



**Politécnico
Castelo Branco**

Escola Superior
de Tecnologia

Conceção, construção e teste de um Desidratador Solar de Alimentos

Agostinho Manuel Nzuzi Quimbo

(aluno nº 20230056)

Orientador

Luís P. C. Neto, Prof. Adjunto, PhD

Trabalho de Projeto apresentado à Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Licenciado em Engenharia das Energias Renováveis, realizado sob a orientação científica do Professor Adjunto Doutor Luís Paulo Coelho Neto do Instituto Politécnico de Castelo Branco.

Setembro 2026

Composição do júri

Presidente do júri

Professor Doutor José Sarreira Tomás Monteiro

Vogais

Professora Doutora Paula Cristina Alves Pereira (Arguente)

Professor Adjunto, Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco

Professor Doutor Luís Paulo Coelho Neto (Orientador)

Professor Adjunto, Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco

Dedicatória

Primeiramente a Deus, por me dar a vida, saúde e a força necessária para superar todos os obstáculos ao longo desta jornada.

Dedico este trabalho aos meus pais, em especial à minha mãe, Suzana de Fátima Nzuzi, cujo amor incondicional, sacrifícios e incentivo constante foram o verdadeiro pilar da minha jornada acadêmica.

À minha falecida avó Bernice Quivango, pela memória, carinho e inspiração que sempre deixaste em mim, sendo uma presença eterna no meu coração.

Agradecimentos

A realização deste projeto não teria sido possível sem o contributo, o apoio e a dedicação de várias pessoas e instituições que, direta ou indiretamente, me acompanharam ao longo desta etapa académica.

Em primeiro lugar, expresso o meu sincero agradecimento ao meu orientador, o Professor Doutor Luís Paulo Coelho Neto, pela inexcedível disponibilidade, rigor científico, paciência e valiosas orientações que foram fundamentais para a condução e conclusão bem-sucedida deste trabalho.

Um agradecimento especial ao Instituto Politécnico de Castelo Branco e a todo o corpo docente, pela formação transmitida e pelas condições disponibilizadas ao longo do curso.

À minha mãe, à minha família e ao meu irmão Zacarias Ngoma Buca, agradeço do fundo do coração pelo apoio incondicional, pelo carinho, pela paciência e por acreditarem sempre em mim, mesmo nos momentos mais desafiantes.

Por fim, a todos os meus colegas e amigos que partilharam comigo esta caminhada, pelas trocas de ideias, pelos momentos de incentivo e pela amizade.

A todos, o meu muito obrigado.

Resumo

O presente trabalho de projeto descreve a concepção, construção e ensaio experimental de um protótipo de desidratador solar de alimentos, que combina o calor do sol com um sistema de ventilação elétrica, desenvolvido no âmbito da Licenciatura em Engenharia das Energias Renováveis do Instituto Politécnico de Castelo Branco. O projeto visa responder ao desafio da conservação agroalimentar e a evitar que os alimentos se estraguem depois de serem colhidos, na região de Castelo Branco, associando um método tradicional de preservação a tecnologias de baixo custo e energeticamente autónomas.

Do ponto de vista teórico, o relatório aborda os fundamentos da geometria solar: variação da órbita terrestre, excentricidade, equinócios, solstícios, tempo solar verdadeiro (TSV) e equação do tempo, necessários à modelação da radiação solar incidente em superfícies inclinadas, bem como os princípios de conservação alimentar por desidratação: composição química dos alimentos, humidade em base húmida e seca, balanço de massa e energia associado à evaporação da água.

O protótipo é constituído por três módulos principais: a câmara de secagem, o coletor solar térmico de ar e o sistema eletrónico de monitorização e controlo. A câmara e o coletor foram construídos em placas de poliestireno (XPS) de 40 mm, com estrutura de suporte em ferro, e o coletor foi orientado com uma inclinação de 25°, otimizada para a captação de radiação solar em Castelo Branco durante o verão. O princípio de funcionamento assenta na convecção do ar: o ar exterior é aquecido no coletor solar (superfície interior pintada de preto) e conduzido até à câmara de secagem, onde atravessa o produto e promove a evaporação da água nele contida. Um sistema de ventilação forçada, controlado automaticamente por um Arduino Mega 2560 com base nas leituras de temperatura e humidade da câmara e do coletor, e alimentado por um conjunto fotovoltaico (painel, controlador de carga e bateria), assegura a operação autónoma do sistema.

O protótipo foi submetido a dois ensaios experimentais, realizados nos dias 06 e 07 de agosto de 2026, com registo de dados a intervalos de 15 minutos ao longo de aproximadamente 9 horas por dia. Os resultados confirmaram um comportamento térmico consistente e repetível entre os dois dias, com a câmara de secagem a atingir picos de temperatura próximos dos 52 °C e a manter-se sistematicamente mais quente do que o coletor solar, validando o seu funcionamento como reservatório térmico. A aplicação do balanço de massa a uma amostra de 20 rodelas de banana permitiu quantificar uma redução de massa de 52,5% e uma diminuição da humidade de 75,0% para 47,4%, correspondendo a uma energia de evaporação estimada de aproximadamente 150 kJ. Este valor de humidade final, ainda distante do intervalo de referência para conservação segura (15–20%), evidencia que a duração dos ensaios foi insuficiente para uma desidratação completa, constituindo a principal limitação identificada e o ponto de partida para os trabalhos futuros propostos.

Palavras-chave

Desidratação de Frutas e Legumes, Desidratador Solar, Energia Solar Térmica, Protótipo, Coletor solar.

Abstract

This project work describes the design, construction, and experimental testing of a solar food dehydrator prototype, which combines heat from the sun with an electric ventilation system, developed within the scope of the Bachelor's Degree in Renewable Energy Engineering at the Polytechnic Institute of Castelo Branco. The project aims to address the challenge of food preservation and to prevent food from spoiling after harvest in the Castelo Branco region, combining a traditional preservation method with low-cost, energy-autonomous technologies.

From a theoretical standpoint, the report covers the fundamentals of solar geometry variations in Earth's orbit, eccentricity, equinoxes, solstices, true solar time (TST), and the equation of time, necessary for modelling solar radiation incident on tilted surfaces, as well as the principles of food preservation through dehydration: chemical composition of food, wet-basis and dry-basis moisture content, and the mass and energy balance associated with water evaporation.

The prototype consists of three main modules: the drying chamber, the solar air collector, and the electronic monitoring and control system. The chamber and collector were built using 40 mm extruded polystyrene (XPS) panels, with an iron support structure, and the collector was oriented at a 25° tilt angle, optimized for solar radiation capture in Castelo Branco during the summer. The operating principle is based on air convection: outside air is heated in the solar collector (whose interior absorbing surface is painted black) and directed into the drying chamber, where it passes through the product and promotes evaporation of the water it contains. A forced ventilation system, automatically controlled by an Arduino Mega 2560 based on temperature and humidity readings from the chamber and the collector, and powered by a photovoltaic setup (solar panel, charge controller, and battery), ensures the system's autonomous operation.

The prototype was subjected to two experimental trials, carried out on 6 and 7 August 2026, with data logged at 15-minute intervals over approximately 9 hours per day. The results confirmed consistent and repeatable thermal behaviour between the two days, with the drying chamber reaching peak temperatures close to 52 °C and remaining consistently warmer than the solar collector, validating its function as a thermal reservoir. Applying the mass balance to a sample of 20 banana slices quantified a mass reduction of 52.5% and a decrease in moisture content from 75.0% to 47.4%, corresponding to an estimated evaporation energy of approximately 150 kJ. This final moisture value, still far from the reference range for safe storage (15–20%), shows that the trial duration was insufficient for complete dehydration, which was identified as the main limitation of the study and the starting point for the future work proposed.

Keywords

Fruit and Vegetable Dehydration, Solar Dehydrator, Solar Energy, Prototype, solar collector.

Índice geral

1. Introdução (motivação e objetivos).....	1
1.1. Introdução ao projeto.....	1
1.2. Contexto e motivação	1
1.3. Objetivos	1
1.4. Estrutura do relatório	2
2. Trajetória e Coordenadas Solares	4
2.1. Introdução.....	4
2.2. Variação da distância entre a Terra e o Sol	5
2.3. Fator de correção da excentricidade da órbita terrestre	6
2.4. Equinócios, Solstícios e Ângulo do Dia	7
2.5. Número-do-dia.....	8
2.6. Ângulo-do-dia	9
2.7. Declinação Solar.....	9
2.8. Variação da declinação ao longo do ano	9
2.9. Modelação matemática da declinação solar	10
2.10. Trajetória do Sol ao longo do ano	11
2.11. Influência da latitude na trajetória solar	11
2.12. Tempo Solar Verdadeiro.....	12
2.13. Desfasamento entre tempo solar e hora local	13
2.14. Equação do Tempo	14
2.15. Ângulo Horário.....	16
2.16. Altura Solar.....	17
2.17. Ângulo de Zénite Solar	19
2.18. Azimute Solar	20
2.19. Latitude.....	22
2.20. Longitude.....	23
2.21. Hora de Verão	25
2.22. Nascer e Pôr-do-Sol	26
2.23. Ângulo horário de nascer e de pôr-do-sol	27
2.24. Duração do dia	28
2.25. Superfícies inclinadas	30
2.26. Ângulo de incidência dos raios solares	32
2.27. Orientação ótima do desidratador.....	33
2.28. Determinação do ângulo de inclinação ótimo no período de Verão	34
3. Desidratação de frutas e legumes	35
3.1. Introdução.....	35

3.2. Composição química dos alimentos frescos	35
3.3. Teor de humidade.....	36
3.4. Teor de humidade em Base Húmida.....	36
3.5. Teor de humidade em Base Seca.....	36
3.6. Balanço de massa na desidratação	37
3.7. Concentração de sólidos	37
3.8. Transferência de Massa (Lei de Fick)	38
3.9. Energia necessária para a secagem.....	38
3.10. Substâncias envolvidas no processo	39
3.11. Alterações na composição	40
3.12. Vantagens e desvantagens	41
3.13. Estudo de Caso Prático: Secagem e desidratação de Banana e Maçã.....	42
4. Desidratadores.....	44
4.1. Desidratador Elétrico	44
4.2. Desidratador Solar Direto	45
4.3. Desidratador Solar Indireto	46
4.4. Desidratador Solar Híbrido	47
5. Conceção, construção e teste de protótipo de desidratador solar	49
5.1. Descrição Geral.....	49
5.2. Princípio de funcionamento do desidratador	49
5.3. Especificações técnicas do desidratador	50
5.4. Análise térmica do desidratador.....	53
5.5. Construção do protótipo de desidratador	58
5.6. Implementação e integração dos componentes eletrónicos para a recolha de dados e automatização do processo de desidratação.	64
6. Teste de protótipo de desidratador	94
7. Conclusões e Trabalhos Futuros	120

Índice de figuras

Figura 1: Diagrama do balanço de energia na terra.	5
Figura 2: Inclinação da terra e distribuição da radiação solar.....	5
Figura 3: Tempo da luz do Sol até à Terra.....	6
Figura 4: Representação esquemática da órbita elíptica da Terra, indicando os pontos de periélio e afélio e a variação da distância em Unidade Astronómica.	6
Figura 5: Movimento anual da terra em torno do Sol.....	8
Figura 6: Movimento aparente do Sol, parâmetros astronómicos aplicados ao dimensionamento solar.....	11
Figura 7: Esquema orbital da Terra e variação da incidência solar para otimização de sistemas.	12
Figura 8: Representação do conceito do tempo solar verdadeiro (TSV), que é o tempo baseado na posição real do sol no céu.....	14
Figura 9: Componentes da equação do tempo, equação do centro, redução ao equador e curva resultante.	15
Figura 10: Esfera celeste e parâmetros de posição do Sol (declinação e ângulo horário).	17
Figura 11: Representação do ângulo de altura solar, evidenciando a relação entre o horizonte, o observador e a posição do Sol.	18
Figura 12: Representação do azimute solar, evidenciando a sua medição no plano horizontal em relação ao Norte verdadeiro.	21
Figura 13: Representação das linhas de latitude e na Terra, evidenciando o equador, os trópicos e os polos.	22
Figura 14: Mapa ilustrativo da utilização da Hora de Verão no mundo.....	26
Figura 15: Representação dos instantes de nascer e pôr-do-sol, evidenciando a interseção da trajetória solar com o horizonte.....	28
Figura 16: Variação da duração do dia ao longo do ano em função da latitude, evidenciando diferenças entre Equinócios e Solstícios.	30
Figura 17: Trajetória solar sazonal sobre uma superfície inclinada.....	31
Figura 18: Geometria ângulos de uma superfície inclinada.....	31
Figura 19: Representação do ângulo de incidência entre os raios solares e a normal a uma superfície inclinada.	33
Figura 20: Fatias de banana colocadas no desidratador.....	42
Figura 21: Maçã desidratada pronta para consumo.	43
Figura 22: Exemplo de um desidratador elétrico.	45
Figura 23: Exemplo de um desidratador solar direto.....	46
Figura 24: Exemplo de um desidratador solar indireto.	47

Figura 25: Exemplo de um desidratador híbrido.....	48
Figura 26: Esquema ilustrativo do funcionamento do sistema em condições reais de operação.....	50
Figura 27: Vista 3D completa do desidratador com indicação das medidas.	51
Figura 28: Parte traseira do desidratador, podendo ver-se o coletor solar térmico (em baixo) e o coletor solar fotovoltaico (em cima).	51
Figura 29: Parte frontal do desidratador, evidenciando-se a porta de acesso à câmara de secagem.	52
Figura 30: Fase inicial da montagem, focada na base do desidratador.....	60
Figura 31: Montagem da estrutura de suporte das bandejas	61
Figura 32: Estrutura do coletor solar em construção.	61
Figura 33: União do coletor solar com a base.	62
Figura 34: Vista interior da câmara de secagem com as bandejas metálicas amovíveis.	63
Figura 35: Vista global do protótipo integrado, evidenciando o painel solar, o suporte em ferro e a bateria de armazenamento.	63
Figura 36: Vista superior do coletor solar, evidenciando o vidro de cobertura, o fundo negro absorvedor e o suporte estrutural em ferro.	64
Figura 37: Esquema de ligação física e arquitetura de hardware do protótipo de controlo e monitorização do desidratador solar.....	69
Figura 38: Declaração das bibliotecas de suporte ao hardware do sistema.	76
Figura 39: Mapeamento físico dos pinos do microcontrolador e definição de constantes temporais.....	76
Figura 40: Declaração de instâncias de periféricos e variáveis de armazenamento global.....	77
Figura 41: Declaração antecipada dos protótipos de funções do programa.	78
Figura 42: Rotina de inicialização e configuração prévia de hardware (setup()).....	79
Figura 43: Estrutura do ciclo principal de funcionamento e temporização sem bloqueios (<i>non-blocking</i>).....	80
Figura 44: Algoritmo de decisão e acionamento automático do sistema de exaustão.	80
Figura 45: Rotina de segurança e proteção térmica através de alarme sonoro.....	81
Figura 46: Rotina de recuperação e desbloqueio físico do barramento de comunicação I2C.	82
Figura 47: Rotina de aquisição, validação e filtragem de dados dos sensores ambientais.	82
Figura 48: Funções de estruturação visual fixa e atualização dinâmica do visor LCD 20x4.....	83
Figura 49: Bibliotecas (<i>#include</i>).....	86

Figura 50: Variáveis globais, protótipos das funções.	87
Figura 51: Continuação do setup().	88
Figura 52: Fim do setup().	89
Figura 53: Função controlarVentiladores().	90
Figura 54: Continuação de atualizarLeituraSensores().	91
Figura 55: Resto de atualizarValoresEcra().	92
Figura 56: Função gravarDadosNoSD() completa.	93
Figura 57: Montagem do protótipo de desidratador solar em ambiente externo para ensaio experimental.	94
Figura 58: Vista interior do protótipo do desidratador solar, com as amostras de banana dispostas na grelha de secagem durante o ensaio.	95
Figura 59: Vista geral do protótipo de desidratador solar durante o ensaio experimental, com destaque para a unidade de monitorização e as ligações aos sensores.	96
Figura 60: Aspeto visual das fatias de banana após o processo de desidratação solar.	96
Figura 61: Gráfico da temperatura na câmara de secagem.	98
Figura 62: Gráfico da temperatura no coletor solar.	99
Figura 63: Humidade relativa na câmara de secagem.	100
Figura 64: Humidade relativa no coletor solar.	101
Figura 65: Estado dos ventiladores.	102
Figura 66: Temperatura da câmara de secagem	102
Figura 67: Temperatura do coletor solar.	103
Figura 68: Gráfico da humidade relativa da câmara de secagem.	105
Figura 69: Grafico da humidade relativa do coletor	106
Figura 70: Gráfico do estado dos ventiladores.	107
Figura 71: Pesagem das rodela de banana frescas antes do ensaio de desidratação (06/08/2026)	116
Figura 72: Pesagem das rodela de banana desidratadas, após o ensaio de secagem (07/08/2026).	117

Índice de tabelas

Tabela 1: Comparação entre os diferentes tipos de desidratadores.....	48
Tabela 2: Capacidade total estimada do desidratador.	53
Tabela 3: Composição dos dados exportados para o cartão SD.....	69
Tabela 4: Mapeamento dos pinos do sensor DHT22 para o Arduino Mega e descrição funcional das ligações no sistema de aquisição de dados.	70
Tabela 5: Ligação do display LCD 20x4 com interface I2C ao Arduino Mega, indicando o mapeamento dos pinos e a função de cada ligação no sistema.	71
Tabela 6: Ligação do sensor BME280 ao Arduino Mega através do barramento I2C, indicando os pinos utilizados e a função de cada ligação no sistema de monitorização ambiental.....	71
Tabela 7: Ligação do sensor de luminosidade BH1750 ao Arduino Mega através do barramento I2C, indicando o mapeamento dos pinos e a função de cada ligação no sistema de monitorização.	72
Tabela 8: Ligação do módulo RTC DS3231 ao Arduino Mega através do barramento I2C, indicando os pinos utilizados e a função de cada ligação no sistema de registo temporal.....	73
Tabela 9: Ligação do módulo de relé de 2 canais ao Arduino Mega, indicando os pinos de controlo e a sua função no acionamento de cargas externas.	73
Tabela 10: Ligação do buzzer ativo ao Arduino Mega, indicando os pinos de controlo e a sua função no sistema de alerta sonoro.....	74
Tabela 11: Ligação do módulo de cartão MicroSD ao Arduino Mega através do protocolo SPI, indicando o mapeamento dos pinos e a função de cada ligação no sistema de armazenamento de dados.	75
Tabela 12: Temperatura da camara.....	97
Tabela 13: Temperatura do coletor	98
Tabela 14: Humidade relativa da camara de secagem	99
Tabela 15: Humidade relativa no coletor.....	100
Tabela 16: Tabela dos ventiladores	101
Tabela 17: Tabela da temperatura na camara de secagem	103
Tabela 18: Tabela do coletor solar.....	104
Tabela 19: Tabela da humidade relativa da camara de secagem	104
Tabela 20: Tabela da humidade relativa do coletor.....	105
Tabela 21: Tabela dos ventiladores	106
Tabela 22: Arduino Mega 2560.....	107
Tabela 23: Do Sensor DHT22 (T/H câmara).....	107
Tabela 24: Do sensor BME280 (T/H/P coletor)	108

Tabela 25: Do sensor de BH1750 (luminosidade).....	108
Tabela 26: Do RTC DS3231	108
Tabela 27:Do LCD 20x4 (módulo I2C)	109
Tabela 28: Do Módulo Relé 2 canais	109
Tabela 29: Buzzer ativo	109
Tabela 30: Módulo MicroSD (SPI).....	110
Tabela 31: Painel solar fotovoltaico	110
Tabela 32: Controlador de carga solar.....	110
Tabela 33: Bateria	111
Tabela 34: Listagem dos dados recolhidos no cartão SD	112
Tabela 35: Amostragem horária do ensaio (06/08/2026)	114
Tabela 36: Valores medidos e calculados por rodela e para o total das 20 rodela 117	

Índice de símbolos

A	Área da superfície de transferência de calor (m^2)
A_c	Área do coletor (m^2)
a_w	Redução da atividade da água (–)
c_p	Calor específico a pressão constante ($J/kg.K$)
$C_{sólidos}$	Fração mássica de sólidos no alimento (%)
$C_{sólidos}$	Fração mássica de sólidos no alimento (%)
$\frac{dC}{dx}$	Gradiente de concentração de água ao longo da direção de difusão (kg/m^4)
D	Coeficiente de difusão (m^2/s)
d_n	Número-do-dia do ano (–)
E_0	Fator de correção da excentricidade da órbita terrestre (–)
E_t	Equação do tempo (minutos)
I	Radiação solar global incidente (W/m^2)
j	Fluxo de massa de água ($kg/m^2.s$)
k_{XPS}	Condutividade térmica do material isolante XPS ($W/m.K$)
L	Espessura do isolamento
L_{local}	Longitude do local geográfico ($^\circ$)
L_{ref}	Longitude do meridiano de referência ($^\circ$)
m	Massa de água evaporada (kg)
$\dot{m}$	Caudal mássico de ar injetado pelos ventiladores (kg/s)
$m_{água}$	Massa de água (kg)
$m_{água} (inicial)$	Massa de água inicial (kg)
$m_{água} (final)$	Massa de água remanescente (kg)
$m_{água} (removida)$	Massa de água removida durante o processo (kg)
$m_{inicial}$	Massa total do alimento antes da desidratação (kg)
m_{final}	Massa total do alimento após a desidratação (kg)
$m_{sólidos}$	Massa da matéria seca ou sólidos totais (kg)
m_{total}	Massa total do alimento (kg)
N_d	Duração do dia (horas)
Q	Energia necessária para a evaporação (J)
$\dot{Q}_c$	Potência térmica perdida (W)
$\dot{Q}_u$	Potência térmica útil transferida pelo coletor para o ar (W)
r	Distância real Terra–Sol num determinado dia do ano (km)

r_0	Distância média entre a Terra e o Sol (km)
T_{entrada}	Temperatura do ar à entrada do coletor solar (°C)
T_{exterior}	Temperatura do ar no exterior do desidratador (°C)
T_{interna}	Temperatura do ar no interior do desidratador (°C)
$T_{\text{saída}}$	Temperatura do ar à saída do coletor solar (°C)
X_{bs}	Teor de humidade em base seca (%)
X_{bs}	Teor de humidade em base seca (%)
X_w	Teor de humidade em base húmida (%)
X_w	Teor de humidade em base húmida (%)
α	Ângulo de altura solar (°)
β	Ângulo de inclinação da superfície em relação à horizontal (°)
Γ	Ângulo do dia (°)
δ	Declinação Solar (°)
Δt	Intervalo de tempo (minutos)
η_c	Rendimento do coletor (–)
θ	Ângulo de incidência dos raios solares (°)
θ_z	Ângulo de zénite solar (°)
ϕ	Latitude do local geográfico (°)
ω	Ângulo horário (°)
ω_{sr}	Ângulo horário de nascer do Sol (°)
ω_{ss}	Ângulo horário de pôr-do-sol (°)
γ	Azimute da superfície (°)
UA	Unidade Astronómica (1 UA = 149 597 870,7 km)
DST	<i>Daylight Saving Time</i> , conhecida em Portugal como Hora de Verão (+ 1 hora)
TSV	Tempo Solar Verdadeiro (horas)
HL	Hora local (ou Legal) (horas)

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro que este relatório de projeto final é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto.

Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

Castelo Branco, 11 de setembro de 2026

O Estudante



Agostinho Quimbo

1. Introdução (motivação e objetivos)

1.1. Introdução ao projeto

O presente projeto surge no âmbito do ciclo de estudos conducente à obtenção do grau de Licenciado em Engenharia das Energias Renováveis pela Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco. O trabalho centra-se na conceção, construção e teste de um protótipo de desidratador solar de alimentos, integrando conceitos fundamentais de energia solar térmica, transferência de calor e massa, e sistemas de controlo automatizados.

A conservação de alimentos por desidratação representa uma das abordagens mais sustentáveis para prolongar a vida útil de produtos alimentares, mitigando o desperdício alimentar e agregando valor à produção local. Ao aliar este processo tradicional às tecnologias de energias renováveis, nomeadamente através do aproveitamento térmico da radiação solar e da autonomia elétrica proporcionada por sistemas fotovoltaicos, o projeto visa desenvolver uma solução eficiente, económica e de baixo impacto ambiental, perfeitamente adaptada às condições climáticas da região de Castelo Branco.

1.2. Contexto e motivação

O setor agroalimentar enfrenta sempre o desafio de reduzir as perdas após a colheita, que acontecem muitas vezes devido às limitações dos métodos tradicionais de secagem e ao facto de os produtos frescos se estragarem depressa. Na zona de Castelo Branco e no mundo rural em geral, a época de certas frutas e legumes cria excedentes que, se não forem aproveitados ou guardados a tempo, acabam por resultar num grande desperdício de comida e de recursos.

Antigamente, a secagem ao sol era o método mais usado para guardar fruta e legumes. No entanto isto tem desvantagens importantes: apanhar sol direto pode destruir os nutrientes e o sabor; a falta de controlo da temperatura e da humidade faz com que apareçam fungos e bactérias; o pó, os insetos e o mau tempo estragam a qualidade e a higiene do produto final.

Por causa disto, mudar para sistemas de desidratação solar controlada é uma excelente alternativa. Ao colocar a fruta numa câmara fechada e aproveitar o ar quente que vem de um coletor solar, conseguimos um ambiente limpo e que aquece muito melhor. Além disso, juntar um sistema inteligente que permita vigiar e controlar a temperatura e a humidade correta, garante um produto seco com qualidade e que gasta pouca energia.

1.3. Objetivos

O objetivo principal deste projeto é conceber, construir e testar um protótipo de um desidratador solar de alimentos de pequeno porte, que funcione de forma autónoma e com controlo automático.

Para alcançar esta meta principal, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- Construir a estrutura física do sistema usando materiais económicos e práticos, utilizando ferro nas pernas de suporte e placas de poliestireno extrudido (XPS) para o isolamento térmico e para o coletor de ar quente;
- Garantir o funcionamento do sistema de captação solar, assegurando que o coletor solar aquece o ar de forma eficiente antes de o enviar para a câmara de secagem;
- Desenvolver e instalar o sistema eletrónico de controlo com recurso a uma placa Arduino Mega 2560 e a sensores próprios (como o BME280 e o DHT22), permitindo obter e registar a temperatura e a humidade do ar em tempo real;
- Testar o funcionamento do protótipo através de experiências práticas de desidratação, analisando a circulação do ar quente, a precisão do controlo automático e a qualidade final dos alimentos secos.

1.4. Estrutura do relatório

Para além do presente capítulo, que contempla o enquadramento, a motivação e os objetivos do projeto, o relatório encontra-se estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 1: Introdução (motivação e objetivos), apresenta o enquadramento contextual do tema, explicitando as motivações subjacentes ao desenvolvimento do projeto e definindo os objetivos gerais e específicos a alcançar.
- Capítulo 2: Trajetória e Coordenadas Solares, aborda os fundamentos teóricos da energia solar, detalhando a geometria solar, os parâmetros de cálculo da radiação, a variação da órbita terrestre, o tempo solar verdadeiro e o comportamento dos raios solares em superfícies inclinadas.
- Capítulo 3: Desidratação de frutas e legumes, aprofunda os conceitos científicos associados à preservação de alimentos, cobrindo a composição química, o balanço de massa, a transferência de massa (Lei de Fick), as necessidades energéticas e um estudo de caso prático focado na secagem de banana e maçã.
- Capítulo 4: Desidratadores, apresenta e compara os diferentes tipos de desidratadores existentes (elétrico, solar direto, solar indireto e solar híbrido), identificando vantagens e desvantagens de cada solução e justificando a escolha da tipologia adotada no protótipo.
- Capítulo 5: Conceção, construção e teste de protótipo de desidratador solar, descreve a vertente prática do trabalho, englobando o princípio de funcionamento, as especificações técnicas, a análise térmica, o processo construtivo do protótipo e a integração dos sistemas eletrónicos para a automatização e monitorização de dados.
- Capítulo 6: Teste de protótipo de desidratador, apresenta a metodologia experimental, os resultados dos ensaios realizados nos dias 06 e 07 de agosto

de 2026 e a respetiva análise, incluindo o balanço de massa e energia aplicado às amostras de banana.

- Capítulo 7: Conclusões e Trabalhos Futuros, sintetiza as principais conclusões retiradas do desenvolvimento do projeto e do desempenho do protótipo, apontando potenciais linhas de investigação e melhorias futuras.

2. Trajetória e Coordenadas Solares

2.1. Introdução

O Sol constitui a principal fonte de energia que sustenta todos os processos naturais na Terra, desempenhando um papel determinante tanto na evolução dos sistemas naturais como no desenvolvimento das sociedades humanas [1]. Desde as primeiras civilizações, a observação do comportamento solar permitiu compreender fenómenos como a alternância entre o dia e a noite e a sucessão das estações.

Ao longo da história, diferentes culturas atribuíram grande relevância ao Sol, não apenas do ponto de vista simbólico, mas também como elemento essencial para a sobrevivência. A sua influência manifesta-se diretamente na regulação do clima, na dinâmica dos ecossistemas e na disponibilidade de recursos naturais.

Do ponto de vista energético, o Sol emite radiação em grande escala, sendo essa energia transmitida sob a forma de ondas eletromagnéticas. Apesar da distância significativa que separa a Terra do Sol, a quantidade de energia que chega ao planeta é suficientemente elevada para suportar a vida e alimentar inúmeros processos naturais. Estima-se que a potência recebida pela Terra seja extremamente elevada, tornando a energia solar a fonte energética mais abundante disponível [2].

No entanto, a distribuição dessa energia não é uniforme. A intensidade da radiação solar varia em função da posição geográfica, do período do dia e da época do ano. Esta variabilidade constitui um dos principais desafios na área das energias renováveis, exigindo soluções tecnológicas capazes de maximizar o aproveitamento da radiação incidente.

Outro aspeto relevante prende-se com a interação da radiação solar com a atmosfera terrestre. Durante a sua propagação, parte da radiação é desviada ou absorvida por partículas e gases atmosféricos, o que reduz a quantidade de energia que atinge diretamente a superfície [3].

Assim, a radiação solar incidente pode ser dividida em duas componentes distintas:

- Radiação direta, que chega à superfície terrestre sem sofrer alterações significativas na sua trajetória;
- Radiação difusa, que resulta da dispersão da radiação na atmosfera, chegando à superfície de forma indireta.

A compreensão destas componentes é fundamental no estudo da energia solar, especialmente no dimensionamento de sistemas de captação e conversão energética.

A Figura 1 ilustra o balanço de energia na terra, evidenciado a forma como a radiação solar é parcialmente refletida pela atmosfera e superfície, enquanto outra

parte é absorvida e posteriormente reemitida sob a forma radiação infravermelha, demonstrando o equilíbrio energético do planeta.



Figura 1: Diagrama do balanço de energia na terra.
(figura adaptada de [4])

A Figura 2 ilustra a influência da inclinação do eixo terrestre na distribuição da radiação solar, mostrando como a variação do ângulo de incidência dos raios solares resulta em diferente intensidade de energia recebida no hemisfério, originando as estações do ano.

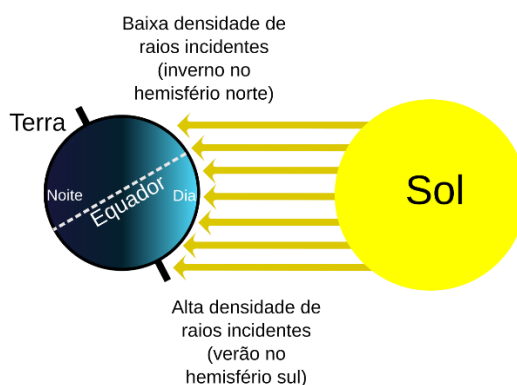


Figura 2: Inclinação da terra e distribuição da radiação solar.
(figura copiada de [5])

2.2. Variação da distância entre a Terra e o Sol

A separação entre a Terra e o Sol apresenta um valor médio de aproximadamente 149,6 milhões de quilómetros, sendo esta referência designada por Unidade Astronómica (UA). Esta grandeza é amplamente utilizada para descrever distâncias dentro do Sistema Solar de forma simplificada [1].

Contudo, devido ao facto de a órbita terrestre possuir uma forma elíptica, essa distância não permanece constante ao longo do ano. Pequenas variações ocorrem à medida que a Terra percorre a sua trajetória em torno do Sol.

O momento em que a Terra se encontra mais próxima do Sol é conhecido como periélio, ocorrendo normalmente no início do mês de janeiro. Por outro lado, quando a Terra atinge o ponto mais afastado da sua órbita, designa-se esse fenómeno por afélio, verificando-se habitualmente no início de julho [2].

Embora estas diferenças de distância não sejam muito acentuadas, elas influenciam ligeiramente a intensidade da radiação solar recebida pela Terra. Por

esse motivo, estas variações são consideradas nos modelos matemáticos da geometria solar, através de fatores de correção que permitem obter resultados mais precisos [3].

A Figura 3 ilustra a distância média entre a Terra e o Sol, representada por uma Unidade Astronómica (UA), bem como o tempo necessário para a luz solar percorrer essa distância, aproximadamente 8 minutos. A Figura 3 evidencia a propagação da radiação solar no espaço e a escala envolvida na interação energética entre sol e a terra.



Figura 3: Tempo da luz do Sol até à Terra.
(figura adaptada de [6])

A Figura 4 ilustra a órbita elíptica da terra em torno do sol, destacando os pontos de Periélio (menor distância ao Sol) e de Afélio (maior distância ao Sol). A representação demonstra a variação da distância Terra-Sol ao longo do ano, conforme descrito pelas leis do movimento planetário, evidenciando que a órbita terrestre não é perfeitamente circular.

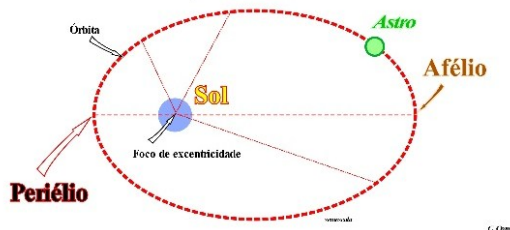


Figura 4: Representação esquemática da órbita elíptica da Terra, indicando os pontos de periélio e afélio e a variação da distância em Unidade Astronómica.

(figura copiada de [7])

2.3. Fator de correção da excentricidade da órbita terrestre

Devido ao facto de a órbita da Terra em torno do Sol apresentar uma forma elíptica, a distância entre estes dois corpos varia ligeiramente ao longo do ano. Essa variação influencia diretamente a quantidade de radiação solar incidente no topo da atmosfera.

Para ter em conta este efeito, introduz-se o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre, representado por E_0 , o qual permite ajustar os cálculos da radiação solar em função da posição orbital da Terra.

Este parâmetro pode ser determinado através da equação (1):

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \quad (1)$$

em que:

E_0 Fator de correção da excentricidade da órbita terrestre (--)

r_0 Distância média entre a Terra e o Sol (km)

r Distância real Terra–Sol num determinado dia do ano (km)

ou, de forma desenvolvida, em função do ângulo do dia (Γ), teremos a equação (2):

$$E_0 = 1,00011 + 0,034221\cos(\Gamma) + 0,00128\sin(\Gamma) + 0,000719\cos(2\Gamma) + 0,000077\sin(2\Gamma) \quad (2)$$

em que:

Γ Ângulo do dia ($^\circ$)

Esta equação traduz a variação da distância Terra–Sol ao longo do ano através de uma aproximação trigonométrica. O valor de E_0 não é constante, variando ligeiramente em torno da unidade, o que reflete o facto de a órbita terrestre não ser perfeitamente circular.

Quando a Terra se encontra mais próxima do Sol (Periélio), o valor de E_0 é ligeiramente superior, indicando maior intensidade de radiação solar. Por outro lado, quando a Terra está mais afastada (Afélio), o valor de E_0 diminui.

2.4. Equinócios, Solstícios e Ângulo do Dia

Os equinócios e os solstícios correspondem a eventos astronómicos fundamentais que definem a variação sazonal da radiação solar recebida na Terra. Estes fenómenos resultam da inclinação do eixo terrestre e do movimento de translação da Terra em torno do Sol [1].

Os solstícios ocorrem duas vezes por ano e correspondem aos momentos em que a inclinação do eixo da Terra atinge o seu máximo relativamente ao Sol. No hemisfério norte, o Solstício de Verão ocorre normalmente por volta de 21 de junho, sendo caracterizado pelo dia com maior duração. Em contrapartida, o Solstício de Inverno ocorre cerca de 21 de dezembro, correspondendo ao dia mais curto do ano. No hemisfério sul, estas condições verificam-se de forma inversa [2].

Por outro lado, os equinócios ocorrem aproximadamente em março e setembro e caracterizam-se pelo facto de o Sol se encontrar alinhado com o plano do equador terrestre. Nestas condições, a duração do dia e da noite é praticamente igual em todo o planeta.

Para além destes fenómenos, importa referir que, ao longo do ano, a distância entre a Terra e o Sol sofre pequenas variações devido à forma elíptica da órbita terrestre. Quando a Terra se encontra no Periélio, a distância ao Sol é mínima (aproximadamente 0,983 UA), enquanto no Afélio essa distância aumenta (cerca de 1,017 UA). Estas variações influenciam ligeiramente a intensidade da radiação solar incidente.

Como se pode observar na Figura 5, mostra o movimento anual da terra em torno do sol ao longo de uma órbita elíptica, evidenciando as diferentes posições

ocupados pelo planeta durante o ano. A representação destaca a sucessão das estações do ano, associada à posição da terra na sua trajetória orbital, bem como a influência da inclinação do seu eixo.

Assim, a figura demonstra como o movimento de translação, em conjunto com a inclinação terrestre, condiciona a variação sazonal da radiação solar recebida.



Figura 5: Movimento anual da terra em torno do Sol.
(figura adaptada de [7])

2.5. Número-do-dia

A análise da geometria solar está diretamente associada à posição da Terra ao longo da sua órbita anual. Como consequência do movimento de translação, a posição aparente do Sol no céu varia continuamente ao longo do ano, influenciando a quantidade de radiação solar recebida em cada instante.

Para descrever matematicamente esta variação, é necessário introduzir um conjunto de parâmetros que permitem localizar temporalmente a Terra na sua órbita. Um dos parâmetros mais importantes é o número-do-dia (d_n), representado por d_n [1].

Este parâmetro corresponde à contagem sequencial dos dias ao longo do ano, sendo definido da seguinte forma:

- $d_n = 1$ no dia 1 de janeiro
- $d_n = 365$ no dia 31 de dezembro

Para efeitos de cálculo em geometria solar, considera-se normalmente um ano com 365 dias, assumindo o mês de fevereiro com 28 dias [2].

O valor de d_n pode ser obtido através da soma dos dias dos meses anteriores com o número do dia do mês em análise:

$$d_n = \sum(\text{dias dos meses anteriores}) + (\text{dia do mês}) \quad (3)$$

O número do dia permite estabelecer uma ligação direta entre o tempo (data) e os modelos matemáticos utilizados na determinação da posição solar. Este parâmetro é utilizado como base para o cálculo de outras grandezas fundamentais, como o ângulo do dia e a declinação solar.

2.6. Ângulo-do-dia

O ângulo-do-dia, representado por Γ , é um parâmetro que permite relacionar o dia do ano com a posição angular da Terra na sua órbita em torno do Sol. Este ângulo é fundamental para o cálculo de várias grandezas da geometria solar [3].

Este parâmetro pode ser determinado através da equação (4):

$$\Gamma = \frac{360(d_n - 1)}{365} \quad (4)$$

em que:

d_n Número-do-dia do ano (--)

Γ Posição angular da Terra na órbita ou ângulo do dia ($^\circ$)

Este parâmetro permite transformar uma variável temporal (dias) numa variável angular, facilitando a aplicação de modelos trigonométricos no estudo da radiação solar.

O valor do ângulo-do-dia influencia diretamente outros parâmetros, como a declinação solar e a duração do dia [2].

2.7. Declinação Solar

A declinação solar, representada por δ , é um dos parâmetros mais relevantes na geometria solar, uma vez que define a posição angular do Sol relativamente ao plano do equador terrestre [1].

Este fenómeno está diretamente relacionado com a inclinação do eixo de rotação da Terra, que apresenta um valor aproximado de $23,45^\circ$ em relação ao plano da sua órbita. Como consequência, ao longo do movimento de translação, a orientação da Terra em relação ao Sol altera-se continuamente, originando variações na distribuição da radiação solar sobre a superfície terrestre [3].

2.8. Variação da declinação ao longo do ano

A declinação solar não é constante, assumindo valores diferentes ao longo do ano dentro do seguinte intervalo:

$$-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ$$

Esta variação explica as diferenças sazonais entre os hemisférios:

- Quando o hemisfério norte se encontra orientado na direção do Sol, a declinação solar assume valores positivos ($\delta > 0^\circ$), correspondendo ao período de verão nessa região;
- Quando o hemisfério sul está mais exposto à radiação solar, a declinação torna-se negativa ($\delta < 0^\circ$), originando o verão nesse hemisfério [2];
- Nos períodos de equinócio, a declinação solar é aproximadamente nula ($\delta \approx 0^\circ$), uma vez que o Sol se encontra alinhado com o equador terrestre,

resultando numa distribuição praticamente uniforme da radiação solar entre os dois hemisférios.

2.9. Modelação matemática da declinação solar

A declinação solar pode ser determinada através de uma expressão trigonométrica em função do ângulo do dia (Γ), permitindo calcular com precisão a sua variação ao longo do ano. Este parâmetro pode ser determinado através da equação (5):

$$\delta = (0,006918 - 0,399912\cos \Gamma + 0,070257\sin \Gamma - 0,006758\cos 2\Gamma + 0,000907\sin 2\Gamma - 0,002697\cos 3\Gamma + 0,00148\sin 3\Gamma) \times \frac{180}{\pi} \quad (5)$$

em que:

δ Declinação Solar ($^{\circ}$)

Γ Ângulo do dia ($^{\circ}$)

Esta equação resulta de uma aproximação harmónica que descreve o comportamento periódico da declinação solar ao longo do ano. A presença de termos com múltiplos de Γ permite representar com maior precisão a variação não linear deste parâmetro [8].

A declinação solar influencia diretamente:

- A altura solar ao meio-dia;
- A duração do dia;
- A trajetória solar;
- A quantidade de radiação incidente.

Por esse motivo, este parâmetro é essencial em aplicações como:

- Dimensionamento de sistemas fotovoltaicas;
- Cálculo da radiação solar;
- Desenvolvimento de seguidores solar.

A Figura 6 ilustra que o Sol não permanece fixo no céu, mas varia a sua posição entre os trópicos ao longo do ano devido à inclinação da Terra. Essa variação determina os solstícios e equinócios, influenciando diretamente a duração dos dias, a intensidade da radiação solar e o desempenho de sistemas energéticos. Para a aplicação em energias renováveis, como painéis solares e seguidores solares, compreender esse movimento é essencial para otimizar a captação de energia, sendo este esquema anual do movimento aparente do Sol e os respetivos parâmetros astronómicos fundamental para o dimensionamento e a otimização de sistemas de captação de energia solar.

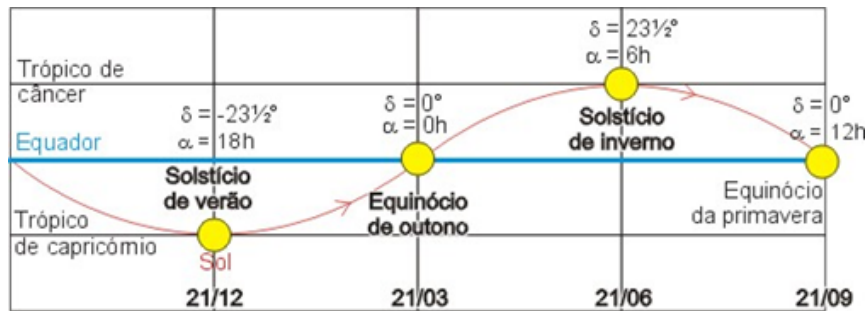


Figura 6: Movimento aparente do Sol, parâmetros astronômicos aplicados ao dimensionamento solar.

(figura adaptada de [5])

2.10. Trajetória do Sol ao longo do ano

A trajetória aparente do Sol ao longo do ano depende fundamentalmente da latitude do observador e da posição do Sol na eclíptica, que corresponde ao percurso aparente descrito pelo Sol na esfera celeste devido ao movimento de translação da Terra [1].

Esta trajetória não é constante, variando ao longo do ano em função da inclinação do eixo terrestre e da posição orbital da Terra, o que resulta em diferentes condições de incidência da radiação solar [2].

2.11. Influência da latitude na trajetória solar

A forma da trajetória solar altera-se significativamente com a latitude, influenciando diretamente a altura do Sol no céu e a distribuição da radiação solar [3].

Regiões de elevada latitude (próximas dos polos)

Nas regiões próximas dos polos, o Sol apresenta uma baixa altura solar, mantendo-se próximo do horizonte ao longo do dia. Nestas condições:

- A trajetória solar é mais horizontal;
- Os raios solares incidem com menor ângulo;
- A radiação é mais dispersa;
- Durante o verão, estas regiões podem apresentar longos períodos de iluminação (dias muito longos), enquanto no inverno podem ocorrer períodos prolongados sem luz solar. Apesar da longa duração do dia no verão, a baixa altura solar limita a intensidade da radiação recebida [3].

Regiões de baixa latitude (próximas do equador)

Nas zonas próximas do equador, a trajetória solar apresenta um comportamento distinto:

- O Sol atinge alturas elevadas, podendo aproximar-se da vertical;
- A trajetória é mais inclinada/vertical;
- A radiação solar é mais intensa e concentrada;

- Nestas regiões, a variação sazonal é menos pronunciada, resultando em pequenas diferenças na duração do dia e em temperaturas relativamente estáveis ao longo do ano.

Comportamento ao longo das estações

Ao longo do ano a trajetória solar sofre alterações que estão diretamente relacionadas com:

- A inclinação do eixo terrestre;
- A declinação solar.

Assim, durante o verão, o Sol percorre uma trajetória mais elevada no céu, enquanto no inverno a sua trajetória é mais baixa. Estas diferenças são responsáveis pelas variações sazonais na radiação solar recebida [9].

A Figura 7 ilustra a influência da inclinação do eixo terrestre (aproximadamente $23,5^\circ$) na distribuição da radiação solar ao longo do ano. Observa-se que essa inclinação, combinada com o movimento orbital, origina os solstícios e equinócios, que determinam as variações sazonais.

Durante os solstícios, a incidência solar atinge valores extremos em cada hemisfério, resultando em dias mais longos ou mais curtos, enquanto nos equinócios há equilíbrio entre dia e noite. Essas variações afetam diretamente a intensidade da radiação solar recebida em diferentes regiões da terra [10].

Assim conclui-se que o movimento de translação da terra é um fator determinante para a variação sazonal de energia solar, sendo essencial para o estudo e dimensionamento de sistemas de aproveitamento energético, como módulos fotovoltaicos e sistemas térmicos.

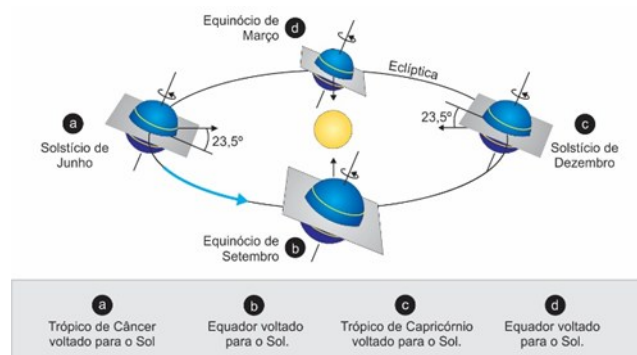


Figura 7: Esquema orbital da Terra e variação da incidência solar para otimização de sistemas.
(figura adaptada de [11])

2.12. Tempo Solar Verdadeiro

O Tempo Solar Verdadeiro (TSV) é uma medida temporal baseada diretamente na posição aparente do Sol no céu, sendo determinado em função do instante em que o Sol atravessa o meridiano local de um determinado observador [3].

Diferentemente do tempo civil (hora do relógio), que é padronizado e uniforme, o tempo solar verdadeiro varia ao longo do ano, refletindo as irregularidades associadas ao movimento da Terra [2].

O TSV está associado ao movimento diário do Sol e é definido da seguinte forma:

- O instante em que o Sol atinge o ponto mais elevado no céu corresponde ao meio-dia solar verdadeiro;
- A partir desse momento, o tempo é medido com base na posição angular do Sol relativamente ao meridiano local [12].

Assim, o TSV representa o tempo real associado ao movimento aparente do Sol.

2.13. Desfasamento entre tempo solar e hora local

Na prática, existe uma diferença entre o Tempo Solar Verdadeiro (TSV) e a Hora Local (HL, tempo civil). Essa diferença resulta de vários fatores:

- Diferença de longitude entre o local de observação e o meridiano de referência;
- Equação do tempo, que corrige as irregularidades do movimento aparente do Sol;
- Hora de Verão (DST¹), aplicada por convenção em determinados períodos do ano.

Mais enfrente falarei de uma forma mais detalhada e profunda sobre Hora de Verão (DST¹).

Este parâmetro pode ser determinado através da equação (6):

$$TSV = HL + \frac{4(L_{local} - L_{ref})}{60} + \frac{E_t}{60} - DST \quad (6)$$

em que:

TSV Tempo Solar Verdadeiro (horas)

E_t Equação do tempo (min)

L_{local} Longitude do local de observação (°)

L_{ref} Longitude do meridiano de referência² (°)

HL Hora local (tempo civil) (horas)

DST Correção associada à hora de Verão (horas)

Como se pode observar na Figura 8, apresenta o conceito de tempo solar verdadeiro (TSV), evidenciando a diferença entre o tempo civil (hora local) e o tempo baseado na posição real do sol no céu.

¹ DST = Daylight Saving Time, conhecida em Portugal como Hora de Verão

² O Meridiano de Referência é o Meridiano de Greenwich

Observa-se o mesmo depende de fatores como a longitude local, a equação do tempo e possíveis ajustes como o horário de verão.

Essa diferença ocorre porque o movimento aparente do sol não é perfeitamente uniforme ao longo do ano, devido à inclinação do eixo da terra e à sua órbita elíptica. Como resultado, o meio-dia solar verdadeiro nem sempre coincide com o meio-dia do relógio.

Conclui-se, portanto, que Tempo Solar Verdadeiro é essencial em sistema de energia solar, pois permite determinar com maior precisão a posição do sol e otimizar o desempenho de dispositivos como noa sistemas fotovoltaicos e seguidores solares.



Figura 8: Representação do conceito do tempo solar verdadeiro (TSV), que é o tempo baseado na posição real do sol no céu.

(figura adaptada de [11])

O Tempo Solar Verdadeiro é um parâmetro fundamental para:

- Determinação do ângulo horário;
- Cálculo da posição solar;
- Modelação da radiação solar incidência.

Sem esta correção, os cálculos associados à geometria solar apresentariam erros significativos [3].

2.14. Equação do Tempo

A Equação do Tempo, representada por E_t , corresponde a uma correção temporal que permite relacionar o tempo solar verdadeiro com o tempo médio utilizado nos sistemas de medição convencional (relógios) [1].

Esta correção torna-se necessária devido ao facto de o movimento aparente do Sol não ser perfeitamente uniforme ao longo do ano, consequência de dois fatores principais [2]:

- A excentricidade da órbita terrestre;
- A inclinação do eixo da Terra em relação ao plano orbital.

Como resultado, o Sol não atravessa o meridiano local sempre à mesma hora ao longo do ano, originando um desfasamento entre o tempo solar verdadeiro e o tempo médio.

A equação do tempo quantifica essa diferença, podendo assumir valores positivos ou negativos.

Valores negativos indicam que o tempo solar está atrasado.

Esta variação é frequentemente representada pelo chamado analema solar, uma curva em forma de “8” que descreve a posição do Sol ao longo do ano quando observado sempre à mesma hora.

Este parâmetro pode ser determinado através da equação (7):

$$E_t = (0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032077 \sin \Gamma - 0.014615 \cos 2\Gamma - 0.04089 \sin 2\Gamma) \times 229,18 \quad (7)$$

em que:

E_t Equação do tempo (min)

Γ Ângulo do dia ($^\circ$)

A Figura 7 mostra o conceito da equação do tempo E_t , que descreve a diferença entre o tempo solar verdadeiro e tempo solar médio ao longo do ano, observa-se que essa diferença devida à combinação de dois fatores principais: a inclinação do eixo da terra e a excentricidade da sua órbita.

O gráfico evidenciado na figura mostra que o desvio pode atingir valores positivos e negativo, indicando momentos em que o sol está “adiantado” ou “atrasado” em relação ao tempo médio. Essas variações influenciam diretamente o instante do meio-dia solar e, conseqüentemente, a posição aparente do sol no céu.

Conclui-se, portanto, que a equação do tempo é essencial para a determinação precisa do tempo solar verdadeiro, sendo um parâmetro fundamental em estudo de geometria solar e no dimensionamento de sistemas de energia solar, como painéis fotovoltaicos e coletores térmicos.

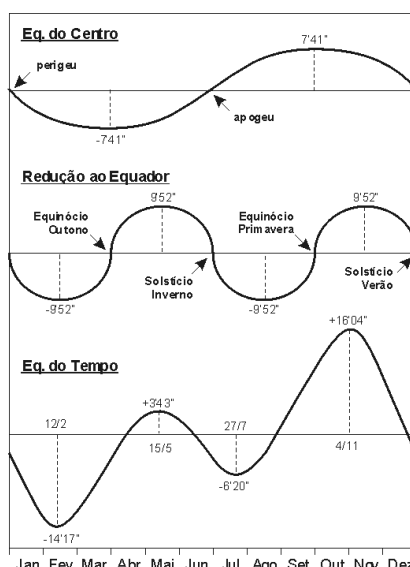


Figura 9: Componentes da equação do tempo, equação do centro, redução ao equador e curva resultante.

(figura adaptada de [13])

A expressão apresentada resulta de uma aproximação harmónica que descreve a variação periódica da equação do tempo ao longo do ano.

O fator multiplicativo (229,18) permite converter o resultado para minutos, sendo esta forma particularmente útil em aplicações práticas de engenharia solar [3].

Apesar de se tratar de uma aproximação, o erro associado é reduzido (tipicamente inferior a um minuto), sendo suficientemente preciso para a maioria dos cálculos técnicos.

A equação do tempo é essencial em várias aplicações, nomeadamente:

- Determinação precisa do tempo solar verdadeiro (TSV);
- Cálculo dos instantes de nascer e pôr do Sol;
- Modelação da posição solar;
- Dimensionamento de sistemas solares.

Sem esta correção, os cálculos associados à geometria solar apresentariam desvios significativos.

2.15. Ângulo Horário

O ângulo horário, geralmente representado por ω , é um parâmetro angular utilizado na geometria solar para descrever a posição do Sol ao longo do dia em relação ao meridiano local do observador [2].

Este ângulo corresponde à diferença angular entre a posição instantânea do Sol e a posição que este ocupa quando atravessa o meridiano local, momento que define o meio-dia solar verdadeiro [2].

Por convenção, o ângulo horário assume [2]:

- Quando $TSV = 12$, então $\omega = 0^\circ$;
- Para valores inferiores a 12 (manhã), $\omega < 0^\circ$;
- Para valores superiores a 12 (tarde), $\omega > 0^\circ$.

A variação do ângulo horário está diretamente relacionada com a rotação da Terra, sendo que o Sol aparenta deslocar-se aproximadamente 15° por hora, o que permite estabelecer uma relação simples entre tempo e deslocamento angular [14].

A Figura 10 ilustra o conceito de ângulo horário (ω), que representa a posição angular do sol em relação ao meridiano local ao longo do dia. Observa-se que o ângulo horário é negativo no período de manhã, zero ao meio-dia solar verdadeiro e positivo no período da tarde, variando aproximadamente 15° por hora.

Esse parâmetro é fundamental para descrever o movimento aparente do Sol no céu e permite determinar com precisão a sua posição em qualquer instante do dia. Dessa forma, o ângulo horário desempenha um papel essencial em aplicações de engenharia solar, como o dimensionamento e orientação de dispositivos solares e térmicos, contribuindo para a otimização da captação de energia solar.

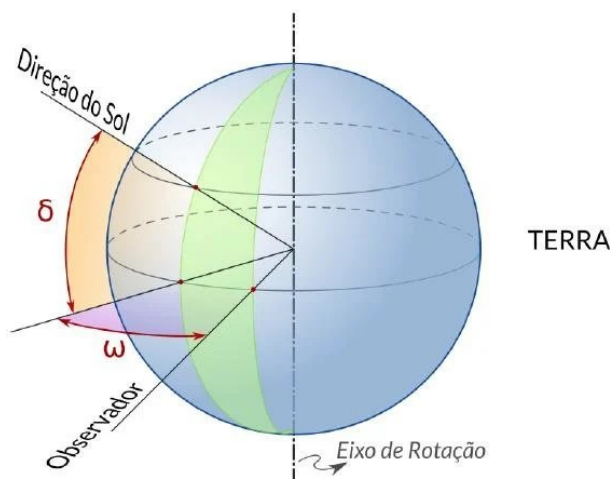


Figura 10: Esfera celeste e parâmetros de posição do Sol (declinação e ângulo horário).
(figura adaptada de [15])

Este parâmetro pode ser determinado através da equação (8):

$$\omega = 15 \times (\text{TSV} - 12) \quad (8)$$

em que:

ω Ângulo horário ($^{\circ}$)

TSV Tempo solar verdadeiro (horas)

O ângulo horário constitui um parâmetro fundamental para a determinação da posição solar, sendo utilizado no cálculo de:

- Altura solar;
- Ângulo zenital;
- Azimute solar;
- Instantes de nascer e pôr do Sol.

A sua correta determinação permite descrever com precisão o movimento aparente do Sol ao longo do dia [3].

2.16. Altura Solar

A altura solar, representada por α , corresponde ao ângulo formado entre a direção dos raios solares incidentes e o plano do horizonte local. Este parâmetro permite quantificar a posição vertical do Sol na abóbada celeste, sendo fundamental na caracterização da geometria solar [1].

A altura solar varia continuamente ao longo do dia devido à rotação da Terra:

- Apresenta valores de 0° durante o nascer e o pôr do Sol;
- Atinge o valor máximo ao meio-dia solar verdadeiro, quando o Sol se encontra no ponto mais elevado da sua trajetória diária.

A altura solar depende essencialmente de três variáveis fundamentais:

- Latitude do local (ϕ);

- Declinação solar (δ);
- Ângulo horário (ω).

A combinação destes parâmetros determina a posição instantânea do Sol no céu.

A altura solar não depende apenas da hora do dia, sendo também influenciada pela época do ano:

- Em regiões próximas do equador, o Sol pode atingir valores elevados de altura, aproximando-se do zénite;
- Em latitudes elevadas, a altura solar mantém-se relativamente baixa, mesmo durante o verão;
- Durante o verão, os valores de altura solar são superiores aos observados no inverno, devido à variação da declinação solar.

Este parâmetro pode ser determinado através da equação (9):

$$\sin \alpha = \sin \delta \times \sin \phi + \cos \delta \times \cos \phi \times \cos \omega \quad (9)$$

em que:

- α Altura solar ($^\circ$)
- δ Declinação solar ($^\circ$)
- ϕ Latitude do local ($^\circ$)
- ω Ângulo horário ($^\circ$)

A Figura 11 mostra que a posição do sol em relação ao observador é definida por ângulos geométricos (principalmente o ângulo de altura solar), que variam ao longo do dia e do ano. Essa variação determina a quantidade de energia solar recebida na superfície terrestre, sendo um fator essencial no dimensionamento e eficiência de sistemas solares, como o desidratador solar, pois influencia diretamente a captação de radiação e o desempenho térmico do sistema.

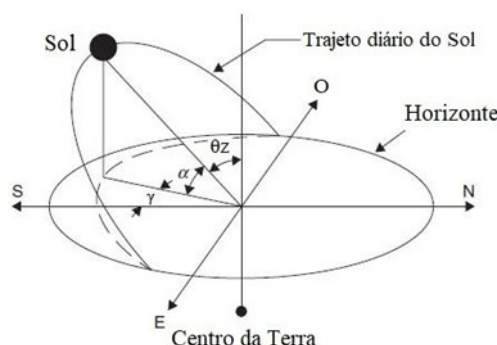


Figura 11: Representação do ângulo de altura solar, evidenciando a relação entre o horizonte, o observador e a posição do Sol.

(figura adaptada de [16])

A altura solar desempenha um papel central em diversas aplicações, nomeadamente:

- Determinação da intensidade da radiação solar incidente;

- Cálculo da energia captada por sistemas solares;
- Dimensionamento e orientação de painéis fotovoltaicos;
- Análise do desempenho de sistemas térmicos solares.

De forma geral, quanto maior for a altura solar, mais perpendicular é a incidência da radiação, aumentando a quantidade de energia recebida pela superfície.

2.17. Ângulo de Zénite Solar

O ângulo de zénite solar, representado por θ_z , corresponde ao ângulo formado entre a direção dos raios solares incidentes e a vertical local (linha que aponta diretamente para o zénite). Este parâmetro descreve a posição angular do Sol relativamente ao ponto mais alto da esfera celeste [1].

O ângulo de zénite está diretamente relacionado com a altura solar, sendo ambos parâmetros complementares, sendo determinado através da equação (10):

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha \quad (10)$$

em que:

θ_z Ângulo de zénite solar ($^\circ$)

α Altura solar ($^\circ$)

Assim, quando o Sol se encontra próximo do zénite, a altura solar é elevada e o ângulo de zénite é reduzido. Por outro lado, quando o Sol está próximo do horizonte, o ângulo de zénite aproxima-se de 90°

Tal como outros parâmetros da geometria solar, o ângulo de zénite varia em função de:

- Latitude do observador (ϕ);
- Declinação solar (δ);
- Ângulo horário (ω).

Esta dependência faz com que o valor de zénite varie ao longo do dia e do ano.

Em regiões próximas do equador, o Sol pode atingir posições muito próximas do zénite, resultando em valores reduzidos de θ_z ;

Em latitudes elevadas, o Sol raramente atinge grandes alturas, conduzindo a valores mais elevados de θ_z , mesmo durante o verão;

Durante o inverno, o ângulo de zénite aumenta significativamente, reduzindo a intensidade da radiação solar incidente [3];

Este parâmetro pode ser determinado através da equação (11):

$$\cos \theta_z = \sin(\delta) \cdot \sin(\phi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\omega) \quad (11)$$

em que:

δ Declinação solar ($^\circ$)

θ_z Ângulo de zénite solar ($^\circ$)

ϕ Latitude do local ($^\circ$)

ω Ângulo horário ($^\circ$)

Como se ilustrou na Figura 11, o ângulo de zénite representa a posição do sol em relação à vertical do observador e está diretamente ligado à intensidade da radiação solar recebida. Ele complementa o ângulo de altura solar e permite compreender como a variação de posição do sol ao longo do ano influencia o desempenho de sistemas solares, sendo um parâmetro fundamental no dimensionamento e otimização de tecnologias que utilizam energia solar.

O ângulo de zénite é um dos parâmetros mais relevantes na análise da radiação solar, uma vez que:

- Determina o ângulo de incidência da radiação;
- Influencia a intensidade energética recebida;
- Afeta o desempenho de sistemas solares térmicos e fotovoltaicos;
- Quanto menor for o ângulo de zénite, mais perpendicular é a incidência da radiação solar, aumentando a eficiência de captação energética [2].

2.18. Azimute Solar

O azimute solar, representado por ψ , define a posição angular do Sol no plano horizontal, sendo medido a partir de uma direção de referência, normalmente o Norte verdadeiro. Este ângulo permite identificar a direção em que o Sol se encontra no céu em cada instante do dia [1].

O azimute solar corresponde ao ângulo formado entre:

- A direção do Norte verdadeiro no plano horizontal;
- A projeção da posição do Sol sobre esse mesmo plano.

Desta forma, este parâmetro descreve o movimento aparente do Sol de Este para Oeste, permitindo localizar a sua posição horizontal ao longo do dia.

O valor do azimute solar altera-se continuamente com o passar do tempo:

- No nascer do Sol, o azimute assume valores próximos da direção Este;
- Ao longo da manhã, o valor do azimute varia à medida que o Sol se desloca no céu;
- No meio-dia solar, o Sol encontra-se alinhado com o meridiano local;
- Durante a tarde, o Sol desloca-se em direção ao Oeste, refletindo-se na variação do azimute.

Dependendo da convenção adotada, o sinal do azimute pode variar. Uma abordagem comum considera:

- $\psi > 0^\circ$ no período da manhã;

- $\psi = 0^\circ$ ao meio-dia solar verdadeiro, momento em que o Sol se encontra alinhado com a direção de referência adotada;
- $\psi < 0^\circ$ durante a tarde.

O azimute Solar depende de vários parâmetros da geometria solar que são:

- Latitude do local (ϕ);
- Declinação solar (δ);
- Ângulo horário (ω);
- Altura solar (α).

A interação destes parâmetros determina a direção exata do Sol no plano horizontal.

O azimute solar pode ser determinado através de relações trigonométricas que envolvem a altura solar e a declinação. Uma forma simplificada é dada por:

Este parâmetro pode ser determinado através da equação (12):

$$\cos \psi = \frac{\sin \delta - \sin \alpha \cdot \sin \phi}{\cos \alpha \cdot \cos \phi} \quad (12)$$

em que:

- α Altura solar ($^\circ$)
- δ Declinação solar ($^\circ$)
- ϕ Latitude do local ($^\circ$)
- ω Ângulo horário ($^\circ$)

A Figura 12 mostra que o ângulo Azimute solar representa a direção horizontal do Sol em relação ao observador, variando ao longo do dia entre Este e Oeste. Na figura, ele permite compreender como a posição do Sol no plano horizontal influencia a orientação de sistemas solares. Em conjunto com o ângulo de altura solar, o azimute é fundamental para otimizar a captação de energia, garantida maior eficiência em aplicações como o desidratador solar.

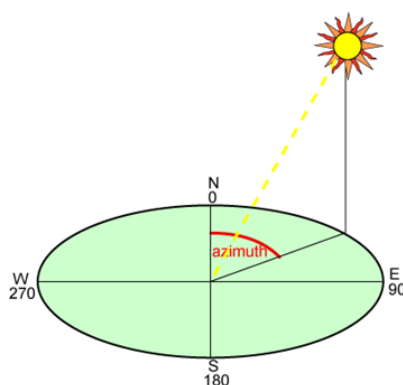


Figura 12: Representação do azimute solar, evidenciando a sua medição no plano horizontal em relação ao Norte verdadeiro.

(figura adaptada de [16])

O azimute solar é um parâmetro essencial para:

- Determinar a orientação ideal de painéis solares;
- Maximizar a captação de energia solar;
- Analisar a direção da radiação incidente;
- Projetar sistemas de seguimento solar (*trackers*);
- Uma correta determinação do azimute permite otimizar o desempenho de sistemas solares, garantindo uma maior eficiência energética.

2.19. Latitude

A latitude, representada por ϕ , é uma coordenada geográfica que define a posição de um ponto na superfície terrestre em relação ao plano do equador. Esta grandeza é expressa em graus e assume valores compreendidos entre 0° , no equador, e $\pm 90^\circ$, nos polos [1].

A Figura 13 ilustra que a Terra é organizada por um sistema de coordenadas geográficas baseado em latitude e longitude, fundamentais para a localização precisa de qualquer ponto na superfície terrestre. O equador (0° de longitude) divide o planeta em hemisfério Norte e sul, enquanto o Meridiano de Greenwich (0° de longitude) separa os hemisférios Este e Oeste.

Além disso, a representação dos trópicos (Câncer e Capricórnio) evidencia a relação entre a posição geográfica e a incidência da radiação solar, influenciando diretamente os climas e as estações do ano.

Portanto conclui-se que as linhas de latitude e longitude não servem apenas para orientação geográfica, mas também são essenciais para compreender fenômenos naturais como a distribuição de temperatura, zonas climáticas e a dinâmica solar na terra.

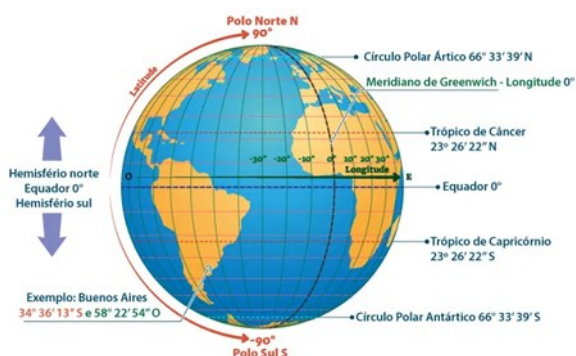


Figura 13: Representação das linhas de latitude e na Terra, evidenciando o equador, os trópicos e os polos.

(figura adaptada de [16])

A latitude corresponde ao ângulo formado entre:

- O plano do equador terrestre;
- A linha que liga o ponto considerado ao centro da Terra.

Convencionalmente:

- Valores positivos correspondem ao hemisfério norte;
- Valores negativos correspondem ao hemisfério sul.

A latitude é um dos parâmetros mais influentes na determinação da posição do Sol, uma vez que condiciona:

- A altura solar máxima ao longo do dia;
- A trajetória solar anual;
- A duração do dia;
- A quantidade de radiação solar incidente;

A distribuição da radiação solar na Terra depende fortemente da latitude:

Regiões equatoriais ($\phi \approx 0^\circ$):

- Elevada incidência de radiação solar;
- Pequena variação sazonal;
- Temperaturas relativamente constantes.

Latitudes médias:

- Variação moderada ao longo do ano;
- Presença de estações bem definidas.

Regiões polares ($\phi \approx \pm 90^\circ$):

- Baixa altura solar;
- Grande variação na duração do dia;
- Temperaturas mais reduzidas.

A latitude está diretamente presente nas principais equações da geometria solar, nomeadamente no cálculo de:

- Altura solar (α);
- Ângulo de zénite (θ_z);
- Azimute solar (ψ).

Desta forma, qualquer estudo da posição solar requer o conhecimento preciso da latitude do local em análise.

2.20. Longitude

A longitude é uma coordenada geográfica que permite definir a posição de um ponto na superfície terrestre relativamente a um meridiano de referência, sendo este o meridiano de Greenwich (0°). Esta grandeza é expressa em graus e varia entre 0° e 180° , tanto para Este como para Oeste [1].

A longitude corresponde ao ângulo formado entre:

- O meridiano de Greenwich;
- O meridiano que passa pelo ponto considerado;
- Este ângulo é medido no plano equatorial, permitindo determinar a posição do ponto ao longo da direção Este–Oeste.

Convenção de sinais:

- Para efeitos de representação e cálculo, adota-se a seguinte convenção:
- Longitudes a Este de Greenwich valores positivos.
- Longitudes a Oeste de Greenwich valores negativos
- Esta convenção é fundamental em aplicações relacionadas com o cálculo do tempo solar e da posição do Sol.

A longitude desempenha um papel essencial na determinação do tempo Solar verdadeiro, uma vez que:

- A Terra roda aproximadamente 15° por hora;
- Diferenças de longitude correspondem a diferenças no instante em que o Sol atinge o meridiano local,
- Deste modo, locais com longitudes diferentes apresentam desfasamentos temporais na observação do movimento solar [2].

A longitude intervém diretamente na correção entre o tempo civil e o tempo solar, sendo utilizada na expressão do Tempo Solar Verdadeiro.

Este parâmetro pode ser determinado através da equação (13):

$$\Delta t = 4(L_{\text{local}} - L_{\text{ref}}) \quad (13)$$

em que:

- L_{local} Longitude local (°)
- L_{ref} Longitude de referência (°)
- Δt Diferencia de tempo (min)

O valor de 4 minutos resulta da rotação da Terra em torno do seu próprio eixo. Como a Terra realiza uma rotação completa de 360° em 24 horas, conclui-se que:

- 360° correspondem a 24 horas;
- 15° correspondem a 1 hora;
- 1° corresponde a aproximadamente 4 minutos.

Assim, cada grau de diferença em longitude provoca uma diferença de cerca de 4 minutos no tempo solar entre dois locais.

Onde cada grau de diferença de longitude corresponde aproximadamente a 4 minutos de diferença temporal.

O conhecimento da longitude é fundamental em diversas aplicações, tais como:

- Cálculo do tempo solar verdadeiro;
- Determinação do ângulo horário;
- Modelação da posição solar;
- Navegação e sistemas de posicionamento global (GPS).

A Figura 13 mostra que a longitude permite localizar um ponto na terra no sentido Este-Oeste e está diretamente associada à medição do tempo, devido à rotação do planeta. A sua relação como o meridiano de Greenwich e com os fusos horários torna-a fundamental para aplicações técnicas, como o cálculo do tempo solar e a análise da incidência da radiação solar em sistemas energéticos [1].

2.21. Hora de Verão

A Hora de Verão, designada internacionalmente por *Daylight Saving Time* (DST), corresponde a um ajuste temporário aplicado ao tempo civil, consistindo no adiantamento dos relógios em uma hora relativamente ao horário padrão.

O principal objetivo desta prática é otimizar o aproveitamento da luz natural durante os meses com maior duração do dia, contribuindo potencialmente para a redução do consumo energético [1].

Em Portugal, a adoção da Hora de Verão segue as diretrizes estabelecidas a nível europeu, sendo sincronizada com a maioria dos países da União Europeia.

As transições entre horários ocorrem da seguinte forma:

Início do horário de verão:

- Realiza-se no último domingo de março, momento em que os relógios são adiantados uma hora (da 01h00 para as 02h00);

Retorno ao horário padrão:

- Ocorre no último domingo de outubro, com o atraso de uma hora (das 02h00 para a 01h00).

Distribuição global:

- A implementação da Hora de Verão não é uniforme a nível mundial, variando de acordo com fatores geográficos, económicos e políticos.

De forma geral, os países podem ser classificados em três categorias:

- Países que adotam atualmente a Hora de Verão, sobretudo no hemisfério norte;
- Países que já utilizaram esta prática, mas que, entretanto, a abandonaram;
- Países que nunca implementaram alterações sazonais no horário.

Embora a Hora de Verão não tenha influência direta nos fenómenos astronómicos, ela afeta a forma como o tempo solar é interpretado no contexto humano.

Em particular, este ajuste interfere no cálculo do:

- Tempo Solar Verdadeiro (TSV);
- Ângulo horário.

Assim, é necessário considerar esta correção nos modelos matemáticos utilizados em estudos de geometria solar [1].

Na Figura 14 mostra-se um mapa ilustrativo da utilização da Hora de Verão (*Daylight Saving Time*, DST) no mundo;

- A azul os países que adotam a Hora de Verão no hemisfério norte;
- A laranja os países que no passado tinham a Hora de Verão e já deixaram de a adotar;
- A vermelho os países que nunca aplicaram Horário de Verão.

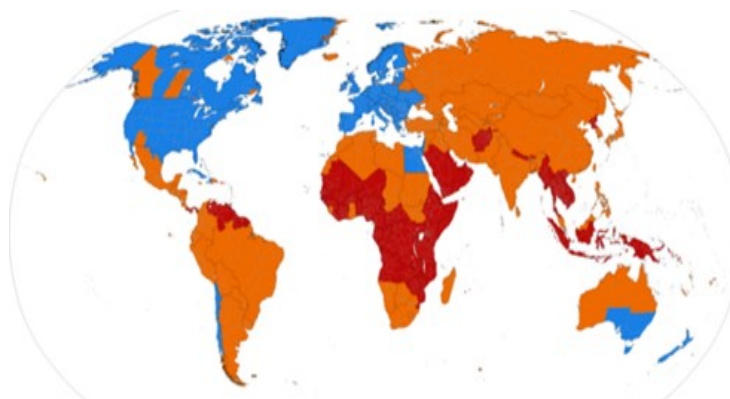


Figura 14: Mapa ilustrativo da utilização da Hora de Verão no mundo.
(figura adaptada de [16])

2.22. Nascer e Pôr-do-Sol

Os fenómenos de nascer e pôr-do-sol correspondem aos instantes em que o disco solar intersecta o plano do horizonte, sendo definidos, em termos geométricos, quando a altura solar assume valor nulo [1].

Do ponto de vista da geometria solar:

- O nascer do Sol ocorre quando o Sol passa do hemisfério inferior para o superior relativamente ao horizonte local;
- O pôr-do-sol corresponde ao movimento inverso, quando o Sol desaparece abaixo do horizonte.

Este parâmetro pode ser determinado através da equação (14):

$$\alpha = 0^\circ \quad (14)$$

em que:

 α Altura solar ($^{\circ}$)

No entanto, estes dois eventos distinguem-se pelo sinal do ângulo horário.

Os instantes de nascer e pôr-do-sol não são constantes, variando em função de:

- Declinação solar (δ);
- Latitude do local (ϕ).

Devido à inclinação do eixo terrestre e à órbita elíptica da Terra, a duração do dia altera-se ao longo do ano:

- Dias mais longos no verão;
- Dias mais curtos no inverno.

2.23. Ângulo horário de nascer e de pôr-do-sol

O cálculo destes instantes baseia-se na determinação do ângulo horário correspondente.

Este parâmetro pode ser determinado através da equação (15):

$$\omega_{sr} = -\cos^{-1}(-\tan \delta \cdot \tan \phi) \quad (15)$$

em que:

- δ Declinação solar ($^{\circ}$)
- ϕ Latitude do local ($^{\circ}$)
- ω_{sr} Ângulo horário do nascer do Sol ($^{\circ}$)

O ângulo horário do pôr-do-sol é simétrico, sendo expresso por (16):

$$\omega_{ss} = -\omega_{sr} \quad (16)$$

em que:

- ω_{ss} Ângulo horário do pôr-do-sol ($^{\circ}$)

O valor de ω_{sr} é negativo, indicando que o nascer do Sol ocorre antes do meio-dia solar.

O valor de ω_{ss} é positivo, correspondendo ao período da tarde.

A magnitude destes ângulos está diretamente relacionada com a duração do dia.

A determinação precisa dos instantes de nascer e pôr-do-sol é essencial para:

- Cálculo da duração do dia;
- Estimativa da energia solar disponível;
- Planeamento de sistemas fotovoltaicos;
- Modelação da radiação solar ao longo do dia.

Como se pode observar na Figura 15, apresenta claramente como a trajetória aparente do sol ao longo do dia determina os instantes de nascer e pôr do sol, bem como a sua variação ao longo do ano.

Observa-se que o sol não nasce sempre exatamente no ponto cardeal Este nem se põe exatamente no Oeste; esses pontos ocorrem apenas nos equinócios. Ao longo

do ano, devido à inclinação do eixo da terra, os azimutes de nascer e pôr do sol deslocam-se para norte ou sul.

Nos solstícios, esses extremos são mais evidentes: no verão, o sol nasce mais a Nordeste e põe-se a Noroeste, resultando em dias longos; no inverno, nasce a Sudeste e põe-se a Sudoeste, originando dias mais curtos. Essa variação influencia diretamente a quantidade de radiação solar recebida ao longo do dia, sendo um fator essencial na modelação da energia solar disponível.

Assim, a figura evidencia a relação entre a geometria solar e a duração do dia, sendo fundamental para aplicações em energia solar, como o dimensionamento de sistemas e o aproveitamento eficiente da radiação ao longo do ano.

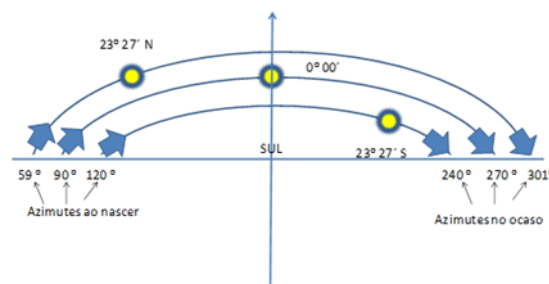


Figura 15: Representação dos instantes de nascer e pôr-do-sol, evidenciando a interseção da trajetória solar com o horizonte.
(figura adaptada de [16])

2.24. Duração do dia

A duração do dia, representada por N_d , corresponde ao intervalo de tempo compreendido entre o nascer e o pôr-do-sol num determinado local da superfície terrestre. Este parâmetro apresenta variações significativas ao longo do ano, sendo influenciado pela inclinação do eixo da Terra e pelo movimento de translação em torno do Sol [1].

A duração do dia não é constante, assumindo comportamentos distintos conforme a época:

- Durante os equinócios (aproximadamente em março e setembro), a duração do dia e da noite é praticamente igual em todo o planeta.

Nos solstícios, verificam-se as maiores diferenças:

- No solstício de verão, ocorre o dia mais longo do ano;
- No solstício de inverno, regista-se o período diurno mais curto.

A latitude desempenha um papel determinante na duração do dia:

- Em regiões próximas do equador, a duração do dia mantém-se relativamente constante ao longo do ano;
- Em **latitudes médias**, verifica-se uma variação moderada entre verão e inverno;

- Em regiões próximas dos polos, a variação é extrema, podendo ocorrer dias com 24 horas de luz (sol da meia-noite) ou períodos prolongados de escuridão [8].

A duração do dia está diretamente associada aos instantes de nascer e pôr-do-sol, sendo possível determiná-la a partir do ângulo horário correspondente ao nascer do Sol [2].

Este parâmetro pode ser determinado através da equação (17):

$$N_d = -2 \times \frac{\omega_{sr}}{15} \quad (17)$$

em que:

N_d Duração do dia (Horas)

Esta expressão resulta da conversão do ângulo horário em tempo, considerando que a Terra realiza uma rotação de aproximadamente 15° por hora.

O fator -2 reflete a simetria entre o nascer e o pôr-do-sol relativamente ao meio-dia-Solar, permitindo obter a duração total do período diurno.

O conhecimento da duração do dia é essencial para:

- Estimativa da energia solar disponível diariamente;
- Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos;
- Planeamento da produção energética;
- Análise de desempenho de sistemas solares ao longo do ano.

a Figura 16 ilustra que a variação da duração do dia ao longo do ano está diretamente relacionada com a inclinação do eixo da terra e o seu movimento de translação em torno do sol. Observa-se que, nos Equinócios (março e setembro), o dia e a noite têm aproximadamente a mesma duração em todas as latitudes, pois o sol incide de forma equilibrada sobre os hemisférios.

Por outro lado, nos Solstícios (junho e dezembro), ocorrem as maioríssimas diferenças na duração do dia: no verão, os dias são mais longos e a incidência solar é maior, enquanto no inverno os dias são mais curtos e a radiação solar é reduzida. Essa variação é mais acentuada quanto maior for a latitude.

Assim, a figura demonstra como os Equinócios e Solstícios influenciam a distribuição da radiação solar ao longo do ano, sendo um fator essencial para o estudo de sistemas solares, como no caso do aproveitamento energético e processo térmicos, incluindo a desidratação de alimentos.



Figura 16: Variação da duração do dia ao longo do ano em função da latitude, evidenciando diferenças entre Equinócios e Solstícios.
(figura adaptada de [16])

2.25. Superfícies inclinadas

As superfícies inclinadas são planas cuja orientação não coincide com o plano horizontal, apresentando um determinado ângulo de inclinação em relação ao horizonte. Este tipo de superfícies é amplamente utilizado em sistemas de captação de energia solar, uma vez que permite ajustar a incidência da radiação de forma a maximizar o aproveitamento energético [2].

Uma superfície inclinada pode ser caracterizada por dois parâmetros fundamentais:

Ângulo de inclinação (β):

Corresponde ao ângulo formado entre a superfície e o plano horizontal onde:

- Superfície horizontal $\beta=0^\circ$;
- Superfície vertical $\beta=90^\circ$.

Valores intermédios representam superfícies inclinadas, sendo estes os mais utilizados em aplicações solares.

Orientação da superfície azimute (γ)

O azimute da superfície define a direção para a qual a superfície está orientada, sendo medido no plano horizontal relativamente a um referencial (normalmente o Norte verdadeiro) [3].

Este parâmetro é essencial para determinar a direção de incidência da radiação solar.

Normal à superfície

Para a análise da radiação incidente, considera-se a normal à superfície, que é uma linha perpendicular ao plano da superfície.

A radiação solar é máxima quando os raios solares incidem perpendicularmente à superfície, ou seja, quando coincidem com a direção da normal [3].

A escolha adequada da inclinação e orientação de uma superfície permite:

Maximizar a captação de radiação solar direta;

Melhorar o rendimento de sistemas fotovoltaicos;

Otimizar o desempenho de sistemas térmicos solares.

Adaptar o sistema às condições locais (latitude e estação do ano):

- Superfícies com baixa inclinação favorecem a captação em períodos de verão;
- Superfícies mais inclinadas são mais eficientes durante o inverno;
- A orientação (azimute) deve ser ajustada de forma a maximizar a exposição ao Sol ao longo do dia.

A Figura 17 e a Figura 18 ilustram a importância da orientação e inclinação de superfície na captação da radiação solar. Observa-se que uma superfície inclinada, como um painel ou coletor solar, deve ser posicionada de forma estratégica em relação à trajetória aparente do sol ao longo do ano, de modo a maximizar a incidência da radiação. A Figura 17 mostra ainda que a inclinação ideal varia conforme a estação: no verão, o sol apresenta maior altura solar, exigindo menores ângulos de inclinação, enquanto no inverno, com o sol mais baixo no horizonte, são necessários ângulos maiores para otimizar a captação energética.

A Figura 18 detalha os parâmetros geométricos fundamentais, como o ângulo de inclinação, azimute da superfície e a posição solar (altura e azimute). Esses parâmetros permitem descrever com a precisão a orientação da superfície em relação ao sol, sendo essenciais para o cálculo da radiação incidente.

Assim ambas as figuras demonstram que o correto ajuste da inclinação e orientação das superfícies é determinante para maximizar o aproveitamento da energia solar, sendo um fator crítico no desempenho de sistemas térmicos e fotovoltaicos, como no caso de desidratadores solares.

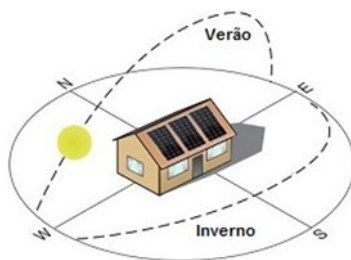


Figura 17: Trajetória solar sazonal sobre uma superfície inclinada.
(figura adaptada de [16])

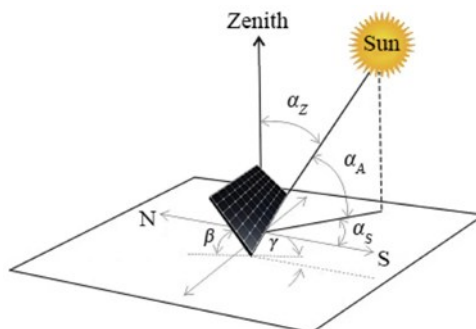


Figura 18: Geometria ângulos de uma superfície inclinada.
(figura adaptada de [16])

2.26. Ângulo de incidência dos raios solares

O ângulo de incidência dos raios solares, representado por θ , corresponde ao ângulo formado entre a direção dos raios solares incidentes e a normal à superfície (linha perpendicular ao plano da superfície).

Este parâmetro é fundamental na análise da radiação solar, pois determina a quantidade efetiva de energia que uma superfície consegue captar.

Quando os raios solares incidem perpendicularmente à superfície, o ângulo de incidência é mínimo.

Quando os raios solares incidem de forma oblíqua, o ângulo aumenta, reduzindo a eficiência de captação.

Este parâmetro pode ser determinado através da equação (18):

$$\cos \theta = (\sin \phi \cdot \cos \beta - \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma) \times \sin \delta + (\cos \phi \cdot \cos \beta + \sin \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma) \times \cos \delta \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \quad (18)$$

em que:

- θ Ângulo de incidência ($^{\circ}$)
- ϕ Latitude do local ($^{\circ}$)
- β Ângulo de inclinação da superfície ($^{\circ}$)
- γ Azimute da superfície ($^{\circ}$)
- δ Declinação solar ($^{\circ}$)
- ω Ângulo horário ($^{\circ}$)

Comportamento do ângulo de incidência

O valor de θ influencia diretamente a intensidade da radiação solar absorvida:

$$\theta = 0^{\circ}$$

- Incidência perpendicular;
- Captação máxima de energia;

$$\theta = 90^{\circ}$$

- Incidência tangencial;
- Captação mínima (praticamente nula).

De forma geral, quanto menor for o ângulo de incidência, maior será a eficiência de captação energética.

O ângulo de incidência é essencial para:

- Cálculo da radiação em superfícies inclinadas;
- Dimensionamento de painéis fotovoltaicos;
- Definição da inclinação e orientação ótimas.

Desenvolvimento de sistemas de seguimento solar (*trackers*).

Este parâmetro permite adaptar superfícies reais às condições solares, garantindo que a radiação incida o mais perpendicularmente possível ao longo do dia ou do ano, aumentando assim o rendimento energético [3].

A Figura 19 apresenta o conceito fundamental do ângulo de incidência da radiação solar sobre uma superfície inclinada, definido como o ângulo entre os raios solares e a norma à superfície. Este parâmetro é determinante para a quantidade de energia solar efetivamente aproveitada.

Observa-se que quanto menor for o ângulo de incidência (ou seja, quanto mais perpendicular for a radiação em relação à superfície), maior será a intensidade da radiação absorvida. Por outro lado, ângulo de incidência elevados resultam em menor aproveitamento energético. Devido à maior reflexão e dispersão da radiação.

A figura também destaca a relação entre a posição do sol (altura solar e ângulo zenital) e a orientação da superfície, evidenciando que a eficiência da captação do alinhamento geométrico entre ambos.

Assim, a compreensão do ângulo de incidência é essencial para o dimensionamento e otimização de sistemas solares, permitindo maximizar o rendimento energético em aplicações como painéis solares e desidratadores solares.

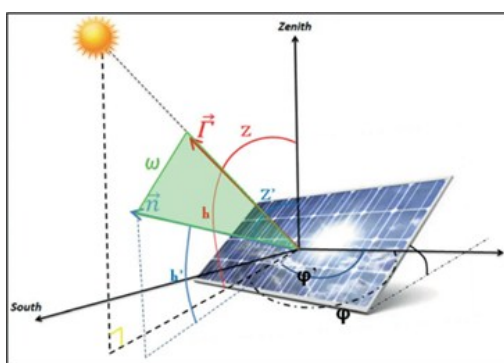


Figura 19: Representação do ângulo de incidência entre os raios solares e a normal a uma superfície inclinada.
(figura adaptada de [16])

Tendo em vista a conceção e construção física do desidratador solar de alimentos descrita no Capítulo 4, o desempenho térmico e energético do sistema depende diretamente da forma como os coletores (o coletor solar para aquecimento do ar e o painel fotovoltaico para autonomia do sistema de controlo com Arduino) são posicionados face à trajetória aparente do Sol.

2.27. Orientação ótima do desidratador

Para garantir uma captação simétrica e contínua da radiação solar direta ao longo do dia, a estrutura do desidratador deve ser orientada de forma rigorosa com os planos de captação voltados para Sul (no Hemisfério Norte).

Esta orientação assegura que o coletor solar e painel fotovoltaico recebam a máxima irradiância solar exatamente no momento do meio-dia solar, otimizando tanto o rendimento do coletor de ar quente.

2.28. Determinação do ângulo de inclinação ótimo no período de Verão

Latitude do local (ϕ): Para a região de Castelo Branco, onde o projeto é desenvolvido, a latitude é de aproximadamente 39,82° N (19):

$$\begin{aligned}\beta &= \phi - 15^\circ \\ \beta &= 39,8^\circ - 15^\circ = 24,8^\circ \approx 25^\circ\end{aligned}\tag{19}$$

Com base na conceção do protótipo e nos critérios de otimização para a região de Castelo Branco, a escolha de um ângulo de inclinação de 25° justifica-se por vários fatores técnicos e práticos:

Adaptação à Época de Verão:

- Como os ensaios de desidratação e o funcionamento principal do protótipo ocorrem durante o período de verão (época de maior abundância de produtos agrícolas para secagem), o Sol atinge uma posição muito elevada no céu. Um ângulo de 25° revela-se ideal para esta estação, permitindo aproximar a superfície de captação da incidência perpendicular dos raios solares e maximizar, desta forma, a captação da radiação solar direta.

Mitigação do Efeito de Sombra e Otimização da Área:

- Uma inclinação mais suave (25°) permite uma melhor distribuição dos raios solares ao longo da superfície do coletor solar e do painel fotovoltaico durante as horas de maior radiação diária.

Sinergia com a Dinâmica de Fluidos (Tiragem Natural):

- Embora uma inclinação maior pudesse teoricamente favorecer a tiragem térmica, o ângulo de 25° assegura a pendente perfeita e suficiente para garantir o escoamento ascendente e contínuo do ar quente gerado no coletor em direção à câmara de secagem, sem comprometer a estabilidade mecânica e a compacidade do protótipo construído.

Na prática de projeto de sistemas solares, e para garantir uma captação energética eficiente não apenas num único dia do ano (o solstício), mas sim ao longo de todo o trimestre de verão (período em que o desidratador de alimentos é intensivamente testado e utilizado devido à época própria de colheita dos frutos e legumes), utiliza-se habitualmente a fórmula prática para o cálculo no verão.

3. Desidratação de frutas e legumes

3.1. Introdução

A desidratação de alimentos é um dos métodos mais antigos de conservação utilizados pela humanidade. O processo consiste na remoção da água presente nos alimentos, reduzindo a atividade microbológica e aumentando o tempo de conservação sem necessidade de refrigeração.

A desidratação de frutas e legumes constitui um processo de conservação alimentar baseado na remoção controlada da fração aquosa dos tecidos vegetais, com o objetivo de reduzir a atividade da água e, conseqüentemente, inibir o desenvolvimento microbológico e as reações enzimáticas indesejáveis [17], [18]. Este procedimento provoca alterações significativas na composição química, nas propriedades físico-químicas e no valor nutricional dos alimentos [19].

O presente relatório propõe uma análise aprofundada dos aspetos quantitativos associados ao processo, incluindo a aplicação de balanços de massa, a modelação da transferência de humidade e a avaliação das variações na composição dos constituintes ao longo da desidratação.

3.2. Composição química dos alimentos frescos

As frutas e os legumes apresentam uma composição química complexa, sendo constituídos predominantemente por água, que representa, em média, entre 70% e 95% da massa total. Para além da fração aquosa, estes alimentos contêm diversos constituintes sólidos com relevância nutricional e funcional.

Entre os principais componentes destacam-se os hidratos de carbono, maioritariamente sob a forma de açúcares simples, como glicose, frutose e sacarose. As fibras alimentares, compostas essencialmente por celulose, hemicelulose e pectinas, desempenham um papel estrutural e fisiológico importante. As proteínas encontram-se presentes em quantidades reduzidas, enquanto os lípidos ocorrem apenas em traços.

Adicionalmente, estes alimentos são fontes significativas de micronutrientes, nomeadamente vitaminas (como a vitamina C, vitamina A e vitaminas do complexo B) e minerais, incluindo potássio, magnésio e cálcio.

Do ponto de vista quantitativo, a massa total do alimento pode ser expressa como a soma das suas frações principais, de acordo com a seguinte relação (20):

$$m_{\text{total}} = m_{\text{água}} + m_{\text{sólidos}} \quad (20)$$

em que:

m_{total}	Massa total do alimento (kg)
$m_{\text{água}}$	Massa de água (kg)
$m_{\text{sólidos}}$	Massa da matéria seca ou sólidos totais (kg)

Esta relação constitui a base para a aplicação de balanços de massa no estudo do processo de desidratação.

3.3. Teor de humidade

O teor de humidade é um dos parâmetros mais relevantes na caracterização de alimentos, especialmente em processos de conservação como a desidratação. Este parâmetro permite quantificar a quantidade de água presente no alimento e está diretamente relacionado com a sua estabilidade microbiológica, propriedades físico-químicas e vida útil [17].

3.4. Teor de humidade em Base Húmida

O teor de humidade em base húmida representa a fração de água em relação à massa total do alimento (incluindo água e sólidos). Este é o método mais utilizado na caracterização de alimentos frescos [19].

A sua expressão matemática é dada por (21):

$$X_w = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{total}}} \quad (21)$$

em que:

m_{total} Massa total do alimento (kg)

$m_{\text{água}}$ Massa de água (kg)

X_w Teor de humidade em base húmida (--) ou em (%)

Este parâmetro indica diretamente a proporção de água no alimento, sendo fundamental para a análise do processo de secagem, uma vez que a desidratação consiste essencialmente na redução deste valor ao longo do tempo.

3.5. Teor de humidade em Base Seca

O teor de humidade em base seca estabelece a relação entre a massa de água presente no alimento e a massa da matéria seca (sólidos totais). Esta forma de expressão é particularmente relevante em cálculos de engenharia, uma vez que a massa de sólidos permanece constante durante o processo de desidratação.

A sua expressão matemática é dada por (22):

$$X_{bs} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{sólidos}}} \quad (22)$$

em que:

m_{total} Massa total do alimento (kg)

$m_{\text{água}}$ Massa de água (kg)

X_{bs} Teor de humidade em base seca (--) ou em (%)

Diferentemente da base húmida, o teor de humidade em base seca pode assumir valores superiores a 1, especialmente em alimentos frescos com elevado conteúdo de água. Esta forma de representação é amplamente utilizada na modelação de

processos de secagem e na análise de balanços de massa, devido à sua maior conveniência matemática [17].

3.6. Balanço de massa na desidratação

O balanço de massa é uma ferramenta fundamental na análise do processo de desidratação, permitindo quantificar a remoção de água ao longo do tempo. Durante este processo, assume-se que a massa de sólidos permanece constante, uma vez que apenas ocorre a remoção da fração aquosa do alimento [18].

Na condição inicial, a massa total do alimento é composta pela soma da massa de água e da massa de sólidos.

A sua expressão matemática é dada pela equação (23):

$$m_{\text{inicial}} = m_{\text{água (inicial)}} + m_{\text{sólidos}} \quad (23)$$

em que:

m_{inicial}	Massa total do alimento antes da desidratação (kg)
$m_{\text{água (inicial)}}$	Massa de água inicial (kg)
$m_{\text{sólidos}}$	Massa da matéria seca (kg)

Após o processo de desidratação, a massa total do alimento diminui devido à remoção de água, mantendo-se constante a massa de sólidos.

A sua expressão matemática é dada pela equação (24):

$$m_{\text{final}} = m_{\text{água (final)}} + m_{\text{sólidos}} \quad (24)$$

Onde:

m_{final}	Massa total do alimento após a desidratação (kg)
$m_{\text{água (final)}}$	Massa de água remanescente (kg)

A quantidade de água removida durante o processo pode ser determinada pela diferença entre a massa de água inicial e final, sendo dada pela equação (25):

$$m_{\text{água (removida)}} = m_{\text{água (inicial)}} - m_{\text{água (final)}} \quad (25)$$

ou pela equação (26):

$$m_{\text{água (removida)}} = m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}} \quad (26)$$

onde:

$m_{\text{água (removida)}}$	Massa de água removida durante o processo (kg)
------------------------------	--

Estes parâmetros são essenciais para avaliar a eficiência do processo de secagem e dimensionar equipamentos de desidratação.

3.7. Concentração de sólidos

Durante o processo de desidratação, a remoção progressiva de água conduz a um aumento da fração relativa de sólidos no alimento. Uma vez que a massa de sólidos

permanece constante, a diminuição da massa total resulta numa maior concentração destes constituintes.

A concentração de sólidos ($C_{\text{sólidos}}$) pode ser expressa pela seguinte relação (27):

$$C_{\text{sólidos}} = \frac{m_{\text{sólidos}}}{m_{\text{final}}} \quad (27)$$

em que:

$C_{\text{sólidos}}$ Fração mássica de sólidos no alimento (--) ou em (%)

À medida que a água é removida, verifica-se uma redução de m_{final} , enquanto $m_{\text{sólidos}}$ permanece constante, resultando no aumento de $C_{\text{sólidos}}$. Este fenómeno está diretamente associado à intensificação do sabor, à alteração da textura e à maior estabilidade do produto final.

3.8. Transferência de Massa (Lei de Fick)

O processo de desidratação envolve mecanismos de transferência de massa, sendo a difusão interna da água um dos fenómenos predominantes. Este transporte ocorre devido a gradientes de concentração no interior do alimento e pode ser descrito pela Lei de Fick [20], [21].

A sua expressão matemática é dada por (28):

$$j = -D \frac{dC}{dx} \quad (28)$$

em que:

j Fluxo de massa de água ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

D Coeficiente de difusão, dependente da temperatura e da estrutura do material ($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

$\frac{dC}{dx}$ Gradiente de concentração de água ao longo da direção de difusão (kg/m^4)

O sinal negativo na equação **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** indica que o fluxo de massa ocorre no sentido oposto ao aumento da concentração, ou seja, a água desloca-se espontaneamente das regiões com maior concentração (interior do alimento, mais húmido) para regiões com menor concentração (superfície, mais seca).

Este fenómeno é fundamental para compreender a cinética de secagem, influenciando diretamente a taxa de remoção de água e a eficiência global do processo de desidratação.

3.9. Energia necessária para a secagem

O processo de desidratação requer o fornecimento de energia térmica para promover a evaporação da água presente no alimento. A quantidade de energia

necessária está diretamente relacionada com a massa de água removida e com o calor latente de vaporização [18], sendo dada por (29):

$$Q = m \cdot h_{fg} \quad (29)$$

em que:

- Q Energia necessária para a evaporação (kJ)
- m Massa de água evaporada (kg)
- h_{fg} Calor latente de vaporização da água, que depende da temperatura de operação ou de saturação (kJ/kg)

Este modelo simplificado assume que toda a energia fornecida é utilizada exclusivamente na mudança de fase da água. No entanto, em sistemas reais, devem ser consideradas perdas térmicas e o consumo energético adicional associado ao aquecimento do ar e do próprio alimento.

De forma geral, quanto maior for a quantidade de água removida, maior será a energia requerida, o que torna a eficiência energética um fator crítico no dimensionamento e operação de sistemas de secagem.

3.10. Substâncias envolvidas no processo

Durante o processo de desidratação, para além da remoção de água, podem ocorrer perdas adicionais de outros constituintes, especialmente aqueles mais sensíveis às condições térmicas e ao arrastamento pelo fluxo de ar.

Substâncias removidas

Ao longo da secagem, as principais substâncias removidas do alimento incluem:

- Água, constitui o principal componente removido, sendo o objetivo central do processo de desidratação;
- Compostos aromáticos voláteis, responsáveis pelo aroma característico dos alimentos, podem ser parcialmente perdidos devido à evaporação e ao arrastamento pelo ar quente;
- Vitaminas termos sensíveis como a vitamina C, que podem sofrer degradação devido à exposição ao calor e ao oxigénio;
- Gases dissolvidos, como oxigénio e dióxido de carbono, que são libertados durante o aquecimento e a redução da pressão parcial no interior do alimento.

A perda destas substâncias pode afetar as propriedades sensoriais (aroma e sabor) e o valor nutricional do produto final, sendo, por isso, um fator importante a considerar na otimização das condições de secagem.

Substâncias absorvidas

Em determinados métodos de desidratação, especialmente na desidratação osmótica³, pode ocorrer a incorporação de substâncias externas no alimento, resultante de gradientes de concentração entre o meio envolvente e o tecido vegetal.

Entre as principais substâncias que podem ser absorvidas destacam-se:

- Açúcares (como a sacarose), frequentemente utilizados em soluções osmóticas, contribuem para o aumento da doçura, melhoria da textura e redução da atividade da água [22];
- Sais (como o cloreto de sódio, NaCl), utilizados para conservação, influenciam o sabor e auxiliam na inibição do crescimento microbiano;
- Antioxidantes (como o ácido ascórbico), adicionados para minimizar reações de oxidação e preservar a cor e o valor nutricional [22];
- Conservantes, utilizados para aumentar a estabilidade microbiológica e prolongar a vida útil do produto.

A incorporação destas substâncias altera a composição química do alimento e pode influenciar as suas propriedades sensoriais, nutricionais e funcionais, sendo um aspeto relevante no controlo e otimização do processo de desidratação.

3.11. Alterações na composição

O processo de desidratação induz alterações significativas na composição dos alimentos, resultantes principalmente da remoção de água e da consequente concentração dos constituintes sólidos. Estas modificações influenciam propriedades físicas, químicas, nutricionais e microbiológicas do produto final [23].

Após perda de água

Após a remoção da fração aquosa, observam-se as seguintes alterações principais:

- Aumento da concentração de sólidos, devido à redução da massa total do alimento, mantendo-se constante a massa de matéria seca;
- Aumento do teor relativo de açúcares, os açúcares tornam-se mais concentrados, intensificando o sabor doce e contribuindo para alterações sensoriais;
- Redução da atividade da água, fator determinante para a estabilidade microbiológica, uma vez que limita o crescimento de microrganismos e a ocorrência de reações enzimáticas.

³ A desidratação osmótica é um processo de remoção parcial de água em que alimentos (como frutas e vegetais) são imersos em uma solução hipertónica (muito concentrada em açúcar ou sal).

Estas alterações são fundamentais para a conservação do alimento, mas também podem influenciar a textura, o valor nutricional e a qualidade sensorial do produto desidratado.

Após entrada de solutos

Nos processos em que ocorre incorporação de solutos, como na desidratação osmótica, verificam-se alterações adicionais na composição e nas propriedades do alimento, resultantes da difusão de substâncias externas para o interior da matriz alimentar.

Entre os principais efeitos destacam-se:

- Alteração do perfil sensorial (sabor), a incorporação de açúcares ou sais modifica significativamente o sabor do produto, podendo intensificar a doçura ou conferir características salgadas;
- Aumento da estabilidade, a presença de solutos contribui para a redução da atividade da água, reforçando a conservação e inibindo o crescimento microbiano;
- Modificação da textura, a interação dos solutos com a estrutura celular pode provocar alterações na firmeza, elasticidade e suculência do alimento.

Estas modificações devem ser cuidadosamente controladas, uma vez que influenciam diretamente a aceitação do produto final e a sua qualidade tecnológica e nutricional.

3.12. Vantagens e desvantagens

O processo de desidratação apresenta diversos benefícios do ponto de vista da conservação e logística alimentar, mas também implica algumas limitações que podem afetar a qualidade do produto final. A avaliação destes aspetos é essencial para a otimização do processo e a adequação ao uso pretendido [17] [19].

Vantagens:

- Aumento da vida útil, a redução da atividade da água limita o desenvolvimento microbiológico e a ocorrência de reações químicas e enzimáticas;
- Redução da carga microbiana, as condições de baixa humidade tornam o ambiente desfavorável ao crescimento de microrganismos;
- Diminuição do peso e volume, facilita o armazenamento e reduz custos de transporte e distribuição;
- Maior concentração de nutrientes, devido à remoção de água, os constituintes sólidos tornam-se mais concentrados por unidade de massa;
- Facilidade de transporte e armazenamento, produtos desidratados são menos perecíveis e requerem menos condições de refrigeração.

Desvantagens:

- Perda de vitaminas, especialmente vitaminas termossensíveis, como a vitamina C, que podem degradar-se durante o processo;
- Redução de compostos aromáticos, a evaporação de substâncias voláteis pode comprometer o aroma e o sabor característicos;
- Alterações na textura, mudanças estruturais podem resultar em produtos mais rígidos, quebradiços ou menos suculentos;
- Possível excesso de solutos, em processos como a desidratação osmótica, pode ocorrer incorporação excessiva de açúcares ou sais;
- Necessidade de reidratação, alguns produtos requerem adição de água antes do consumo, o que pode não restaurar completamente as propriedades originais.

3.13. Estudo de Caso Prático: Secagem e desidratação de Banana e Maça

Banana desidratada

Vantagem:

- A banana desidratada possui maior durabilidade e facilidade de armazenamento.

Desvantagem:

- Pode apresentar textura muito dura e aumento da concentração de açúcar [24].



Figura 20: Fatias de banana colocadas no desidratador.
(figura adaptada de [14])

Maça desidratada

Vantagem:

- A maçã desidratada mantém o aroma e pode ser utilizada como *snack* saudável.

Desvantagem:

- Pode escurecer durante o processo e perder parte da vitamina C.



Figura 21: Maçã desidratada pronta para consumo.
(Figura adaptada de [25])

4. Desidratadores

Os desidratadores de frutas e legumes são equipamentos desenvolvidos para realizar o processo de desidratação de forma controlada, mantendo características importantes dos alimentos, como sabor, aroma, cor e parte dos nutrientes [26].

Atualmente existem diferentes tipos de desidratadores, desde modelos elétricos até sistemas que utilizam energias renováveis, como a energia solar. No contexto das energias renováveis, os desidratadores solares destacam-se por serem sustentáveis, económicos e adequados para pequenas produções agrícolas.

De um modo geral os desidratadores de frutas e legumes podem categorizar-se em:

- Desidratador Elétrico;
- Desidratador Solar Direto;
- Desidratador Solar Indireto;
- Desidratador Solar Híbrido.

4.1. Desidratador Elétrico

Os desidratadores elétricos utilizam resistências elétricas e ventiladores para produzir ar quente e secar os alimentos. Segundo [27], estes sistemas apresentam secagem rápida e maior controlo operacional.

Princípio de Funcionamento:

- As resistências elétricas convertem a energia elétrica em energia térmica por efeito Joule, aquecendo o ar de admissão. Simultaneamente, os ventiladores forçam a circulação deste ar aquecido através da câmara de secagem, garantindo uma distribuição térmica homogénea e a renovação constante da camada limite de humidade sobre as bandejas de alimentos.

Vantagens: Cinética de secagem acelerada:

- A manutenção de um fluxo de ar constante e aquecido otimiza as taxas de transferência de massa e calor, reduzindo significativamente o tempo de processamento.
- Controlo preciso das variáveis de processo:
- Permitem a monitorização e regulação rigorosa da temperatura e, em sistemas avançados, da humidade relativa, garantindo a repetibilidade do processo e a qualidade do produto final.

Independência climática e produção contínua:

- Ao contrário dos sistemas solares diretos, operam em regime contínuo (24 horas por dia), independentemente das condições meteorológicas ou da sazonalidade.

Homogeneidade do produto:

- A ventilação forçada minimiza os gradientes de temperatura no interior da câmara, assegurando que o teor de humidade final seja uniforme em todas as bandejas.

Desvantagens: Elevada pegada energética:

- A conversão termoelétrica contínua e o acionamento dos motores de ventilação resultam num consumo energético substancial.

Custos operacionais (OPEX) elevados:

- O consumo de eletricidade da rede reflete-se diretamente no custo por quilograma de produto processado, reduzindo a margem de viabilidade económica em larga escala.

Vulnerabilidade e dependência infraestrutural:

- A operação está estritamente condicionada à estabilidade e disponibilidade da rede de distribuição elétrica local, inviabilizando a sua aplicação isolada em zonas rurais descentralizadas.

A Figura 22 mostra um desidratador elétrico comercial, evidenciando a sua estrutura composta por base com painel digital e tabuleiros empilháveis.



Figura 22: Exemplo de um desidratador elétrico.
(figura adaptada de [19])

4.2. Desidratador Solar Direto

No desidratador solar direto os alimentos ficam expostos diretamente à radiação solar dentro de uma câmara fechada com cobertura transparente. O calor do sol aquece os alimentos e provoca a evaporação da água. Segundo [28], este é um dos sistemas mais simples e económicos de secagem solar.

Funcionamento:

- A radiação solar atravessa a cobertura transparente e aquece diretamente os alimentos colocados nas bandejas internas. O ar quente remove a humidade e esta é expulsa pelas aberturas superiores.

Vantagens:

- Baixo custo de construção;

- Fácil montagem;
- Não necessita de energia elétrica;
- Boa alternativa para pequenas produções.

Desvantagens:

- Exposição direta ao sol pode reduzir nutrientes;
- Menor controlo da temperatura;
- Possibilidade de alteração da cor e sabor;
- Menor proteção contra poeira e insetos.

A Figura 23 mostra um sistema de secagem solar direta, evidenciando a exposição dos alimentos diretamente à radiação sob uma cobertura transparente.



Figura 23: Exemplo de um desidratador solar direto.
(figura adaptada de [28])

4.3. Desidratador Solar Indireto

O desidratador solar indireto utiliza um coletor solar separado da câmara de secagem. O ar é aquecido no coletor antes de entrar em contacto com os alimentos. Segundo [25], este método apresenta maior eficiência térmica e melhor qualidade de secagem.

Funcionamento:

- O coletor solar absorve a radiação solar e aquece o ar. O ar quente desloca-se para a câmara de secagem, atravessando as bandejas contendo frutas e legumes. A humidade é removida e expulsa através das saídas de ventilação.

Vantagens:

- Melhor qualidade dos alimentos;
- Maior higiene;
- Menor exposição direta ao sol;

- Secagem mais uniforme;
- Melhor conservação nutricional.

Desvantagens:

- Construção mais complexa;
- Custo mais elevado;
- Necessita maior espaço físico.

Na Figura 24 mostra-se um desidratador solar indireto, evidenciando o coletor separado da câmara de secagem.



Figura 24: Exemplo de um desidratador solar indireto.
(figura adaptada de [25])

4.4. Desidratador Solar Híbrido

O desidratador híbrido combina energia solar com outra fonte de energia, como eletricidade ou biomassa. Segundo [29], os sistemas híbridos aumentam a continuidade operacional do equipamento.

Funcionamento:

- Durante o dia, o sistema utiliza energia solar. Em períodos de baixa radiação solar, uma resistência elétrica ou sistema auxiliar fornece calor adicional.

Vantagens:

- Funciona em dias nublados;
- Maior controlo da temperatura;
- Processo contínuo;
- Maior eficiência.

Desvantagens:

- Maior custo de instalação;
- Necessidade de manutenção adicional;
- Maior complexidade técnica.

Na Figura 25 esquematiza-se um desidratador solar híbrido, detalhando-se os principais subsistemas que compõe o equipamento.

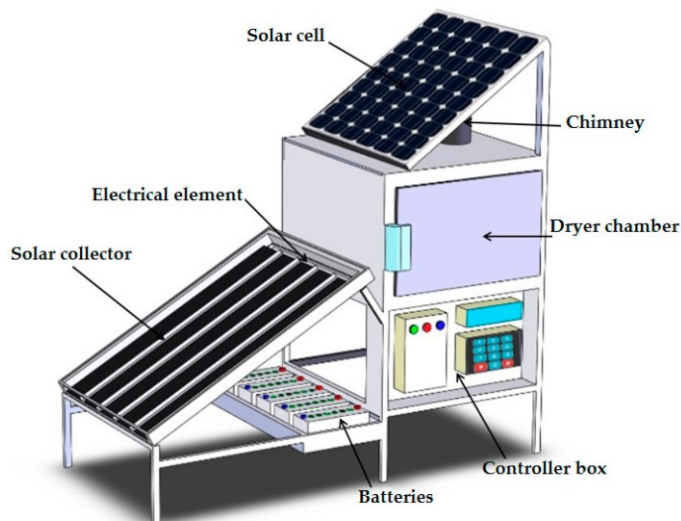


Figura 25: Exemplo de um desidratador híbrido.
(figura adaptada de [29])

Para terminar, na Tabela 1 faz-se uma comparação entre os diferentes tipos de desidratadores, apresentando as vantagens e desvantagens de cada um deles.

Tabela 1: Comparação entre os diferentes tipos de desidratadores

(figura adaptada de [28], [25], [29])

TIPO DE DESIDRATADOR	FONTE DE ENERGIA	VANTAGEM PRINCIPAL	DESVANTAGEM PRINCIPAL
SOLAR DIRETO	Energia Solar	Baixo custo	Menor qualidade alimentar
SOLAR INDIRETO	Energia Solar	Melhor conservação	Construção complexa
SOLAR HÍBRIDO	Energia Solar + Energia Elétrica	Funciona continuamente	Alto custo
ELÉTRICO		Secagem rápida	Alto consumo energético

5. Conceção, construção e teste de protótipo de desidratador solar

5.1. Descrição Geral

Neste projeto foi desenvolvido um desidratador solar híbrido ativo de alimentos, concebido para operar em regime de convecção natural e forçada. O objetivo principal centrou-se na integração sinérgica da energia solar térmica com a tecnologia fotovoltaica, permitindo alimentar de forma autónoma um sistema de ventilação inteligente e um módulo eletrónico dedicado à aquisição e registo de dados.

Com este protótipo pretende-se otimizar o processo de desidratação de diversos produtos alimentares, com destaque para bananas, maçãs, mangas, tomate, cebola, ervas aromáticas e pimentas. Através do controlo ativo das variáveis ambientais internas e externas, assegura-se a máxima qualidade do produto final, garantindo simultaneamente uma operação totalmente autónoma e com consumo energético nulo proveniente da rede elétrica comercial.

5.2. Princípio de funcionamento do desidratador

O desidratador solar híbrido desenvolvido neste trabalho baseia-se na combinação de aquecimento solar passivo (coletor térmico) e ventilação forçada alimentada por energia fotovoltaica, permitindo um processo de secagem mais eficiente e controlado.

O funcionamento do sistema inicia-se com a captação de ar do ambiente exterior, que é conduzido para o coletor térmico solar. Neste componente, o ar é aquecido através da absorção da radiação solar, aumentando a sua temperatura e reduzindo a sua humidade relativa.

De seguida o ar aquecido no coletor solar (cuja superfície interior absorvente foi pintada de preto para maximizar a captação de radiação) é direcionado por convecção (natural ou forçada) para a câmara de desidratação, onde se encontram dispostas as bandejas com os produtos a desidratar. Ao atravessar as superfícies das frutas, o fluxo de ar quente promove a evaporação da água nelas contida, reduzindo progressivamente o seu teor de humidade.

Para melhorar a eficiência do processo, o sistema integra ventiladores responsáveis pela convecção forçada do ar. Estes ventiladores são alimentados por um painel fotovoltaico, que converte a radiação solar em energia elétrica. O uso de ventilação forçada permite aumentar a taxa de renovação do ar no interior da câmara, garantindo uma secagem mais uniforme e reduzindo o tempo necessário para o processo.

Após absorver a humidade dos produtos, o ar é expulso para o exterior sob a forma de ar quente e húmido, completando assim o ciclo de funcionamento.

Adicionalmente, o sistema é monitorizado por sensores de temperatura, humidade relativa, pressão atmosférica e intensidade luminosa, permitindo ajustar o funcionamento dos ventiladores de acordo com as condições ambientais. Os dados recolhidos são registados em intervalos regulares, possibilitando a posterior análise e otimização do desempenho do desidratador.

A Figura 26 ilustra um esquema de funcionamento do desidratador solar híbrido, ilustrando o percurso do ar desde a entrada de ar frio, o aquecimento no coletor solar térmico, a passagem pela câmara de secagem por ação dos ventiladores (convecção forçada) e a expulsão do ar húmido, bem como a integração do painel fotovoltaico para alimentação elétrica do sistema.

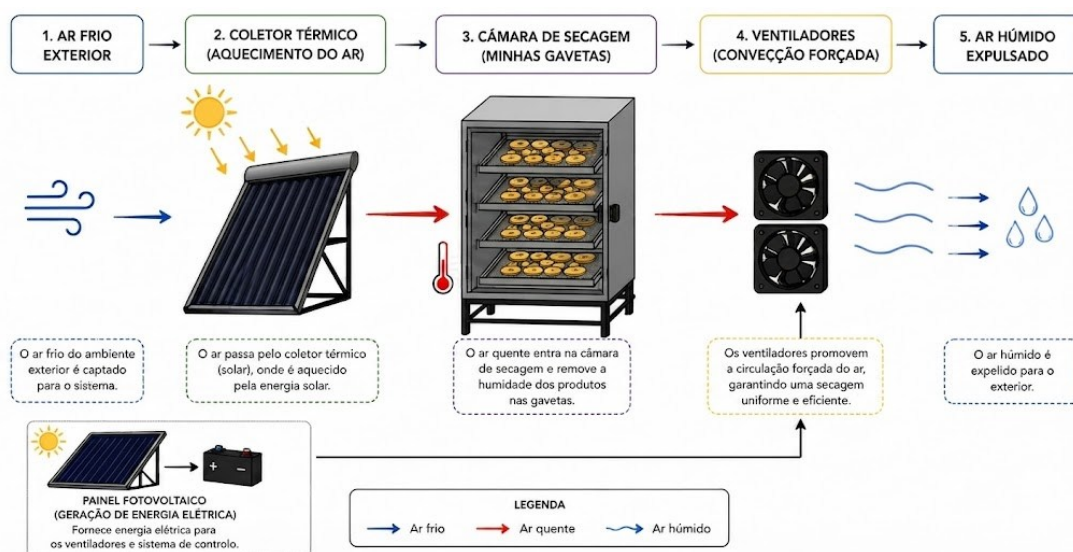


Figura 26: Esquema ilustrativo do funcionamento do sistema em condições reais de operação.
(figura gerada por IA)

5.3. Especificações técnicas do desidratador

O desidratador foi estruturado e concebido em três módulos principais:

- Câmara de secagem;
- Coletor solar térmico;
- Sistema de instrumentação e controlo.

Câmara de secagem:

- A câmara de secagem foi construída recorrendo a placas de XPS (poliestireno extrudido) de 40 mm de espessura. A seleção deste material deveu-se à sua excelente resistência mecânica e à sua condutibilidade térmica extremamente baixa, garantindo um isolamento térmico ideal e minimizando as perdas de calor para o exterior.

Parâmetros dimensionais do protótipo:

- A estrutura de suporte foi projetada com uma base quadrada de 60 cm x 60 cm, resultando numa área de implantação de 0,36 m².

Volume útil e capacidade de armazenamento:

- A capacidade de carga da câmara foi estabelecida em três bandejas dispostas umas por cima das outras, garantindo a uniformidade na circulação e transferência de calor do fluxo de ar quente que as atravessa.

Coletor de ar solar e sistema fotovoltaico de controlo:

- Tanto o coletor de ar solar como o painel fotovoltaico foram posicionados com uma inclinação de 25° em relação à horizontal, ângulo otimizado para maximizar a captação da radiação solar durante a sua operação no período de verão.

Estrutura de suporte:

- Os pés de suporte foram concebidos e montados em perfil de ferro, garantindo a rigidez mecânica necessária e a estabilidade de todo o conjunto face à ação do vento.

Ao longo das figuras 27 a 29 apresentam-se várias vistas 3D do desidratador concebido.

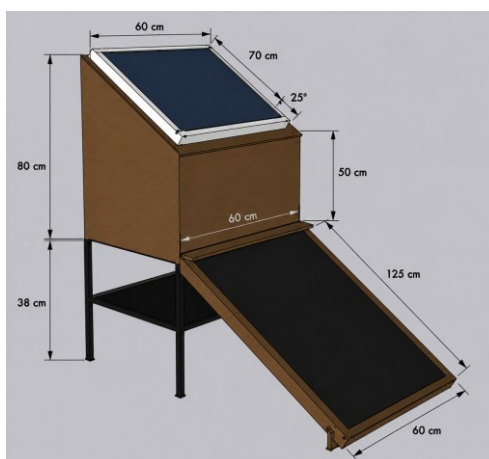


Figura 27: Vista 3D completa do desidratador com indicação das medidas.

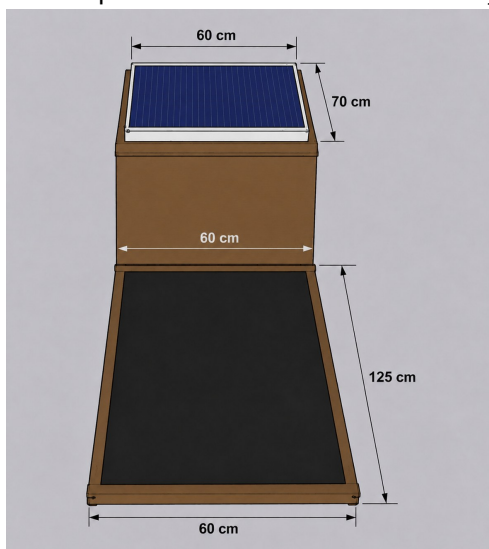


Figura 28: Parte traseira do desidratador, podendo ver-se o coletor solar térmico (em baixo) e o coletor solar fotovoltaico (em cima).

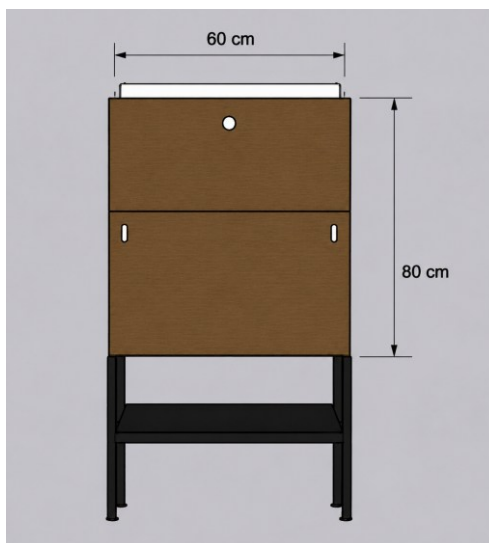


Figura 29: Parte frontal do desidratador, evidenciando-se a porta de acesso à câmara de secagem.

Estimativa de capacidade de carga (Frutas)

Para determinar a capacidade de carga do desidratador por ciclo de secagem, foi realizado um dimensionamento geométrico baseado na área útil das bandejas e nas dimensões médias dos produtos a desidratar. Embora o estudo tenha como referência inicial a banana, a metodologia é aplicável a diferentes tipos de frutas cortadas em rodela ou fatias.

Parâmetros de dimensionamento:

Área útil de cada bandeja:

- Considerando a estrutura de suporte, foi definida uma superfície útil de 56 cm por 56 cm, correspondente a 0,3136 m².

Dimensão média das unidades de produto:

- Para efeitos de cálculo, foi assumido um diâmetro médio de 3 cm por rodela ou fatia do produto a desidratar. Este valor é representativo de frutas como banana, maçã ou kiwi, podendo variar consoante o tipo de produto e o corte adotado.

Espaçamento entre unidades:

- Foi considerado um espaçamento de 0,5 cm entre cada rodela, de forma a garantir uma circulação de ar eficiente e homogênea. Assim, cada unidade a desidratar ocupa aproximadamente uma área equivalente a um quadrado de 3,5 cm por 3,5 cm.

Este modelo permite estimar a capacidade de carga de forma simplificada, assegurando condições adequadas de ventilação e uniformidade no processo de secagem. Para frutas com dimensões diferentes ou cortes alternativos (fatias mais finas ou cubos), os valores devem ser ajustados proporcionalmente.

Desta forma o desidratador apresenta versatilidade para o processamento de diversos produtos, mantendo a eficiência do processo de desidratação.

Cálculo de distribuição por bandejas

Número de rodela por linha/coluna (30):

$$\text{Rodela por lado} = \frac{56\text{cm}}{3,5\text{cm}} = 16 \text{ rodela} \quad (30)$$

Capacidade máxima por bandeja (31):

$$\text{Capacidade máxima por bandeja} = 16 \cdot 16 = 256 \text{ rodela} \quad (31)$$

Capacidade total estimada

A Tabela 2 apresenta a capacidade de carga do desidratador em função do número de bandeja utilizadas no protótipo, tendo em consideração uma configuração com a existência de um total de três bandeja:

Tabela 2: Capacidade total estimada do desidratador.

CONFIGURAÇÃO DO PROTÓTIPO	TOTAL DE RODELAS	MASSA ESTIMADA DE BANANA FRESCA (APROX. 7 G/RODELA)
COM 3 BANDEJAS	768 rodela	~ 5,4 kg

5.4. Análise térmica do desidratador

Radiação Solar Incidente

Para a validação termodinâmica e a realização do balanço energético do protótipo, foi selecionada a localização de Castelo Branco, Portugal (39°49' N; 7°29' W), considerando o período de verão, correspondente aos meses de junho, julho e agosto.

Foi realizado um estudo do comportamento termodinâmico do sistema adaptado às condições climáticas típicas de Castelo Branco durante o verão. O objetivo desta análise é quantificar a energia térmica captada, a eficiência com que o XPS retém esse calor e a energia necessária para desidratar as frutas sob as condições extremas da nossa região.

Balanço Energético no Coletor Solar Térmico

No verão, em Castelo Branco, a radiação solar global horizontal atinge facilmente valores entre 900 W/m² e 1000 W/m² durante o período de maior incidência solar. A potência térmica útil que o coletor térmico, construído em placas de XPS com interior preto e inclinado a 25°, consegue transferir para o fluxo de ar pode ser estimada multiplicando a área do coletor pela radiação solar incidente e pelo rendimento do coletor.

Com base nas dimensões reais do protótipo, a superfície absorvente do coletor mede 125 cm de comprimento por 60 cm de largura, resultando numa área útil de 0,75 m².

Para o rendimento do coletor, foi assumido um valor de referência de 50%, típico de coletores solares de ar de placa plana com cobertura simples de vidro e absorvedor não seletivo [2], consistente com a construção adotada no protótipo (cobertura de vidro simples e superfície interior pintada de preto, sem revestimento especial de baixa emissividade).

Multiplicando estes três valores para a gama de radiação solar típica de verão em Castelo Branco, obtém-se uma potência térmica útil de 337,5 W para uma radiação de 900 W/m², e de 375,0 W para uma radiação de 1000 W/m².

Este resultado indica que, em condições típicas de verão, o coletor solar térmico do protótipo é capaz de fornecer entre aproximadamente 337,5 W e 375 W de potência térmica útil ao fluxo de ar que alimenta a câmara de secagem, um valor bastante superior às perdas térmicas calculadas anteriormente para as paredes da câmara (10,66 W), confirmando que a energia térmica disponível é largamente suficiente para compensar essas perdas e manter a câmara nas temperaturas de funcionamento observadas nos ensaios (até 52 °C).

Dinâmica de evaporação no processo de desidratação de frutas

Os produtos hortofrutícolas frescos, como a banana, apresentam tipicamente um teor de humidade inicial na ordem dos 70% a 80%. O objetivo do processo de desidratação consiste em reduzir esse valor para aproximadamente 15% a 20%, garantindo a conservação do alimento e a inibição do crescimento microbiano.

A energia mínima necessária para remover a água presente no produto está associada ao processo de evaporação.

Esta redução significativa da água livre no interior do alimento traz grandes vantagens:

- Conservação prolongada: Permite armazenar os produtos durante largos períodos sem que se estraguem rapidamente;
- Inibição microbiana: Ao diminuir a água disponível, impede-se o desenvolvimento de bactérias, fungos e leveduras que necessitam de humidade para se multiplicarem;
- Redução de volume e peso: Facilita e economiza o armazenamento e o transporte dos produtos desidratados.

Do ponto de vista físico e termodinâmico, a energia mínima necessária para remover a água presente no produto está intimamente associada ao calor latente de evaporação. Na prática, para que a água líquida retida nos tecidos vegetais se transforme em vapor e seja arrastada pelo fluxo de ar quente, é fundamental fornecer energia térmica suficiente para quebrar as forças de adesão da água ao produto, permitindo a sua migração do interior para a superfície e, posteriormente, a sua transferência por convecção para a atmosfera.

A potência térmica útil ($\dot{Q}_u$) foi determinada através de uma equação de balanço energético apropriada ao sistema (32):

$$\dot{Q}_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{saída} - T_{entrada}) \quad (32)$$

em que:

$\dot{Q}_u$	Potência térmica útil transferida pelo coletor para o ar (W)
$\dot{m}$	Caudal mássico de ar injetado pelos ventiladores (kg/s)
c_p	Calor específico do ar a pressão constante (J/kg.°C)
$T_{entrada}$	Temperatura do ar ambiente exterior que entra no coletor (em Castelo Branco, durante o verão, varia frequentemente entre os 35 °C e os 40 °C)
$T_{saída}$	Temperatura do ar que sai do coletor e que entra depois na câmara de secagem (°C)

A aplicação desta equação ao protótipo desenvolvido permite obter o resultado em Watts (W), quantificando diretamente o fluxo de energia térmica que o coletor solar consegue entregar volume de ar circulante por unidade de tempo no sistema. Em termos práticos, este parâmetro é fundamental para:

- Avaliar a capacidade de aquecimento: Determinar o ganho térmico efetivo do ar antes de este entrar na câmara de secagem.
- Dimensionar a energia para o processo: Validar se o calor gerado é suficiente para promover a evaporação da humidade dos produtos agrícolas colocados no desidratador durante o período de funcionamento.
- Validar o protótipo: Permitir a comparação entre os valores teóricos calculados e os dados recolhidos experimentalmente no terreno através do sistema de monitorização com sensores.

A vantagem do coletor em XPS

A vantagem do coletor em XPS: Ao contrário de um coletor com caixa metálica, que perderia muito calor por condução para o ambiente pelas paredes laterais e traseira, o uso de placas de XPS como corpo do coletor elimina quase por completo essas perdas térmicas parasitárias. Isto maximiza a eficiência térmica do coletor (η_c), garantindo que quase a totalidade da radiação captada sirva exclusivamente para elevar a temperatura do ar (33):

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_u}{I \cdot A_c} \quad (33)$$

em que:

η_c	Rendimento do coletor (–)
$\dot{Q}_u$	Potência térmica útil transferida pelo coletor para o ar (W)
A_c	Área do coletor (m²)
I	Irradiação solar global incidente (W/m²)

A aplicação deste parâmetro ao protótipo desenvolvido é fundamental para:

- Avaliar a eficiência energética: Determinar que percentagem da energia solar que incide na superfície do coletor é efetivamente aproveitada para aquecer o ar, em vez de se perder para o ambiente.
- Analisar as perdas do sistema: Permitir identificar o impacto das perdas térmicas (por condução, convecção e radiação através do isolamento e da cobertura) no funcionamento global do coletor.
- Validar o desempenho do protótipo: Servir como indicador principal de qualidade da conceção e construção do sistema, permitindo comparar o desempenho real do coletor com os valores expectáveis para este tipo de tecnologia.

Avaliação do isolamento térmico global (câmara e coletor)

Como todo o circuito de circulação de ar (coletor + câmara) é feito de XPS, conseguiu-se criar uma barreira térmica contínua e altamente isolante. As perdas térmicas totais por condução para o exterior ($\dot{Q}_c$) são drasticamente reduzidas e modeladas pela Lei de Fourier (34):

$$\dot{Q}_c = \sum \left(\frac{A \cdot k_{XPS}}{L} \right) \cdot (T_{interna} - T_{externa}) \quad (34)$$

em que:

$\dot{Q}_c$	Potência térmica perdida (W)
A	Área da superfície de transferência de calor (m ²).
k_{XPS}	Condutividade térmica do material isolante XPS (W/m·K)
L	Espessura do isolamento (m)
$T_{interna}$	Temperatura no interior do desidratador (°C)
$T_{externa}$	Temperatura do ambiente exterior (°C)

Cálculo da potência térmica perdida

Para calcular a potência térmica perdida ($\dot{Q}_c$) através das paredes isoladas com placas de XPS, aplicamos a lei de Fourier para a condução térmica unidimensional em regime estacionário (paredes planas).

Onde:

A	Área da superfície de transferência de calor é 0,3136 (m ²).
k_{XPS}	Condutividade térmica do material isolante XPS é 0,034 (W/m·K)
L	Espessura do isolamento 0,04 (m)
$T_{interna}$	Temperatura no interior do desidratador assumimos que é 60 °C
$T_{externa}$	Temperatura do ambiente exterior assumimos que é 20 °C

Então:

$$\dot{Q}_c = \sum \left(\frac{0,3136 \cdot 0,034}{0,04} \right) \cdot (60 - 20) = 10,66 \text{ W} \quad (35)$$

Análise e argumentação do resultado

O cálculo da potência térmica perdida através das paredes do desidratador resultou em 10,66 W com área de 0,3136 m² espessura de XPS de 40 mm e consideramos que a diferença de temperatura é de 40 °C entre o interior e o exterior.

O que diz este resultado:

- **Baixas Perdas Energéticas:** Um valor de perdas na ordem dos 10,66 W é relativamente baixo, o que comprova a excelente eficácia do painel de XPS como material de isolamento térmico para o protótipo;
- **Estabilidade Térmica:** O isolamento consegue reter de forma eficiente a energia térmica gerada no interior da câmara de secagem, impedindo que o calor se dissipe rapidamente para a atmosfera;
- **Eficiência do Sistema:** Como a potência perdida para o exterior é pequena, a maior parte da energia térmica aproveitada do coletor solar ou da fonte de energia auxiliar fica concentrada no processo de evaporação da água dos alimentos, otimizando o consumo energético global do equipamento.

Desempenho do material:

- A baixa condutividade térmica do XPS combinada com a espessura de 40 mm cria uma barreira resistiva significativa à condução de calor. Isso justifica-se fisicamente pela estrutura celular fechada do XPS, que retém ar estagnado no seu interior, minimizando a transferência de calor por condução.

Impacto no dimensionamento:

- O resultado demonstra que o isolamento dimensionado é adequado para manter a câmara a temperaturas de funcionamento estáveis (por exemplo, 60 °C) sem exigir um esforço excessivo da fonte de energia auxiliar ou do fluxo de ar quente proveniente do coletor solar.

A aplicação desta componente analítica ao protótipo permite compreender e justificar o comportamento térmico do sistema através de vários aspetos essenciais:

Quantificação das perdas de calor:

- Determinar a quantidade exata de energia gerada que não chega a ser aproveitada, dissipando-se através das paredes do coletor (por condução no material de isolamento e estrutura) e da cobertura (por convecção e radiação).

Avaliação da eficácia construtiva:

- Permitir analisar de que forma a escolha dos materiais e o isolamento aplicado influenciam a retenção de calor dentro do sistema.

Balanço energético global:

- Servir como elemento fundamental para fechar o balanço térmico do coletor, relacionando diretamente a radiação incidente, a potência útil aproveitada para aquecer o ar e a energia que inevitavelmente se perde para o exterior.

Paredes do coletor e da câmara (XPS):

- Devido às excelentes propriedades de isolamento das placas de XPS, estas garantem que o fluxo de energia térmica seja predominantemente direcionado para o interior do sistema, minimizando as perdas de calor para o meio exterior.

Base e pés (ferro):

- Dado que o ferro apresenta uma elevada condutividade térmica, aproximadamente $50 \text{ W/}^\circ\text{C}$, a sua utilização estrutural foi restrita aos pés e à base de suporte. Esta escolha visa conferir rigidez mecânica e pontos de fixação sólidos ao protótipo; contudo, devido à leveza e ao elevado volume da estrutura em placas de XPS, o conjunto apresenta uma forte vulnerabilidade a rajadas de vento características da região de Castelo Branco. Por esta razão, o projeto prevê sistemas complementares de Fixação ou peso da base para garantir a total estabilidade operacional e evitar o capotamento do equipamento.
- De forma a garantir um elevado desempenho térmico, toda a câmara de desidratação foi construída integralmente com placas de poliestireno extrudido (XPS) de 40 mm de espessura. Graças às excelentes propriedades isolantes deste material e à sua baixa condutividade térmica, as perdas de calor para o exterior através das paredes da câmara são significativamente reduzidas, assegurando a retenção da energia térmica necessária para otimizar o processo de secagem

5.5. Construção do protótipo de desidratador

Neste subcapítulo, descreve-se detalhadamente o processo construtivo idealizado e executado para a materialização física do desidratador solar. A prioridade na seleção dos materiais foi garantir a máxima leveza, uma excelente robustez mecânica e um isolamento térmico de alta performance.

Materiais utilizados na estrutura

- Placas de XPS (Poliestireno Extrudido): Utilizadas como o material estrutural principal de todo o desidratador (paredes laterais, traseira, teto e porta da câmara de secagem). O XPS foi selecionado devido às suas excelentes propriedades de isolamento térmico, baixa absorção de humidade e facilidade de manuseamento;
- Não só pelas suas propriedades isoladoras térmicas (essenciais para manter o calor captado no interior), mas também pela facilidade de corte, modelação e leveza.

Base Metálica de ferro:

- Para garantir a estabilidade do protótipo, o suporte de cargas mecânicas e a fixação segura dos pés estruturais, definiu-se que a base inferior do desidratador seria feita de ferro. Esta base funciona como o centro apoio do

sistema, conferindo-lhe uma elevada altura e resistência ao desgaste em ambiente exterior.

Perfis de Canto (Cantoneiras):

- Para reforçar todas as arestas e uniões das placas de XPS, aplicaram-se perfis de canto ao longo das juntas estruturais. Estes perfis evitam a torção das placas, protegem os cantos contra impactos e distribuem os esforços mecânicos de forma uniforme.

Cola em Bisnaga Especial para XPS:

- Como o poliestireno extrudido pode sofrer corrosão química se for exposto a solventes comuns, utilizou-se uma cola em bisnaga especificamente formulada para XPS. Esta cola garante uma união química forte, durável e estanque entre as placas, eliminando possíveis pontes térmicas e fugas de ar quente nas juntas.
- Para complementar a união estrutural, utilizaram-se também parafusos de madeira, garantindo um reforço mecânico adicional e discreto na fixação das placas sem criar pontes térmicas.

Etapas de Montagem

Corte e modelação do XPS:

- Utilizando ferramentas de corte, prepararam-se as placas de XPS à medida para erguer as paredes da câmara de secagem e do coletor solar. As dimensões internas foram projetadas para acomodar perfeitamente as calhas onde deslizam as bandejas de secagem.

União estrutural:

- Aplicou-se a cola em bisnaga especial para XPS e parafusos nas superfícies de contacto das placas e uniram-se com o auxílio dos perfis de canto em PVC. Pressionaram-se firmemente para garantir que a colagem fosse homogénea. Os perfis de canto foram colados externamente para blindar a estrutura.

Estanquicidade e vedação:

- Após a secagem total da cola, realizou-se uma inspeção visual em todas as juntas internas e externas. Aplicou-se uma camada extra de silicone nas uniões interiores para garantir que o fluxo de ar quente do coletor seja obrigado a passar apenas pelas bandejas, sem escapar pelas frestas das paredes.

Preparação da base e pés de suporte:

- Iniciou-se o processo pela fixação dos pés de ferro à base metálica a 38 cm. Esta estrutura foi fixada e nivelada para suportar o peso da câmara e a inclinação de 25° do painel fotovoltaico e do coletor solar.

Instalação dos tabuleiros e porta:

- Posicionou-se os suportes para os tabuleiros no interior da câmara e finalizei com a construção da porta frontal (também em XPS), adicionando uma dobradiça para assegurar que o fecho da câmara está completamente fechado durante o funcionamento.

A Figura 30 documenta a fase de montagem da câmara de secagem, mostrando o posicionamento e alinhamento das placas de XPS cortadas à medida, momento imediatamente anterior à aplicação da cola especial e dos parafusos de fixação nas superfícies de contacto.



Figura 30: Fase inicial da montagem, focada na base do desidratador.

A Figura 31 A figura mostra o momento em que os suportes das bandejas são encaixados e ajustados no interior da câmara de secagem. As calhas metálicas laterais foram fixadas às paredes de XPS em três alturas distintas, permitindo a introdução de várias bandejas sobrepostas, enquanto dois pequenos blocos de XPS são utilizados como apoio temporário para garantir o nivelamento correto das calhas antes da fixação definitiva. A marcação (Cima da Porta) identifica a orientação correta do painel, assegurando que a montagem respeita a posição prevista da porta frontal.



Figura 31: Montagem da estrutura de suporte das bandejas

A Figura 32 mostra o momento em que o coletor solar está a ser construído, com os seus componentes principais a serem montados: as paredes laterais em XPS, cortadas com a inclinação de 25° definida para o projeto, e os perfis metálicos perfurados fixados ao longo das arestas superiores, que reforçam a estrutura e servirão de apoio à fixação da cobertura de vidro. Nesta fase, o fundo do coletor ainda não apresenta a superfície absorvedora pintada de preto, sendo esta uma das etapas subsequentes da montagem.



Figura 32: Estrutura do coletor solar em construção.

A Figura 33 mostra o momento em que o coletor solar é unido à base do desidratador, já com a estrutura em forma de calha do coletor alinhada e fixada à câmara de secagem. São visíveis os dois orifícios retangulares que permitem a

passagem do ar aquecido do coletor para o interior da câmara, bem como os vestígios de cola/silicone ainda húmidos aplicados ao longo das juntas de união, garantindo a estanquicidade necessária para evitar fugas de ar quente nesta zona crítica de transição entre os dois módulos.



Figura 33: União do coletor solar com a base.

A Figura 34 mostra a instalação dos dois ventiladores (12VDC, 80 mm) na câmara de secagem, posicionados entre os dois níveis de bandejas de forma a promoverem a circulação forçada do ar quente proveniente do coletor solar através de todo o volume interior. A cablagem visível liga os ventiladores ao módulo de relés, permitindo o seu acionamento independente através do sistema de controlo automático descrito anteriormente. É também visível, no canto inferior direito da imagem, a bateria responsável pelo armazenamento da energia produzida pelo painel fotovoltaico, posicionada junto à base exterior da câmara.

Bandejas / Grelhas: Estruturas em rede metálica suportadas por guias laterais em ferro fixadas às paredes de XPS, permitindo a distribuição uniforme dos produtos em múltiplos níveis;

- **Circulação de Ar:** O design em grelha das bandejas é fundamental para garantir o fluxo livre e vertical do ar quente em toda a secção transversal da câmara de secagem;
- **Acessibilidade:** As bandejas são amovíveis, facilitando o carregamento, a descarga e a higienização dos produtos alimentares.



Figura 34: Vista interior da câmara de secagem com as bandejas metálicas amovíveis. A Figura 35 apresenta o protótipo montado, destacando os seguintes componentes principais:

- Painel Solar: Instalado na cobertura superior da estrutura, é responsável pela captação da radiação solar e conversão em energia elétrica para alimentar os componentes do sistema.
- Suporte em Ferro: Estruturas metálicas de apoio fixadas à base da câmara de secagem, conferindo rigidez mecânica, estabilidade e a elevação necessária ao protótipo.
- Bateria: Elemento de armazenamento energético posicionado junto à base, destinado a acumular a energia gerada e assegurar o funcionamento autónomo dos sistemas eletrónicos e de ventilação.



Figura 35: Vista global do protótipo integrado, evidenciando o painel solar, o suporte em ferro e a bateria de armazenamento.

A Figura 36 exibe a estrutura detalhada do coletor solar térmico, destacando os seguintes componentes essenciais:

- Cobertura do Coletor (Vidro de Cobertura): Painel de vidro transparente posicionado na parte superior do coletor, responsável por criar o efeito de estufa, permitindo a entrada da radiação solar e reduzindo as perdas térmicas por convecção para o exterior,
- Fundo Negro (Placa Absorvedora): Superfície interior pintada de preto com elevada absorvidade, destinada a absorver a radiação solar incidente e convertê-la em energia térmica para aquecer o fluxo de ar que circula no interior do coletor;
- Suporte de Ferro do Coletor: Estrutura metálica de base e sustentação que garante a estabilidade mecânica, a rigidez do conjunto e a inclinação correta orientada para a captação solar.



Figura 36: Vista superior do coletor solar, evidenciando o vidro de cobertura, o fundo negro absorvedor e o suporte estrutural em ferro.

5.6. Implementação e integração dos componentes eletrónicos para a recolha de dados e automatização do processo de desidratação.

Arquitetura de monitorização e controlo

Para dotar o desidratador de capacidade de automatização e controlo, foi integrado um sistema eletrónico dedicado ao controlo e à aquisição de dados, permitindo a monitorização contínua das variáveis do processo.

Para garantir a monitorização rigorosa e o controlo ativo do processo de desidratação, o protótipo foi equipado com:

Controlador Central

- **Arduíno Mega 2560 R3:** Controlador principal (cérebro do sistema).

Sensores (Entradas)

- **DHT22**: Sensor digital de temperatura e humidade;
- **Adafruit BME280**: Sensor de temperatura, humidade e pressão atmosférica;
- **BH1750 (GY-30)**: Sensor digital de intensidade de luz (lux);
- **RTC DS3231**: Relógio de tempo real (fornece dados de data e hora).

Atuadores e Sinalizadores (Saídas)

- **Display I2C LCD2004**: Periférico de saída para exibição visual de dados.
- **Módulo Buzzer Ativo**: Atuador acústico para emitir alertas sonoros.
- **Ventiladores 12VDC 80mm**: Atuador mecânico (com sensor de feedback de rotação).

Periférico de Armazenamento

- **Shield Cartões SD**: Módulo de expansão de memória para gravação de dados (datalogger).

Elementos de Infraestrutura e Conectividade

- **Breadboard 830 Pontos**: Base de suporte físico e conexões temporárias.
- Fios *Jumper* M/M e M/F: Condutores elétricos de interconexão de sinais e alimentação.

Sensores:

- Sensores de Temperatura (interna e externa DHT22 e BME280): Essenciais para garantir que a temperatura interna não ultrapassa os 60 °C a 65 °C, evitando que as frutas secam demasiado ou menos, e percam as suas propriedades;
- sensores de Humidade Relativa (interna e externa DHT22 e BME280): Cruciais para monitorizar o diferencial higrométrico entre o ar de entrada e o de saída, permitindo avaliar em tempo real a taxa de evaporação e a eficiência do processo de secagem;
- Sensores de Intensidade de Luz (BH1750): Posicionados estrategicamente no exterior para quantificar a radiação solar incidente, permitindo correlacionar a luminosidade ambiental com o rendimento térmico do sistema e identificar variações nas condições meteorológicas (como a presença de nebulosidade);
- Módulo de Relógio em Tempo Real (RTC): Utilizado para gerir a marcação temporal precisa do funcionamento e associar um carimbo de data e hora (*timestamp*) a cada registo de dados.

Sistema de Alimentação Elétrica (Painel Solar, Controlador e Bateria)

O sistema é alimentado de forma autónoma por um conjunto fotovoltaico composto por três elementos interligados em série na cadeia de energia: painel solar

fotovoltaico, controlador de carga solar, bateria, carga (Arduíno, sensores, ventiladores e restantes atuadores).

O painel solar fotovoltaico, do tipo policristalino, está montado na tampa superior da câmara de secagem, inclinado de forma a maximizar a captação de radiação solar direta ao longo do dia (visível na Figura 59). Os dois terminais de saída do painel (positivo e negativo) ligam-se diretamente à entrada de painel solar (PV in) do controlador de carga:

- Potência nominal:
- Potencia: (vou preencher)
- Tensão em circuito aberto (Voc) / Tensão de máxima potência (Vmp): (vou preencher)
- Corrente de curto-circuito (Isc) / Corrente de máxima potência (Imp): (vou preencher)

O controlador de carga solar regula a energia entregue pelo painel à bateria, protegendo-a contra sobrecarga e descarga excessiva, e assegura que a tensão fornecida à carga se mantém dentro dos limites seguros de operação do Arduíno e dos restantes módulos:

- Modelo/marca: Steca (*Solar Charge controller*)
- Tipo: Solsun 6.6F (Controlador de carga solar PWM)
- Corrente máxima suportada: 6A (tanto para o painel quanto para carga).
- Tensão de saída para a carga: 12 V ou 24 V (ajusta-se automaticamente ao sistema de baterias ligado).

A bateria armazena a energia excedente produzida durante as horas de maior radiação solar, permitindo alimentar o sistema de forma contínua mesmo com flutuações momentâneas de luminosidade (como as observadas nos períodos de sombreamento):

- Tecnologia: Chumbo-ácido selada, livre de manutenção (Maintenance-free sealed lead-acid battery/ VRLA/ Non-spillable).
- Tensão nominal: 12 V (indicado no código 12V7.0AH)
- Capacidade: 7,0 Ah (medida a uma taxa de descarga de 20 horas/ 20HR).

A saída de carga do controlador liga-se diretamente à alimentação do Arduíno Mega 2560 (pino 5V/VIN e GND, consoante a tensão de saída do controlador), que por sua vez distribui energia aos sensores, ao módulo de relés dos ventiladores, ao LCD e ao *buzzer*.

Esquema de Ligação e Interconexão dos Componentes

Para assegurar a comunicação fiável entre o microcontrolador, os sensores, os atuadores e os sistemas de armazenamento, o circuito eletrónico foi montado

seguindo uma arquitetura centralizada no Arduino Mega 2560 R3. As ligações elétricas e de dados foram distribuídas da seguinte forma:

Alimentação do Sistema (Barramentos de Tensão):

- 5V e GND: A alimentação principal provém da porta USB ou de uma fonte externa regulada, sendo distribuída através de barramentos na *breadboard* de 830 pontos para alimentar os sensores lógicos e o *display*;
- 12VDC: Linha de potência dedicada exclusivamente à alimentação dos ventiladores de 80mm, gerida por circuitos de comutação adequados.

Barramento de Comunicação I2C (Pins SDA e SCL):

- Os dispositivos que utilizam o protocolo I2C, nomeadamente o *Display* I2C LCD2004, o Sensor BME280 e o RTC DS3231, estão ligados em paralelo aos pinos dedicados de comunicação I2C do Arduino Mega (Pino SDA e Pino SCL), utilizando resistências de *pull-up* adequadas e permitindo a partilha do mesmo barramento de dados sem conflitos.

Interfaces Digitais e de Controlo Direto:

- DHT22: Ligado a um pino digital dedicado do Arduino Mega, utilizando uma resistência de *pull-up* interna/externa para a leitura correta do sinal de dados de temperatura e humidade;
- BH1750 (GY-30): Também integrado no barramento I2C para a transmissão digital dos valores de intensidade luminosa em lux;
- *Shield* de Cartões SD (*Datalogger*): Utiliza a interface SPI nativa do Arduino Mega (pinos digitais para MOSI, MISO, SCK e o pino de seleção de chip CS/SS), permitindo a escrita contínua de ficheiros de texto com os registos (*datalogging*);
- Módulo *Buzzer* Ativo: Ligado a um pino digital configurado como saída, acionado pelo microcontrolador sempre que se verificam condições de alerta pré-definidas;
- Ventiladores 12VDC (com feedback): Acionados através de transístores de potência ou módulos de relé comandados por pinos digitais PWM do Arduino (permitindo regular o caudal de ar), estando as linhas de sinal de feedback de rotação ligadas a pinos de interrupção externa para a contagem de impulsos.

Lógica da programação dos ventiladores

A gestão do sistema de ventilação foi programada para operar de forma intermitente e inteligente, acionando os ventiladores com base em três condições fundamentais:

Horário pré-estabelecido:

- Intervalo de maior captação energética: Ativação sincronizada com a faixa horária de pico de irradiação, otimizando o fluxo de ar quente na câmara de secagem.

Condições de Temperatura e Humidade Relativa:

- Critério de Temperatura: O sistema monitoriza o diferencial térmico entre o interior e o exterior, otimizando o funcionamento do fluxo de ar de acordo com a energia térmica disponível.
- Critério de Humidade Relativa: Os ventiladores são acionados sempre que a humidade relativa no interior da câmara excede a do ambiente exterior, garantindo a renovação do ar e a expulsão contínua do ar saturado de vapor de água;

Intensidade da Luz:

- Gestão Energética Noturna: Caso o sensor detete níveis de radiação nulos ou insuficientes (período noturno ou condições meteorológicas adversas), o sistema desativa os ventiladores. Esta lógica evita o consumo desnecessário da energia armazenada nas baterias e impede a circulação de ar frio e húmido no interior da câmara de secagem quando não existe ganho térmico no coletor.

Esquema Lógico e Fluxo de Programação

O programa foi desenvolvido em linguagem C/C++ e estruturado para garantir a execução síncrona e sem bloqueios de todas as rotinas críticas do sistema. A arquitetura de software divide-se nos seguintes blocos funcionais:

Gestão Temporal sem Bloqueio (millis()):

- O código evita o uso da instrução de atraso bloqueante *DELAY()* no ciclo principal (*LOOP()*), recorrendo a temporizadores baseados em *MILLIS()*.
- Leitura de Sensores: Executada ciclicamente a cada 5 segundos (*INTERVALOLEITURASENORES*), garantindo a resposta rápida do sistema às variações térmicas e higrométricas;
- Registo de Dados (*DATALOGGING*): Configurado para gravar automaticamente todos os parâmetros ambientais num ficheiro .csv no cartão SD a cada 15 minutos (*INTERVALOGRAVACAO*), otimizando o espaço de armazenamento e criando um histórico rigoroso.

Gestão de Periféricos e Comunicação I2C/SPI:

- Inicialização e Desbloqueio: Inclui uma rotina de limpeza do barramento I2C (*DESTRAVARI2C()*) para prevenir bloqueios de hardware na inicialização;
- Gestão do *Display* LCD (20x4): Implementa um sistema de atualização inteligente que apenas reescreve os valores no ecrã quando estes se alteram, eliminando a cintilação (*FLICKER*) visual.

Lógica de Segurança e Controlo de Atuadores:

- Proteção Térmica (*BUZZER*): Monitoriza permanentemente a temperatura interna (*DATA_TINT*). Caso ultrapasse o limite de segurança de 65 °C, o *buzzer*

ativo é acionado de imediato para alertar o operador e evitar a degradação do produto;

- Controlo Diferencial dos Ventiladores: Os ventiladores acionados por relé operam com base na comparação entre as condições interiores e exteriores. O sistema ativa a ventilação forçada (*LOW* para relés de lógica invertida) sempre que se verifica um ganho térmico útil ou necessidade de exaustão de humidade.

Registo de Dados Estruturado (Formato CSV):

- Cria automaticamente um ficheiro diário com base na data fornecida pelo RTC DS3231 (ex: DDMMYYYY.csv);
- Gera o cabeçalho técnico na primeira abertura do ficheiro e regista de forma tabular o carimbo temporal (TIMESTAMP), temperaturas, humidades, pressão atmosférica, nível de luz (lux) e o estado operativo dos ventiladores.

Timestamp;Tint;Hrint;Text;Hrext;pres;IL;Ventiladores

A Tabela 3 mostra um excerto dos dados gravados no cartão SD num ensaio de teste realizado a 23 de julho de 2026, às 13:03.

Tabela 3: Composição dos dados exportados para o cartão SD.

Timestamp	Tint	Hrint	Text	Hrext	pres	IL	Ventiladores
23/07/2026 13:03	25.2	57.8	25.8	45.3	977.1	140	ON

Imagem de Conexões

A Figura 37 ilustra o esquema global de interligação dos componentes eletrónicos que compõem o sistema de controlo e aquisição de dados do protótipo.

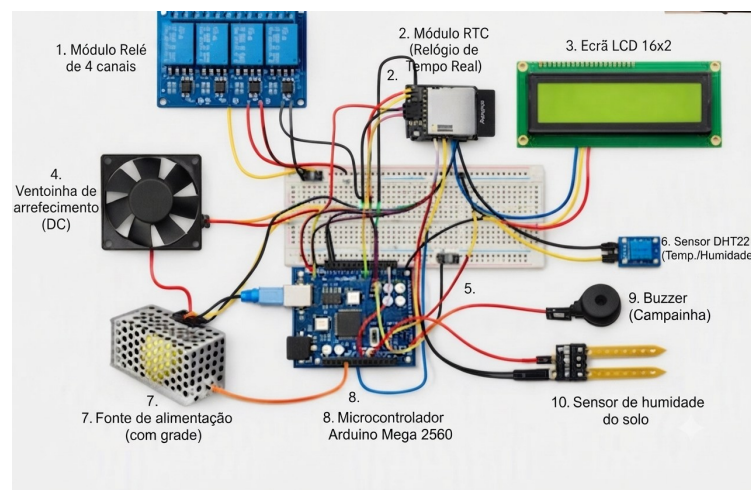


Figura 37: Esquema de ligação física e arquitetura de hardware do protótipo de controlo e monitorização do desidratador solar.

Unidade de Processamento e Visualização:

- Os módulos RTC permitem a monitorização visual em tempo real dos parâmetros ambientais e da hora correta.

Sensores Ambientais e de Luminosidade:

- Os sensores integrados no circuito (como o DHT22 para o interior, o BME280 para o exterior e o BH1750 para a luz) recolhem continuamente as grandezas físicas necessárias para avaliar o estado da secagem.
- Sistema de Atuação e Segurança: O módulo de relés (azul) comanda o acionamento automático dos ventiladores de exaustão, enquanto o *buzzer* assegura o alarme sonoro preventivo caso a temperatura interna exceda os limites seguros estabelecidos.
- Registo de Dados e Alimentação: O módulo de cartão SD permite a gravação periódica (a cada 15 minutos) de todos os dados em formato tabular, sendo o sistema alimentado por uma fonte de corrente contínua dedicada para garantir a estabilidade elétrica de todos os atuadores e sensores.

Tabela de Conexões

A Tabela 4 apresenta a correspondência entre os pinos do sensor DHT22 e os pinos do Arduino Mega, bem como a função de cada ligação no sistema.

Observa-se que o pino VCC do sensor está ligado ao pino 5V do Arduino, garantindo a alimentação elétrica necessária ao funcionamento do dispositivo. O pino GND encontra-se ligado ao GND do Arduino, assegurando uma referência comum de terra para o circuito.

Relativamente à comunicação, o pino DATA do DHT22 está ligado ao pino digital D2 do Arduino Mega. Este pino é responsável pela transmissão dos dados de temperatura e humidade do sensor para o microcontrolador, utilizando um protocolo digital específico.

Adicionalmente, é utilizado um resistor *pull-up* de 10k Ω entre os pinos VCC e DATA, cuja função é estabilizar o sinal de comunicação, evitando leituras incorretas ou ruído elétrico.

Deste modo, a tabela permite compreender de forma clara a interligação dos componentes e a função de cada ligação no sistema de aquisição de dados.

Tabela 4: Mapeamento dos pinos do sensor DHT22 para o Arduino Mega e descrição funcional das ligações no sistema de aquisição de dados.

Componente	Pino do Componente	Pino Arduino Mega	Função	Protocolo
DHT22 (Sensor T/H Int)	VCC	5V	Alimentação	—
	DATA	D2	Dados	Digital
	GND	GND	GND	—

A Tabela 5 apresenta a ligação do display LCD 20x4 com interface I2C ao Arduino Mega, indicando os pinos utilizados e a respetiva função no sistema.

O pino VCC do módulo LCD encontra-se ligado ao pino 5V do Arduino, assegurando a alimentação elétrica do dispositivo. O pino GND está ligado ao GND, garantindo uma referência comum de terra no circuito.

A comunicação entre o Arduino e o LCD é realizada através do protocolo I2C (*Inter-Integrated Circuit*), que utiliza apenas dois fios. O pino SDA (Serial Data) está ligado ao pino D20 do Arduino Mega e é responsável pela transmissão de dados. O pino SCL (*Serial Clock*) está ligado ao pino D21, sendo responsável pela sincronização da comunicação.

Este tipo de ligação permite reduzir significativamente o número de fios necessários, comparativamente a um LCD convencional, simplificando o circuito e facilitando a implementação do sistema.

Tabela 5: Ligação do display LCD 20x4 com interface I2C ao Arduino Mega, indicando o mapeamento dos pinos e a função de cada ligação no sistema.

Componente	Pino do Componente	Pino Arduino Mega	Função	Protocolo
LCD 20x4 (com I2C)	GND	GND	GND	I2C
	VCC	5V	Alimentação	—
	SDA	D20	Dados	—
	SCL	D21	Clock	—

A Tabela 6 apresenta a ligação do sensor BME280 ao Arduino Mega, evidenciando o mapeamento dos pinos e a função de cada ligação no sistema.

O pino VIN (ou VCC) do sensor está ligado ao pino 3.3V do Arduino, sendo esta a tensão recomendada para garantir o funcionamento seguro e estável do dispositivo. Embora alguns módulos suportem 5V, o uso de 3.3V é tecnicamente mais adequado para evitar danos ao sensor.

O pino GND encontra-se ligado ao GND do Arduino, assegurando uma referência comum de terra no circuito.

A comunicação é realizada através do protocolo I2C, partilhando o mesmo barramento utilizado por outros dispositivos (como o LCD ou RTC). O pino SDA está ligado ao pino D20, responsável pela transmissão de dados, enquanto o pino SCL está ligado ao pino D21, responsável pelo sinal de *clock* que sincroniza a comunicação.

O sensor BME280 permite medir temperatura, humidade e pressão atmosférica, sendo utilizado neste sistema para monitorização ambiental externa.

Tabela 6: Ligação do sensor BME280 ao Arduino Mega através do barramento I2C, indicando os pinos utilizados e a função de cada ligação no sistema de monitorização ambiental.

Componente	Pino do Componente	Pino Arduino Mega	Função	Protocolo
BME280 (Sensor T/H/P Ext)	VIN (ou VCC)	3.3V (Recomendado)	Alimentação	I2C
	GND	GND	GND	—
	SDA	D20	Dados	—
	SCL	D21	Clock	—

A Tabela 7 apresenta a ligação do sensor de luminosidade BH1750 ao Arduino Mega, indicando os pinos utilizados e a função de cada ligação no sistema.

O pino VCC do sensor está ligado ao pino 3.3V ou 5V do Arduino, dependendo do módulo utilizado, uma vez que a maioria dos módulos BH1750 possui regulador de tensão integrado, permitindo flexibilidade na alimentação.

O pino GND encontra-se ligado ao GND do Arduino, garantindo uma referência comum de terra no circuito.

A comunicação entre o sensor e o microcontrolador é realizada através do protocolo I2C, partilhando o mesmo barramento com outros dispositivos do sistema. O pino SDA está ligado ao pino D20, responsável pela transmissão de dados, enquanto o pino SCL está ligado ao pino D21, responsável pelo sinal de *clock* que sincroniza a comunicação.

O sensor BH1750 permite medir a intensidade luminosa em lux, sendo utilizado no sistema para monitorizar as condições de iluminação ambiente.

Tabela 7: Ligação do sensor de luminosidade BH1750 ao Arduino Mega através do barramento I2C, indicando o mapeamento dos pinos e a função de cada ligação no sistema de monitorização.

Componente	Pino do Componente	Pino Arduino Mega	Função	Protocolo
BH1750 (Sensor Luz)	VCC	3.3V ou 5V	Alimentação	I2C
	GND	GND	GND	—
	SDA	D20	Dados	—
	SCL	D21	Clock	—

A Tabela 8 apresenta a ligação do módulo RTC DS3231 ao Arduino Mega, evidenciando o mapeamento dos pinos e a função de cada ligação no sistema.

O pino VCC do módulo está ligado ao pino 5V do Arduino, garantindo a alimentação necessária ao funcionamento do circuito. O pino GND encontra-se ligado ao GND, assegurando uma referência comum de terra.

A comunicação entre o Arduino e o RTC é realizada através do protocolo I2C, partilhado com outros dispositivos do sistema. O pino SDA está ligado ao pino D20, sendo responsável pela transmissão de dados, enquanto o pino SCL está ligado ao pino D21, responsável pela sincronização da comunicação.

O módulo DS3231 é um relógio de tempo real de alta precisão, utilizado para manter a data e hora mesmo quando o sistema está desligado, graças à presença de uma bateria interna.

Tabela 8: Ligação do módulo RTC DS3231 ao Arduino Mega através do barramento I2C, indicando os pinos utilizados e a função de cada ligação no sistema de registo temporal.

Componente	Pino do Componente	Pino Arduino Mega	Função	Protocolo
RTC DS3231	VCC	5V	Alimentação	I2C
	GND	GND	GND	—
	SDA	D20	Dados	—
	SCL	D21	Clock	—

A Tabela 9 apresenta a ligação do módulo de relé de 2 canais ao Arduino Mega, indicando os pinos utilizados e a função de cada ligação no sistema de controlo.

O pino VCC do módulo está ligado ao 5V do Arduino, garantindo a alimentação do circuito interno do relé. O pino GND encontra-se ligado ao GND, assegurando uma referência comum de terra.

Os pinos IN1 e IN2 estão ligados aos pinos digitais D10 e D11, respetivamente, sendo utilizados para controlar o acionamento dos relés. Estes sinais são do tipo digital, permitindo ligar ou desligar dispositivos externos, como ventiladores.

O módulo de relé funciona como um interruptor controlado eletronicamente, permitindo ao Arduino controlar cargas de maior potência de forma segura e isolada.

Tabela 9: Ligação do módulo de relé de 2 canais ao Arduino Mega, indicando os pinos de controlo e a sua função no acionamento de cargas externas.

Componente	Pino do Componente	Pino Arduino Mega	Função	Protocolo
Módulo Relé (2 canais)	VCC	5V	Alimentação	—
	GND	GND	GND	—
	IN1 (vent 3)	D10	Sinal controlo	Digital
	IN2 (vent 4)	D11	Sinal controlo	Digital

A Tabela 10 apresenta a ligação do *buzzer* ativo ao Arduino Mega, indicando os pinos utilizados e a função de cada ligação no sistema.

O terminal positivo (+) do *buzzer* está ligado ao pino digital D8 do Arduino, sendo este responsável pelo envio do sinal de controlo. O terminal negativo (-) está ligado ao GND, garantindo a referência de terra necessária ao funcionamento do circuito.

O *buzzer* ativo possui um circuito interno que gera som automaticamente quando recebe tensão, não sendo necessário gerar sinais PWM ou frequências específicas. Assim, basta um sinal digital simples (HIGH/LOW) para o seu funcionamento.

Neste sistema, o *buzzer* é utilizado como dispositivo de alerta sonoro, sendo ativado quando determinadas condições são atingidas, como por exemplo temperaturas elevadas.

Tabela 10: Ligação do buzzer ativo ao Arduino Mega, indicando os pinos de controlo e a sua função no sistema de alerta sonoro.

Componente	Pino do Componente	Pino Arduino Mega	Função	Protocolo
Buzzer Ativo (5V)	(+) Positivo	D8	Sinal controlo	Digital
	(-) Positivo	GND	GND	—

A Tabela 11 apresenta a ligação do módulo de cartão MicroSD ao Arduino Mega, utilizando o protocolo de comunicação SPI (*Serial Peripheral Interface*).

O pino VCC está ligado ao 5V do Arduino, garantindo a alimentação do módulo, enquanto o pino GND assegura a referência comum de terra.

A comunicação SPI utiliza quatro linhas principais:

- O pino SCK (*Serial Clock*) está ligado ao pino D52, sendo responsável pela sincronização dos dados;
- O pino MOSI (*Master Out Slave In*) está ligado ao pino D51, permitindo ao Arduino enviar dados para o cartão;
- O pino MISO (*Master In Slave Out*) está ligado ao pino D50, permitindo ao Arduino receber dados do cartão;
- O pino CS (*Chip Select*) está ligado ao pino D53, sendo utilizado para selecionar o dispositivo SPI com o qual o Arduino comunica.

Este módulo permite o armazenamento de dados, sendo frequentemente utilizado para registo (*logging*) de medições, como temperatura, humidade, pressão e luminosidade no sistema.

Tabela 11: Ligação do módulo de cartão MicroSD ao Arduino Mega através do protocolo SPI, indicando o mapeamento dos pinos e a função de cada ligação no sistema de armazenamento de dados.

Componente	Pino do Componente	Pino Arduino Mega	Função	Protocolo
Cartão MicroSD (SPI)	CS	D53(Hardware ss)	Seleção	SPI
	SCK	D52	Clock	—
	MOSI	D51	Data <i>In</i>	—
	MISO	D50	Data <i>Out</i>	—
	VCC	5V	Alimentação	—
	GND	GND	GND	—

Notas sobre a montagem física:

- Alimentação 3,3V vs 5V: O BME280 e o BH1750 geralmente funcionam com ambas, mas prefira 3,3V se o módulo tiver regulador onboard para proteger o chip. O DHT22 e o RTC preferem 5V no Arduino Mega para garantir estabilidade.
- I2C Pull-up: Os módulos I2C (LCD, BME, BH, RTC) geralmente já trazem resistências pull-up integradas. Com 4 dispositivos no barramento, a resistência equivalente cai, mas deve funcionar bem a 100kHz. Se houver falhas de comunicação, pode ser necessário remover as resistências de alguns módulos, mantendo apenas um par.
- Módulo Relé: O código usa lógica Active-LOW (`digitalWrite(pin, LOW)` liga). Certifique-se de que o *jumper* VCC-JDVCC no módulo relé está configurado para separar a alimentação da bobina do relé da alimentação do Arduino se usar muitos relés, mas com apenas dois, ligar o VCC do relé ao 5V do Arduino deve funcionar (use uma fonte externa de 5V se notar *resets* no Arduino).

Explicação de como o sistema funciona

O sistema é um *datalogger* ambiental autónomo. O seu objetivo principal é medir variáveis internas e externas, apresentá-las num ecrã para monitorização em tempo real e registá-las num cartão SD periodicamente para análise posterior. Adicionalmente, atua como um sistema de controlo, ligando ventiladores baseados num diferencial térmico/hídrico e acionando um alarme sonoro se a temperatura interna for crítica.

Inclusão de Bibliotecas (`#include`):

Como demonstrado na Figura 38, o código inicia com a importação de todas as bibliotecas de software necessárias para gerir a comunicação e os periféricos do Arduino Mega. São incluídas bibliotecas essenciais para o barramento I2C (*Wire.h*), comunicação SPI (*SPI.h*), gestão do cartão SD (*SD.h*), controlo do visor LCD

(*LiquidCrystal_I2C.h*), leitura do relógio de tempo real (*RTCLib.h*), tratamento dos sensores ambientais (*DHT.h*, *Adafruit_BME280.h*) e do sensor de luminosidade (*BH1750.h*).

```
C++

#include <Arduino.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include "RTCLib.h"
#include <Adafruit_BME280.h>
#include <BH1750.h>
```

Figura 38: Declaração das bibliotecas de suporte ao hardware do sistema.

O que faz:

- Importa todos os pacotes de código necessários para comunicar com o hardware.

Como funciona no sistema:

- Fornece as funções básicas do Arduino (*Arduino.h*), a comunicação por barramento I2C (*Wire.h*) e SPI (*SPI.h*), o controlo do visor LCD (*LiquidCrystal_I2C*), a leitura do sensor de temperatura/humidade interna DHT22 (*DHT.h*), a gestão do cartão SD (*SD.h*), a leitura da data e hora do relógio RTC (*RTCLib.h*), a leitura de temperatura/humidade/pressão externa do BME280 (*Adafruit_BME280.h*) e a medição de luminosidade do BH1750 (*BH1750.h*).

Definições de Pinos e Constantes (*#define* e *const*):

A Figura 39 ilustra a atribuição de pinos físicos e parâmetros fixos do sistema encontra-se ilustrada na Figura 38. Esta secção define claramente as ligações de hardware, tais como o pino digital do sensor DHT22 (2), o pino de controlo do *buzzer* de alarme (8), os relés de acionamento dos ventiladores (10 e 11) e o pino de seleção de chip (*Chip Select* - 53) do cartão SD. Além disso, estabelece as constantes de tempo que determinam a frequência de leitura dos sensores (a cada 5 segundos) e a periodicidade de gravação dos dados (a cada 15 minutos).

```
C++

#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT22

#define PIN_BUZZER 8

#define PIN_RELE_VENTILADOR1 10
#define PIN_RELE_VENTILADOR2 11

const int pinoCS_SD = 53;

const unsigned long intervaloGravacao = 15UL * 60UL * 1000UL;
const unsigned long intervaloLeituraSensores = 5000UL;
```

Figura 39: Mapeamento físico dos pinos do microcontrolador e definição de constantes temporais.

O que faz:

- Atribui nomes legíveis aos pinos físicos da placa Arduino Mega 2560 e define intervalos de tempo fixos.

Como funciona no sistema:

- O pino digital 2 lê o DHT22, o pino 8 comanda o alarme sonoro (*buzzer*), e os pinos 10 e 11 controlam os dois relés dos ventiladores. O pino 53 é configurado como o Chip *Select* (CS) obrigatório para o módulo de cartão SD na arquitetura do Mega. Os intervalos determinam que os sensores são lidos a cada 5 segundos (5000ms) e os dados são gravados no cartão a cada 15 minutos (15 * 60 * 1000ms).

Instanciação de Objetos e Variáveis Globais:

Na Figura 40 é apresentada a criação dos objetos de software correspondentes a cada módulo físico (como o objeto *lcd*, o sensor atmosférico *bme*, o medidor de luz *lightMeter* e o relógio *rtc*). São também declaradas as variáveis globais do tipo *float* responsáveis por armazenar temporariamente as leituras de temperatura, humidade, pressão e luminosidade, bem como as variáveis de controlo de estado e os buffers de otimização gráfica para evitar oscilações no visor.

```
C++

DHT_Unified dht(DHTPIN, DHTTYPE);
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);
Adafruit_BME280 bme;
BH1750 lightMeter;
RTC_DS3231 rtc;

float data_tint = -1.0;
float data_hrint = -1.0;
float data_text = -1.0;
float data_hnext = -1.0;
float data_pres = -1.0;
float data_il = -1.0;

bool estadoVentiladores = false;
```

Figura 40: Declaração de instâncias de periféricos e variáveis de armazenamento global.

O que faz:

- Cria as instâncias de software para cada componente conectado e define as variáveis de armazenamento de dados.

Como funciona no sistema:

- Os objetos (como *lcd*, *bme*, *rtc*) permitem interagir diretamente com os módulos físicos usando comandos específicos. As variáveis globais (*data_tint*, *data_text*, etc.) armazenam os valores atuais medidos. O valor -1.0 serve como um código de erro inicial para indicar que o sensor ainda não leu ou falhou.

Protótipos das Funções:

A Figura 41 exibe a listagem dos protótipos de todas as funções desenvolvidas para o projeto. Esta prática de programação assegura que o compilador do Arduino reconhece a assinatura de sub-rotinas como a gestão do cartão SD, o controlo dos atuadores e a atualização do ecrã, independentemente da ordem em que aparecem implementadas no corpo principal do ficheiro de código.

```
C++  
  
void gravarDadosNoSD(...);  
void atualizarLeituraSensores();  
void desenharInterfaceFixa();  
void atualizarValoresEcra(DateTime agora);  
String obterNomeArquivoDiario(DateTime agora);  
void destravarI2C();  
void controlarBuzzerPorTemperatura();  
void controlarVentiladores();
```

Figura 41: Declaração antecipada dos protótipos de funções do programa.

O que faz:

- Declara antecipadamente todas as funções criadas pelo programador antes da função *setup()*.

Como funciona no sistema:

- Permite que o compilador do Arduino reconheça as funções independentemente da ordem em que foram escritas no ficheiro de código.

Configuração Inicial (*setup*):

A fase de arranque e preparação inicial do sistema é executada pela função *setup()*, ilustrada na Figura 42. Nesta etapa, a porta série é configurada para efeitos de depuração, os pinos dos atuadores (*buzzer* e relés) são definidos como saídas e colocados num estado seguro de repouso, e executa-se a sequência de desbloqueio do barramento I2C. De seguida, procede-se à inicialização individual do barramento de comunicação, do visor LCD, dos sensores ambientais (DHT22, BME280 e BH1750), do relógio RTC e do módulo de cartão SD, assegurando que todos os periféricos estão operacionais antes de dar início ao ciclo principal de funcionamento.

```

C++

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  delay(1000);
  Serial.println("--- Inicializando Sistema ---");

  pinMode(PIN_BUZZER, OUTPUT);
  digitalWrite(PIN_BUZZER, LOW);

  pinMode(PIN_RELE_VENTILADOR1, OUTPUT);
  pinMode(PIN_RELE_VENTILADOR2, OUTPUT);
  digitalWrite(PIN_RELE_VENTILADOR1, HIGH);
  digitalWrite(PIN_RELE_VENTILADOR2, HIGH);

  destravarI2C();

  Wire.begin();
  Wire.setClock(100000);
  delay(200);

  dht.begin();

  lcd.init();
  lcd.backlight();
  delay(100);

  // Inicialização dos sensores I2C (BH1750 e BME280) e RTC...
  // Inicialização do Cartão SD...
}

```

Figura 42: Rotina de inicialização e configuração prévia de hardware (setup()).

O que faz:

- Prepara e inicializa todos os componentes de hardware uma única vez quando o sistema é ligado ou reiniciado.

Como funciona no sistema:

- Configura a porta série para depuração no PC,
- Define os pinos dos atuadores (*buzzer* e relés) como saídas e desliga-os no arranque;
- Executa a função `destravarI2C()` para limpar eventuais bloqueios elétricos no barramento de comunicação;
- Inicia o barramento I2C a uma velocidade estável de 100 kHz;
- Arranca individualmente o sensor DHT22, o visor LCD (acendendo a luz de fundo), o medidor de luz BH1750 (procurando nos endereços 0x23 ou 0x5C), o sensor atmosférico BME280 (nos endereços 0x76 ou 0x77), o relógio de tempo real RTC e o módulo de cartão SD.

Ciclo Principal de Execução (loop):

NA Figura 43 ilustra núcleo operacional do sistema é executado de forma contínua através da função `loop()`, visível na figura. Utilizando a função nativa `millis()` em alternativa ao comando de pausa `delay()`, o código gere concorrentemente e sem tempos de espera bloqueantes a atualização periódica dos sensores, a verificação de segurança dos atuadores, a atualização fluida do relógio no visor LCD e o armazenamento programado dos dados no cartão de memória.

```

C++

void loop() {
    unsigned long millisAtual = millis();

    if (millisAtual - millisAnteriorLeitura >= intervaloLeituraSensores) {
        millisAnteriorLeitura = millisAtual;

        atualizarLeituraSensores();
        controlarBuzzerPorTemperatura();
        controlarVentiladores();
    }

    DateTime agora = rtc.now();
    atualizarValoresEcra(agora);

    if (millisAtual - millisAnteriorGravacao >= intervaloGravacao) {
        millisAnteriorGravacao = millisAtual;
        // Grava os dados no cartão SD...
    }

    delay(50);
}

```

Figura 43: Estrutura do ciclo principal de funcionamento e temporização sem bloqueios (*non-blocking*).

O que faz:

- Executa repetidamente o núcleo operacional do desidratador de forma contínua e sem bloqueios (usando *millis()* em vez de *delay()*).

Como funciona no sistema:

- A cada 5 segundos, atualiza as variáveis com as novas leituras dos sensores, avalia se o alarme deve tocar e decide se os ventiladores devem ligar ou desligar;
- Em cada ciclo do *loop*, obtém a hora atual do RTC e atualiza o ecrã LCD com fluidez;
- A cada 15 minutos, cria uma linha com todos os dados e guarda-os num ficheiro .csv no cartão SD.

Controlo do Alarme Sonoro (*controlarBuzzerPorTemperatura*):

O comportamento do sistema de ventilação do desidratador é gerido de forma autónoma pela rotina apresentada na Figura 44. A função *controlarVentiladores()* valida primeiro a integridade dos dados termo-higrométricos recolhidos. Caso as leituras sejam válidas, o microcontrolador avalia duas condições essenciais para a eficiência do processo de secagem: se a temperatura interior for inferior à exterior ($T_i < T_e$) ou se a humidade interior for superior à alta humidade exterior ($H_i > H_e$). Verificando-se qualquer uma destas condições, o sistema aciona os relés (através de lógica invertida em nível baixo) para ligar os ventiladores, promovendo a exaustão do ar saturado. Caso contrário, os ventiladores permanecem desligados.

```

C++

void controlarBuzzerPorTemperatura() {
    if (data_tint != -1.0 && data_tint > 65.0) {
        digitalWrite(PIN_BUZZER, HIGH);
    } else {
        digitalWrite(PIN_BUZZER, LOW);
    }
}

```

Figura 44: Algoritmo de decisão e acionamento automático do sistema de exaustão.

O que faz:

- Monitoriza a segurança térmica interna do protótipo.

Como funciona no sistema:

- Se a temperatura interna (*data_tint*) for válida (diferente de -1.0) e ultrapassar os 65 °C, o pino do *buzzer* é colocado em nível alto (HIGH), acionando o alarme para evitar sobreaquecimento dos alimentos. Caso contrário, mantém-se desligado (LOW).

Controlo Automático dos Ventiladores (*controlarVentiladores*):

Para salvaguardar a integridade estrutural do protótipo e prevenir danos nos produtos em processo de desidratação devido a sobreaquecimentos, o código implementa a função de segurança ilustrada na Figura 45. Através de *controlarBuzzerPorTemperatura()*, o Arduino monitoriza continuamente a temperatura interna registada pelo sensor DHT22. Se a temperatura ultrapassar o limite crítico de segurança estabelecido em 65 °C, o pino digital associado ao *buzzer* é ativado em nível alto (HIGH), gerando um sinal sonoro de alerta imediato até que os parâmetros térmicos regressem a níveis controlados.

```
C++
void controlarVentiladores() {
    bool leiturasValidas = (data_tint != -1.0 && data_text != -1.0 &&
        data_hrint != -1.0 && data_hrest != -1.0);

    if (leiturasValidas) {
        if (data_tint < data_text || data_hrint > data_hrest) {
            digitalWrite(PIN_RELE_VENTILADOR1, LOW);
            digitalWrite(PIN_RELE_VENTILADOR2, LOW);
            estadoVentiladores = true;
        } else {
            digitalWrite(PIN_RELE_VENTILADOR1, HIGH);
            digitalWrite(PIN_RELE_VENTILADOR2, HIGH);
            estadoVentiladores = false;
        }
    } else {
        digitalWrite(PIN_RELE_VENTILADOR1, HIGH);
        digitalWrite(PIN_RELE_VENTILADOR2, HIGH);
        estadoVentiladores = false;
    }
}
```

Figura 45: Rotina de segurança e proteção térmica através de alarme sonoro.

O que faz:

- Automatiza a exaustão de ar do desidratador com base nas condições termo-higrométricas internas e externas.

Como funciona no sistema:

- Verifica se os dados do DHT22 e BME280 são válidos;
- Compara a temperatura interna com a externa e a humidade interna com a externa. Se a temperatura interior for inferior à exterior ($T_i < T_e$) ou se a humidade interna for superior à externa ($H_i > H_e$), o sistema conclui que é vantajoso ventilar e aciona os relés (LOW ativa os módulos de relé ótico). Caso contrário, desliga os ventiladores (HIGH). Se houver falha de leitura, desliga o sistema por segurança.

Desbloqueio Físico do Barramento I2C (destravarI2C):

Para acautelar eventuais falhas de comunicação em ambientes industriais ou académicos devido a ruído elétrico ou reinicializações bruscas, o sistema integra o algoritmo de recuperação apresentado na Figura 46. A função `destravarI2C()` força uma sequência controlada de impulsos de relógio (SCL) para desbloquear mecanicamente a linha de dados (SDA) caso algum sensor escravo fique retido em nível lógico baixo, garantindo a fiabilidade da comunicação I2C no arranque.

```
C++
void destravarI2C() {
    pinMode(21, OUTPUT);
    pinMode(20, INPUT_PULLUP);

    for (byte i = 0; i < 9; i++) {
        digitalWrite(21, HIGH);
        delayMicroseconds(5);
        digitalWrite(21, LOW);
        delayMicroseconds(5);
    }
}
```

Figura 46: Rotina de recuperação e desbloqueio físico do barramento de comunicação I2C.

O que faz:

- Corrige falhas comuns de hardware onde o barramento I2C fica travado (com a linha SDA presa em nível baixo) devido a reinicializações bruscas.

Como funciona no sistema:

- Envia manualmente uma sequência de 9 impulsos elétricos de *clock* pelo pino SCL (21) para forçar qualquer escravo I2C a libertar a linha de dados SDA antes de iniciar oficialmente a comunicação do sistema.

Atualização de Leituras dos Sensores (atualizarLeituraSensores):

A recolha e o tratamento dos dados obtidos do meio físico são executados pela função detalhada na Figura 47. Esta rotina lê ciclicamente o sensor DHT22, o BME280 e o luxímetro BH1750, aplicando filtros condicionais (como a verificação de valores nulos com *isnan* e limites de gama) para detetar erros de leitura. Caso ocorra uma falha num sensor, o sistema atribui um código de erro standardizado (-1.0), impedindo que dados corrompidos comprometam o controlo dos ventiladores ou o registo histórico.

```
void atualizarLeituraSensores() {
    sensors_event_t event;
    dht.temperature().getEvent(&event);
    if (!isnan(event.temperature)) data_tint = event.temperature; else data_tint = -1.0;

    dht.humidity().getEvent(&event);
    if (!isnan(event.relative_humidity)) data_hrint = event.relative_humidity; else data_hrint = -1.0;

    float temp_bme = bme.readTemperature();
    float hum_bme = bme.readHumidity();
    float pres_bme = bme.readPressure() / 100.0F;
    // Valida e guarda os dados do BME280 e BH1750...
}
```

Figura 47: Rotina de aquisição, validação e filtragem de dados dos sensores ambientais.

O que faz:

- Recolhe os dados brutos de todos os sensores e valida-os contra erros de leitura.

Como funciona no sistema:

- Pede os valores ao DHT22, BME280 e BH1750. Aplica filtros condicionais (como *isnan* para verificar se o valor é inválido e limites lógicos de funcionamento) para garantir que valores corrompidos não afetam o resto do programa, atribuindo -1.0 se houver falha.

Interface Gráfica e Gestão do Ecrã LCD (`desenharInterfaceFixa` e `atualizarValoresEcra`):

A recolha e o tratamento dos dados obtidos do meio físico são executados pela função detalhada na Figura 48. Esta rotina lê ciclicamente o sensor DHT22, o BME280 e o luxímetro BH1750, aplicando filtros condicionais (como a verificação de valores nulos com *isnan* e limites de gama) para detetar erros de leitura. Caso ocorra uma falha num sensor, o sistema atribui um código de erro standardizado (-1.0), impedindo que dados corrompidos comprometam o controlo dos ventiladores ou o registo histórico.

```
C++
void desenharInterfaceFixa() {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Ti:--.-C Hi:--.-%");
    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Te:--.-C He:--.-%");
    lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("P:----.-hPa IL:-----");
}

void atualizarValoresEcra(DateTime agora) {
    // Atualiza apenas os caracteres numéricos se os valores mudarem, evita
    char bufferEcra[21];
    sprintf(bufferEcra, "%02d:%02d:%02d %02d/%02d/%04d", ...);
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print(bufferEcra);
}
```

Figura 48: Funções de estruturação visual fixa e atualização dinâmica do visor LCD 20x4.

O que faz:

- Desenha a estrutura visual fixa no LCD de 20x4 e atualiza dinamicamente os valores numéricos e o relógio.

Como funciona no sistema:

- O design fixo cria as etiquetas estáticas (Ti, Te, P, IL). A função de atualização compara os valores correntes com os anteriores (*ult_tint*, etc.) e só reescreve no LCD se houver alterações, evitando a cintilação (*flicker*) visual. Na última linha, imprime constantemente as horas, minutos, segundos e a data completa obtida do RTC.

Gestão e Gravação de Dados no Cartão SD (`obterNomeArquivoDiario` e `gravarDadosNoSD`):

```
String obterNomeArquivoDiario(DateTime agora) {
    char nome[13];
    sprintf(nome, "%02d%02d%04d.csv", agora.day(), agora.month(), agora.year());
    return String(nome);
}

void gravarDadosNoSD(String nomeArq, String timestamp, float tint, float hrint, float hrent, float pres, int IL, Ventiladores) {
    File meuArquivo = SD.open(nomeArq, FILE_WRITE);

    if (meuArquivo) {
        if (meuArquivo.size() == 0) {
            meuArquivo.println("Timestamp;Tint;Hrint;Text;Hrent;pres;IL;Ventiladores");
        }
        // Escreve os dados separados por ponto e vírgula (...)
        meuArquivo.close();
    }
}
```

O que faz:

- Organiza os ficheiros de registo diário e escreve os dados tabulares no cartão de memória.

Como funciona no sistema:

- Cria automaticamente um ficheiro .csv baseado na data atual (exemplo: 30072026.csv). Quando é acionado a cada 15 minutos, abre o ficheiro, verifica se é novo para inserir o cabeçalho técnico (*Timestamp;Tint;Hrint;...*) e anexa uma nova linha com todas as variáveis ambientais e o estado dos ventiladores (ON/OFF), fechando o ficheiro logo de seguida para evitar perda de dados.

Gravação de dados

O sistema foi configurado para registar automaticamente todas as variáveis monitorizadas num cartão SD, com uma frequência de amostragem de 15 minutos.

Cada registo no ficheiro de dados apresenta a seguinte estrutura:

Timestamp / Data e Hora:

- Apresentado no formato completo dd/mm/aaaa hh:mm:ss (dia/mês/ano e horas:minutos:segundos), gerado diretamente pelo relógio de tempo real (RTC DS3231) e gravado em cada linha do ficheiro CSV, garantindo a ordenação cronológica rigorosa e o seguimento temporal de todo o ensaio experimental.

Temperatura Interna (T_{int}):

- Refere-se à temperatura do ar no interior da câmara de secagem (não à temperatura no interior físico da polpa da fruta), medida diretamente no fluxo de ar que passa sobre os tabuleiros.

Temperatura Externa (T_{ext}):

- Refere-se à temperatura do ar ambiente exterior, medida nas imediações do coletor solar para servir de referência comparativa.

Humidade Relativa Interna (HR_{int}):

- Quantifica a percentagem de vapor de água contida no ar no interior da câmara de secagem, após este ter absorvido a humidade dos produtos.

Humidade Relativa Externa (HR_{ext}):

- Quantifica a percentagem de vapor de água contida no ar ambiente exterior antes de entrar no sistema.

Pressão Atmosférica:

- Medida através do sensor ambiental para monitorizar as condições barométricas locais que influenciam a termodinâmica do processo.

Intensidade Luminosa ou Intensidade de Luz (IL):

- O parâmetro regista os níveis de radiação solar incidente no exterior captados pelo sensor ótico.

Estado dos Ventiladores (*On* ou *Off*):

- Registo binário ou de estado (por exemplo, ligado/Desligado ou o nível de velocidade/PWM aplicado) que indica se o sistema de convecção forçada está ativo em cada momento de acordo com a lógica programada.

Código Arduíno Implementado

Listagem Integral do Código Arduíno Implementado:

A Figura 49 mostra a bibliotecas (`#include`), definição de pinos e constantes (`#define`), instanciação dos objetos dos sensores/LCD/RTC e as 6 variáveis globais de dados. O que faz:

- prepara tudo o que o resto do código vai usar nomes dos pinos, objetos de cada módulo, e as variáveis onde ficam guardadas as leituras.

Como funciona no sistema:

- `Wire.h` trata da comunicação I2C; `SPI.h` e `SD.h` tratam do cartão de memória; `LiquidCrystal_I2C.h` controla o LCD; `DHT.h/DHT_U.h` leem o sensor da câmara; `Adafruit_BME280.h` lê o sensor do coletor; `BH1750.h` lê a luminosidade; `RTCLib.h` lê a data/hora.

```

#include <Arduino.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include "RTClib.h"
#include <Adafruit_BME280.h>
#include <BH1750.h> // Biblioteca do Sensor de Luz BH1750

#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT22

// Definição do pino do Buzzer Ativo
#define PIN_BUZZER 8

// Definição dos pinos do Relé dos Ventiladores (2 ventiladores)
#define PIN_RELE_VENTILADOR1 10 // Ligado ao IN3 do módulo de relés
#define PIN_RELE_VENTILADOR2 11 // Ligado ao IN4 do módulo de relés

DHT_Unified dht(DHTPIN, DHTTYPE);
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);
Adafruit_BME280 bme;
BH1750 lightMeter; // Objeto do sensor de luz

// No Mega 2560, usamos o pino 53 como CS por padrão de hardware
const int pinoCS_SD = 53;
RTC_DS3231 rtc;

// 15 minutos de intervalo para gravação no SD
const unsigned long intervaloGravacao = 15UL * 60UL * 1000UL;
unsigned long millisAnteriorGravacao = 0;

// 5 segundos de intervalo para atualização das leituras dos sensores
const unsigned long intervaloLeituraSensores = 5000UL;
unsigned long millisAnteriorLeitura = 0;

// Variáveis dos Sensores
float data_tint = -1.0; // Temperatura Interna (DHT22)
float data_hrhint = -1.0; // Humidade Interna (DHT22)
float data_text = -1.0; // Temperatura Externa (BME280)
float data_hrext = -1.0; // Humidade Externa (BME280)
float data_pres = -1.0; // Pressão Atmosférica (BME280)
float data_il = -1.0; // Intensidade da Luz em Lux (BH1750)

// Estado atual dos ventiladores (para mostrar/gravar)
bool estadoVentiladores = false;

// Controlo de atualização do LCD (evita cintilação)
float ult_tint = -999.0, ult_hrhint = -999.0;

```

Figura 49: Bibliotecas (#include).

A Figura 50 mostra Fim das variáveis globais, protótipos das funções, e início da função *setup()*: configuração dos pinos do *buzzer* e dos relés, início do desbloqueio I2C e arranque do BH1750.

O que faz:

- arranca a configuração inicial do sistema, ligado uma única vez ao ligar o Arduino.

```
float ult_text = -999.0, ult_hrex = -999.0;
float ult_pres = -999.0;
float ult_il = -999.0;
String ultima_hora_data = "";

// Protótipos das funções
void gravarDadosNoSD(String nomeArq, String timestamp, float tint, float hrint, float text, float hrex,
float pres, float il, bool ventiladoresLigados);
void atualizarLeituraSensores();
void desenharInterfaceFixa();
void atualizarValoresEcra(DateTime agora);
String obterNomeArquivoDiario(DateTime agora);
void destravarI2C();
void controlarBuzzerPorTemperatura();
void controlarVentiladores();

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  delay(1000);
  Serial.println("--- Inicializando Sistema ---");

  // ===== CONFIGURAÇÃO DO BUZZER =====
  pinMode(PIN_BUZZER, OUTPUT);
  digitalWrite(PIN_BUZZER, LOW); // Garante que o buzzer começa calado

  // ===== CONFIGURAÇÃO DO RELÉ DOS VENTILADORES =====
  pinMode(PIN_RELE_VENTILADOR1, OUTPUT);
  pinMode(PIN_RELE_VENTILADOR2, OUTPUT);
  digitalWrite(PIN_RELE_VENTILADOR1, HIGH); // Lógica invertida: HIGH desliga o relé ótico comum
  digitalWrite(PIN_RELE_VENTILADOR2, HIGH);

  // ===== 1. DESBLOQUEIO FÍSICO DO BARRAMENTO I2C =====
  destravarI2C();

  // ===== 2. INICIALIZAÇÃO DO BARRAMENTO I2C =====
  Wire.begin();
  Wire.setClock(100000); // 100 kHz para máxima estabilidade elétrica
  delay(200);

  dht.begin(); // DHT22 usa pino digital comum

  // ===== 3. INICIALIZAÇÃO DO LCD (I2C) =====
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  delay(100);

  // ===== 4. INICIALIZAÇÃO DO BH1750 (I2C - Luz) =====
  Serial.println("A tentar iniciar o BH1750 (IL)...");

  if (!lightMeter.begin(BH1750::CONTINUOUS_HIGH_RES_MODE)) {
    Serial.println("Falha no endereço 0x23. A tentar endereço alternativo 0x5C...");
    if (!lightMeter.begin(BH1750::CONTINUOUS_HIGH_RES_MODE, 0x5C)) {
      Serial.println("Erro: Sensor BH1750 não respondeu em nenhum endereço!");
      lcd.setCursor(15, 2);
      lcd.print("ERR ");
    } else {
      Serial.println("BH1750 ativo com sucesso no endereço 0x5C!");
    }
  }
}
```

Figura 50: Variáveis globais, protótipos das funções.

A Figura 51 mostra Continuação do setup(): inicialização do BME280, do RTC (acerta a hora), do cartão SD, e primeira leitura/gravação de dados.

O que faz:

- Termina de preparar todos os sensores e confirma que o sistema está pronto a operar antes de entrar no ciclo principal.

```

}
} else {
  Serial.println("BH1750 ativo com sucesso no endereco 0x23!");
}
delay(100);

// ===== 5. INICIALIZAÇÃO DO BME280 (I2C) =====
if (!bme.begin(0x76)) {
  Serial.println("BME280 nao encontrado em 0x76. A tentar 0x77...");
  if (!bme.begin(0x77)) {
    Serial.println("Erro: Sensor BME280 nao foi encontrado!");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Erro: Sem BME280!");
  } else {
    Serial.println("BME280 ativo com sucesso em 0x77!");
  }
} else {
  Serial.println("BME280 ativo com sucesso em 0x76!");
}
delay(100);

desenharInterfaceFixa();

// ===== 6. INICIALIZAÇÃO DO RTC (I2C) =====
if (!rtc.begin()) {
  Serial.println("Erro: RTC nao encontrado!");
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("Erro: Sem RTC!   ");
} else {
  // Força a atualização imediata com a hora atual do computador ao compilar
  rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
  Serial.println("Hora atualizada com sucesso via compilação!");
}

// ===== 7. CARTÃO SD (SPI) =====
pinMode(53, OUTPUT);
digitalWrite(53, HIGH);

Serial.println("A tentar inicializar o Cartao SD no Mega...");

if (!SD.begin(pinoCS_SD)) {
  Serial.println("Erro: Falha no Cartao SD!");
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("Erro: Sem Cartao SD!");
} else {
  Serial.println("Cartao SD OK!");
}

// ===== Primeira leitura e gravação =====
atualizarLeituraSensores();
controlarVentiladores();

DateTime agora = rtc.now();
atualizarValoresEcra(agora);

String arquivo = obterNomeArquivoDiario(agora);

```

Figura 51: Continuação do setup().

A Figura 52 mostra Fim do setup() (monta o timestamp e grava a primeira linha) e início/corpo completo do loop(), o ciclo principal que corre indefinidamente, seguido da função controlarBuzzerPorTemperatura().

O que faz:

- É o coração do programa: a cada 5 segundos lê sensores e controla ventiladores/buzzer, e a cada 15 minutos grava no SD.

```
char timestamp[25];
sprintf(timestamp, "%02d/%02d/%04d %02d:%02d:%02d",
    agora.day(), agora.month(), agora.year(),
    agora.hour(), agora.minute(), agora.second());

if (data_tint != -1.0 || data_text != -1.0) {
    gravarDadosNoSD(arquivo, String(timestamp), data_tint, data_hrint, data_text, data_hnext, data_pres,
    data_il, estadoVentiladores);
    milisAnteriorGravacao = millis();
}

milisAnteriorLeitura = millis();
}

void loop() {
    unsigned long milisAtual = millis();

    // Atualização dos sensores e do controle de atuadores a cada 5 segundos
    if (milisAtual - milisAnteriorLeitura >= intervaloLeituraSensores) {
        milisAnteriorLeitura = milisAtual;

        atualizarLeituraSensores();
        controlarBuzzerPorTemperatura();
        controlarVentiladores();
    }

    // Atualiza o ecrã a cada ciclo com a hora correta e fluida do RTC
    DateTime agora = rtc.now();
    atualizarValoresEcra(agora);

    // Gravação Periódica no SD (15 em 15 minutos)
    if (milisAtual - milisAnteriorGravacao >= intervaloGravacao) {
        milisAnteriorGravacao = milisAtual;

        String arquivo = obterNomeArquivoDiario(agora);

        char timestamp[25];
        sprintf(timestamp, "%02d/%02d/%04d %02d:%02d:%02d",
            agora.day(), agora.month(), agora.year(),
            agora.hour(), agora.minute(), agora.second());

        gravarDadosNoSD(arquivo, String(timestamp), data_tint, data_hrint, data_text, data_hnext, data_pres,
        data_il, estadoVentiladores);
    }

    delay(50);
}

// Ativa o buzzer quando a temperatura interna ultrapassa os 65 graus
void controlarBuzzerPorTemperatura() {
    if (data_tint != -1.0 && data_tint > 65.0) {
        digitalWrite(PIN_BUZZER, HIGH);
    } else {
        digitalWrite(PIN_BUZZER, LOW);
    }
}
```

Figura 52: Fim do setup().

A Figura 53 mostra a Função controlarVentiladores() completa (a lógica de decisão ON/OFF), destravarI2C() completa, e início de atualizarLeituraSensores().

O que faz:

- Aqui está a regra que liga os ventiladores quando $T_{int} < T_{ext}$ ou $H_{int} > H_{ext}$, e a rotina que evita bloqueios no barramento I2C.

```
// Controle corrigido para módulos de relé óticos comuns (LOW liga, HIGH desliga)
void controlarVentiladores() {
    bool leiturasValidas = (data_tint != -1.0 && data_text != -1.0 &&
        data_hrint != -1.0 && data_hrext != -1.0);

    if (leiturasValidas) {
        // Se  $T_i < T_e$  OU  $H_i > H_e$ , ligam os ventiladores (LOW no relé ativo a nível baixo)
        if (data_tint < data_text || data_hrint > data_hrext) {
            digitalWrite(PIN_RELE_VENTILADOR1, LOW);
            digitalWrite(PIN_RELE_VENTILADOR2, LOW);
            estadoVentiladores = true;
        } else {
            digitalWrite(PIN_RELE_VENTILADOR1, HIGH);
            digitalWrite(PIN_RELE_VENTILADOR2, HIGH);
            estadoVentiladores = false;
        }
    } else {
        digitalWrite(PIN_RELE_VENTILADOR1, HIGH);
        digitalWrite(PIN_RELE_VENTILADOR2, HIGH);
        estadoVentiladores = false;
    }
}

// Liberta as linhas de comunicação física SDA (20) e SCL (21) no Arduino Mega
void destravarI2C() {
    pinMode(21, OUTPUT);
    pinMode(20, INPUT_PULLUP);

    for (byte i = 0; i < 9; i++) {
        digitalWrite(21, HIGH);
        delayMicroseconds(5);
        digitalWrite(21, LOW);
        delayMicroseconds(5);
    }

    pinMode(20, OUTPUT);
    digitalWrite(20, LOW);
    delayMicroseconds(5);
    digitalWrite(21, HIGH);
    delayMicroseconds(5);
    digitalWrite(20, HIGH);
    delayMicroseconds(5);
}

void atualizarLeituraSensores() {
    // --- Leitura do DHT22 ---
    sensors_event_t event;
    dht.temperature().getEvent(&event);
    if (!isnan(event.temperature)) {
        data_tint = event.temperature;
    } else {
        data_tint = -1.0;
    }

    dht.humidity().getEvent(&event);
    if (!isnan(event.relative_humidity)) {
        data_hrint = event.relative_humidity;
    }
}
```

Figura 53: Função controlarVentiladores().

A Figura 54 ilustra a Continuação de `atualizarLeituraSensores()`: leitura e validação do BME280 (temperatura, humidade, pressão) e do BH1750 (luminosidade), seguida do início de `desenharInterfaceFixa()` e `atualizarValoresEcra()`.

O que faz:

- Recolhe os dados brutos de todos os sensores e filtra leituras inválidas antes de as guardar.

```

    } else {
        data_hrint = -1.0;
    }

    // --- Leitura do BME280 ---
    float temp_bme = bme.readTemperature();
    float hum_bme = bme.readHumidity();
    float pres_bme = bme.readPressure() / 100.0F;

    if (!isnan(temp_bme) && temp_bme > -50.0 && temp_bme < 100.0) {
        data_text = temp_bme;
    } else {
        data_text = -1.0;
    }

    if (!isnan(hum_bme) && hum_bme >= 0.0 && hum_bme <= 100.0) {
        data_hrext = hum_bme;
    } else {
        data_hrext = -1.0;
    }

    if (!isnan(pres_bme) && pres_bme > 300.0 && pres_bme < 1200.0) {
        data_pres = pres_bme;
    } else {
        data_pres = -1.0;
    }

    // --- Leitura do BH1750 ---
    float lux = lightMeter.readLightLevel();
    if (lux >= 0.0 && lux < 120000.0) {
        data_il = lux;
    } else {
        data_il = -1.0;
    }
}

void desenharInterfaceFixa() {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Ti:--C Hi:--%");

    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Te:--C He:--%");

    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("P:----hPa IL:-----");
}

void atualizarValoresEcra(DateTime agora) {
    if (data_tint != ult_tint || data_hrint != ult_hrint) {
        ult_tint = data_tint;
        ult_hrint = data_hrint;

        lcd.setCursor(3, 0);
        if (data_tint != -1.0) lcd.print(data_tint, 1);
        else lcd.print("ERR ");
    }
}

```

Figura 54: Continuação de `atualizarLeituraSensores()`.

A Figura 55 mostra Resto de atualizarValoresEcra() (atualização seletiva do LCD, sem cintilação) e função obterNomeArquivoDiario().

O que faz:

- Mostra os valores no visor LCD só quando mudam, e gera o nome do ficheiro .csv do dia (ex.: 06082026.csv).

```

lcd.setCursor(13, 0);
if (data_hrint != -1.0) lcd.print(data_hrint, 1);
else lcd.print("ERR ");
}

if (data_text != ult_text || data_hrext != ult_hrext) {
    ult_text = data_text;
    ult_hrext = data_hrext;

    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Te:"); // Garante explicitamente que escreve "Te:"

    lcd.setCursor(3, 1);
    if (data_text != -1.0) lcd.print(data_text, 1);
    else lcd.print("ERR ");

    lcd.setCursor(13, 1);
    if (data_hrext != -1.0) lcd.print(data_hrext, 1);
    else lcd.print("ERR ");
}

if (data_pres != ult_pres) {
    ult_pres = data_pres;
    lcd.setCursor(2, 2);
    if (data_pres != -1.0) lcd.print(data_pres, 1);
    else lcd.print("ERR ");
}

if (data_il != ult_il) {
    ult_il = data_il;
    lcd.setCursor(15, 2);
    if (data_il != -1.0) {
        int il_inteiro = (int)data_il;
        lcd.print(il_inteiro);

        if (il_inteiro < 10) lcd.print(" ");
        else if (il_inteiro < 100) lcd.print(" ");
        else if (il_inteiro < 1000) lcd.print(" ");
        else if (il_inteiro < 10000) lcd.print(" ");
    } else {
        lcd.print("ERR ");
    }
}

char bufferEcra[21];
sprintf(bufferEcra, "%02d:%02d:%02d %02d/%02d/%04d",
    agora.hour(), agora.minute(), agora.second(),
    agora.day(), agora.month(), agora.year());

if (String(bufferEcra) != ultima_hora_data) {
    ultima_hora_data = String(bufferEcra);
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print(bufferEcra);
}
}

String obterNomeArquivoDiario(DateTime agora) {

```

Figura 55: Resto de atualizarValoresEcra().

A Figura 56 ilustra a Função gravarDadosNoSD() completa.

O que faz:

- Escreve cada linha de dados no cartão SD — é esta função que produziu literalmente as tabelas dos dias 06 e 07 que já analisámos, incluindo o cabeçalho Timestamp;Tint;Hrint;Text;Hrext;pres;IL;Ventiladores.

```
char nome[13];
sprintf(nome, "%02d%02d%04d.csv", agora.day(), agora.month(), agora.year());
return String(nome);
}

void gravarDadosNoSD(String nomeArq, String timestamp, float tint, float hrint, float text, float hrext,
float pres, float il, bool ventiladoresLigados) {
    File meuArquivo = SD.open(nomeArq, FILE_WRITE);

    if (meuArquivo) {
        if (meuArquivo.size() == 0) {
            meuArquivo.println("Timestamp;Tint;Hrint;Text;Hrext;pres;IL;Ventiladores");
            Serial.println("Cabecalho criado com sucesso!");
        }

        meuArquivo.print(timestamp);
        meuArquivo.print(",");

        if (tint != -1.0) meuArquivo.print(tint, 1); else meuArquivo.print("ERR");
        meuArquivo.print(",");

        if (hrint != -1.0) meuArquivo.print(hrint, 1); else meuArquivo.print("ERR");
        meuArquivo.print(",");

        if (text != -1.0) meuArquivo.print(text, 1); else meuArquivo.print("ERR");
        meuArquivo.print(",");

        if (hrext != -1.0) meuArquivo.print(hrext, 1); else meuArquivo.print("ERR");
        meuArquivo.print(",");

        if (pres != -1.0) meuArquivo.print(pres, 1); else meuArquivo.print("ERR");
        meuArquivo.print(",");

        if (il != -1.0) meuArquivo.print(il, 0); else meuArquivo.print("ERR");
        meuArquivo.print(",");

        meuArquivo.print(ventiladoresLigados ? "ON" : "OFF");

        meuArquivo.println();
        meuArquivo.close();

        Serial.print("Dados gravados em ");
        Serial.println(nomeArq);
    } else {
        Serial.println("Erro ao abrir arquivo para gravacao!");
    }
}
```

Figura 56: Função gravarDadosNoSD() completa.

6. Teste de protótipo de desidratador

Metodologia Experimental

O objetivo deste ensaio foi a validação funcional e térmica do protótipo de desidratador solar híbrido. O teste foi conduzido em condições de radiação solar direta, Local (Castelo Branco, utilizando fatias de banana como amostra orgânica devido ao seu elevado teor de humidade inicial. O sistema operou de forma autónoma, alimentado pelo painel fotovoltaico, enquanto o microcontrolador efetuava a aquisição de dados através dos sensores distribuídos.

Procedimento Experimental

O protótipo foi posicionado numa área com incidência direta de radiação solar, conforme ilustrado na Figura 57. O sistema, composto por uma câmara de secagem isolada e equipada com um painel solar fotovoltaico, foi montado para promover o aquecimento passivo e a circulação forçada de ar. As fatias de banana foram distribuídas uniformemente sobre a grelha interna, permitindo a circulação de ar necessária para a remoção da humidade.



Figura 57: Montagem do protótipo de desidratador solar em ambiente externo para ensaio experimental.

A Figura 58 mostra o interior da câmara de secagem do protótipo, evidenciando a disposição das amostras de banana colocadas diretamente sobre a grelha metálica, junto às hastes de suporte. É possível observar diferentes graus de desidratação entre as fatias, algumas apresentam uma coloração mais escura e uma textura já visivelmente mais seca e encolhida, enquanto outras mantêm ainda um aspeto mais húmido, o que é expectável tendo em conta a posição de cada amostra na grelha e a sua exposição não uniforme ao fluxo de ar quente gerado dentro da câmara.

No topo da imagem são visíveis os ventiladores de circulação de ar (referidas na tabela de dados como "Ventiladores"), responsáveis por promover a circulação forçada do ar quente no interior do desidratador e, assim, acelerar o processo de secagem por convecção. Observa-se também parte da cablagem elétrica (fios coloridos) que liga os ventiladores e os sensores ao sistema de aquisição de dados (registado no cartão SD), confirmando a integração entre a parte mecânica/térmica do protótipo e o sistema de monitorização.



Figura 58: Vista interior do protótipo do desidratador solar, com as amostras de banana dispostas na grelha de secagem durante o ensaio.

A Figura 59 ilustra o protótipo completo do desidratador solar híbrido construído com placas de poliestireno (XPS) durante o ensaio experimental em ambiente externo.

Através da imagem, é possível observar os principais subsistemas integrados:

- Coletor solar e câmara de secagem: A estrutura inclinada em placas XPS com cobertura transparente e base escura, projetada para otimizar a captação e o aquecimento do ar por radiação solar.
- Painel fotovoltaico: O painel solar montado na parte superior da estrutura, responsável por fornecer a energia elétrica autónoma necessária para o funcionamento do sistema.
- Sistema eletrónico de aquisição de dados: O circuito de controlo montado sobre a cadeira ao lado do protótipo, integrando o microcontrolador, o módulo de registo (cartão SD) e os sensores que monitorizam o desempenho térmico do equipamento.



Figura 59: Vista geral do protótipo de desidratador solar durante o ensaio experimental, com destaque para a unidade de monitorização e as ligações aos sensores.

A Figura 60 mostra análise visual das fatias de banana após o término do processo de secagem evidencia as alterações físicas características da desidratação por convecção térmica através de energia solar. Observa-se uma redução significativa do volume e da espessura da matéria-prima, acompanhada por uma alteração na coloração (escurecimento superficial) resultante da concentração dos açúcares naturais e da oxidação enzimática controlada.

O produto final apresenta-se com uma textura firme e desidratada de forma homogénea, o que comprova a eficácia do sistema na remoção da água livre contida no interior dos tecidos vegetais, garantindo assim o aumento do tempo de prateleira (*shelf-life*) e a preservação dos nutrientes essenciais sem a necessidade de aditivos químicos.



Figura 60: Aspeto visual das fatias de banana após o processo de desidratação solar.

Monitorização e Controlo

Durante o ensaio, a eletrónica de controlo (baseada em microcontrolador) realizou o registo contínuo dos parâmetros ambientais. Através da implementação de uma rotina de data *logging* (conforme apresentado no código-fonte), o sistema

armazenou dados como temperatura, humidade e o estado dos ventiladores num cartão SD, permitindo a análise posterior da eficiência do processo de secagem.

Observações Preliminares

As observações visuais confirmaram a funcionalidade do sistema. O protótipo demonstrou ser capaz de manter as condições necessárias para o início do processo de desidratação das amostras de banana, verificando-se uma alteração na textura e humidade dos alimentos expostos. A integração do painel solar mostrou-se suficiente para alimentar os componentes eletrónicos e os sistemas de ventilação, validando o conceito de um desidratador autossuficiente e sustentável.

Este teste inicial serviu como prova de conceito, permitindo identificar o comportamento térmico do equipamento e a precisão do sistema de aquisição de dados, estabelecendo as bases para otimizações futuras do projeto.

Análise dos Resultados

As Figuras e tabelas seguintes apresentam os parâmetros ambientais registados pelos sensores do protótipo ao longo do ensaio realizado no dia 06/08/2026, entre as 10h54 e as 19h54 (cerca de 9 horas), com registo de dados a intervalos de 15 minutos.

A Tabela 12 Apresenta um excerto dos dados de temperatura da câmara (Tint) registados durante o ensaio de 06/08/2026, correspondente ao início da série (10h54–12h54) e ao valor final (19h54). Esta tabela tem como objetivo ilustrar o formato e a resolução temporal dos dados recolhidos (intervalos de 15 minutos), sem reproduzir a totalidade dos 37 registos do ensaio. A série completa de dados está representada graficamente na Figura 61 (Gráfico 1) e disponível na íntegra na Tabela 34.

Tabela 12: Temperatura da camara

Hora	Tint (°C)
10:54	49,0
11:09	49,1
11:24	49,5
11:39	50,0
11:54	49,9
12:09	50,1
12:24	50,7
12:39	50,8
12:54	50,8
-	-
19:54	43,8

Na Figura 61 mostra a temperatura no interior da câmara de secagem sobe de forma progressiva de 49,0 °C (10h54) até um máximo de 51,9 °C às 13h54, coerente com o período de maior incidência solar. A partir das 14h00 inicia uma descida constante, mais acentuada a partir das 18h00, terminando em 43,8 °C às 19h54, uma redução de cerca de 8 °C face ao pico, associada à diminuição da radiação solar ao final da tarde.

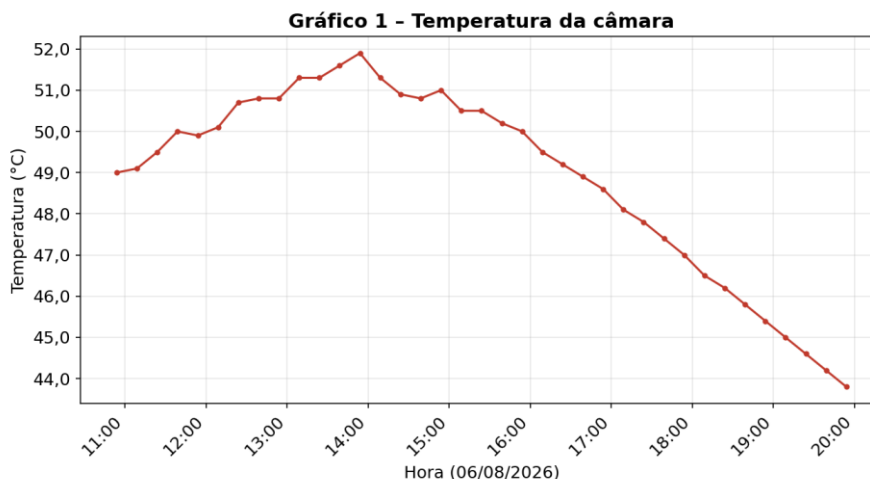


Figura 61: Gráfico da temperatura na câmara de secagem.

Na Tabela 13 Mostra-se aqui apenas uma parte dos dados de temperatura do coletor (Text) registados no ensaio de 06/08/2026, o início (10h54 às 12h54) e o valor final (19h54). A tabela completa está na Tabela 34 e o gráfico com a evolução completa está na Figura 62.

Tabela 13: Temperatura do coletor

Hora	Tint (°C)
10:54	42,2
11:09	42,4
11:24	42,9
11:39	43,1
11:54	43,2
12:09	43,2
12:24	43,3
12:39	43,2
12:54	43,4
-	-
19:54	35,0

A Figura 62 ilustra a temperatura no coletor solar acompanha o mesmo padrão da câmara, mas com valores sistematicamente mais baixos: sobe de 42,2 °C até um máximo de 44,1 °C às 14h39, mantendo-se num patamar entre 42 °C e 44 °C durante praticamente toda a tarde, antes de descer até 35,0 °C às 19h54. O facto de a câmara atingir temperaturas superiores às do coletor é expectável, já que a câmara acumula o calor transferido pelo coletor, funcionando como reservatório térmico.

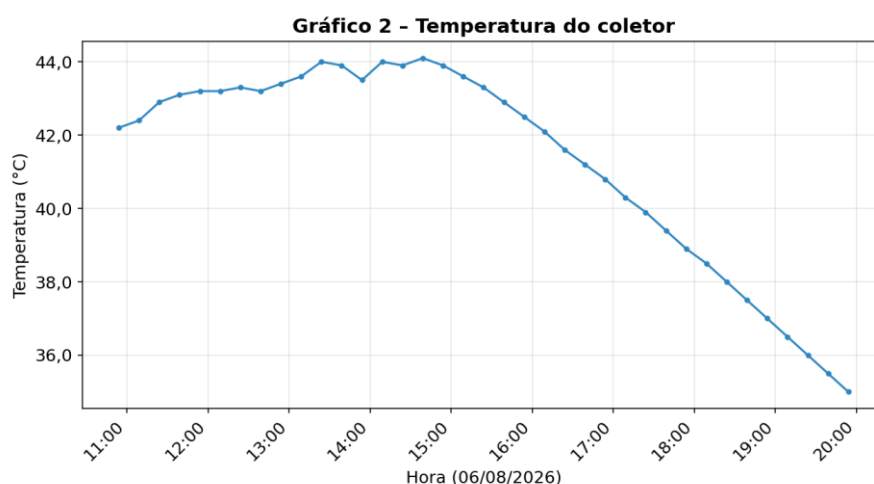


Figura 62: Gráfico da temperatura no coletor solar.

Na Tabela 14 Mostra apenas uma parte dos dados de humidade relativa da câmara (Hrint) registados no ensaio, o início e o valor final (19h54). A tabela completa está na Tabela 34 e o gráfico na Figura 63.

Tabela 14: Humidade relativa da camara de secagem

Hora	Tint (°C)
10:54	15,8
11:09	16,9
11:24	17,1
11:39	17,4
11:54	17,9
12:09	17,8
12:24	18,6
12:39	19,0
10:54	15,8
-	-
19:54	35,5

A Figura 63 mostra a humidade relativa no interior da câmara aumenta de forma contínua ao longo de todo o ensaio, de 15,8% (10h54) para 35,5% (19h54), sem inversão de tendência mesmo durante o período de temperatura mais elevada. Este comportamento sugere que a evaporação da água contida nas rodela de banana introduz vapor de água na câmara a um ritmo superior ao da sua remoção pelo sistema de ventilação, fazendo a humidade acumular-se progressivamente em vez de estabilizar.

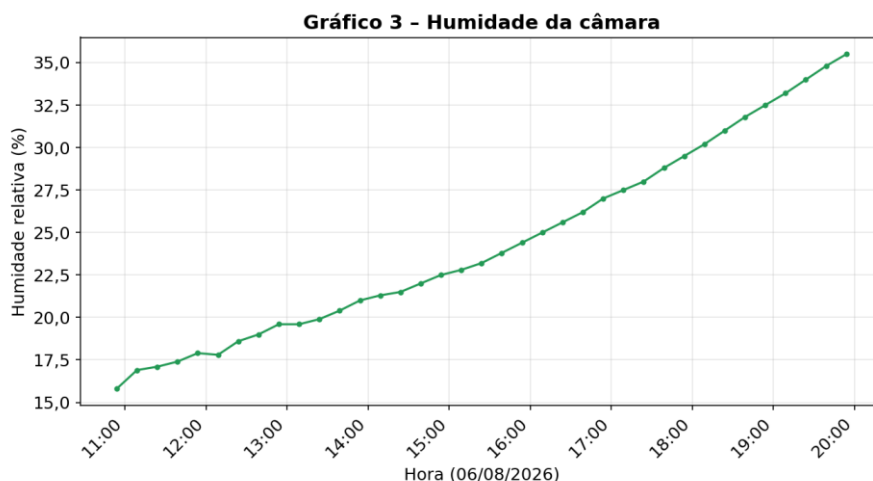


Figura 63: Humidade relativa na câmara de secagem.

A Tabela 15 mostra apenas uma parte dos dados de humidade relativa no coletor (H_{ext}) registados no ensaio, o início e o valor final (19h54). A tabela completa está na Tabela 34 e o gráfico com a evolução completa está na Figura 64.

Tabela 15: Humidade relativa no coletor

Hora	Tint (°C)
0:54	10
11:09	7
11:24	10
11:39	9
11:54	10
12:09	8
12:24	8
12:39	7
12:54	8
-	-
19:54	7

A Figura 64 ilustra a humidade relativa no coletor solar mantém-se baixa e estável durante todo o ensaio, oscilando entre 7% e 10% sem tendência definida, mostrando um comportamento esperado para um espaço fechado e aquecido, com pouca troca de ar húmido. A oscilação ponto a ponto reflete provavelmente a resolução limitada do sensor e não uma variação real do ambiente.

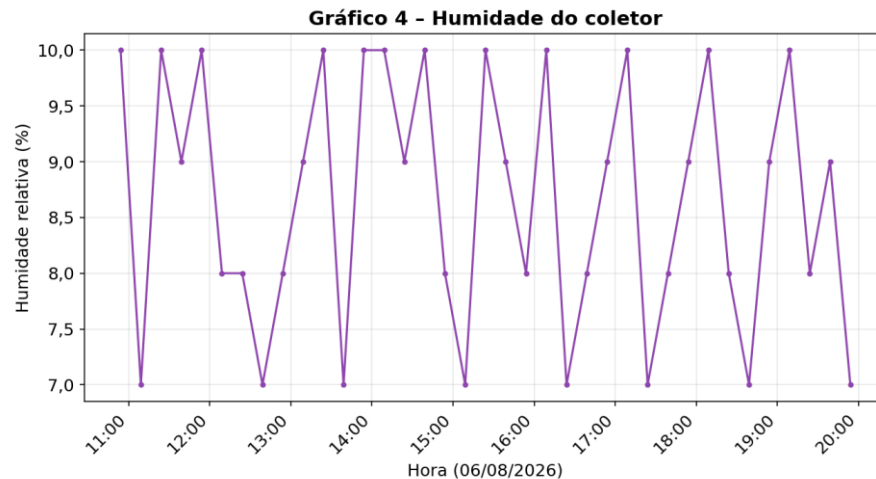


Figura 64: Humidade relativa no coletor solar.

A Tabela 16 mostra apenas uma parte dos registos do estado dos ventiladores durante o ensaio, o início e o valor final (19h54). A tabela completa está na Tabela 34 e o gráfico com a evolução completa está na Figura 65.

Os ventiladores mantiveram-se sempre ligados (ON) em todo este excerto, do início (10h54) até ao fim (19h54).

Tabela 16: Tabela dos ventiladores

Hora	Ventiladores
10:54	ON
11:09	ON
11:24	ON
11:39	ON
11:54	ON
12:09	ON
12:24	ON
12:39	ON
12:54	ON
-	-
19:54	ON

A Figura 65 mostra os ventiladores mantiveram-se ligados (ON) durante a totalidade do ensaio do dia 06/08/2026, mesmo após a luminosidade ter chegado a 0 lux.

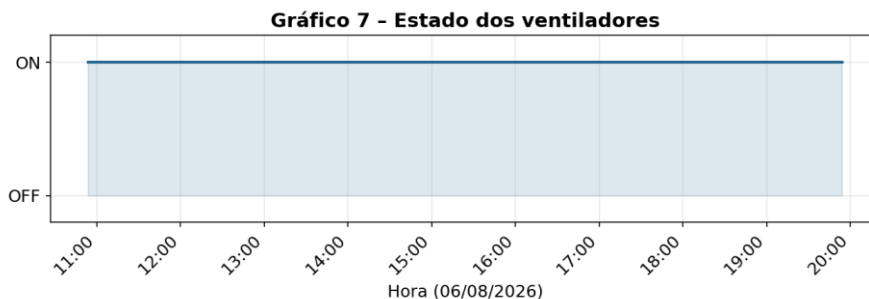


Figura 65: Estado dos ventiladores.

As Figuras e Tabelas seguintes apresentam os parâmetros ambientais registados pelos sensores do protótipo ao longo do ensaio realizado no dia 07/08/2026, entre as 10h54 e as 19h54 (cerca de 9 horas), com registo de dados a intervalos de 15 minutos.

A Figura 66 mostra que a temperatura na câmara sobe de 49,6 °C (10h54) até um máximo de 52,0 °C às 13h54, seguindo praticamente o mesmo perfil do dia anterior. A partir daí desce de forma consistente, mais acentuada depois das 18h00, terminando em 43,9 °C às 19h54.

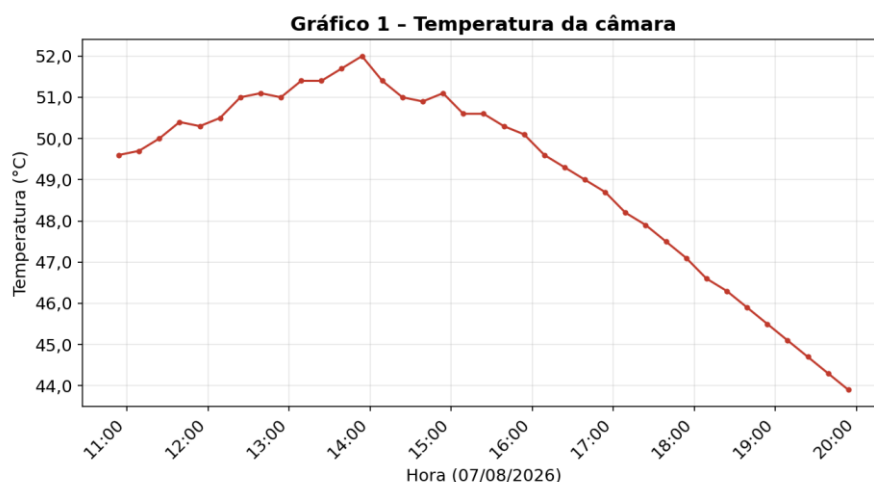


Figura 66: Temperatura da câmara de secagem

A Tabela 17 mostra parte dos dados de temperatura da câmara (Tint) registados no ensaio, do início (10h54) até às 12h54. A tabela completa está na Tabela 35 e o gráfico com a evolução completa está na Figura 66.

Tabela 17: Tabela da temperatura na camara de secagem

Hora	Tint (°C)
10:54	49,6
11:09	49,7
11:24	50,0
11:39	50,4
11:54	50,3
12:09	50,5
12:24	51,0
12:39	51,1
12:54	51,0
-	-
19:54	43,9

Na Figura 67 a temperatura no coletor solar acompanha a câmara, com pico de 42,5 °C às 14h39, ligeiramente inferior ao pico do dia 06 (44,1 °C), e descida até 33,4 °C às 19h54.

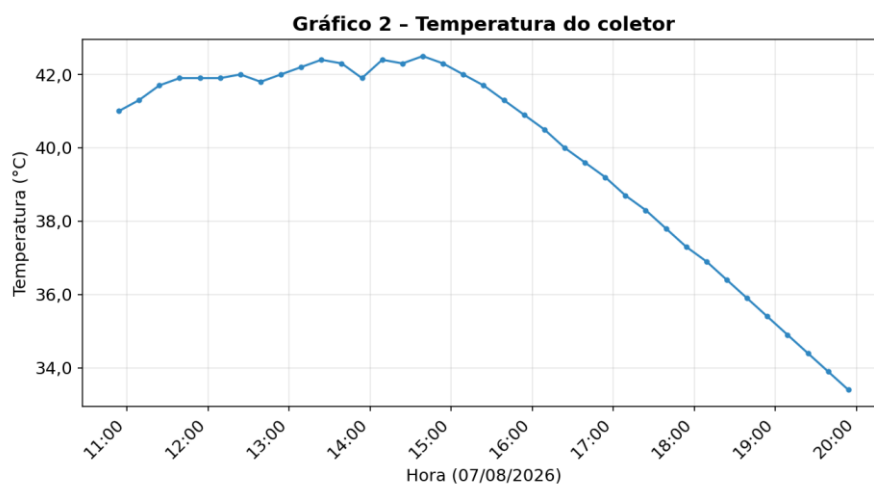


Figura 67: Temperatura do coletor solar.

A Tabela 18 mostra parte dos dados de temperatura do coletor (Text) registados no ensaio, o início (10h54 às 12h54) e o valor final (19h54). A tabela completa está na Tabela 35. O gráfico com a evolução completa está na Figura 67.

Tabela 18: Tabela do coletor solar

Hora	Tint (°C)
10:54	41,0
11:09	41,3
11:24	41,7
11:39	41,9
11:54	41,9
12:09	41,9
12:24	42,0
12:39	41,8
12:54	42,0
-	-
19:54	33,4

A Tabela 19 mostra a parte dos dados de humidade relativa da câmara (Hrint) registados no ensaio, o início (10h54 às 12h54) e o valor final (19h54). A tabela completa está na Tabela 35. O gráfico com a evolução completa está na Figura 68.

Tabela 19: Tabela da humidade relativa da camara de secagem

Hora	Hrint (°C)
10:54	16,6
11:09	17,5
11:24	17,7
11:39	17,9
11:54	18,3
12:09	18,2
12:24	18,8
12:39	19,3
12:54	19,8
-	-
19:54	35,6

Na Figura 68 a humidade relativa na câmara aumenta de forma contínua, de 16,6% (10h54) para 35,6% (19h54), com a mesma tendência monótona já observada no

dia 06, consistente com a acumulação progressiva de vapor de água libertado pelas rodelas de banana ao longo da secagem.

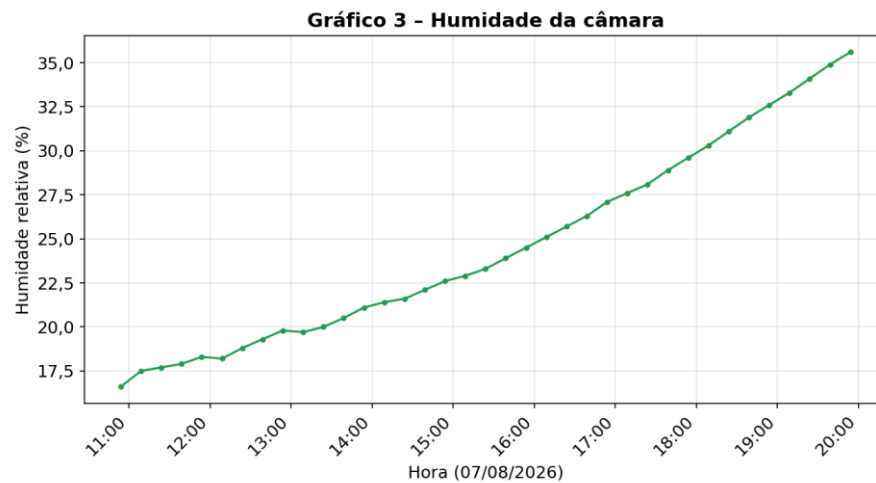


Figura 68: Gráfico da humidade relativa da câmara de secagem.

A Tabela 20 Mostra a parte dos dados de humidade relativa do coletor (H_{rext}) registados no ensaio, o início (10h54 às 12h54) e o valor final (19h54). A tabela completa está na Tabela 35. O gráfico com a evolução completa está na Figura 69.

Tabela 20: Tabela da humidade relativa do coletor

Hora	H _{rext} (°C)
10:54	18,0
11:09	17,9
11:24	18,0
11:39	17,5
11:54	17,5
12:09	17,3
12:24	16,8
12:39	17,4
12:54	17,1
-	-
19:54	12,3

A Figura 69 mostra a humidade relativa no coletor decresce de 18,0% (10h54) para 12,3% (mínimo às 19h39), de forma mais gradual e com tendência descendente mais clara do que no dia 06 (que oscilava entre 7% e 10% sem tendência). O ambiente do coletor tende a secar ao longo do dia.

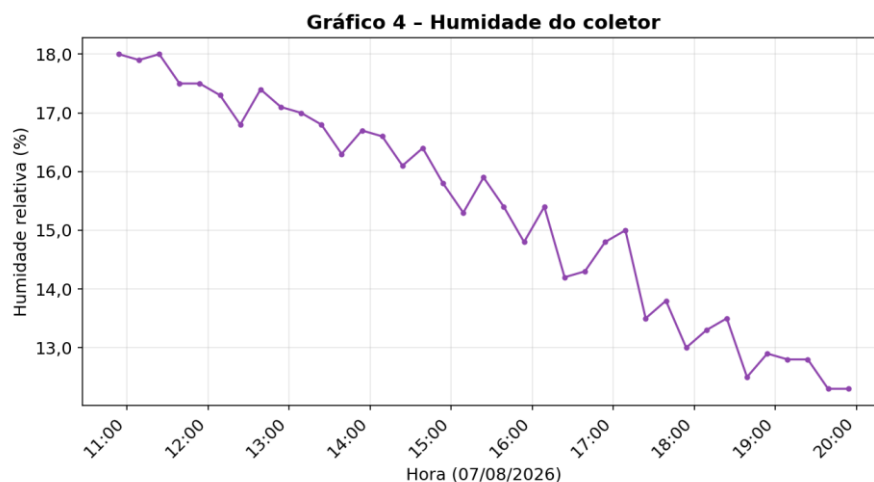


Figura 69: Grafico da humidade relativa do coletor

A Tabela 21 mostra a parte dos registos do estado dos ventiladores durante o ensaio, o início (10h54 às 12h54) e o valor final (19h54). A tabela completa está na Tabela 35. O gráfico com a evolução completa está na Figura 70.

Os ventiladores começam desligados (OFF) porque a humidade exterior era maior que a interior, ligam-se (ON) a partir das 11h39, e mantêm-se ligados até ao fim deste excerto (19h54).

Tabela 21: Tabela dos ventiladores

Hora	Hrext (°C)
10:54	OFF (Hrext > Hrint)
11:09	OFF
11:24	OFF
11:39	ON
11:54	ON
12:09	ON
12:24	ON
12:39	ON
12:54	ON
-	-
19:54	ON

Na Figura 70, ao contrário do dia 06 (ventiladores sempre ON), neste dia o sistema regista o automatismo em ação, os ventiladores começam desligados (10h54 até 11h24, período em que a humidade do coletor é superior à da câmara,

Hrex > Hrint) e ligam-se automaticamente às 11h39, mantendo-se ON até ao fim do ensaio (19h54). Este é o único dos dois dias em que se observa o critério de controlo automático a atuar.

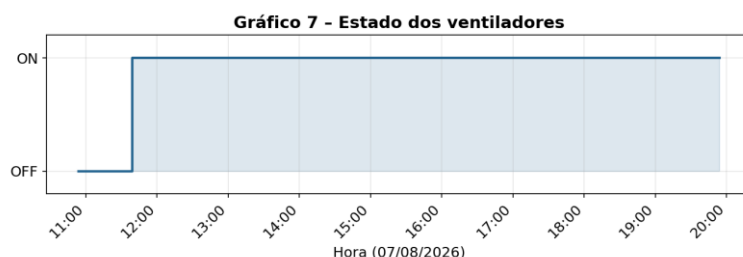


Figura 70: Gráfico do estado dos ventiladores.

Especificações Técnicas dos Componentes

Arduíno Mega 2560:

- Microcontrolador responsável por toda a lógica de controlo do sistema: leitura dos sensores, decisão de acionamento dos ventiladores, atualização do LCD e gravação no cartão SD. Foi escolhido em vez de um Arduíno Uno pela maior quantidade de pinos digitais e de memória, necessária para gerir simultaneamente vários módulos I2C e SPI.

Tabela 22: Arduíno Mega 2560

Componente	Parâmetro	Valor típico
Arduíno Mega 2560	Microcontrolador	ATmega2560
	Tensão de operação	5 V
	Pinos digitais I/O	54 (15 com PWM)
	Memória <i>Flash</i>	256 KB
	<i>Clock</i>	16 MHz

DHT22 Sensor de Temperatura e Humidade da Câmara (Tint / Hrint):

- Instalado no interior da câmara de secagem, mede a temperatura e humidade do ar em contacto direto com as amostras de banana. Comunica por um único fio digital (protocolo proprietário de 1-Wire simplificado), sendo lido a cada 5 segundos pelo Arduíno.

Tabela 23: Do Sensor DHT22 (T/H câmara)

Componente	Parâmetro	Valor típico
DHT22 (T/H câmara)	Gama de temperatura	-40 °C a 80 °C ($\pm 0,5$ °C)
	Gama de humidade	0–100% HR (± 2 –5%)
	Alimentação	3,3–6 V
	Interface	Digital, 1 fio

BME280 Sensor de Temperatura, Humidade e Pressão do Coletor (Text / Htext / Pres):

- Colocado no interior do coletor solar, mede as condições do ar antes de este entrar na câmara, servindo de referência para a decisão de ventilação (comparação Tint vs. Text e Hrint vs. Htext). É também a única fonte de pressão atmosférica do sistema.

Tabela 24: Do sensor BME280 (T/H/P coletor)

Componente	Parâmetro	Valor típico
BME280 (T/H/P coletor)	Gama de temperatura	-40 °C a 85 °C (± 1 °C)
	Gama de humidade	0–100% HR ($\pm 3\%$)
	Gama de pressão	300–1100 hPa (± 1 hPa)
	Alimentação	1,8–3,6 V

BH1750 Sensor de Luminosidade (IL):

- Mede a intensidade de radiação solar incidente em lux, permitindo relacionar o desempenho térmico do sistema com a disponibilidade de luz solar ao longo do dia (e detetar o pôr-do-sol, quando IL 0).

Tabela 25: Do sensor de BH1750 (luminosidade)

Componente	Parâmetro	Valor típico
BH1750 (luminosidade)	Gama de medição	1–65 535 lux
	Resolução	1 lux
	Alimentação	2,4–3,6 V
	Interface	I2C

RTC DS3231 Relógio de Tempo Real:

- Fornece a data e hora exatas para cada registo gravado no cartão SD, garantindo a ordenação cronológica dos dados mesmo que o Arduino seja desligado e religado (mantém a hora via bateria de backup própria).

Tabela 26: Do RTC DS3231

Componente	Parâmetro	Valor típico
RTC DS3231	Precisão	± 2 ppm (≈ 1 min/ano)
	Alimentação	3,3–5,5 V + bateria backup CR2032
	Interface	I2C

LCD 20x4 com módulo I2C (Visor):

- Mostra em tempo real os valores medidos (Tint, Text, pressão, luminosidade) e a hora atual, permitindo monitorização local do ensaio sem necessidade de ligar o Arduino a um computador.

Tabela 27: Do LCD 20x4 (módulo I2C)

Componente	Parâmetro	Valor típico
LCD 20x4 (módulo I2C)	Resolução	20 colunas x 4 linhas
	Alimentação	5 V
	Interface	I2C (endereço 0x27 típico)

Módulo Relé de 2 Canais (Acionamento dos Ventiladores):

- Atua como interruptor eletrónico entre o Arduino (sinal de baixa potência) e os ventiladores (carga de maior potência), permitindo ligar/desligar cada ventilador com um sinal digital simples. O código usa lógica invertida (nível LOW liga o relé).

Tabela 28: Do Módulo Relé 2 canais

Componente	Parâmetro	Valor típico
Módulo Relé 2 canais	Tensão de acionamento	5 V (lógica ativa em LOW)
	Corrente máx. por canal	10 A @ 250 V AC / 10 A @ 30 V DC

Buzzer Ativo 5V (alarme de Segurança)

- Emite um sinal sonoro sempre que a temperatura da câmara ultrapassa os 65 °C, protegendo o equipamento e o produto contra sobreaquecimento.

Tabela 29: Buzzer ativo

Componente	Parâmetro	Valor típico
Buzzer ativo 5V	Tensão de operação	5 V
	Tipo de sinal	Digital (HIGH/LOW)

Módulo MicroSD (SPI Registo de Dados):

- Grava, a cada 15 minutos, uma linha com todos os parâmetros medidos e o estado dos ventiladores num ficheiro .csv nomeado automaticamente com a data do dia, permitindo a análise posterior do ensaio.

Tabela 30: Módulo MicroSD (SPI)

Componente	Parâmetro	Valor típico
Módulo MicroSD (SPI)	Interface	SPI (CS, SCK, MOSI, MISO)
	Tensão	5 V (regulador on-board para 3,3 V)

Painel Solar Fotovoltaico:

- Fornece a energia elétrica para todo o sistema (microcontrolador, sensores, ventiladores), validando o conceito de funcionamento off-grid.

Tabela 31: Painel solar fotovoltaico

Componente	Parâmetro	Valor típico
Painel solar fotovoltaico	Potência nominal	50W (+/- 10%)
	Tensão/corrente	18,2V (V_{mpp}) / 2,75 A (I_{mpp})

Controlador de Carga Solar:

- Regula a energia entregue pelo painel à bateria, protegendo contra sobrecarga e descarga excessiva.

Tabela 32: Controlador de carga solar

Componente	Parâmetro	Valor típico
Controlador de carga solar	Tipo	Controlador de carga solar PWM (modelo Steca Solsun 6,6F)
	Corrente máxima	6A (para sistemas de 12 V ou 24 V)

Bateria:

- Armazena a energia produzida pelo painel para alimentar o sistema fora das horas de maior radiação solar.

Tabela 33: Bateria

Componente	Parâmetro	Valor típico
Bateria	Tecnologia	Bateria de chumbo-ácido selada, livre de manutenção
	Capacidade	7,0 Ah (com taxa de descarga a 20 HR) e tensão nominal de 12 V

Dados Recolhidos no Cartão SD

Listagem dos Dados Recolhidos no Cartão SD Dia (06/08/2026):

A Tabela 34 corresponde à transcrição integral do ficheiro .csv gravado automaticamente pelo sistema de aquisição de dados no cartão MicroSD, ao longo do ensaio realizado no dia 07/08/2026, entre as 10h54 e as 19h54. Cada linha representa uma amostra registada a intervalos de 15 minutos, conforme definido na rotina *gravarDadosNoSD()* do código implementado no Arduino, resultando num total de 37 registos para este dia.

As colunas apresentadas correspondem diretamente às variáveis monitorizadas pelo sistema:

- Timestamp: data e hora do registo, fornecida pelo módulo RTC DS3231, garantindo a ordenação cronológica rigorosa dos dados;
- Tint e Hrint: temperatura e humidade relativa no interior da câmara de secagem, medidas pelo sensor DHT22;
- Text e Hrext: temperatura e humidade relativa no interior do coletor solar, medidas pelo sensor BME280;
- Pres: pressão atmosférica, também obtida através do sensor BME280;
- IL: intensidade luminosa (luminosidade), em lux, medida pelo sensor BH1750;
- Ventiladores, estado do sistema de ventilação forçada (ON/OFF), determinado pela lógica de controlo automático implementada na função *controlarVentiladores()*.

Tabela 34: Listagem dos dados recolhidos no cartão SD

Timestamp	Tint (°C)	Hrint (%)	Text (°C)	Hrext (%)	Pres (hPa)	IL (lux)	Ventiladores
06/08/2026 10:54	49,0	15,8	42,2	10	975,5	49.438	ON
06/08/2026 11:09	49,1	16,9	42,4	7	975,7	48.001	ON
06/08/2026 11:24	49,5	17,1	42,9	10	975,4	46.563	ON
06/08/2026 11:39	50,0	17,4	43,1	9	975,4	45.126	ON
06/08/2026 11:54	49,9	17,9	43,2	10	975,6	43.689	ON
06/08/2026 12:09	50,1	17,8	43,2	8	975,9	42.252	ON
06/08/2026 12:24	50,7	18,6	43,3	8	975,5	40.815	ON
06/08/2026 12:39	50,8	19,0	43,2	7	975,4	39.378	ON
06/08/2026 12:54	50,8	19,6	43,4	8	975,7	37.940	ON
06/08/2026 13:09	51,3	19,6	43,6	9	975,6	36.503	ON
06/08/2026 13:24	51,3	19,9	44,0	10	975,3	35.066	ON
06/08/2026 13:39	51,6	20,4	43,9	7	975,4	33.629	ON
06/08/2026 13:54	51,9	21,0	43,5	10	975,7	32.192	ON
06/08/2026 14:09	51,3	21,3	44,0	10	975,6	30.755	ON
06/08/2026 14:24	50,9	21,5	43,9	9	975,0	29.318	ON
06/08/2026 14:39	50,8	22,0	44,1	10	975,4	27.881	ON
06/08/2026 14:54	51,0	22,5	43,9	8	975,3	26.444	ON
06/08/2026 15:09	50,5	22,8	43,6	7	975,6	25.006	ON
06/08/2026 15:24	50,5	23,2	43,3	10	975,4	23.569	ON
06/08/2026 15:39	50,2	23,8	42,9	9	975,5	22.132	ON
06/08/2026 15:54	50,0	24,4	42,5	8	975,5	20.695	ON
06/08/2026 16:09	49,5	25,0	42,1	10	975,5	19.258	ON

Timestamp	Tint (°C)	Hrint (%)	Text (°C)	Hrext (%)	Pres (hPa)	IL (lux)	Ventiladores
06/08/2026 16:24	49,2	25,6	41,6	7	975,6	17.821	ON
06/08/2026 16:39	48,9	26,2	41,2	8	975,4	16.384	ON
06/08/2026 16:54	48,6	27,0	40,8	9	975,3	14.946	ON
06/08/2026 17:09	48,1	27,5	40,3	10	975,6	13.509	ON
06/08/2026 17:24	47,8	28,0	39,9	7	975,5	12.072	ON
06/08/2026 17:39	47,4	28,8	39,4	8	975,5	10.635	ON
06/08/2026 17:54	47,0	29,5	38,9	9	975,6	9.198	ON
06/08/2026 18:09	46,5	30,2	38,5	10	975,6	7.761	ON
06/08/2026 18:24	46,2	31,0	38,0	8	975,4	6.324	ON
06/08/2026 18:39	45,8	31,8	37,5	7	975,5	4.886	ON
06/08/2026 18:54	45,4	32,5	37,0	9	975,6	3.449	ON
06/08/2026 19:09	45,0	33,2	36,5	10	975,4	2.012	OFF
06/08/2026 19:24	44,6	34,0	36,0	8	975,5	575	OFF
06/08/2026 19:39	44,2	34,8	35,5	9	975,6	0	OFF
06/08/2026 19:54	43,8	35,5	35,0	7	975,4	0	OFF
06/08/2026 11:09	49,1	16,9	42,4	7	975,7	48.001	ON
06/08/2026 11:24	49,5	17,1	42,9	10	975,4	46.563	ON

Listagem dos Dados Recolhidos no Cartão SD Dia (07/08/2026):

Tabela 35: Amostragem horária do ensaio (06/08/2026)

Timestamp	Tint (°C)	Hrint (%)	Text (°C)	Hrex (%)	Pres (hPa)	IL (lux)	Ventiladores
07/08/2026 10:54	49,6	16,6	41,0	18,0	976,1	49.438	OFF
07/08/2026 11:09	49,7	17,5	41,3	17,9	976,1	48.001	OFF
07/08/2026 11:24	50,0	17,7	41,7	18,0	976,1	46.563	OFF
07/08/2026 11:39	50,4	17,9	41,9	17,5	976,1	45.126	ON
07/08/2026 11:54	50,3	18,3	41,9	17,5	975,9	43.689	ON
07/08/2026 12:09	50,5	18,2	41,9	17,3	976,0	42.252	ON
07/08/2026 12:24	51,0	18,8	42,0	16,8	976,1	40.815	ON
07/08/2026 12:39	51,1	19,3	41,8	17,4	975,9	39.378	ON
07/08/2026 12:54	51,0	19,8	42,0	17,1	976,4	37.940	ON
07/08/2026 13:09	51,4	19,7	42,2	17,0	976,1	36.503	ON
07/08/2026 13:24	51,4	20,0	42,4	16,8	975,8	35.066	ON
07/08/2026 13:39	51,7	20,5	42,3	16,3	975,9	33.629	ON
07/08/2026 13:54	52,0	21,1	41,9	16,7	976,2	32.192	ON
07/08/2026 14:09	51,4	21,4	42,4	16,6	976,1	30.755	ON
07/08/2026 14:24	51,0	21,6	42,3	16,1	975,5	29.318	ON
07/08/2026 14:39	50,9	22,1	42,5	16,4	975,9	27.881	ON
07/08/2026 14:54	51,1	22,6	42,3	15,8	975,8	26.444	ON
07/08/2026 15:09	50,6	22,9	42,0	15,3	976,1	25.006	ON
07/08/2026 15:24	50,6	23,3	41,7	15,9	975,9	23.569	ON
07/08/2026 15:39	50,3	23,9	41,3	15,4	976,0	22.132	ON
07/08/2026 15:54	50,1	24,5	40,9	14,8	976,0	20.695	ON
07/08/2026 16:09	49,6	25,1	40,5	15,4	976,0	19.258	ON

Timestamp	Tint (°C)	Hrint (%)	Text (°C)	Hrext (%)	Pres (hPa)	IL (lux)	Ventiladores
07/08/2026 16:24	49,3	25,7	40,0	14,2	976,1	17.821	ON
07/08/2026 16:39	49,0	26,3	39,6	14,3	975,9	16.384	ON
07/08/2026 16:54	48,7	27,1	39,2	14,8	975,8	14.946	ON
07/08/2026 17:09	48,2	27,6	38,7	15,0	976,1	13.509	ON
07/08/2026 17:24	47,9	28,1	38,3	13,5	976,0	12.072	ON
07/08/2026 17:39	47,5	28,9	37,8	13,8	976,2	10.634	ON
07/08/2026 17:54	47,1	29,6	37,3	13,0	976,0	9.197	ON
07/08/2026 18:09	46,6	30,3	36,9	13,3	976,3	7.760	ON
07/08/2026 18:24	46,3	31,1	36,4	13,5	975,9	6.323	ON
07/08/2026 18:39	45,9	31,9	35,9	12,5	976,5	4.886	ON
07/08/2026 18:54	45,5	32,6	35,4	12,9	976,1	3.449	ON
07/08/2026 19:09	45,1	33,3	34,9	12,8	975,8	2.012	ON
07/08/2026 19:24	44,7	34,1	34,4	12,8	975,8	574	ON
07/08/2026 19:39	44,3	34,9	33,9	12,3	976,1	0	ON
07/08/2026 19:54	43,9	35,6	33,4	12,3	976,0	0	ON
07/08/2026 10:54	49,6	16,6	41,0	18,0	976,1	49.438	OFF (Hrext > Hrint)
07/08/2026 11:09	49,7	17,5	41,3	17,9	976,1	48.001	OFF
07/08/2026 11:24	50,0	17,7	41,7	18,0	976,1	46.563	OFF

Aplicação das Equações 23, 26 e 29

Para validação experimental do balanço de massa e energia apresentado na secção teórica, procedeu-se à pesagem de 20 rodela de banana antes e após o ensaio de desidratação nos dias (06/08/2026 e 07/08/2026). As pesagens foram realizadas com recurso a uma balança digital de precisão (resolução de 0,01 g), imediatamente antes da colocação das rodela na câmara de secagem ($t = 0$ h) e imediatamente após o final do ensaio ($t = 4$ h), de forma a garantir que os valores

registados correspondem exclusivamente ao período de exposição às condições de secagem.

A massa de sólidos foi considerada constante ao longo do processo (conforme pressuposto da equação (23), tendo sido estimada a partir da composição típica da banana fresca [referência bibliográfica a incluir]. A massa de água inicial e a massa final foram obtidas diretamente por pesagem, permitindo o cálculo dos restantes parâmetros por aplicação das equações apresentadas na secção teórica.

A Figura 71 mostra que as rodela de banana foram pesadas com recurso a uma balança digital de cozinha (modelo SilverCrest), com capacidade máxima de 10 000 g e resolução de 1 g. A pesagem foi realizada com as rodela dispostas sobre um prato, tendo a tara da balança sido previamente ajustada de modo a descontar o peso do prato antes do registo da massa das amostras.



Figura 71: Pesagem das rodela de banana frescas antes do ensaio de desidratação (06/08/2026)

A Figura 72 mostra a massa final das rodela de banana, após o processo de desidratação, foi determinada com o mesmo procedimento e equipamento utilizados na pesagem inicial (balança digital *SilverCrest*, com tara ajustada para o prato).



Figura 72: Pesagem das rodela de banana desidratadas, após o ensaio de secagem (07/08/2026).

Tabela 36: Valores medidos e calculados por rodela e para o total das 20 rodela

Parâmetro	Por rodela (kg)	Total 20 rodela (kg)
Massa de água inicial	0,00199	0,0398
Massa de sólidos	0,00066	0,0133
Massa final	0,00075	0,0150

Equação (Balanço de massa inicial):

$$m_{\text{inicial}} = m_{\text{água (inicial)}} + m_{\text{sólidos}} = 0,0398 + 0,0133 = 0,0530 \text{ kg} \quad (36)$$

Equação (Água removida):

$$m_{\text{água(removida)}} = m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}} = 0,0530 - 0,0150 = 0,0380 \text{ kg} \quad (37)$$

Equação (Água removida por rodela):

$$m_{\text{água(removida),rodela}} = \frac{m_{\text{água(removida)}}}{n_{\text{rodela}}} = \frac{0,0380}{20} = 0,0019 \text{ kg} \quad (38)$$

Equação (Energia necessária para a evaporação):

O calor latente de vaporização da água, h_{fg} representa a quantidade de energia necessária para converter uma unidade de massa de água líquida em vapor, sem

alteração de temperatura. Esta grandeza não é constante, sendo função da temperatura (e, por consequência, da pressão de saturação) à qual a mudança de fase ocorre: quanto menor a temperatura de evaporação, maior a energia necessária para vencer as forças intermoleculares que mantêm a água no estado líquido.

O valor de referência mais frequentemente citado na literatura $h_{fg} \approx 2257 \text{ kJ/kg}$, corresponde à vaporização da água à pressão atmosférica padrão e à sua temperatura de ebulição (100 °C). Este valor não é diretamente aplicável ao processo em análise, uma vez que a evaporação da água contida nas amostras de banana ocorre a uma temperatura substancialmente inferior, a temperatura média registada na câmara de secagem ao longo do ensaio foi de aproximadamente 48 a 49 °C.

Recorrendo às tabelas de propriedades termodinâmicas da água saturada, o valor de literatura h_{fg} correspondente a esta gama de temperaturas é de aproximadamente 2386 kJ/kg. É este o valor adotado nos cálculos seguintes, por representar de forma mais rigorosa as condições térmicas reais em que ocorre o processo de secagem, evitando a subestimação da energia efetivamente necessária ao processo.

Então:

$$Q_{\text{rodela}} = m \cdot h_{fg} = 0,0019 \times 2386 \approx 4,53 \text{ kJ} \quad (39)$$

Por 20 rodela:

$$Q_{(20\text{rodela})} = m \cdot h_{fg} = 0,0380 \times 2386 \approx 90,67 \text{ kJ} \approx 0,0252 \text{ kWh} \quad (40)$$

Análise dos Resultados (Balanço de Massa e Energia)

Os resultados obtidos através da aplicação das equações 23, 26 e 29 permitem quantificar, pela primeira vez neste trabalho, o processo de desidratação em termos de massa e energia, complementando a análise puramente visual apresentada anteriormente.

Em termos de balanço de massa, cada rodela de banana perdeu 1,90 g de água num total inicial de 2,65 g, o que corresponde a uma redução de massa de 71,7%. Ao nível do lote completo (20 rodela), isto traduziu-se na remoção de 0,038 kg de água, de um total inicial de 0,053 kg de produto fresco, resultando numa massa final de 0,015 kg. Este resultado confirma, de forma objetiva, que o desidratador retirou uma quantidade significativa de água às amostras durante o período de ensaio.

Relativamente à humidade relativa do produto, partindo de uma composição inicial típica da banana ($\approx 75,0\%$ de água e $\approx 25,0\%$ de sólidos, valor de referência da literatura, uma vez que o teor de sólidos não foi determinado de forma independente para este lote), a humidade final calculada situa-se em aproximadamente 11,7%, valor já abaixo do intervalo de referência habitualmente citado para conservação

segura de fruta desidratada (15–20%). Este resultado sugere que, para este conjunto de amostras, o processo de secagem terá avançado de forma satisfatória, ainda que a fiabilidade deste valor dependa da validade da composição inicial assumida, uma vez que não foi realizada uma medição direta e independente da massa de sólidos deste lote específico. Ainda assim, mantém-se válida a observação visual anteriormente descrita, as amostras apresentavam coloração mais escura e textura aparentemente mais seca na superfície, comportamento compatível com um eventual efeito de endurecimento superficial (*case hardening*), no qual a camada externa seca mais rapidamente do que o núcleo da fatia, podendo mascarar diferenças de humidade residual entre o exterior e o interior do produto que este cálculo global, por si só, não permite captar.

Do ponto de vista energético, foi necessário fornecer aproximadamente 90,67 kJ ($\approx 0,0252$ kWh) para evaporar a água removida do lote completo de 20 rodela, com base no calor latente de vaporização corrigido para a temperatura média de funcionamento da câmara (≈ 48 a 49 °C). Este valor representa a energia térmica mínima teoricamente necessária para o processo, não contabilizando perdas térmicas do sistema, a energia sensível necessária para aquecer o produto até à temperatura de secagem, nem ineficiências do processo de transferência de calor e massa entre o ar e as amostras, pelo que a energia solar efetivamente incidente sobre o coletor ao longo do ensaio terá sido necessariamente superior a este valor.

Em suma, os resultados quantitativos confirmam que o protótipo é tecnicamente capaz de remover água das amostras de forma consistente com os princípios teóricos de secagem solar, tendo-se alcançado, para este lote, uma redução de humidade compatível com os valores de referência para conservação. Importa, contudo, assinalar que a estimativa da humidade final depende de uma composição de referência da literatura, e não de uma medição direta do teor de sólidos deste lote, o que constitui uma limitação da presente análise. Recomenda-se, em ensaios futuros, a determinação experimental do teor de sólidos (por exemplo, através de secagem em estufa até massa constante) de forma a validar de modo independente os valores de humidade aqui estimados.

7. Conclusões e Trabalhos Futuros

Conclusões

O desenvolvimento e a implementação do protótipo de desidratador solar híbrido possibilitaram validar com sucesso os princípios teóricos e práticos estudados ao longo do curso de Engenharia de Energias Renováveis. Através dos ensaios experimentais realizados nos dias 06 e 07/08/2026 (cerca de 9 horas de registo por dia, entre as 10h54 e as 19h54), foi possível retirar as seguintes conclusões principais:

Validação do Desempenho Térmico:

- Os testes práticos demonstraram que o coletor solar em placas de poliestireno (XPS), aliado à câmara de secagem isolada, retém o calor eficientemente e eleva a temperatura da câmara acima da do coletor de forma consistente nos dois dias de ensaio (em média 7,6 °C a 9,3 °C acima), confirmando que a câmara funciona como reservatório térmico e cria as condições necessárias para iniciar o processo de desidratação de produtos alimentares, como demonstrado nas amostras de banana.

Autonomia e Controlo Eletrónico:

- A integração do microcontrolador (Arduíno) com o painel fotovoltaico garantiu a operação contínua do sistema de ventilação forçada e dos circuitos de medição durante as cerca de 18 horas de ensaio registadas ao longo dos dois dias, validando o conceito de solução *off-grid*. Note-se, no entanto, que os ensaios cobriram apenas o período diurno; a autonomia energética durante a noite ou em dias de fraca radiação solar, bem como a duração máxima de funcionamento contínuo do conjunto painel-bateria, não foram avaliadas e deverão ser confirmadas em ensaios de maior duração.

Fiabilidade da Aquisição de Dados:

- O sistema de *data logging* desenvolvido e implementado mostrou-se robusto, registando de forma contínua e autónoma parâmetros críticos, temperatura, humidade, pressão, luminosidade e estado dos ventiladores, diretamente num cartão SD em formato .csv, a intervalos de 15 minutos, o que facilitou a análise rigorosa do comportamento do protótipo ao longo dos dois dias de ensaio. A listagem completa dos valores recolhidos no cartão SD é apresentada em Anexo (Tabelas 1 a 7, dias 06 e 07/08/2026).

Sustentabilidade e Viabilidade:

- O protótipo foi construído com materiais de custo reduzido e amplamente disponíveis (como o XPS e a estrutura de suporte em ferro), apresentando-se como uma alternativa potencialmente sustentável para a conservação de alimentos em zonas isoladas ou com recursos limitados. Uma quantificação formal dos custos de construção não foi realizada neste trabalho, ficando reservada para a análise económica proposta nos Trabalhos Futuros.

Trabalhos Futuros

Apesar dos resultados promissores alcançados com o protótipo atual, o projeto abre portas para várias melhorias e otimizações futuras que poderão ser desenvolvidas em investigações posteriores:

Otimização do Algoritmo de Controlo:

- Implementar um controlo PID ou lógica difusa (*fuzzy logic*) no microcontrolador para ajustar automaticamente a velocidade dos ventiladores com base na humidade relativa interna, maximizando a eficiência de secagem.

Validação à Capacidade Real:

- Os ensaios realizados utilizaram apenas uma pequena fração da capacidade máxima teórica de desidratação calculada para o protótipo, e cobriram somente o período diurno de dois dias. Trabalhos futuros devem repetir o ensaio com a carga total de produto e por períodos mais prolongados (incluindo ciclos completos de secagem de vários dias), de modo a validar o desempenho do sistema à escala real e a autonomia do conjunto de alimentação elétrica.

Integração de Armazenamento de Energia:

- Adicionar um sistema de baterias de acumuladores mais robusto para assegurar a recolha de dados e a ventilação mesmo durante períodos noturnos ou de reduzida radiação solar prolongada.

Análise Económica e de Ciclo de Vida (ACV):

- Realizar um estudo detalhado sobre os custos de fabrico e materiais utilizados, a durabilidade dos materiais de isolamento (XPS) e o impacto ambiental global da solução proposta.

- 122

- [16] M. W. Rey, Geometría solar para arquitectos: movimiento solar y herramientas de diseño, Lima (Peru): Editorial Universitaria, 2014.
- [17] P. J. Fellows, Food Processing Technology: Principles and Practice, 3ª edição ed., Cambridge, Reino Unido: Woodhead Publishing, 2009.
- [18] A. S. Mujumdar, Handbook of Industrial Drying, 4ª edição ed., Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [19] D. R. Heldman e R. P. Singh, Introduction to Food Engineering, 5ª edição ed., Londres, Reino Unido: Academic Press, 2013.
- [20] J. Crank, The Mathematics of Diffusion, Oxford, Reino Unido: Oxford University Press, 1975.
- [21] C. J. Geankoplis, Transport Processes and Separation Process Principles, New Jersey, EUA: Prentice Hall, 2003.
- [22] V. D. Belessiotis, Drying of Foods, Oxford, Reino Unido: Eolss Publishers, 2011.
- [23] O. R. Fennema, Food Chemistry, 3ª edição ed., Nova Iorque, EUA: Marcel Dekker, 1996.
- [24] C. Ratti, Hot Air and Freeze, vol. 49, Journal of Food Engineering, 2001.
- [25] J. A. DUFFIE e W. A. BECKMAN, Solar Engineering of Thermal Processes, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [26] F. E. P. C. V. C. W. Regina Isabel Nogueira, Manual para Construção de um Desidratador, Rio de Janeiro, 2015.
- [27] F. E. P. Carnejo, Construa Você Desidratador de Alimentos, Rio de Janeiro, 2018.
- [28] A. FUDHOLI, Solar Drying Technology: Concept, Design, Testing, Modeling, Economics, and Environment., Singapore: Springer Nature, 2020.
- [29] J. TWIDELL e T. WEIR, Renewable Energy Resources, London: Routledge, 2015.
- [30] G. M. Masters, Renewable and Efficient Electric Power, Wiley, 2013.

ANEXOS

ANEXO I

Ficha Técnica do Microcontrolador Arduino Mega 2560

Arduino® MEGA 2560 Rev3

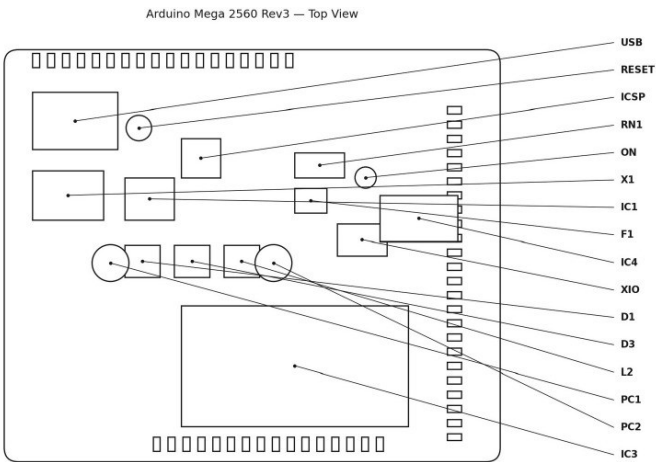
2 Ratings

2.1 Recommended Operating Conditions

Symbol	Description	Min	Typ	Max	Unit
VIN	Input voltage from VIN pad / DC Jack	7	7.0	12	V
VUSB	Input voltage from USB connector	4.8	5.0	5.5	V
TOP	Operating Temperature	-40	25	85	°C

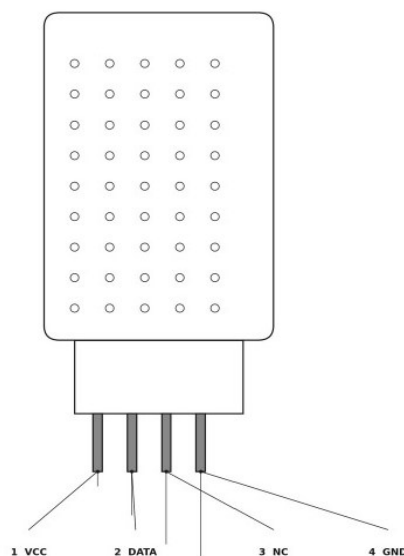
3 Functional Overview

3.2 Board Topology



ANEXO II

Ficha Técnica do Sensor de Temperatura e Humidade DHT22

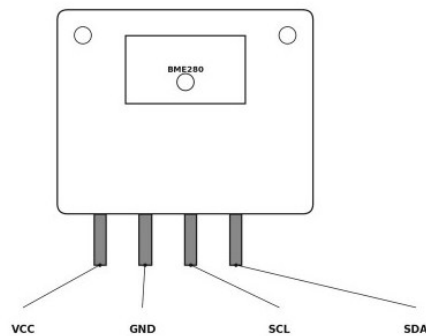


Especificações Elétricas

Parâmetro	Valor
Tensão de alimentação	3,3 – 6 V DC
Gama de temperatura	-40 °C a +80 °C ($\pm 0,5$ °C)
Gama de humidade relativa	0 – 100 % HR ($\pm 2 - 5$ %)
Resolução	0,1 °C / 0,1 % HR
Interface	Digital, protocolo próprio de 1 fio (single-wire)
Frequência de amostragem	$\leq 0,5$ Hz (1 leitura a cada 2 s)
Pinos	1 VCC · 2 DATA · 3 NC (não utilizado) · 4 GND

ANEXO III

Ficha Técnica do Sensor BME280



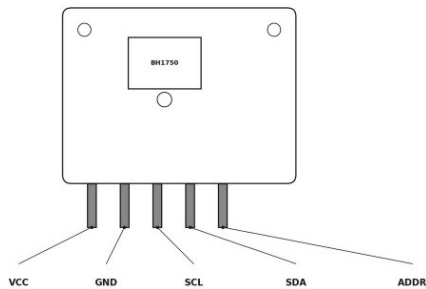
Especificações Elétricas

Parâmetro	Valor
Alimentação	1,8 – 5 V DC (módulo com regulador integrado)
Gama de temperatura	-40 °C a +85 °C ($\pm 1,0$ °C)
Gama de humidade relativa	0 – 100 % HR (± 3 %)
Gama de pressão atmosférica	300 – 1100 hPa (± 1 hPa)
Interface	I2C / SPI
Endereços I2C possíveis	0x76 ou 0x77
Consumo em modo ativo	$\approx 3,6$ μ A (1 Hz, humidade e temperatura)
Pinos (módulo I2C)	VCC · GND · SCL · SDA

Dados técnicos: datasheet Bosch Sensortec BME280. Desenho: esquema ilustrativo original com base na disposição física típica do módulo de rutura (breakout) I2C.

ANEXO IV

Ficha Técnica do Sensor BH1750



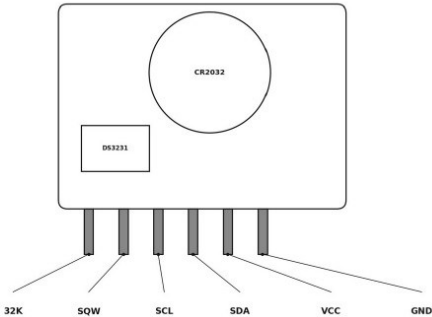
Especificações Elétricas

Parâmetro	Valor
Alimentação	3 – 5 V DC
Gama de medição	1 – 65535 lux
Resolução	1 lux
Interface	I2C
Endereços I2C possíveis	0x23 (ADDR = GND/flutuante) ou 0x5C (ADDR = VCC)
Resistência à luz infravermelha	Elevada (resposta espectral próxima da visão humana)
Pinos	VCC · GND · SCL · SDA · ADDR

Dados técnicos: datasheet ROHM BH1750FVI. Desenho: esquema ilustrativo original com base na disposição física típica do módulo de rutura (breakout) GY-30.

ANEXO V

Ficha Técnica do Módulo RTC DS3231



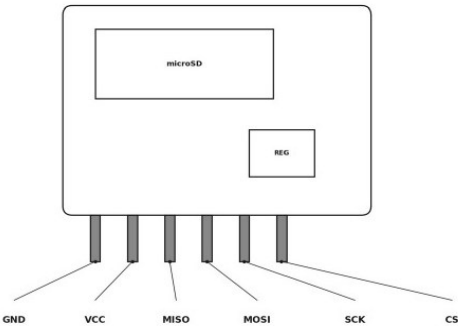
Especificações Elétricas

Parâmetro	Valor
Alimentação	3,3 – 5 V DC
Precisão	±2 ppm (0 °C a 40 °C), equivalente a ≈ 1 min/ano
Interface	I2C (endereço 0x68)
Cristal	Integrado, compensado em temperatura (TCXO)
Alimentação de reserva	Pilha CR2032 (mantém a hora sem alimentação principal)
Saídas adicionais	SQW (onda quadrada programável) · 32K (saída de 32,768 kHz)
Pinos	32K · SQW · SCL · SDA · VCC · GND

Dados técnicos: datasheet Maxim Integrated / Analog Devices DS3231. Desenho: esquema ilustrativo original com base na disposição física típica do módulo de rutura (breakout) com suporte de pilha CR2032.

ANEXO VI

Ficha Técnica do Leitor/Escritor de Cartão microSD



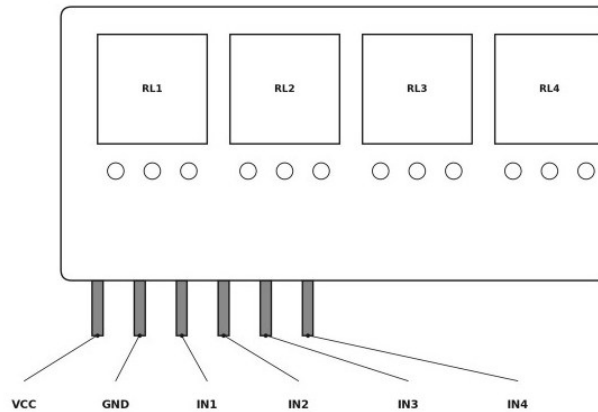
Especificações Elétricas

Parâmetro	Valor
Alimentação	5 V DC (com regulador on-board para 3,3 V do cartão)
Interface	SPI
Cartões suportados	microSD / microSDHC (FAT16/FAT32)
Pino CS utilizado (Mega 2560)	Pino digital 53
Pinos	GND · VCC · MISO · MOSI · SCK · CS

Dados técnicos: especificações genéricas de módulo shield microSD para Arduino. Desenho: esquema ilustrativo original com base na disposição física típica do módulo.

ANEXO VII

Ficha Técnica do Módulo de Relé de 4 Canais



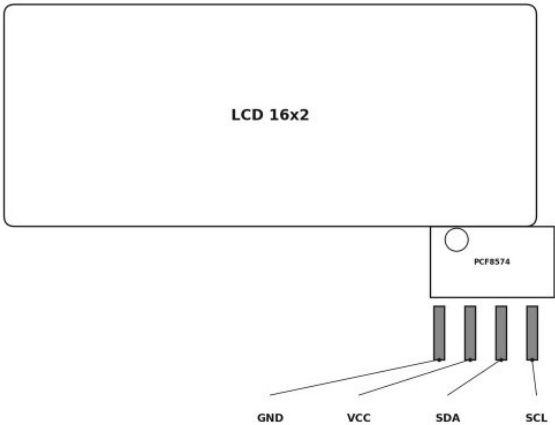
Especificações Elétricas

Parâmetro	Valor
Tensão de controlo	5 V DC (nível lógico do Arduino)
Tensão/corrente máx. de comutação	250 V AC / 10 A ou 30 V DC / 10 A por canal
Isolamento	Opto-acoplador entre o circuito de controlo e o de potência
Número de canais	4 (2 utilizados neste projeto — IN3/IN4)
Lógica de acionamento	Ativo a nível baixo (LOW liga, HIGH desliga)
Pinos de controlo	VCC · GND · IN1 · IN2 · IN3 · IN4
Pinos de potência (por canal)	NO (normalmente aberto) · COM (comum) · NC (normalmente fechado)

Dados técnicos: especificações genéricas de módulo de relé de 4 canais compatível com Arduino. Desenho: esquema ilustrativo original com base na disposição física típica do módulo.

ANEXO VIII

Ficha Técnica do Display LCD I2C 20x4



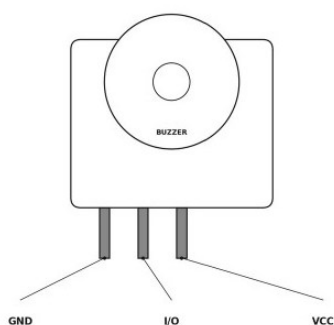
Especificações Elétricas

Parâmetro	Valor
Alimentação	5 V DC
Resolução	16 caracteres × 2 linhas
Interface	I2C (via módulo adaptador PCF8574), endereço 0x27
Retroiluminação	LED azul, contraste ajustável por potenciômetro
Controlador	HD44780 (compatível)
Pinos (módulo I2C)	GND · VCC · SDA · SCL

Dados técnicos: especificações genéricas de display LCD 16x2 com interface I2C (controlador HD44780, adaptador PCF8574). Desenho: esquema ilustrativo original com base na disposição física típica do módulo.

ANEXO IX

Ficha Técnica do Módulo Buzzer Ativo

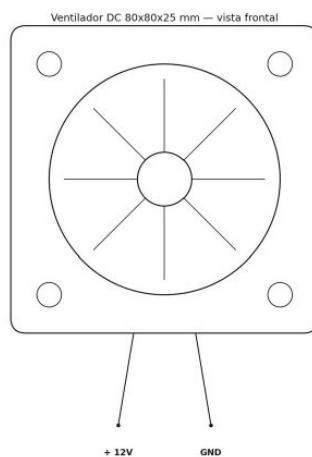


Especificações Elétricas

Parâmetro	Valor
Alimentação	3,5 – 5,5 V DC
Tipo	Buzzer ativo (oscilador interno; ativa-se com nível lógico HIGH)

ANEXO X

Ficha Técnica do Ventilador DC



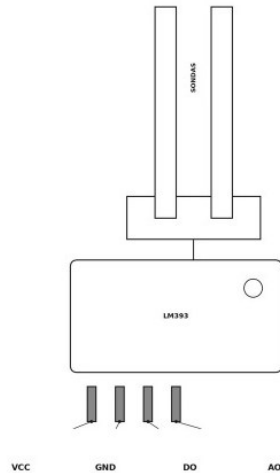
Especificações Elétricas

Parâmetro	Valor
Tensão nominal	12 V DC
Corrente nominal	≈ 0,2 A
Potência	≈ 2,6 W
Rolamento	Sleeve bearing
Quantidade utilizada	2 unidades
Acionamento no sistema	Via módulo de relé (canais IN3/IN4)
Pinos	+12 V · GND

Dados técnicos: datasheet Sunon KDE1208PTS1 (série equivalente). Desenho: esquema ilustrativo original com base na disposição física típica de uma ventoinha DC 80x80x25 mm.

ANEXO XI

Ficha Técnica de Sensor de Humidade do Solo



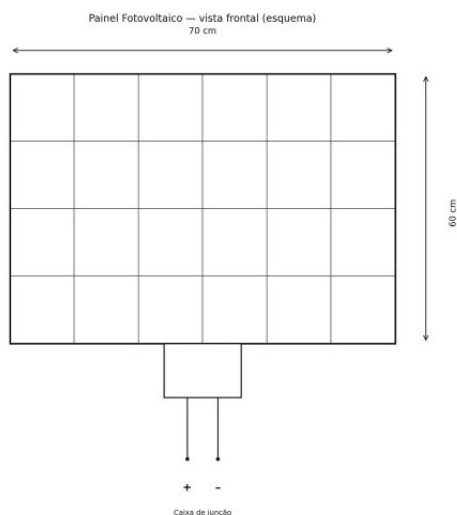
Especificações Elétricas

Parâmetro	Valor
Alimentação	3,3 – 5 V DC
Saída	Analógica (AO, proporcional à humidade) e digital (DO, via LM393, com limiar ajustável)
Princípio de funcionamento	Medição da resistência elétrica entre as duas sondas, variável com o teor de humidade
Função no sistema	Monitorização complementar (referência de humidade em suporte/solo, quando aplicável)
Pinos	VCC · GND · DO · AO

Dados técnicos: especificações genéricas de módulo sensor de humidade do solo (higrómetro resistivo, comparador LM393). Desenho: esquema ilustrativo original com base na disposição física típica do módulo.

ANEXO XII

Ficha Técnica do painel fotovoltaico



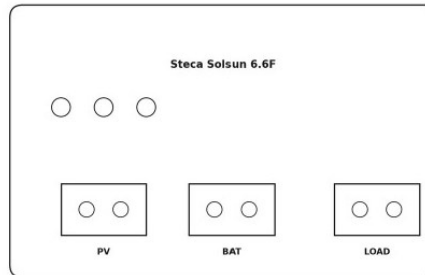
Especificações

Parâmetro	Valor
Dimensões (esquema)	≈ 60 × 70 cm
Função no sistema	Alimentação do sistema eletrónico de aquisição de dados e controlo, através do controlador de carga e da bateria
Ligação	Ao controlador de carga Steca Solsun 6.6F (entrada PV)

Nota: valores de potência/tensão nominal a confirmar junto da ficha técnica específica do painel utilizado. Desenho: esquema ilustrativo original, dimensões conforme utilizadas no protótipo.

ANEXO XIII

Ficha Técnica do controlador de carga steca solsun 6.6f



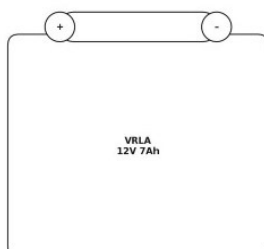
Especificações Elétricas

Parâmetro	Valor
Tipo de regulação	PWM (Pulse Width Modulation)
Corrente máxima	6 A
Tensão do sistema	12 / 24 V (autodeteção)
Proteções	Sobrecarga, curto-circuito, polaridade inversa, descarga profunda
Função no sistema	Regulação da carga da bateria de 12 V a partir do painel fotovoltaico, protegendo-a de sobrecarga e descarga excessiva
Terminais	PV (entrada painel) · BAT (bateria) · LOAD (saída/carga)

Dados técnicos: datasheet Steca Solsun 6.6F. Desenho: esquema ilustrativo original com base na disposição física típica do controlador.

ANEXO XIV

Ficha Técnica da bateria vrla



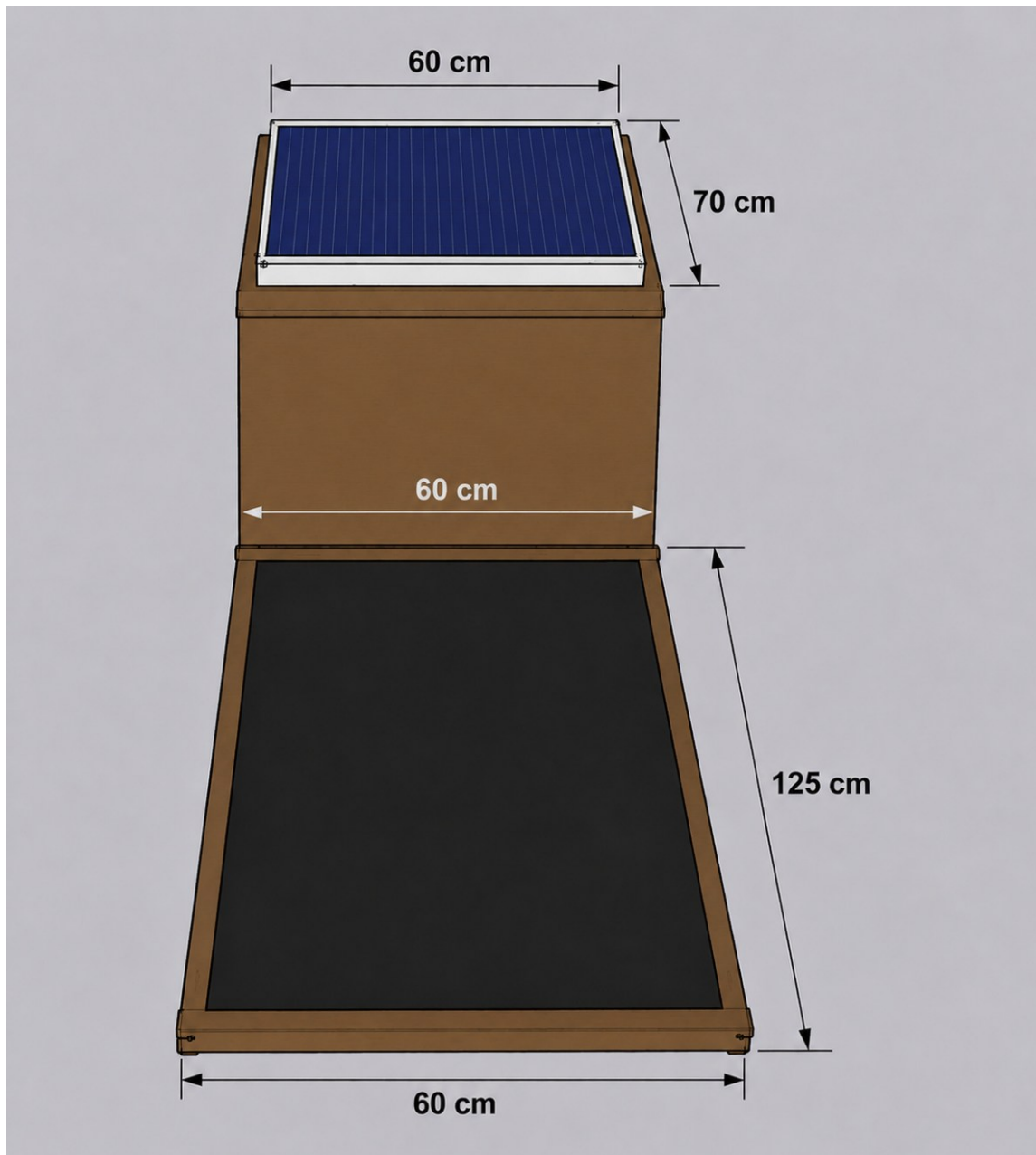
Especificações Elétricas

Parâmetro	Valor
Tecnologia	Chumbo-ácido regulada por válvula (VRLA), selada
Tensão nominal	12 V
Capacidade nominal	7 Ah
Função no sistema	Armazenamento de energia proveniente do painel fotovoltaico, garantindo a alimentação contínua do sistema de monitorização e controlo
Terminais	+ (positivo) · - (negativo)

Dados técnicos: especificações genéricas de bateria VRLA 12 V 7 Ah. Desenho: esquema ilustrativo original com base na disposição física típica deste tipo de bateria.

ANEXO XV

Esquema dimensional do protótipo



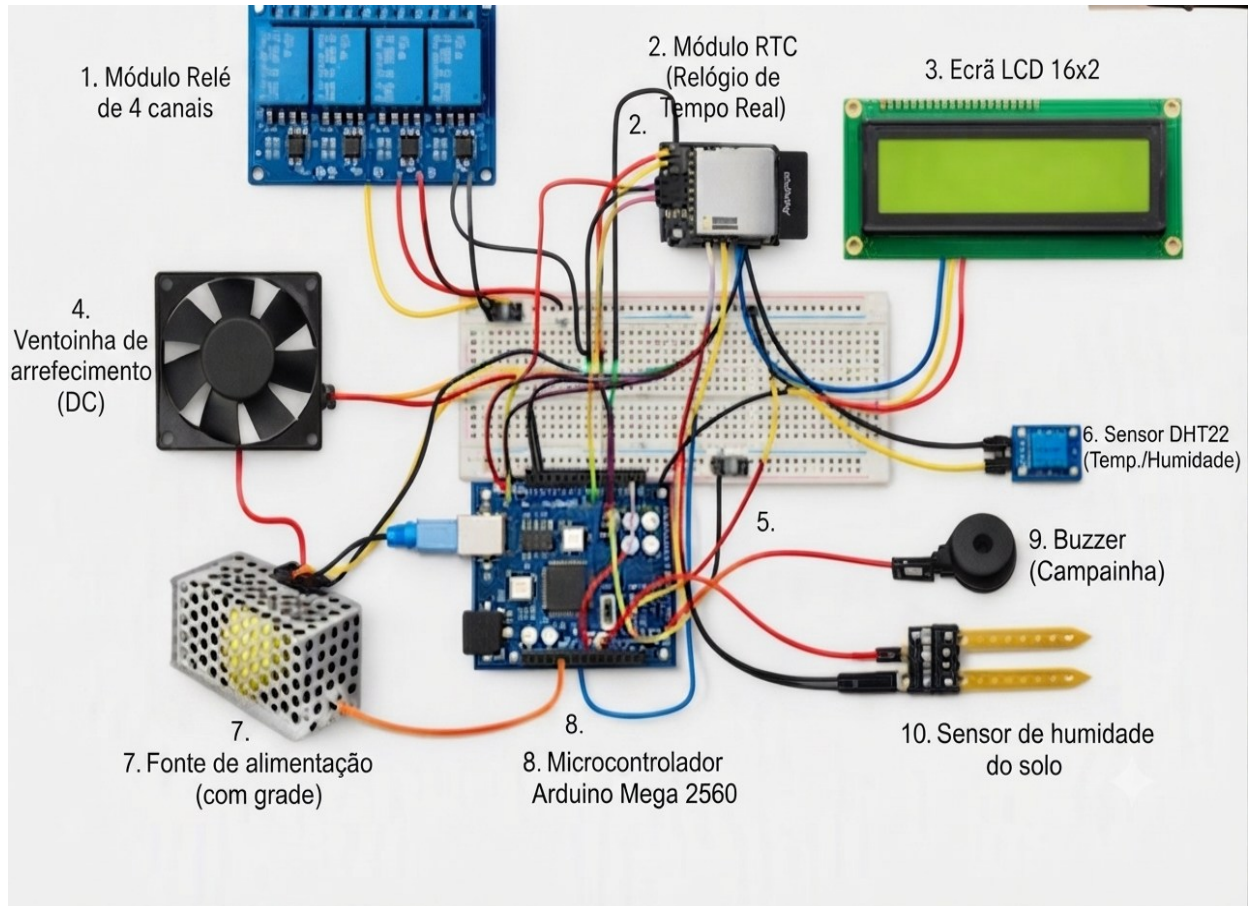
ANEXO XVI

Fotografia do ensaio no exterior



ANEXO XVI

Fotografia da Montagem física do Sistema Eletrónico



ANEXO XVII

Fotografia da Montagem física do Sistema Eletrónico

