	49,15
82	38,62	172,63	37,76	43,06	261,37	16,53	41,09	219,42	26,59	38,74	168,91	50,57
83	43,08	217,98	10,70	42,86	257,59	19,69	41,11	219,94	27,80	38,53	164,91	51,57
84	42,89	258,20	14,34	42,42	248,58	21,77	41,01	217,76	29,53	38,58	165,51	51,29
85	40,14	201,50	19,68	41,56	231,90	21,36	41,03	218,28	30,21	38,49	163,97	52,25
86	40,42	206,55	21,43	42,21	244,82	22,72	41,06	218,85	30,52	38,50	164,01	51,84
87	40,60	210,31	22,95	37,23	145,94	48,30	41,06	218,85	31,44	38,70	167,57	50,23
88	40,74	212,66	24,13	38,13	162,82	42,35	41,20	221,24	31,07	38,47	163,11	51,51
89	40,89	215,90	25,06	39,00	178,62	38,60	41,23	221,82	31,39	38,49	163,20	50,79
90	38,77	170,20	19,73	37,21	145,49	46,93	41,24	222,28	31,86	38,77	168,26	48,16
91	39,73	189,11	21,34	37,50	151,13	44,93	41,18	220,72	32,96	39,26	177,85	44,49
92	39,39	183,16	22,16	37,77	155,99	40,74	41,09	219,01	34,16	39,31	178,86	43,53
93	39,06	176,55	22,18	38,09	161,50	36,68	40,96	216,27	35,42	39,39	180,80	42,77
94	39,20	179,14	22,38	40,12	200,20	37,03	40,88	214,62	36,41	39,28	178,33	42,35
95	39,18	178,66	22,69	39,25	184,48	38,63	41,00	213,61	29,21	39,49	182,44	40,42
96	40,01	194,45	23,33	42,90	258,69	18,25	40,66	206,96	31,74	40,74	207,77	33,84
97	38,80	169,56	25,61	42,47	250,15	21,26	40,46	203,51	32,20	40,62	205,13	34,68
98	38,66	167,78	24,19	42,05	241,79	23,84	40,60	205,44	31,41	40,17	196,43	33,99
99	38,53	165,29	23,46	38,86	176,04	42,37	41,01	213,25	29,84	41,09	212,85	33,15
100	39,27	179,07	23,21	38,05	161,33	38,30	41,03	213,36	31,22	40,59	212,29	36,58
101	39,82	189,15	23,16	38,52	170,26	33,61	41,88	228,66	28,65	40,47	205,99	37,36
102	40,03	193,34	23,71	39,27	184,18	31,24	39,53	182,23	34,13	40,39	202,76	38,38
103	39,41	181,68	23,93	37,95	159,01	42,82	40,00	193,20	40,41	40,08	196,39	40,68
104	39,35	180,62	23,41	38,87	176,08	37,28	40,22	197,08	39,71	39,82	190,74	42,40
105	38,38	162,35	23,46	39,06	174,21	40,40	40,11	194,93	40,59	39,81	190,29	42,34
106	38,08	156,89	22,77	39,34	179,39	38,45	39,94	192,11	41,23	39,99	193,55	41,69
107	38,37	162,31	22,30	39,20	176,79	36,99	39,90	191,12	41,42	39,97	193,06	41,84
108	37,65	148,72	21,53	38,70	167,18	34,95	39,94	191,71	41,24	39,83	190,39	42,68
109	38,15	157,94	20,19	39,83	188,79	34,07	39,76	188,06	41,50	39,67	187,24	43,80
110	39,16	176,61	20,64	38,84	170,12	33,73	40,94	210,02	26,36	39,63	186,26	43,95
111	39,89	190,67	21,54	38,98	172,68	32,65	39,16	175,05	30,05	39,58	185,23	44,14
112	40,13	195,43	35,00	40,58	205,74	24,78	38,09	155,41	38,31	39,58	185,23	43,99
113	39,59	184,89	34,22	40,98	213,10	26,47	40,78	208,39	28,44	39,83	189,99	41,97
114	38,79	169,51	33,59	39,35	180,22	31,50	40,74	207,77	29,46	39,73	187,13	39,20
115	39,18	177,49	21,02	39,05	174,55	29,77	40,76	208,28	30,21	38,76	168,61	35,33
116	39,91	191,57	22,10	39,02	173,64	27,75	40,74	207,77	31,02	40,64	205,23	34,60
117	39,77	188,91	22,52	40,47	201,54	22,53	40,76	207,88	31,54	40,52	203,01	35,78
118	39,61	185,77	22,75	40,74	206,96	23,99	40,77	208,33	32,20	40,27	198,13	37,83
119	39,95	192,16	22,86	40,84	208,69	26,01	40,64	205,64	33,60	40,02	193,30	39,55
120	39,90	191,12	25,88	39,58	183,26	31,57	40,58	204,52	34,54	39,73	187,92	41,58
121	39,47	183,14	26,13	39,47	180,38	30,86	39,50	180,91	45,65	39,66	186,80	42,28
122	38,86	170,98	26,30	39,63	185,07	40,98	39,09	173,17	46,86	39,51	183,72	43,59
123	38,69	167,91	25,45	39,85	188,89	38,75	40,91	211,10	32,63	39,54	184,26	43,62
124	38,79	169,51	24,76	40,18	196,48	36,74	40,83	209,46	33,67	39,63	185,86	44,02
125	38,92	172,03	24,61	40,27	198,13	36,10	40,85	209,97	33,90	38,71	166,07	52,13
126	39,01	173,59	24,65	39,78	188,56	36,85	40,72	207,26	35,23	38,63	164,56	52,77
127	39,32	179,69	25,00	39,83	189,59	36,11	40,58	204,52	36,82	38,80	167,62	51,58
128	40,06	193,89	26,02	40,78	208,79	26,35	40,52	203,82	37,73	39,02	171,69	50,29
129	40,36	199,78	27,29	40,76	208,28	27,55	40,36	200,99	39,00	38,84	168,18	51,51
130	38,73	163,05	35,18	39,48	178,84	31,87	40,34	198,07	44,08	38,73	166,15	52,40
131	38,61	160,62	32,17	39,07	176,60	33,03	40,26	196,87	44,43	40,22	198,28	40,34
132	39,37	175,20	30,40	40,48	199,97	29,66	40,34	198,07	43,94	40,19	197,33	41,06
133	40,00	187,20	30,33	41,01	212,84	24,62	40,39	199,12	43,29	40,27	198,93	40,60
134	38,98	166,83	35,51	41,02	213,30	26,88	40,39	199,12	43,24	40,62	205,54	39,85
135	38,52	158,70	33,50	40,97	212,63	28,53	40,73	205,69	41,07	40,62	205,94	39,95
136	38,12	152,48	29,73	40,95	212,12	29,92	40,79	206,81	40,28	40,36	200,59	41,94
137	38,22	154,41	28,22	40,90	211,04	31,16	40,77	206,30	40,13	40,19	197,33	43,35
138	37,37	139,39	39,25	40,90	211,04	31,95	40,72	205,23	40,05	40,52	203,82	41,77
139	39,38	176,03	31,23	40,34	199,68	23,89	41,10	213,72	32,35	40,45	202,65	42,46
140	38,24	154,87	29,76	40,16	196,38	24,69	41,65	214,50	34,80	40,12	196,19	44,96
141	38,40	157,82	28,28	40,06	194,29	24,79	40,16	195,58	34,16	40,17	197,23	44,97
142	39,45	177,92	23,04	40,05	194,24	25,14	40,45	201,04	31,97	39,86	188,94	48,47
143	41,94	215,57	20,58	40,10	194,89	25,52	40,63	204,78	31,27	40,17	194,82	46,85
144	41,74	211,62	23,76	39,86	190,13	25,11	41,35	218,74	31,43	40,26	196,87	45,89
145	41,59	209,20	26,52	39,97	192,26	25,48	40,38	199,88	35,57	40,32	197,97	45,51
146	41,56	208,22	27,65	41,17	215,32	28,50	41,19	215,84	36,91	40,12	194,18	46,54
147	41,50	207,09	28,88	41,22	216,41	30,47	40,41	200,43	39,32	40,17	195,23	46,36
148	41,47	206,11	29,58	40,99	209,87	27,30	40,41	200,03	38,46	40,01	191,65	47,38
149	39,19	151,67	32,72	41,21	213,88	27,39	40,61	203,46	38,34	39,82	187,95	47,07
150	38,99	147,38	30,29	41,32	216,10	28,09	41,05	212,23	41,70	40,21	195,42	45,90

Arrefecimento Convectivo de Painéis Fotovoltaicos

151		39,29	153,62	28,38	41,17	213,26	30,26	39,46	180,73	34,98	40,09	193,23	45,62
152		39,68	161,50	27,35	39,75	186,03	34,36	39,80	187,46	31,78	40,25	196,42	44,71
153		40,21	172,90	26,85	39,85	187,69	33,04	40,87	207,62	33,02	40,40	199,17	43,89
154		40,18	171,97	26,82	40,11	192,93	32,29	40,67	203,76	34,79	40,63	204,78	39,24
155		40,94	187,51	26,66	39,74	183,20	31,24	40,19	194,52	35,22	41,08	213,62	34,36
156		39,12	149,83	28,10	39,85	185,30	30,33	40,30	196,66	34,94	40,12	194,58	39,48
157		38,13	129,64	26,09	39,97	187,86	30,06	40,53	200,62	33,20	37,90	151,22	43,88
158		39,51	157,64	23,95	40,47	197,49	30,72	40,35	197,31	34,79	40,81	207,31	39,39
159		41,00	189,42	24,86	39,01	168,52	38,66	39,33	177,38	34,62	41,05	211,82	37,65
160		40,07	170,30	32,41	41,13	208,94	32,21	40,34	196,86	34,02	41,04	212,59	37,13
161		40,84	189,50	23,94	38,95	166,71	39,35	40,59	201,33	34,70	40,94	210,84	37,40
162					39,69	180,99	35,87	40,60	200,97	34,67	40,98	211,46	36,73
163					40,59	198,49	36,66	40,71	203,14	34,76	40,84	208,69	37,01
164					40,27	192,09	38,08	40,62	201,48	35,35	40,67	205,38	36,87
165					39,45	176,74	38,34	40,66	202,08	35,39	40,76	207,47	35,88
166					39,93	185,67	34,14	40,55	200,32	37,04	40,59	204,17	35,26
167					41,92	225,11	24,03	40,06	189,88	40,39	40,70	203,09	38,45
168					40,37	195,39	28,97	40,21	193,01	38,81	40,67	202,13	40,09
169					38,80	165,68	32,85	40,44	197,35	37,57	40,56	199,96	40,70
170					39,48	178,84	32,90	40,13	191,42	36,72	40,71	202,33	40,84
171					39,30	174,89	32,36	39,61	181,02	35,01	40,69	201,82	39,85
172					39,64	181,15	31,63	39,69	182,57	33,09	40,59	199,30	40,11
173					39,64	181,15	31,64	40,21	192,61	31,98	40,80	203,59	39,10
174					41,42	216,21	25,21	40,72	202,38	32,03	40,56	198,74	40,41
175					41,06	209,41	28,61	40,42	196,44	33,54	40,04	188,99	43,88
176					39,81	185,12	32,87	40,30	194,25	33,46	40,79	203,54	39,57
177					41,90	209,50	28,34	40,26	193,65	33,80	40,45	196,99	42,68
178					41,02	190,74	31,69	40,33	194,79	33,52	39,92	186,83	44,60
179					41,78	210,99	25,60	41,04	208,89	35,80	40,02	188,49	45,03
180					41,62	207,68	27,57	40,17	191,61	41,69	40,79	202,73	41,54
181					41,59	206,70	28,36	39,63	181,11	38,52	39,55	178,77	45,81
182					41,56	206,55	29,11	39,94	186,92	36,57	40,92	207,46	34,69
183					41,57	206,60	29,55	40,28	193,34	35,18	40,35	196,10	38,56
184					41,58	206,65	29,91	40,77	203,03	34,52	40,18	192,86	40,12
185								41,10	209,61	35,51	39,99	189,15	41,84
186								39,42	177,00	44,03	39,83	186,40	43,16
187								39,80	184,27	40,97	39,73	184,74	44,35
188								39,67	181,69	39,40	39,71	183,86	44,64
189								40,55	198,70	39,13	40,00	189,20	43,53
190								39,75	182,85	41,34	41,64	220,69	30,09
191								40,13	189,81	39,71	40,97	195,02	35,35
192								39,63	179,92	45,80	40,83	191,49	36,78
193								39,65	180,41	46,76	40,81	190,99	37,13
194								39,48	177,27	46,45	40,78	190,03	37,78
195								39,59	179,34	44,59	40,73	188,99	38,71
196								39,78	182,99	41,82	40,91	192,69	37,85
197								40,12	189,77	40,33	40,95	193,28	39,02
198								40,95	205,57	37,93	40,84	191,13	39,91
199								40,24	191,94	42,14	40,63	186,49	41,32
200								39,55	178,37	43,19	40,51	183,51	42,42
201								40,81	204,46	28,84	40,54	184,05	42,17
202								38,90	168,44	44,45	40,51	183,51	42,69
203								39,12	172,13	44,38	40,47	182,52	43,24
204								40,06	189,88	33,24	40,42	181,49	43,73
205								40,69	201,82	30,18	40,25	177,50	44,82
206								41,25	212,44	32,89	40,17	175,94	45,25
207								41,39	204,47	30,55	40,10	174,44	45,89
208								41,31	202,83	31,38	39,88	169,49	47,34
209								41,20	200,23	32,55	39,78	167,47	48,41
210								41,12	198,61	33,42	39,73	166,47	49,00
211								41,05	196,63	34,28	39,85	168,96	48,26
212								41,04	196,58	34,35	39,52	159,27	50,39
213								39,52	158,48	44,96	39,64	161,73	49,45
214								40,28	174,82	41,54	39,90	167,18	47,51
215								39,98	168,72	41,59	39,97	167,87	46,78
216								39,08	149,29	39,07	39,99	168,36	46,51
217								39,81	164,42	35,37	40,02	168,88	46,41
218								41,55	206,09	30,53	40,00	168,40	46,40
219								41,45	204,35	31,76	40,93	192,37	36,12
220								41,23	199,14	33,55	41,07	195,49	35,51
221								40,97	193,38	35,42	41,08	195,95	35,95
222											41,04	194,94	36,38
223											41,03	194,89	36,93
224											40,91	191,87	37,87
225											40,96	192,92	37,74

Arrefecimento Convectivo de Painéis Fotovoltaicos

226										41,10	196,05	37,10
227										41,07	195,08	37,47
228										40,89	191,77	38,66
229										41,00	193,11	38,17
230										41,03	194,07	38,21
231										40,95	192,06	39,62
232										40,79	188,86	41,29
233										40,70	186,81	42,21
234										40,44	181,17	43,66
235										40,63	185,27	43,40
236										40,35	179,15	44,95
237										40,42	180,68	44,61
238										40,67	185,86	43,07
239										40,47	181,71	44,19
240										40,44	180,77	44,34
241										40,39	179,74	44,51
242										40,70	186,41	42,65
243										40,70	186,41	42,17
244										40,65	185,36	42,14
245										40,55	183,29	42,61
246										40,62	184,41	42,29
247										40,46	181,26	42,89
248										40,51	182,30	42,48
249										40,86	189,59	39,99
250										40,98	192,20	38,82
251										40,79	188,04	39,63
252										40,72	186,90	39,78
253										40,71	186,86	39,62
254										40,64	184,91	39,77
255										40,78	188,00	38,65
256										40,95	191,65	37,21
257										41,10	194,81	35,93
258										41,08	194,31	35,71
259										41,13	195,78	35,03
260										41,21	197,40	34,10
261										41,18	196,84	33,47
262										40,97	192,15	33,86
263												

Arrefecimento Convectivo de Painéis Fotovoltaicos

N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
ção Solar, I (W/m²)											
I ∈ [500;599]			I ∈ [600;699]			I ∈ [700;799]			I ∈ [800;899]		
Tensão (V)	Potência (W)	Tpainel (°C)	Tensão (V)	Potência (W)	Tpainel (°C)	Tensão (V)	Potência (W)	Tpainel (°C)	Tensão (V)	Potência (W)	Tpainel (°C)
39,60	182,95	50,19	38,07	152,66	62,06	38,52	170,64	61,28	38,16	163,71	63,85
39,43	179,80	51,59	38,24	156,02	60,98	38,41	168,62	61,43	37,98	159,90	65,84
39,18	174,74	53,40	38,16	154,17	61,46				37,60	152,66	64,87
39,10	173,21	54,19	38,33	157,54	60,34						
38,94	170,17	55,29	38,27	156,52	60,92						
38,79	167,18	56,64	38,53	161,06	59,33						
38,62	164,14	57,88	38,46	159,61	59,64						
38,53	161,83	58,62	38,48	160,08	59,63						
38,72	165,72	57,32	38,58	161,65	58,91						
38,52	161,78	58,91	38,51	160,20	59,50						
38,27	156,91	60,71	38,38	157,74	60,31						
38,08	153,46	62,18	38,50	160,16	59,29						
38,10	153,54	61,75	38,18	154,25	61,71						
38,17	154,59	61,40	37,97	150,36	63,14						
37,87	149,04	63,79	37,90	148,95	63,64						
37,51	141,41	66,06	37,89	148,53	63,60						
37,61	142,92	65,35	37,91	148,61	63,45						
37,73	144,88	64,44	37,85	147,62	63,80						
37,74	144,92	64,22	37,66	143,86	65,23						
38,05	150,68	61,70	40,30	199,49	46,02						
38,45	158,03	59,13	39,44	183,00	54,84						
38,53	159,51	58,24	39,33	180,92	55,56						
38,45	158,03	58,52	39,19	177,92	56,81						
38,48	158,54	58,17	35,94	117,16	52,32						
38,56	160,02	57,22	37,81	150,86	44,98						
38,50	159,01	57,33	40,35	198,93	43,56						
38,34	155,66	58,25	37,99	155,00	51,38						
38,32	155,20	58,13	39,90	191,52	41,76						
38,20	153,18	58,77	39,64	185,91	49,22						
39,17	193,89	37,35	39,77	189,31	51,77						
41,12	215,06	34,86	38,34	163,33	45,35						
39,87	190,58	41,31	39,08	182,11	56,21						
40,03	194,15	49,21	38,56	171,21	53,78						
39,61	186,17	52,40	39,17	183,32	55,52						
39,41	182,47	54,27	38,64	173,11	58,96						
39,44	183,00	54,50	38,64	173,11	59,05						
38,54	174,20	45,84	38,81	176,20	58,87						
40,63	204,78	47,04	36,31	129,26	57,99						
40,58	204,52	39,88	41,22	221,76	41,74						
40,07	195,14	41,89	39,33	185,24	48,74						
41,43	222,48	33,90	39,49	189,55	52,64						
40,59	206,20	40,35	39,30	185,50	54,01						
40,38	201,90	43,82	39,21	183,50	54,78						
40,83	217,22	39,13	39,16	182,49	54,85						
41,00	220,58	39,66	39,29	185,06	54,14						
40,73	215,05	41,46	39,13	181,95	54,87						
40,67	213,92	42,26	38,36	167,25	56,63						
40,53	211,16	43,52	38,90	177,38	53,04						
40,30	206,74	45,37	39,08	174,69	50,08						
40,02	201,30	47,47	39,12	175,26	50,10						
40,00	200,80	47,83	39,04	173,34	50,71						
40,10	202,91	47,29	38,76	168,22	53,15						
40,01	200,85	47,96	38,58	164,74	53,77						
39,96	199,80	48,43	38,49	162,81	55,17						
39,97	199,85	48,53	38,42	162,13	56,25						
39,96	199,80	48,43	38,42	162,13	55,34						
39,81	196,26	49,50	38,47	163,11	54,63						
39,71	194,98	50,33									
39,54	191,77	51,55									
39,32	187,56	53,20									
39,18	184,54	54,43									
39,18	184,54	55,00									
39,26	185,70	54,73									
40,00	198,40	48,37									
39,37	186,22	52,62									
38,98	178,53	55,61									
38,84	175,95	56,85									
38,96	178,05	55,96									
38,69	172,94	57,71									
38,60	171,00	58,15									
38,68	172,90	57,51									

Arrefecimento Convectivo de Painéis Fotovoltaicos

38,64	171,95	57,81									
38,60	171,38	56,71									
39,95	198,95	48,86									
39,71	194,18	50,55									
39,47	189,46	52,07									
39,34	186,87	53,49									
39,49	189,95	52,43									
39,38	187,45	53,36									
39,13	182,74	55,16									
39,29	185,84	53,94									
39,34	186,47	53,31									
39,38	187,45	53,06									
39,22	184,33	53,89									
39,04	180,76	55,61									
38,92	178,64	56,59									
38,99	179,74	55,81									
39,13	182,35	55,16									
39,16	182,88	54,09									
39,80	195,42	50,53									
41,36	224,58	36,72									
41,19	220,37	37,53									
41,14	219,28	38,00									
41,05	217,57	39,01									
41,01	216,53	39,56									
40,99	216,02	39,95									
40,93	214,47	40,26									
40,92	214,42	40,16									
41,10	218,24	39,00									
40,98	215,96	40,04									
41,18	219,90	38,82									
41,08	217,72	39,43									
40,99	215,61	40,23									
40,92	214,42	40,66									
40,70	210,01	42,41									
40,62	208,38	43,02									
40,61	207,92	43,10									
40,63	207,21	43,25									
40,59	206,60	43,26									
40,76	209,91	42,35									
40,61	207,11	43,38									
40,47	203,97	44,40									
40,47	203,97	44,51									
40,44	203,41	44,83									
40,15	197,54	46,96									
40,10	196,49	47,49									
39,75	190,01	49,72									
40,22	199,09	46,64									
40,12	196,99	47,13									
39,99	194,75	47,29									
39,87	192,57	48,22									
40,11	197,34	46,69									
40,18	198,49	45,96									
40,02	195,30	47,01									
40,01	195,25	46,89									
39,93	193,66	47,95									
39,90	192,72	48,33									
39,81	191,09	48,99									
39,84	191,23	48,76									
39,65	187,94	50,10									
39,56	186,33	50,54									
39,49	184,81	50,40									
39,07	176,60	50,61									
39,22	179,24	49,52									
39,25	179,77	49,26									
39,00	175,11	50,91									
39,09	177,08	50,08									
39,12	177,21	49,60									
40,66	205,33	35,85									
40,18	195,68	39,68									
40,00	192,40	41,29									

Arrefecimento Convectivo de Painéis Fotovoltaicos

39,87	189,78	42,64
39,65	185,96	44,63
39,68	186,89	44,69
39,66	186,40	44,80
39,75	188,02	44,44
39,81	189,50	44,32
39,59	184,89	45,80
39,47	182,75	46,88
39,39	180,80	47,34
39,31	179,25	47,99
39,60	184,54	46,16
39,48	182,40	46,88
39,23	177,32	48,76
38,49	162,43	54,57
38,78	167,92	52,51
38,98	171,51	50,93
38,92	170,47	51,21
38,79	167,96	52,41
38,73	166,54	52,97
38,75	167,01	52,94
38,65	165,04	53,75
38,50	162,09	54,69
38,41	160,55	55,32
38,49	162,04	54,74
38,81	168,05	52,26
38,68	165,55	52,92
38,58	163,97	53,95
38,71	166,07	52,86
38,54	163,02	54,01
38,45	161,11	54,70
38,54	162,64	53,85
38,74	166,58	52,22
40,29	199,44	44,53
40,44	202,20	43,84
40,28	199,39	44,84
40,12	196,19	46,08
40,24	198,38	45,32
40,27	198,93	45,16
40,21	197,43	45,57
40,01	193,25	46,93
39,79	189,40	48,34
39,66	186,40	49,42
39,54	184,26	50,07
39,49	183,23	50,20
39,70	186,99	48,96
39,82	189,54	48,82
39,76	188,06	49,15
39,94	191,31	48,22
40,02	192,90	47,89
40,19	196,13	46,70
40,32	198,37	45,97
40,20	195,77	46,63
39,99	191,95	47,90
40,05	193,04	47,75
40,34	198,47	46,07
40,38	199,07	45,75
40,26	196,87	46,28
40,04	192,59	47,74
39,94	190,51	48,54
40,03	192,14	47,90
40,28	197,37	46,36
40,33	198,02	45,95
40,08	193,19	47,37
39,86	189,34	48,86
39,73	186,73	49,75
39,95	190,96	48,38
40,14	194,28	47,04
40,00	191,60	47,85
40,23	195,92	46,07
40,08	192,78	47,46
39,31	178,07	50,02
40,69	201,82	40,96
40,37	196,20	41,93
40,76	203,39	40,46
39,89	169,53	47,83
39,87	169,05	48,12

Arrefecimento Convectivo de Painéis Fotovoltaicos

39,91	169,62	47,78							
39,74	166,11	49,03							
39,75	166,16	49,02							
39,64	163,71	49,70							
39,49	160,72	50,82							
39,51	160,81	50,57							
39,77	166,24	48,83							
39,61	163,19	49,83							
39,41	158,43	51,26							
39,41	158,43	51,20							
39,45	159,38	51,30							
39,86	167,81	48,36							
39,81	166,80	48,37							
39,49	160,33	50,61							
39,62	162,84	50,33							
39,65	163,36	50,01							
39,76	165,40	49,23							
40,23	175,00	45,60							
39,84	166,93	48,05							
39,66	163,40	49,25							
39,66	163,00	49,43							
39,72	164,44	49,16							
39,71	164,40	49,20							
39,50	159,98	50,23							
39,56	160,22	49,94							
39,52	159,27	50,23							
39,47	157,88	50,69							
40,58	183,83	43,01							
40,80	189,31	41,64							
40,85	191,18	41,34							
40,68	187,53	42,27							
40,42	181,89	44,24							
40,27	178,80	45,28							
40,56	184,55	43,72							
40,73	188,58	42,55							
40,89	191,77	41,70							
41,00	194,34	41,08							
40,95	193,28	41,46							
40,76	189,13	42,63							
40,66	186,63	43,48							
40,33	179,87	45,43							
40,23	177,41	46,30							
40,35	180,36	45,54							
40,45	182,43	44,75							
40,38	180,90	45,24							
40,48	182,97	44,62							
40,56	184,14	44,06							
40,53	183,60	44,19							
40,58	184,64	44,09							
40,65	186,18	43,83							
40,52	183,15	44,39							
40,32	178,62	45,55							
40,53	183,60	44,19							
40,59	184,68	43,96							
40,35	179,56	45,54							
40,56	183,74	44,18							
40,64	185,32	43,64							
40,67	185,86	43,31							
40,61	184,37	43,58							