



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Faculdade de Engenharia

Desenvolvimento de uma unidade experimental para o estudo do processo de secagem solar

Daniel Filipe Mateus Parente

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Dinho da Silva
Co-orientador: Prof. Doutor Luís Carlos Carvalho Pires

Departamento de Engenharia Eletromecânica
Universidade da Beira Interior
Covilhã, Portugal

Covilhã, outubro de 2016

Agradecimentos

A dissertação de mestrado encerra uma fase de conhecimento com duração de 5 anos. Ao longo deste período, o mérito é meu e de algumas pessoas que a mim estão conectadas. Para além de um agradecimento pessoal e constante, sinto a necessidade de transmitir-lhes algumas palavras de apreço. Posto isto, a minha gratidão direciona-se:

Ao meu orientador, Professor Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva, pela transmissão do seu conhecimento, pelo auxílio na tomada de decisões e pela sugestão de algumas correções ao longo da dissertação. Ao meu co-orientador, Professor Doutor Luís Carlos Carvalho Pires, pela disponibilidade para qualquer tipo de esclarecimento.

Ao Professor Doutor José Nunes e à Inês Lourenço, professor e aluna da ESACB, pela ajuda na realização dos ensaios experimentais de secagem.

Aos meus Pais, a quem tenho de agradecer no presente documento e em todos os momentos da minha vida, pela educação e esforço que realizaram para que eu conseguisse esta proeza. Ao meu irmão pelo carinho demonstrado ao longo destes anos.

Ao Sr. João Correia, técnico do laboratório de Transmissão de Calor, e ao Sr. Miguel Alves, carpinteiro de profissão, pelas sugestões e auxílio na construção do protótipo experimental.

Ao Tiago Grilo, pela excelente capacidade de trabalho em equipa, pela amizade ganha, pelos momentos de descontração e, porque sem ele, o estudo realizado teria sido muito mais complicado.

À minha namorada e amiga Lara, pelo apoio, estímulo e paciência, e por, apesar da distância, sempre se mostrar presente.

Aos meus amigos, Rui Miranda, Narciso Lopes, Diogo Carrilho, João Almeida, Christopher delgado e Anthony Calado, quer pelos bons momentos de convivência que proporcionaram, quer pelo auxílio em algumas fases do trabalho.

A todos os amigos, familiares e professores que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Muito OBRIGADO!

Resumo

A água contida nos alimentos permite a proliferação de micro-organismos e/ou o desenvolvimento de reações químicas que os prejudicam. A remoção da humidade, através da secagem, previne o crescimento e reprodução desses micro-organismos, que causam apodrecimento, e minimiza muitas das reações de deterioração, revelando-se por isso, um método crucial de conservação. Sendo Portugal um país com enorme potencial de exploração da energia solar, a implementação de um sistema de secagem baseado nesta fonte renovável, enfrentando os dispositivos com altos consumos energéticos e daí mais dispendiosos, é aliciante. Com isto, surge o presente trabalho, com o intuito de, através da construção de um modelo de secagem sustentável, avaliar o seu desempenho, para que se possa revelar como uma boa solução. Após a construção do equipamento, caracterizado por possuir uma unidade coletora de altura variável de 5, 10 e 15 cm, entre a cobertura e a placa absorvedora, seguiu-se o estudo comportamental do aparelho. Nesse sentido, conduziram-se ensaios com diferentes padrões. Primeiramente, efetuaram-se ensaios de caracterização do secador vazio, estudando as temperaturas e humidades relativas no interior da câmara de secagem. Estudou-se ainda a influência das várias alturas do coletor e do modo de funcionamento, sob convecção natural e forçada, nos mesmos parâmetros. A unidade desenvolvida foi posteriormente utilizada na secagem de cereja. O primeiro ensaio de secagem, permitiu a secagem de 15 kg de cereja em 124 horas. O segundo com 25 kg de carregamento realizou-se sob condições adversas, tendo apresentado mais 25 horas de tempo de secagem face ao primeiro. Os resultados dos estudos realizados indicam fortes potencialidades do mecanismo de secagem proposto, com capacidade de alcançar temperaturas no interior da câmara de secagem de 55 °C, coincidindo com uma intensidade de radiação de 918 W/m², e uma temperatura e humidade relativa ambiente, de 31,7 °C e 28%, respetivamente.

Palavras-chave

Secagem solar, cereja, secador solar indireto, coletor solar variável.

Abstract

The water contained in foods allows the proliferation of micro-organisms and/or the development of chemical reactions which damage her. The removal of moisture by drying, prevents the growth and reproduction of these microorganisms, which cause rotting, and minimizes many of the reactions of deterioration from moisture, revealing itself a crucial preservation method. Portugal is a country with great potential for exploitation of solar energy, the implementation of a drying system based on this renewable source, facing devices with high energy consumption and hence more expensive, is attractive. With this, the present work emerges, in order to, by building a sustainable drying model, evaluate their performance, so that can be a good solution. After construction of the equipment, characterized by possessing a collecting unit of variable height of 5, 10 and 15 cm, between the cover and the absorber plate, followed the behavioral study of the device. In this sense, was conducted perform tests with different patterns. First, was done characterization tests with the dryer unload, studying the temperatures and relative humidity inside the drying chamber. The influence of various heights of collector and operation modes, under natural and forced convection, to evaluate the same parameters, was studied. The developed unit was subsequently used in cherry drying. The first drying test, allowed to dry 15 kg cherry in 124 hours. The second with 25 kg was carried out under adverse conditions, therefore presented an additional drying time of 25 hours from the first. The results of the studies realized indicate great potential of the drying mechanism proposed, capable of reaching temperatures of 55°C inside the drying chamber, for a temperature and humidity environment of 31,7 °C and 28%, respectively, and an intensity of radiation of 918 W/m².

Keywords

Solar drying, cherry, indirect Solar dryer, variable solar collector.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice	ix
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas	xvii
Nomenclatura.....	xix
1. Introdução	1
1.1. Perspetiva geral.....	1
1.2. O problema em estudo e a sua relevância	3
1.3. Revisão bibliográfica	4
1.3.1. Processo de secagem e secadores.....	5
1.3.2. Estudos comparativos	5
1.3.3. Estudos envolvendo secadores indiretos e mistos	8
1.3.4. Aspectos construtivos dos secadores.....	13
1.4. Objetivos e contribuição da dissertação	16
1.5. Visão geral e organização da dissertação	16
2. Fundamentos teóricos	19
2.1. Radiação solar.....	19
2.2. Classificação dos sistemas de secagem solar	21
2.2.1. Secadores passivos	21
2.2.2. Secadores ativos.....	22
2.2.3. Secadores diretos	23
2.2.4. Secadores indiretos	23
2.2.5. Secadores mistos	24
2.2.6. Secadores híbridos	24
2.3. Tipos de Coletores Solares	25
2.3.1. Descobertos	26
2.3.2. Cobertos	26
2.4. Fatores influentes no desempenho do coletor	28

2.4.1.	Orientação e inclinação	29
2.4.2.	Cobertura	30
2.4.3.	Placa absorvedora.....	31
2.4.4.	Perdas térmicas nos coletores	31
2.4.5.	Chaminé	32
2.5.	Mecanismos de transferência de calor	33
2.5.1.	Condução	33
2.5.2.	Convecção	34
2.5.3.	Radiação	35
2.6.	Secagem Solar	36
2.6.1.	Curvas de secagem.....	36
2.6.2.	Atividade da água (a_w)	39
2.6.3.	Temperaturas preferenciais.....	39
2.7.	Nota conclusiva	40
3.	Protótipo experimental.....	41
3.1.	Introdução	41
3.2.	Construção do Secador Solar	41
3.2.1.	Estrutura de apoio	43
3.2.2.	Coletor solar	44
3.2.3.	União do coletor com a câmara de secagem	51
3.2.4.	Câmara de Secagem	53
3.2.5.	Saída de ar	55
3.3.	Instrumentação	58
3.3.1.	Estação meteorológica	59
3.3.2.	Anemómetro	60
3.3.3.	Data-loggers e termopares	60
3.3.4.	Balança digital.....	62
3.3.5.	Analisador de humidade	63
3.4.	Nota conclusiva	64
4.	Análise e discussão de resultados	65
4.1.	Procedimento experimental	65
4.2.	Ensaio realizados	68
4.2.1.	Avaliação da temperatura e humidade relativa em função da posição na câmara de secagem	68

4.2.2. Avaliação da temperatura e humidade relativa em função da altura de caixa-de-ar do coletor	74
4.2.3. Avaliação da temperatura e humidade relativa em função do tipo de convecção	80
4.2.4. Secagem solar de cereja sem pré-tratamento sob condições climáticas favoráveis	90
4.2.5. Secagem solar de cereja com pré-tratamento sob condições climáticas adversas	102
4.3. Nota conclusiva	111
5. Conclusão	115
5.1. Recapitulação	115
5.2. Sugestão para trabalho futuro	118
Referências bibliográficas	119

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Soma anual da radiação incidente numa superfície com uma inclinação otimizada e orientada a sul nos países europeus em 2012 (PVGIS, 2016).	3
Figura 2.1 - Razão entre a radiação incidente na Terra e a que atinge a superfície terrestre (Morais, 2009).....	20
Figura 2.2 - Variação diária e valor total de irradiação em 4 dias do ano (Portal-Energia, 2004).	20
Figura 2.3 - Classificação de modelos de secadores solares (adaptado de Ekechukwu e Norton, 1999a).....	22
Figura 2.4 - Secador solar indireto utilizado no estudo de Mohanraj e Chandrasekar (2009). ...	24
Figura 2.5 - Secador misto utilizado no estudo de Martins et al. (2010).....	25
Figura 2.6 - Coletor descoberto (adaptado de Ekechukwu e Norton, 1999b).	26
Figura 2.7 - Coletor de fluxo superior (adaptado de Ekechukwu e Norton, 1999b).	27
Figura 2.8 - Coletor de fluxo inferior (adaptado de Ekechukwu e Norton, 1999b).	27
Figura 2.9 - Coletores de placa suspensa: a) paralelos; b) passagem dupla (adaptado de Ekechukwu e Norton, 1999b).	28
Figura 2.10 - Coletor de placa perfurada (adaptado de Ekechukwu e Norton, 1999b).	28
Figura 2.11 - Variação da inclinação do coletor ao longo do ano para as coordenadas da UBI (PVGIS, 2016).	29
Figura 2.12 - Inclinação ótima do coletor nos países da Europa para funcionamento anual (PVGIS, 2016)	30
Figura 2.13 - Representação das perdas num coletor (adaptado de Agbo e Okoroigwe, 2007)..	32
Figura 2.14 - Espectro eletromagnético (adaptado de NASA, 2016).	36
Figura 2.15 - Curvas de secagem (adaptado de Park et al., 2014).....	37
Figura 2.16 - Isotermas de sorção (Belessiotis e Delyannis, 2011).	39
Figura 3.1 - Esquematização do CAD 3D do secador solar e respetivas dimensões gerais.	42
Figura 3.2 - Elementos desagregáveis do secador.	43
Figura 3.3 - Pormenor da fixação da base plana à estrutura metálica.	44
Figura 3.4 - Determinação das coordenadas geográficas do secador solar (adaptado de PVGIS, 2016).	45
Figura 3.5 - Encaixes do coletor para variação da altura: a) separados b) encaixados.	46
Figura 3.6 - Esquematização do sistema de encaixe.	47
Figura 3.7 - Pormenor da moldura para acomodar o vidro e ainda das cantoneiras de aço.	48
Figura 3.8 - Esquematização da forma de colocação do isolamento e contacto deste com a placa absorvedora.	49
Figura 3.9 - Coletor com a altura de caixa-de-ar de 5 cm.	50
Figura 3.10 - Coletor com a altura de caixa-de-ar de 10 cm.	50

Figura 3.11 - Coletor com a altura de caixa-de-ar de 15 cm.	50
Figura 3.12 - Vista lateral da união do coletor com a câmara de secagem.	51
Figura 3.13 - Pormenor do interior da união, com destaque para a cavidade destinada ao encaixe da câmara.	52
Figura 3.14 - Representação CAD dos tampos para as alturas de caixa-de-ar: a) 15 cm; b) 10 cm; c) 5 cm.	52
Figura 3.15 - Sistema de encaixe da câmara de secagem em CAD.....	53
Figura 3.16 - Vista interior da câmara de secagem.....	54
Figura 3.17 - Pormenor do processo de união da rede com a cantoneira através de soldadura por pontos (à esquerda) e do tabuleiro posicionado na câmara de secagem (à direita).	55
Figura 3.18 - Pormenor da construção do afunilamento do ar após união das placas triangulares.	55
Figura 3.19 - Chaminés do secador solar com a válvula de borboleta à esquerda e o ventilador à direita: a) vista frontal; b) vista superior.	56
Figura 3.20 - Ligação entre o ventilador e a fonte de computador.....	57
Figura 3.21 - Secador solar após a conclusão da construção.....	58
Figura 3.22 - Localização do secador.	58
Figura 3.23 - Estação meteorológica Davis Wireless Vantage Pro 2 do edifício das Engenharias da UBI.	59
Figura 3.24 - Anemómetro de turbina TESTO 416.....	60
Figura 3.25 - Data Logger USB LASCAR eletronic.....	61
Figura 3.26 - Termopar tipo T colocado à entrada da chaminé.	61
Figura 3.27 - Termopares tipo T para medição da temperatura no interior e na superfície da cereja.	62
Figura 3.28 - Balança digita Ohaus.	62
Figura 3.29 - Pesagem da cereja na rede de alumínio maleável.	63
Figura 3.30 - Analisador de humidade Ohaus MB35 com ampliação do visor.....	63
Figura 4.1 - Organograma dos ensaios realizados.	65
Figura 4.2 - Diferentes alturas e respetiva identificação dos tabuleiros.	66
Figura 4.3 - Disposição e identificação dos data-loggers (DL1, DL2, DL3, DL4, DL5 e DL6) quando utilizados 2 tabuleiros.....	67
Figura 4.4 - Disposição e identificação dos data-loggers (DL1, DL2, DL3, DL4 e DL5) quando utilizados 5 tabuleiros.....	67
Figura 4.5 - DL6 à saída do coletor quando usados 5 tabuleiros na câmara de secagem.	67
Figura 4.6 - Variação da radiação incidente e da temperatura ambiente ao longo das 24 horas de ensaio.	69
Figura 4.7 - Variação da radiação solar incidente e humidade relativa ambiente ao longo das 24 horas de ensaio.	69

Figura 4.8 - Temperatura ambiente (T_{amb}) e HR ambiente (H_{amb}), e temperatura no DL2 e DL5 (TDL2 e TDL5) e HR no DL2 e DL5 (HDL2 e HDL5), correspondendo aos data-loggers da posição central de cada tabuleiro.....	71
Figura 4.9 - Variação da temperatura no DL1, DL2 e DL3, posicionados no tabuleiro inferior. .	72
Figura 4.10 - Variação da temperatura no DL1, DL2 e DL3, posicionados no tabuleiro inferior.	73
Figura 4.11 - Temperatura média nos dois tabuleiros utilizados ao longo do ensaio.	73
Figura 4.12 - Humidade relativa média nos dois tabuleiros ao longo do ensaio.	74
Figura 4.13 - Radiação incidente durante os ensaios de 5 e 10 cm para o mesmo intervalo de tempo.	75
Figura 4.14 - Temperaturas ambiente para os ensaios com 5, 10 e 15 cm de altura de caixa-de-ar.....	76
Figura 4.15 - Humidade relativa ambiente para os ensaios com 5, 10 e 15 cm de altura do coletor.	76
Figura 4.16 - Temperatura média no interior (T_{int}) do secador e no exterior do secador (T_{amb}) com 5, 10 e 15 cm de altura do coletor.....	78
Figura 4.17 - Variação da humidade relativa média no interior e no exterior do secador com 5, 10 e 15 cm de altura do coletor.	79
Figura 4.18 - Radiação solar incidente durante os ensaios em CN e CF para a altura de 15 cm no coletor.	81
Figura 4.19 - Variação da temperatura exterior e interior do secador para o ensaio com convecção natural (CN) e forçada (CF) para altura do coletor de 15 cm.	81
Figura 4.20 - Variação da humidade relativa exterior e interior do secador para o ensaio com convecção natural e forçada para altura do coletor de 15 cm.	82
Figura 4.21 - Radiação solar incidente durante os ensaios em CN e CF para a altura de 10 cm no coletor.	83
Figura 4.22 - Variação da temperatura exterior e interior do secador para o ensaio sob convecção natural e forçada para altura do coletor de 10 cm.	84
Figura 4.23 - Variação da humidade relativa exterior e interior do secador para o ensaio com convecção natural e forçada para altura do coletor de 10 cm.	85
Figura 4.24 - Radiação solar incidente durante os ensaios em CN e CF para a altura de 5 cm no coletor.	86
Figura 4.25 - Variação da temperatura exterior e interior do secador para o ensaio com convecção natural e forçada para altura do coletor de 5 cm.....	86
Figura 4.26 - Variação da humidade relativa exterior e interior do secador para o ensaio com convecção natural e forçada para altura do coletor de 5 cm.	87
Figura 4.27 - Variação da temperatura e humidade ambiente e temperatura e humidade no interior do secador sob convecção natural.	89

Figura 4.28 - Variação da temperatura e humidade ambiente, e temperatura e humidade no interior do secador sob convecção forçada.	90
Figura 4.29 - Variação da intensidade de radiação solar ao longo dos seis dias de ensaio do 1º processo de secagem.	92
Figura 4.30 - Variação da temperatura ambiente ao longo do período diurno dos seis dias do processo de secagem.	93
Figura 4.31 - Variação da humidade ambiente ao longo do período diurno dos seis dias do processo de secagem.	94
Figura 4.32 - Temperatura média no interior do secador ao longo dos 6 dias de secagem.	95
Figura 4.33 - Humidade relativa média no interior do secador ao longo dos 6 dias de secagem.	96
Figura 4.34 - Variação da temperatura e humidade ambiente, e temperatura e humidade no interior do secador para a 1ª noite.	98
Figura 4.35 - Variação da temperatura e humidade ambiente, e temperatura e humidade no interior do secador para a 2ª noite.	98
Figura 4.36 - Variação da temperatura e humidade ambiente, e temperatura e humidade no interior do secador para a 3ª noite.	99
Figura 4.37 - Variação da temperatura e humidade ambiente, e temperatura e humidade no interior do secador para a 4ª noite.	100
Figura 4.38 - Amostra colocada no tabuleiro superior, correspondente a P4, e disposição dos data-loggers no tabuleiro.	101
Figura 4.39 - Curvas da taxa de secagem para as amostras de cereja do 1º processo de secagem.	102
Figura 4.40 - Intensidade de radiação solar ao longo de cada dia do 2º processo de secagem.	104
Figura 4.41 - Variação das temperaturas exteriores durante o período diurno para cada dia do processo de secagem.	105
Figura 4.42 - Variação das humidades relativas exteriores durante o período diurno para cada dia do processo de secagem.	106
Figura 4.43 - Temperatura à saída do coletor e no interior da câmara de secagem ao longo dos 8 dias de secagem.	107
Figura 4.44 - Pormenor da tubagem de saída de ar: a) ligação com a chaminé do ventilador b) saída para o exterior.	108
Figura 4.45 - Humidade relativa à saída do coletor e no interior da câmara de secagem ao longo dos 8 dias de secagem.	109
Figura 4.46 - Curvas da taxa de secagem para as amostras de cereja do 2º processo de secagem.	111

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Aspectos construtivos de secadores presentes na literatura.	15
Tabela 3.1 - Volume e área de secção do coletor em função da altura da caixa-de-ar.....	49
Tabela 3.2 - Características do ventilador axial Papst 4212.	57
Tabela 4.1 - Comparação de resultados de temperatura e humidade relativa no interior do secador com as do exterior em função do tipo de convecção, tendo em conta a radiação incidente.	88
Tabela 4.2 - Velocidade do ar exterior média, máxima e mínima para cada dia da secagem. ..	95

Nomenclatura

Simbologia:

a	Altura da câmara de secagem (m)
a_w	Atividade da água
c	Comprimento da câmara de secagem (m)
CF	Convecção forçada
CN	Convecção natural
Hamb	Humidade relativa ambiente (%)
Hint	Humidade relativa no interior da câmara de secagem (%)
p	Profundidade da câmara de secagem (m)
pH	Potencial de hidrogénio
Rad	Intensidade de radiação solar fornecida pela estação meteorológica (W/m^2)
Tamb	Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)
Tint	Temperatura no interior da câmara de secagem ($^{\circ}C$)

Acrónimos:

AC	Antes de Cristo
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
HR	Humidade Relativa
JRC	<i>Joint Research Centre</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
PCM	<i>Phase change materials</i>
PVC	Policloreto de Vinilo
PVGIS	<i>Photovoltaic Geographical Information System</i>
UBI	Universidade da Beira Interior
UV	Ultravioleta

1. Introdução

Ao longo deste primeiro capítulo será apresentada uma panorâmica geral sobre a secagem. Apresentam-se todas as adversidades envolventes ao processo, bem como a importância do estudo da viabilidade de novas soluções. Para tal é demonstrado o potencial da secagem solar, em função da radiação solar disponível, nomeadamente em Portugal. Ainda nesta secção será apresentada e descrita alguma da revisão bibliográfica realizada, que enriqueceu o conhecimento sobre a temática, e se revelou como imprescindível no auxílio da definição dos objetivos, que são também apresentados aqui. Por fim, é sintetizada toda a estrutura da presente dissertação.

1.1. Perspetiva geral

No presente, por forma a estabelecer um equilíbrio entre a produção e o consumo de produtos alimentícios, surge a necessidade da sua conservação. Existem atualmente diversas técnicas de preservação: refrigeração, tratamento químico, embalagem em atmosfera controlada, congelação, salga, secagem, defumação, entre outros (Sharma et al., 1995).

A água contida nos alimentos permite a proliferação de micro-organismos e/ou o desenvolvimento de reações químicas que os prejudicam. A remoção da humidade, através da secagem, previne o crescimento e reprodução desses micro-organismos, que causam apodrecimento, e minimiza muitas das reações de deterioração, revelando-se por isso, um método crucial de conservação (Umogbai e Iorter, 2013).

De todos os métodos de secagem referidos, a secagem é provavelmente dos métodos mais antigos. Já os primórdios do homem usavam a radiação solar, para secar peles de animais, para fazerem roupas e preservarem os alimentos até ao inverno. A primeira instalação de secagem foi descoberta no sul de França 8000 anos AC. Esta consistia numa superfície pavimentada em pedra, usada para a secagem de colheitas, onde a radiação solar combinada com a brisa ou vento aceleravam o processo de secagem. Contudo, em termos industriais foi apenas no século XVIII que o processo de secagem foi adotado para a preservação de alimentos (Belessiotis e Delyannis, 2011).

O crescimento populacional acentuado tem impacto no balanço dos produtos alimentares. Para manter um equilíbrio, entre o fornecimento destes bens e o crescimento da população, é necessário minimizar as perdas pós-colheita, no caso dos frutos. Uma estratégia para a sua concretização é a produção de fruta desidratada (Mustayen et al., 2014). Atualmente os produtos desidratados surgem no mercado sob a forma de conceitos inovadores, como por exemplo *snacks*. Posto isto, cada vez mais é importante salvaguardar a qualidade nutricional dos produtos por forma a colocar no mercado produtos de valor acrescentado (Jangam, 2011).

Uma maneira simples de secar um produto é expô-lo ao ar cujas condições de temperatura e de humidade permitam evaporar a água do produto (Romero et al., 2014). Existe um vasto domínio de soluções que realizam este fenómeno, métodos como a liofilização (*freeze drying*), atomização (*spray dryers*), rotação (*drum dryers*) são tecnologias presenciáveis na indústria. Contudo, o seu grande entrave é que envolvem um consumo energético intensivo e dispendioso, para o aquecimento e transporte do ar, que faz aumentar o preço dos produtos (Sharma et al., 2009). Nos dias que correm, a rentabilização dos processos industriais requer cada vez mais celeridade nos processos. Apesar do consumo de energia estar dependente do tipo de produto, e da tecnologia usada no processo de secagem, quanto menor for a duração da secagem, maior será esse consumo (Celma e Cuadros, 2009).

A demanda de energia, no presente, excede em determinados momentos o fornecimento, perspetivando-se como uma tendência ameaçadora. O excesso de consumo de combustíveis fósseis, definidos como recursos finitos, levam a que o homem preste maior atenção ao potencial de aproveitamento de fontes de energia renováveis como a eólica e a solar (Irtwange e Adebayo, 2009). O desenvolvimento de sistemas de secagem com foco na poupança energética tem aumentado no mundo inteiro, especialmente em áreas onde a presença de energias renováveis é abundante, e desde logo vantajosa (Umogbai e Iorter, 2013). Portugal apresentou entre janeiro de 2006 e janeiro de 2016 um valor médio de 2239,3 horas de Sol, com uma média diária de 7,9 horas. Noutros países da Europa, como por exemplo a Alemanha, para o mesmo período apresenta uma média de 1653,8 horas de sol e uma média diária de 4,6 horas (WeatherOnline, 2016).

Na Figura 1.1 é retratado um mapa dos países europeus com diferentes colorações, representativas da quantidade de radiação solar incidente, de acordo com o seu ângulo otimizado e orientação a sul. É possível constatar-se uma maior disponibilidade da energia solar em Portugal, em analogia com países do centro e norte da Europa, refletindo-se num enorme potencial para a exploração do sol como fonte de energia, nomeadamente para o processo de secagem. A secagem a céu aberto como já referido foi dos primeiros métodos a ser utilizado. Apesar disto, nas últimas duas décadas, esta técnica tem-se tornado gradualmente mais limitada devido ao aparecimento dos processos de secagem industriais. Estes apesar de associados a custos operacionais elevados, não revelam problemas como a morosidade do processo, possibilidade de degradação por peiras, inconsistência do processo afetada por condições ambientais adversas, infestação causada por animais e dificuldades inerentes ao controlo do processo de secagem (Irtwange e Adebayo, 2009). Para contornar estes inconvenientes sem desaproveitar a fonte de energia solar, surgem os secadores solares.

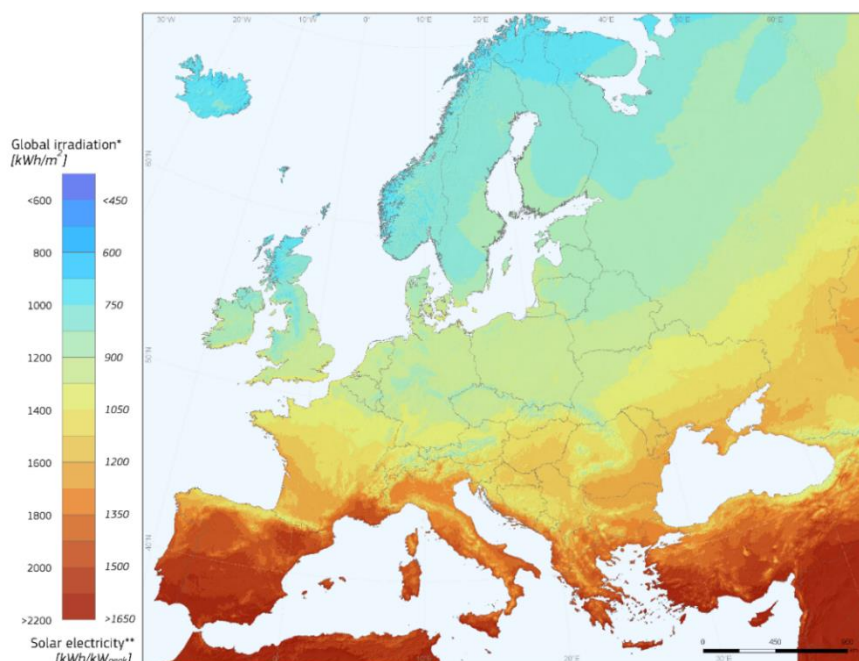


Figura 1.1 - Soma anual da radiação incidente numa superfície com uma inclinação otimizada e orientada a sul nos países europeus em 2012 (PVGIS, 2016).

1.2. O problema em estudo e a sua relevância

Em diversos países, o fornecimento e o consumo de eletricidade ainda é uma incógnita. Noutros, este bem revela-se como dispendioso, o que leva muitas pessoas a não usufruírem dele. No setor agrícola, mais precisamente no ramo da secagem, a utilização de métodos motorizados, supridos por combustíveis fósseis, tem-se denotado desvantajosa especialmente para pequenos produtores. A secagem ao ar livre apesar de não se evidenciar desvantajosa monetariamente, traz com ela algumas limitações, já referenciadas anteriormente, que podem tornar o produto menos comerciável. Fatores esses que a estabelecem como uma má alternativa à secagem mecânica (Vlachos et al., 2006). Sem descartar a hipótese de aproveitar a energia solar, que não produz ruído, não polui e não envolve mecanismos que tornam os sistemas menos fiáveis e duradouros, têm sido realizados nas últimas décadas estudos envolvendo a estrutura, a construção e a operação dos secadores solares para aplicações de larga escala, segundo Jangam (2011) no sentido de:

- melhorar a eficiência térmica;
- melhorar a qualidade dos produtos;
- tornar o processo mais seguro, sem o risco de incêndio, explosão ou riscos tóxicos;
- reduzir o impacto ambiental;
- minimizar os custos iniciais, de operação e manutenção;
- diminuir a pegada de carbono.

Os secadores solares podem ser classificados em várias categorias, dependendo do seu modo de aquecimento e operação. Segundo El-Sebaii et al. (2002) podem ser classificados em secadores diretos, indiretos ou mistos. Numa versão visando a redução e não a ausência do consumo de fontes não renováveis, permitem um funcionamento sob convecção forçada, que providencia um melhor controlo das condições do ar, favorecendo a produção com fins comerciais. Numa versão focada na privação de consumo energético o funcionamento sob convecção natural apresenta-se como uma alternativa (Pangavhane et al., 2002). Graças à grande variedade de estudos disponíveis na literatura, nem sempre é consensual qual o mais indicado. Uma má escolha do modelo de secador pode interferir adversamente nas propriedades físicas e nutricionais do produto (Jangam, 2011). Para um país mediterrânico como Portugal, onde a radiação solar é abundante, a projeção e o desenvolvimento de um método de secagem combinado com a energia solar térmica é aliciante. Tendo isto, surgiu a ambição de construir um secador solar e avaliar o seu comportamento.

A cereja, um dos frutos apreciados pelos consumidores pelas suas qualidades organolépticas e nutricionais, não tem sido empregada em estudos recorrendo a secadores solares. Esta, um produto de excelência da região da Beira Interior, contribuiu com uma produção de 6634 t (62,7%) de um total de 10 577 t em 2014. Parte destes produtos, após a colheita são acondicionados em câmaras de refrigeração, por forma a alargar o tempo de comercialização. Contudo, com este modo de conservação, as cerejas deterioram num curto espaço de tempo, contribuindo assim para elevadas perdas económicas. Uma forma de minimizar tais desperdícios é através da sua secagem (Nunes et al. 2016).

Posto isto, o presente trabalho recai sobre a construção de um protótipo de secagem solar para a secagem de cerejas, solucionando o problema das perdas económicas pela deterioração, quer pelo consumo energético das câmaras de refrigeração através do uso exclusivo de energia solar, que não engloba custos de operação.

1.3. Revisão bibliográfica

Neste subcapítulo serão abordados vários estudos realizados no âmbito dos secadores solares, presentes na literatura. Numa fase inicial, para auxílio à escolha da melhor solução, são retratadas obras que mostram o domínio de soluções existentes. Após esta abordagem apresentam-se obras que fazem estudos comparativos entre diferentes configurações de secador, indicando a melhor opção. No final são descritos estudos realizados com diversos modelos de secadores, com uma análise mais minuciosa aos aspetos construtivos, aos mecanismos de transferência de calor e massa e ainda à cinética da secagem.

1.3.1. Processo de secagem e secadores

Existem na literatura vários modelos de secadores que apresentam diferenças na sua configuração. A forma como captam a energia solar, o sistema de circulação de ar, as dimensões, os materiais utilizados são algumas das divergências encontradas.

Jangam (2011) sintetizou as mais recentes tecnologias na temática da secagem de produtos alimentares. Dentro de cada uma das tecnologias, onde se enquadra a secagem assistida por bomba de calor, em atmosfera controlada, mecânica e a liofilização, são apresentadas diversas obras que realizaram testes com cada método. No final do documento, o autor aborda ainda a necessidade da implementação de energias renováveis nesta matéria.

Kumar et al. (2016), Mustayen et al. (2014), Sharma et al. (2009), Vijayavenkataraman et al. (2012) nas suas obras desenvolveram revisões dos vários modelos de secadores solares, com informação detalhada sobre os seus dados construtivos e operacionais. Relataram ainda os fenómenos que acontecem na secagem a céu aberto, e ainda na secagem com recurso a secadores indiretos e diretos. Belessiotis e Delyannis (2010) para além de fazerem uma revisão semelhante à dos autores anteriores focaram-se ainda nos princípios e teoria da secagem.

Ekechukwu (1999) apresentou na sua obra uma revisão da teoria associada ao processo de secagem. Este mesmo autor realizou, em conjunto com Norton (1999) uma revisão em torno dos modelos de secadores solares existentes. Para além disto, classificaram-nos de acordo com a sua gama de temperaturas, modo de aquecimento, modo de operação e estruturação. Estabeleceram que o grupo primordial se divide em dois: os secadores passivos, sob convecção natural, e os ativos, sob convecção forçada. Do ponto de vista estrutural identificaram-nos como: diretos, onde a unidade coletora de energia solar e a de secagem representam uma parte integral; indiretos, quando a unidade coletora e a de secagem se encontram separadas; mistos, que são uma combinação dos diretos e indiretos; por fim, os híbridos, que anexam uma fonte de energia que auxilia a energia solar. Ekechukwu e Norton (1999) publicaram ainda uma revisão com foco nos coletores solares, aplicáveis a secadores solares indiretos. Nela apresentaram vários modelos de coletores, com a respetiva exposição dos pontos fortes e fracos de cada um. Para além de os classificarem, apresentaram alguns dos fatores a ter em conta no projeto de um coletor, fazendo algumas analogias entre materiais e métodos.

1.3.2. Estudos comparativos

Por forma a compreender-se melhor a influência de cada modelo de secador solar, estudos comparativos dos quatro tipos de secadores têm sido realizados. Na presente secção são apresentadas comparações feitas por vários autores, nomeadamente entre o modo de circulação de ar (natural ou forçada). Dentro dos tipos de secagem serão abordados estudos comparativos entre a secagem ao ar livre, e a secagem com recurso a secadores diretos, indiretos, mistos e

híbridos. Por forma a permitir uma análise mais cuidada a cada secador, tiveram-se em atenção os aspetos construtivos.

Montero et al. (2010) visando essa comparação conceberam um secador que permite adotar todas as configurações num só secador. Analisaram parâmetros como a temperatura, humidade relativa (HR), caudal mássico, o rendimento de cada secador e ainda a cinética da secagem. No final concluíram que o modo passivo-misto em analogia com o passivo-indireto, apresentou um valor de temperatura superior de 6 °C, e valor inferior de HR de 8% na câmara de secagem. Relativamente ao modo ativo e passivo, averiguaram que as temperaturas eram superiores em 15 °C para o modo passivo. O modo mais eficiente de operação foi o híbrido, seguido pelo passivo e pelo ativo. Da análise à cinética de secagem o melhor desempenho verificou-se para os modos híbrido e misto com metade do tempo de secagem dos restantes.

Onyinge et al. (2015) confrontaram a secagem de peixe de forma natural ao ar livre e recorrendo a um secador solar indireto ativo. Este último, composto por dois coletores solares com uma área de 5 m² a gerar calor para fornecer à zona de secagem. A unidade de secagem foi feita em aço galvanizado, permitindo uma maior absorção de radiação solar. No seu interior foram dispostos 20 tabuleiros com área de 1 m², distanciados de 20 cm. A altura da chaminé foi de 30 cm. Com este dispositivo, os autores em termos de humidade apuraram que esta tende a diminuir com o aumento da radiação incidente. Obtiveram valores de humidade superiores ao ambiente, na camara de secagem no primeiro dia, contrapondo-se ao segundo dia, que apresentou valores mais baixos. Em termos de temperaturas, para radiação solar incidente a rondar os 500 a 600 W/m² e temperaturas ambiente médias de 15,6 a 27,2 °C, a temperatura à saída do coletor foi de 40 a 50 °C. Conseguiram aumentos de 12,5 °C no interior da câmara de secagem, face à temperatura ambiente, havendo pequenas discrepâncias em função da altura e posição no tabuleiro. Para os tabuleiros superiores e inferiores a temperatura foi sempre superior relativamente aos tabuleiros centrais, adversidade derivada do material usado para a estrutura ser condutor. No final, a secagem ao ar livre demorou 2 dias a alcançar o mesmo teor de humidade que o secador solar que o concretizou em apenas 11 h, com qualidades sensoriais superiores.

Shrivastava e Kumar (2015) basearam-se num secador solar indireto com um coletor de passagem dupla. Neste arranjo, o ar é forçado a circular no coletor duas vezes, para esta situação, ao longo de uma placa de policarbonato ondulada em “v” (*Vee corrugated*). Dada a montagem experimental referida compararam-na com a secagem ao ar livre. No término dos dois dias de secagem, o Feno-grego (*Fenugreek*), colocado nos três tabuleiros da câmara de secagem, teve diferentes durações de secagem. O mais rápido foi o mais baixo, com 1 hora a menos comparativamente à do tabuleiro ao ar livre. Seguiu-se o mediano e por fim o mais alto, que apresentaram 3 e 5 horas a mais em relação ao tabuleiro inferior. Em termos de temperatura, esta foi superior no tabuleiro inferior, seguido do mediano e por último o superior. Na análise à

humidade os resultados foram contrastantes com os da temperatura. Após o tratamento dos resultados experimentais, os autores recorreram à computação numérica para calcular o coeficiente de transferência de calor convectivo. Apuraram que este coeficiente foi bastante reduzido para o tabuleiro colocado ao ar livre. Perante as situações de convecção natural e forçada, este parâmetro toma valores de 2,90 e 6,91 W/m², respetivamente no primeiro dia, e de 0,45 e 0,79 W/m² no segundo dia, resultando em valores superiores para convecção forçada. No final os autores concluíram que o coeficiente convectivo diminui com a taxa de secagem, consequência da diminuição do teor de humidade.

Umogbai e Iorter (2013) utilizaram um secador indireto passivo e compararam os resultados obtidos com a secagem realizada ao ar livre. No interior do dispositivo, as temperaturas mais altas, conseguidas para uma temperatura ambiente de 38 °C às 13h00, foram de 59 e 48 °C no coletor e câmara de secagem, respetivamente. Os produtos, com 30,3% de teor de humidade inicial, ao fim de três dias para o secador já apresentavam valores de 13,3%, tendo a humidade estabilizado neste valor. Já a secagem natural demorou seis dias a atingir o mesmo valor percentual de humidade. Os autores abordam ainda que no período noturno os produtos expostos naturalmente necessitam de ser conservados, contrariamente aos do secador que conseguem reduzir o seu teor de humidade, ainda que em menor quantidade.

Irtwange e Adebayo (2009) realizaram o mesmo estudo comparativo que os autores anteriores, com grão de milho, e ainda com a diferença do modelo possuir uma unidade acumuladora de calor. O acumulador foi constituído por um aglomerado de seixos na base da câmara de secagem, com o intuito de armazenar o calor durante o dia e libertá-lo no período de carência solar. Os resultados mostraram que para temperaturas ambiente a variar de 28 a 33,5 °C, dependendo da radiação solar incidente, a temperatura à saída do coletor atingiu valores de 35 a 47 °C. Isto implicou taxas de secagem mais rápidas no caso do secador. A unidade armazenadora atingiu temperaturas de 34 a 45 °C, já a unidade de secagem exibiu temperaturas ligeiramente inferiores, variando entre os 32 e os 42 °C. No âmbito das secagens, quando utilizado o secador, o processo concluiu-se num período de 4 dias, apresentando um teor de humidade final de 13,1%. Já a secagem natural demorou o dobro dos dias, tendo apresentado um teor de humidade final de 13,4%. Os autores concluíram através dos resultados que o elevado valor de coeficiente de transferência de calor, apresentado entre o ar e os seixos alto, teve impacto na redução do tempo de secagem. Verificaram também que com o aumento da área de secção da entrada de ar, o desempenho do equipamento era otimizado.

Pangavhane et al. (2002) compararam a secagem natural de uva, ao sol e à sombra, com a secagem com recurso a um secador solar indireto. De modo a reduzir o tempo de secagem, os produtos foram mergulhados, durante 3 minutos, numa solução com 2% de óleo e 2,5% de carbonato de potássio, a fim de tornar a superfície exterior mais permeável. Os autores obtiveram

um período total de secagem de 15, 7 e 4 dias para a secagem à sombra, ao sol e com secador respetivamente. Conseguiram, com este último, temperatura interior de 69,5 °C, com temperatura ambiente de 38 °C e radiação solar de 909 W/m². Em termos de avaliação sensorial e química, observaram que as qualidades organoléticas da uva no dispositivo de secagem foram melhores que nas restantes. Foi ainda observado um maior escurecimento na secagem completamente exposta à radiação solar, face à secagem à sombra e à secagem com o secador solar. Os autores estudaram o efeito do caudal mássico do ar de secagem no rendimento do coletor, e obtiveram rendimentos de 0,26 para 0,0126 kg/s e 0,65 para 0,0246 kg/s.

Sharma et al. (1994) realizaram estudos comparativos entre um secador indireto, um direto e um misto. O indireto combina um elemento coletor e uma câmara de secagem. Nela estão dispostos 7 tabuleiros, com uma área de 0,64 m² e desfasados de 15 cm. O direto consiste numa caixa retangular de madeira, perfurada em todo o seu perímetro, permitindo a circulação de ar no seu interior. O misto, caracterizado por um coletor dividido em duas partes, uma parte coberta por um vidro (parte inferior), e outra completamente opaca à radiação (parte superior). Depois de estudados sob semelhantes condições meteorológicas, os autores concluíram que a secagem foi muito mais rápida no secador indireto utilizando convecção forçada, relativamente aos outros. Relataram ainda que os secadores diretos poderão causar um sobreaquecimento do produto, e que de forma geral, os secadores indiretos com câmara de secagem são mais eficientes à larga escala.

1.3.3. Estudos envolvendo secadores indiretos e mistos

Após a análise aos dados fornecidos pelos autores que realizaram as analogias anteriores, verifica-se que, para a secagem de produtos onde as qualidades nutricionais e organoléticas têm de ser salvaguardadas, os secadores diretos são inapropriados. Segue-se de seguida a apresentação de estudos realizados somente utilizando secadores indiretos e mistos, visto serem os mais favoráveis. Um aspeto comum aos secadores solares indiretos e mistos é a unidade coletora de radiação. Diversos estudos têm sido feitos enfatizando a zona coletora, resultando num largo domínio de configurações distintas, para além deste elemento, outros serão também retratados e descritos nesta secção.

El-Sebaili et al. (2001) idealizaram e construíram um secador indireto, com o intuito de estudar o processo de secagem em frutos esféricos com e sem pré-tratamento, e ainda ver a influência do uso de areia no coletor, com a finalidade de armazenar calor. As temperaturas obtidas à entrada da unidade de secagem encontram-se entre os 45,5 °C e os 55,5 °C. Verificaram ainda que à medida que o ar subiu verticalmente a sua temperatura diminuiu, isto, segundo os autores, devido à libertação de humidade dos produtos inferiores. O valor mais alto de temperatura de secagem do produto foi alcançado no 3º dia quando o teor de humidade alcançou o seu valor mínimo. O equilíbrio do teor de humidade da uva demorou mais a ser atingido, quando comparada

com maçãs, figos ou ervilhas, derivado da cutícula cerosa que esta possui, que restringe a difusão da humidade. De encontro aos objetivos principais dos autores, os valores obtidos confirmaram que o uso de material acumulador, sob a placa absorvedora, causa o aumento de maiores perdas de humidade do produto durante a noite. Estas resultaram numa redução de 12 horas no processo de secagem. Já relativamente ao pré-tratamento químico, relataram que é desejável apenas em produtos de pequenas dimensões, como o caso da uva que permitiu diminuir a resistência da membrana exterior, melhorando a permeabilidade.

Madhlopa et al. (2002) conceberam um secador indireto passivo baseado num coletor plano, com a particularidade de possuir dois sistemas de absorção distintos. Estes conseguidos através de uma placa absorvedora em aço carbono removível, e uma placa em madeira na base. O coletor foi do tipo passagem dupla, com a placa absorvedora colocada a meio do coletor. Na ausência desta, a radiação incidia diretamente na superfície de madeira. O teste ao secador foi feito com amostras de manga, onde os autores estudaram a evolução do teor de humidade, pH e ácido ascórbico, com uma redução do primeiro parâmetro de 85% para 13% na base húmida. No decorrer do ensaio alcançaram temperaturas máximas de 45,9 e 42,9 °C com e sem placa absorvedora ao meio, representando ganhos térmicos máximos de 8,4 °C ao meio-dia. Para além dos ensaios com fruta, os autores apresentam expressões matemáticas relacionadas com a psicrometria do secador solar, nomeadamente, energia necessária para a secagem e massa de água perdida no processo. Exibiram também fórmulas que fundamentam a deslocação do ar no interior do secador, através das quais concluíram que aumentos da altura de coluna de ar traduzem-se numa melhoria da capacidade de transferência de calor convectivo do secador.

Mohanraj e Chandrasekar (2009) desenvolveram um secador indireto ativo. A caixa-de-ar do coletor possui 2,5 cm de altura e uma camada de 10 cm de areia misturada com pedaços de alumínio entre a placa absorvedora e o isolamento. O objetivo da construção foi analisar a influência do acumulador de calor. Para uma radiação máxima de 950 W/m², com uma temperatura média de 31 °C, obtiveram temperaturas máximas de 68 e 43 °C durante o dia e noite, respetivamente. A malagueta, produto utilizado no ensaio de secagem, com uma humidade inicial de 72,8% viu esse valor diminuído para 9,1 e 9,8% após 24 h, para o tabuleiro da base e do topo respetivamente. Relativamente ao material acumulador de calor, os autores concluíram que permite conservar a temperatura no interior do secador, mesmo em períodos de flutuação da intensidade de radiação. Mais, retrataram ainda que permite alargar o tempo de secagem em 4 horas por dia, contribuindo para uma maior eficiência do secador, que foi estimada em 21%.

Jain e Tewari (2015) estudaram o efeito do uso de materiais mudança de fase (*phase change materials, PCM*) num secador indireto. Este com a particularidade de possuir dois elementos coletores de energia, um que alimenta a parte inferior da câmara de secagem e outro colocado na parte superior da câmara de secagem. A função do coletor superior é criar um aumento de

temperatura nessa zona, favorecendo o mecanismo de convecção natural do secador, aumentando a quantidade de humidade que é libertada para o exterior. O sistema PCM consiste em vários tubos preenchidos com cera de parafina, acondicionados para evitar fugas, que armazenam calor latente. Um dos sistemas é colocado na parte inferior da câmara de secagem, onde passa o ar proveniente do coletor principal. O outro sistema é colocado sob a superfície absorvedora do coletor situado no cimo da câmara de secagem, com o intuito de melhorar a renovação do ar também durante a noite. Outro aspeto construtivo em destaque foi a utilização de um espelho na parte frontal do secador, com o propósito de fazer incidir maior quantidade de radiação no coletor, melhorando o rendimento do secador. Realizaram ainda neste estudo uma análise económica, onde fazem balanços para determinar o retorno financeiro do sistema. No final, os autores concluíram que o processo de secagem continua, durante 5 a 6 horas após a inexistência de radiação solar, com temperaturas de 40 a 45 °C, devido ao PCM. Durante o dia conseguem obter incrementos de temperatura na câmara de secagem de 20 °C face à temperatura ambiente.

Shanmugam e Natarajan (2007) secaram ervilhas e ananás num secador indireto ativo, integrando um sistema dessecante. Este sistema foi colocado na parte superior da câmara de secagem, sob um envidraçado duplo, com uma caixa de ar de 50 mm. O objetivo dessa implementação era armazenar calor durante o dia, para poder libertá-lo para o interior da câmara por intermédio de um ventilador durante a noite. Para além do estudo do efeito deste sistema realizaram experiências com e sem a presença de um espelho, cuja função é direcionar a radiação solar para o envidraçado do sistema dessecante. Os autores concluíram que o material dessecante permitiu aumentar a temperatura no interior da câmara, e mantê-la acima da temperatura ambiente, até à manhã do dia seguinte. O espelho revelou-se como influente na eficiência térmica do secador, com um incremento de 10 °C na temperatura da câmara, permitindo uma redução do tempo de secagem de 2h no caso das ervilhas, e 4 h no caso do ananás.

Bolagi e Olalusi (2008) avaliaram o desempenho de um secador solar misto. A diferença evidenciada face às construções de outros autores foi a presença de uma matriz metálica utilizada entre a cobertura e a superfície absorvedora. Com esta construção os autores realizaram ensaios de secagem com 6,2 kg de batata doce. Conseguiram obter um ganho de 24 °C perto do meio-dia no interior da câmara de secagem face ao ambiente. Isto fez com que 85,4% de humidade, na base húmida, fosse removida durante 10 h de secagem, implicando uma taxa de secagem de 0,62 kg/h. Com estes dados, o coletor apresentou um rendimento de 57,5%.

Martins et al. (2010) compararam os dados experimentais de um secador misto híbrido com a simulação numérica do mesmo. A fonte auxiliar à energia solar foi uma resistência elétrica de 2400 W, utilizada para manter a temperatura dentro dos limites definidos. As simulações numéricas foram baseadas nas equações de conservação de massa, quantidade de movimento e

resolvidas no *software* ANSYS-CFX. Os resultados foram idênticos aos experimentais, o escoamento suave e o aquecimento do ar no coletor foi gradual ao longo da sua passagem. Na câmara de secagem os valores de temperatura e velocidade foram praticamente uniformes, com a velocidade do escoamento a aumentar apenas na saída, devido à redução da área.

Ayenu (1997) tratou as variáveis e os mecanismos envolvidos no processo de secagem. Dimensionou para isso um secador misto, com base nos cálculos da quantidade de ar necessária, da espessura da camada de produto, da altura da chaminé e das diferenças de pressão no interior do secador. Para este efeito utilizou cartas psicrométricas para determinar as trocas térmicas no interior do secador. Referiu ainda na sua obra que para armazenar produtos, num ambiente com HR entre os 80 e os 90%, é desejado um teor de humidade de equilíbrio menor ou igual a 14%.

Forson et al. (2007) projetaram e conceberam um secador misto com aplicação à larga escala. Para tal, apresentam todos os cálculos, condições e princípios, que combinados permitiram a projeção apropriada do secador, para os objetivos definidos. Numa fase inicial tiveram em conta as características do produto (mandioca), através disso determinaram parâmetros essenciais como o caudal de ar, área dos tabuleiros, dimensões do coletor e a altura de coluna de ar necessária.

Gatea (2011) apresentou os cálculos efetuados no projeto do seu secador misto. Após os ensaios experimentais, o secador, para uma média diária de radiação solar de 600 W/m^2 , e uma temperatura ambiente de $38 \text{ }^\circ\text{C}$, conseguiu atingir uma temperatura máxima de $56 \text{ }^\circ\text{C}$. Os 4 tabuleiros colocados na câmara de secagem, deslocados 10 cm uns dos outros, após 6 horas de secagem, evidenciaram teores de humidade de 8, 11, 14 e 18%, pela ordem de colocação de baixo para cima.

Singh e Kumar (2012) investigaram a influência da energia térmica absorvida, caudal mássico, tamanho da amostra de secagem e a densidade de carregamento, na curva da cinética de secagem. Para tal, construíram um modelo de secador misto, para testes no laboratório, estudando cada um dos parâmetros, variando um e mantendo os restantes constantes. Em termos de resultados, para um aumento de 150 para 750 W/m^2 deu-se um aumento de 121,4% de humidade removida. Para um aumento de 0,009 para $0,017 \text{ kg/s}$, a humidade removida foi 18,5% superior, apresentando uma diminuição de 15,6% quando o caudal mássico foi acima de $0,022 \text{ kg/s}$. Aumentando a quantidade de produto no secador de 1,08 para $4,33 \text{ kg/m}^2$, e a espessura do produto de 5 para 18 mm, verificou-se uma descida de 16,6 e 75,4%, respetivamente. No final compararam o secador misto com um direto através de um parâmetro adimensional de avaliação de desempenho, tendo concluído que o primeiro apresenta um desempenho superior.

Finck-Pastrana (2014) desenvolveu um secador solar indireto feito com a câmara de secagem feita com contraplacado. A parte coletora composta, no seu interior, por um canal de ar em

formato de serpentina. Este contruído com treze chapas de cobre pintadas de preto, com 10 cm de altura, contribuindo para um canal de 5 m para aquecimento de ar. Para atenuar as perdas de calor, o coletor foi isolado com lã de vidro. A entrada do coletor tem a possibilidade de estar mais ou menos restringida, por forma a variar o caudal de ar que chega ao produto. Apesar das soluções apresentadas o autor apresenta apenas resultados da taxa de secagem, afirmando que esta diminui de forma linear do início ao final do processo.

Hedge et al. (2015) projetaram um secador solar indireto com coletor de passagem dupla, para realizar testes de secagem com bananas. O estudo focou-se na variação do caudal de ar, variando a velocidade (0 a 3 m/s), através de um ventilador com regulação da velocidade de rotação. Compararam ainda os resultados para escoamento superior e inferior relativamente à placa absorvedora. Por último, compararam o efeito da colocação do produto em tabuleiros e em espetos de madeira. Em termos de resultados conseguiram temperaturas 2,5 °C acima quando o escoamento era sob a placa. Obtiveram para esta situação 38,21% de rendimento, contrastando com os 27,5% do fluxo sobre a placa. Quando confrontadas as velocidades de 0,5, 1 e 2 m/s, o produto apresentou melhores atributos em termos de coloração, textura e forma para a velocidade de 1 m/s, praticamente para condições atmosféricas idênticas. Depois de 16h de secagem o rendimento da secagem foi de 5,75, 5,05, e 4,96% para velocidades de 0,5, 2, e 1 m/s, respetivamente. Também em termos de qualidade do produto houve diferenças, para as três velocidades. Para as velocidades de 0,5 e 2 m/s, a banana seca obtida apresentou superfície dura e má aparência, e ainda uma coloração negra da superfície no caso da velocidade mais elevada.

Vlachos et al. (2006) construíram um secador solar com duas placas absorvedoras onduladas de 1,25 mm de espessura e separadas por 50 mm. As paredes da câmara de secagem, feitas por chapa de alumínio com 1,5 mm de espessura, foram isoladas com fibra de vidro. O objetivo foi a redução das perdas térmicas, pela elevada absorvidade solar e baixa emissividade para comprimentos de onda elevados. Outra particularidade do secador foi a presença de uma unidade armazenadora de calor sob a câmara de secagem, que incluía no seu interior recipientes com água. Estudaram o interior da câmara de secagem, monitorizando a temperatura e humidade, variando a posição no secador. No final as experiências permitiram concluir que a presença de um acumulador de calor se torna útil, com diminuição, apesar de em menor quantidade, do teor de humidade do produto. Durante o dia conseguiram obter um ganho térmico de 10 a 20 °C, relativamente à temperatura ambiente.

O uso de novas tecnologias aplicadas a secadores solares, combatendo os seus pontos fracos também tem sido abordada.

Sarsilmaz et al. (2000) na tentativa de uniformizar a secagem por todo o produto, os autores construíram um secador indireto ativo alternativo. Este possui uma câmara de secagem

cilíndrica, com um sistema de rotação dos tabuleiros, concebido por intermédio de um motor DC de 12 V, uma polia e uma correia. O estudo realizado com pêssegos foi desenvolvido com várias velocidades de rotação dos tabuleiros. Foi conseguido um aumento de 20% na taxa de secagem, com a maior velocidade de rotação possível, limitada pelo efeito da força centrífuga na fruta que a expelle do tabuleiro. Contudo, os autores pretendiam apenas obter uma secagem homogênea, o que foi conseguido através da empregabilidade de velocidades de rotação mais baixas.

1.3.4. Aspetos construtivos dos secadores

Um dos problemas do uso de secadores solares indiretos passivos é o baixo caudal de ar. Existem duas maneiras de melhorar o seu desempenho. A primeira através da implementação de chaminés, a segunda diminuindo o espaço de ar entre a placa absorvedora e a cobertura transparente (Vijayavenkataraman et al., 2012). Na variedade de estudos presentes na literatura, a conceção dos coletores não está em harmonia entre os autores. A forma como esta é feita tem influência nas características térmicas do coletor, impondo diferentes temperaturas à saída deste. A altura da caixa-de-ar, a espessura do vidro, a espessura da placa absorvedora são alguns dos pontos discordantes, com a existência de apenas alguns estudos comparativos, abordados de seguida.

Bassey et al. (1993) avaliaram a influência de várias configurações de chaminés e ainda alturas de caixa-de-ar diferentes, utilizando dois secadores solares indiretos passivos idênticos. Relativamente ao efeito da chaminé, os autores estudaram a ação da temperatura, bem como a sua altura. Quando comparadas as chaminés de 1 e 2 m, a mais alta contribuiu com forças de impulsão superiores, resultando em melhorias na taxa de secagem. Quanto ao aquecimento, através da sua experiência, os autores notaram que a presença de temperaturas elevadas, na chaminé, tem impacto no desempenho do dispositivo apenas quando prolongada. Com isto, concluíram nesta vertente, que o desempenho pode ser melhorado tendo em conta a magnitude e a duração do aquecimento. Alusivamente à variação da altura da caixa-de-ar, esta foi alterada de 4 para 5 cm, tendo sido obtido um desempenho mais favorável para a altura de 4 cm, sendo referido no estudo que esta altura não deve ser excedida.

Bakari et al. (2014) num coletor plano testaram espessuras de vidro, com baixo teor de Ferro (mais puro), de 3, 4, 5 e 6 mm. Os resultados mostraram melhores rendimentos do coletor para o vidro com espessura de 4 mm (35,4%) comparativamente ao de 6 mm (27,8%). Contudo, o uso do vidro mais eficiente necessita de precauções em termos de manuseamento na colocação para evitar custos adicionais devido à sua quebra.

Koyuncu e Turhan (2006) compararam 6 configurações distintas de coletor: modelo-1 com uma cobertura de plástico simples, sem placa absorvedora; modelo-2 com uma cobertura de plástico

simples e uma placa absorvedora plana; modelo-3 cobertura de plástico simples, placa absorvedora ondulada; modelo4- com uma cobertura de plástico simples, placa absorvedora plana (fluxo inferior à placa); modelo-5 cobertura de plástico simples, placa absorvedora ondulada (fluxo inferior à placa); modelo-6 cobertura de plástico dupla, placa absorvedora plana (fluxo inferior à placa). Para estas situações obtiveram rendimentos de 42,11%, 45,98%, 44,23%, 39,76%, 39,05% e 36,94%, pela mesma ordem. Concluíram com isto que o modelo-2, constituído por uma placa de alumínio de 0,4 mm de espessura, foi o mais eficiente evidenciando as maiores elevações de temperatura e as menores perdas. Anunciaram ainda que, para ganhos de temperatura entre os 10 e os 35 °C no coletor, sob convecção natural, as coberturas mais apropriadas são as simples.

Segundo Bassey et al. (1994) uma das maneiras de aumentar o coeficiente de transferência de calor é diminuindo a altura da caixa-de-ar. Contudo, segundo Agbo e Okoroigwe (2007) as perdas globais num coletor diminuem à medida que se incrementa a altura da caixa-de-ar. Na literatura algumas obras evidenciam testes envolvendo várias alturas, noutras fazem referências a valores que originam melhores desempenhos.

Bassey et al. (1994) testaram a caixa-de-ar com alturas de 4cm e 5cm. Concluíram que para 4 cm de altura, o desempenho do secador é mais elevado, obtendo-se taxas de secagem superiores. Afirmam ainda, que para valores inferiores a 4 cm o desempenho do coletor começa a diminuir.

Bhargava et al. (1991) compararam as alturas de 5, 10 e 15 cm de caixa-de-ar do coletor. Verificaram que à medida que aumenta o comprimento do duto, a eficiência térmica diminui. Estabeleceram, por isso, que altura de 5 cm é a mais indicada.

Por fim, Irtwange e Adebayo (2009) declararam que o espaço ótimo entre a placa absorvedora e a cobertura de vidro deve ser superior a 4 cm, e devido ao efeito de sombreamento lateral inferior a 8 cm.

Por forma a analisar os aspetos construtivos, aplicados a cada modelo de secador, foi feito um levantamento de alguns dados presentes na literatura. A informação adquirida encontra-se disponível na Tabela 1.1. Nos resultados evidenciados não foram retratadas as temperaturas alcançadas por cada modelo de coletor, por estas serem influenciadas por diversos fatores, e não só pela configuração do secador. De referir ainda que alguns autores não publicaram nas suas obras a totalidade dos dados daí existirem campos sem os respetivos valores.

Tabela 1.1 - Aspectos construtivos de secadores presentes na literatura.

Artigo	Convecção	Área do Coletor (m ²)	Material da Placa	Espessura da placa (mm)	Espessura da cobertura (mm)	Tipo de escoamento relativamente à placa absorvedora	Altura da caixa-de-ar (cm)	Dimensões câmara de secagem (c x p x a) (m)
Bennamoun e Belhamri (2003)	Forçada	-	Alumínio	1	10	inferior	-	-
Bolagi e Olalusi (2008)	Natural	0,8	Alumínio	2	4	duplo	-	0,82 x 0,54 x 0,7
Celma e Cuadros (2009)	Forçada	1	Alumínio	1	3	superior	5	1 x 0,4 x 0,493
El-Sebaili et al. (2002)	Natural	1	Cobre	2	5	superior	8	1 x 1 x 1,5
Finck-Pastrana (2014)	Natural	-	Cobre	-	-	superior	10	0,6 x 0,4 x 0,55
Gatea (2011)	Forçada	-	Aço galvanizado	-	-	-	-	-
Hedge et al. (2015)	Forçada	0,96	Aço galvanizado	0,6	5	superior vs inferior	5 + 5	1 x 0,5 x 1
Irtwange e Adebayo (2009)	Natural	0,72	Zinco	0,5	4	superior	5,5	0,6 x 0,3 x 0,62
Jain e Tewari (2015)	Natural	1,5	-	-	-	superior	5	1 x 0,75 x 0,9
Madhlop et al. (2002)	Natural	0,5	Aço carbono	-	-	duplo	7,5 + 7,5	-
Mohanraj e Chandrasekar (2009)	Forçada	2	Cobre	2	5	superior	2,5	1 x 1 x 1,5
Onyinge et al. (2015)	Forçada	5	Aço galvanizado	-	5	-	-	-
Pangavhane et al. (2002)	Natural	1,42	Alumínio	0,5	4	superior	3	0,35 x 0,35 x 0,7
Romero et al. (2014)	Forçada	2	Aço galvanizado	-	5	-	10	1 x 0,8 x 1,2
Sarsilmaz et al. (2000)	Forçada	0,7	Cobre	-	4	-	-	-
Shanmugam e Natarajan (2007)	Forçada	2,88	Cobre	0,9	6	inferior	-	1,2 x 1,2 x 1
Singh e Kumar (2012)	Forçada	0,5	Alumínio	0,644	4	superior	-	0,54 x 0,43 x 0,46
Umogbai e Iorter (2013)	Natural	0,7	zinco	-	4	superior	10	-
Vlachos et al. (2006)	Forçada	2	Alumínio	1,25	3	duplo	5	1,3 x 1 x 0,7

1.4. Objetivos e contribuição da dissertação

O objetivo geral da presente dissertação é a construção de um modelo de secador solar, por forma a estudar o processo de secagem de produtos agroalimentares. Constituem-se assim como objetivos específicos:

- A projeção, construção e instrumentação de um secador solar indireto;
- A Realização de ensaios experimentais de avaliação de desempenho tirando partido das características construtivas de geometria variável introduzidas na unidade desenvolvida, nomeadamente, a espessura da caixa-de-ar;
- O estudo experimental do comportamento da unidade para diferentes condições ambiente exteriores e interiores, nomeadamente com recurso à convecção natural e forçada;
- A avaliação do desempenho da unidade desenvolvida no processo de secagem da cereja para diferentes condições climáticas.

Face aos objetivos expostos, pretende-se com a presente tese dar um contributo para a melhoria do conhecimento da temática da secagem solar, bem como, explorar a possibilidade da sua utilização em produtos característicos desta região, como é o caso da cereja produzida na Cova da Beira.

1.5. Visão geral e organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, dos quais será abordado de seguida de forma sucinta o conteúdo inerente a cada um.

O presente capítulo estabelece um enquadramento da temática da secagem com recurso a secadores solares. Após isto expõe-se o problema em estudo bem como a importância de o solucionar. Neste capítulo insere-se ainda o estado da arte, com abordagem a vários estudos e teorias relatadas por diversos autores com trabalhos publicados nesta área. Explicita-se ainda qual a motivação e os objetivos desta dissertação.

No Capítulo 2 faz-se referência à radiação solar, ponto essencial na geração de energia térmica no sistema de secagem apresentado. A isto segue-se a classificação dos sistemas de secagem solar existentes, bem como a análise às vantagens e desvantagens de cada um. Expõe-se também a descrição dos vários coletores solares, com foco nos que funcionam com o ar como fluido de trabalho. Ainda dentro dos coletores são apresentados os fatores que influenciam o desempenho destes, como por exemplo a sua orientação e inclinação. Tratando-se de um sistema que envolve

a transferência de calor são abordados neste capítulo os três modos para a realização deste fenômeno. Por fim, neste capítulo é retratada a teoria envolvente à secagem.

No Capítulo 3 apresenta-se o projeto, com foco nos princípios de funcionamento, processos e materiais utilizados na concepção e instrumentação do secador solar. Inicia-se com a descrição de todo o processo de construção, e finaliza com uma abordagem ao equipamento utilizado na monitorização dos parâmetros estudados.

No Capítulo 4 numa primeira parte é apresentada uma descrição da forma como o estudo do secador foi conduzido, com o retrato dos vários ensaios realizados sob diferentes padrões. Na segunda parte são exibidos os resultados, acompanhados da respetiva análise, dos ensaios de caracterização do secador e do caso de estudo envolvendo o processo de secagem.

No Capítulo 5 finaliza-se a presente dissertação, com a recapitulação que visa relatar todos os pontos de interesse ao longo do desenvolvimento do estudo, com foco nas informações recolhidas, e com base na análise dos resultados abordados. Em função da apreciação dos resultados obtidos e da execução do estudo são apresentadas algumas sugestões para trabalho futuro.

2. Fundamentos teóricos

A presente secção fará abordagem a alguns aspetos importantes inerentes ao estudo realizado. Desde logo começando pela radiação solar, parâmetro essencial na geração da energia térmica do sistema de secagem apresentado. Tratando-se de um sistema de secagem solar, é esquematizada uma classificação dos dispositivos que concernem este processo, com foco especial às vantagens e desvantagens de cada um. O coletor solar apresenta-se como um elemento vital, na conceção de um secador da natureza do apresentado na presente dissertação. Com isto, exhibe-se uma descrição a algumas das configurações existentes, tendo como base aqueles que funcionam com o ar como fluido de trabalho. No final, visto que o estudo engloba o estudo da secagem da cereja, é relatada alguma da teoria associada a este fenómeno.

2.1. Radiação solar

A fonte de energia do sistema em questão é o Sol. A luz e o calor que irradia para o espaço é determinada pelas suas características estruturais, é por isso meritório abordar-se alguns aspetos inerentes a este. O Sol no seu núcleo apresenta radiações que variam dos raios- γ aos raios-x, do espectro eletromagnético. Os comprimentos de onda da radiação que emite aumentam à medida que a temperatura se vai tornando menor e as distâncias radiais maiores (Duffie e Beckman, 2013).

No desenvolvimento de um coletor solar é relevante o conhecimento sobre a quantidade de radiação solar incidente nesse coletor, e daí surge a constante solar. Esta indica a porção de energia que incide fora da atmosfera terrestre e cujo valor é de $1,35 \text{ kW/m}^2$, sendo que apenas 1 kW/m^2 alcança a superfície terrestre (Benedito, 2010), mesmo assim, segundo Morais (2009) representa um fornecimento 10 000 vezes superior ao consumo mundial de energia num ano. Uma determinada superfície inclinada é atingida por radiação direta, difusa e ainda o albedo. A primeira é a radiação recebida do Sol sem ser dispersa na atmosfera. A segunda, a que chega à superfície após a sua direção ter sido afetada pela atmosfera. Por último, o albedo que é a fração reenviada em todas as direções por reflexão ou difusão na superfície incidente (Morais 2009). A Figura 2.1 ilustra o balanço da radiação que atinge a superfície terrestre, após sofrer absorções e reflexões por diversos elementos. Nela é visível que apenas uma porção (70%) da radiação total que incide na Terra atinge a superfície terrestre. A intensidade de radiação é reduzida devido à reflexão causada pela atmosfera, absorção em moléculas, difusão de Rayleigh (em moléculas de ar), partículas de pó e pela poluição do ar, que é superior em áreas industriais. Na cidade de Lisboa a média da radiação solar difusa é de 40% da radiação global, esta aumenta em Portugal com a deslocação de Norte para Sul (Portal-Energia 2004).

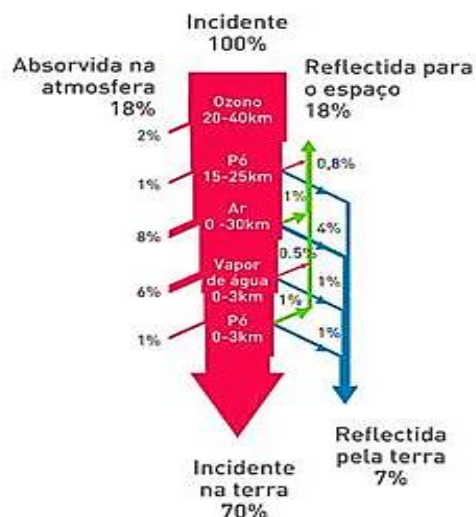


Figura 2.1 - Razão entre a radiação incidente na Terra e a que atinge a superfície terrestre (Morais, 2009).

A energia solar útil que incide um coletor solar depende da latitude geográfica, do dia e do ano. A inclinação do eixo da Terra faz com que os dias no verão sejam maiores que no inverno, também no verão as altitudes solares são mais elevadas (Portal-Energia 2004). A Figura 2.2 mostra a irradiação em 4 dias distintos numa superfície de 1m² situada em Lisboa. Verifica-se uma maior amplitude de valores para o dia 24 de junho, contrastando com o dia 18 de dezembro que revela a menor amplitude de valores.

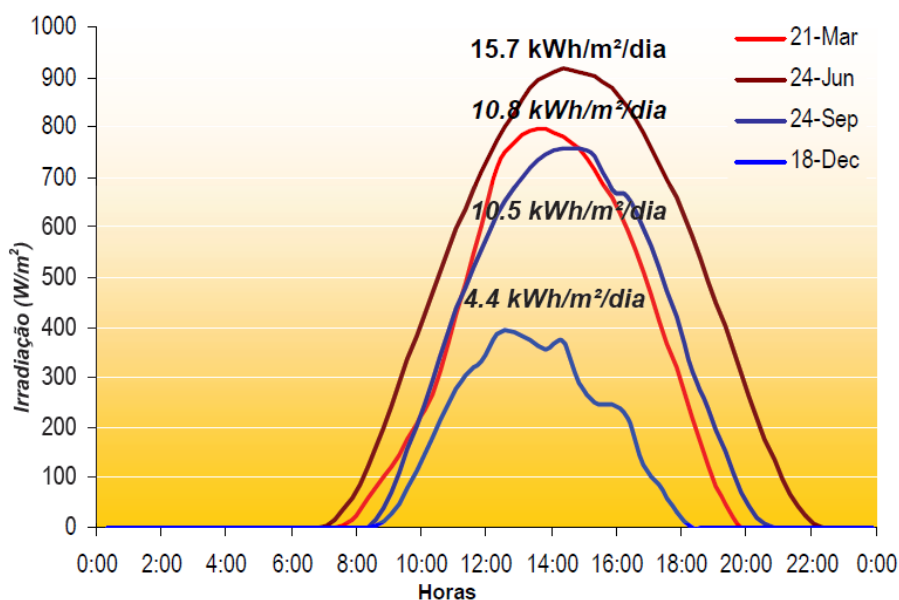


Figura 2.2 - Variação diária e valor total de irradiação em 4 dias do ano (Portal-Energia, 2004).

2.2. Classificação dos sistemas de secagem solar

Os sistemas de secagem devem ser primeiramente classificados, de acordo com a gama de temperaturas a que operam, como secadores de baixas ou altas temperaturas. Nos sistemas de baixa temperatura, o teor de humidade do produto é posto em equilíbrio com o ar de secagem. Estes sistemas são mais morosos e adequados para processos onde a preservação dos nutrientes do produto é desejada. Os sistemas de alta temperatura são utilizados para uma secagem mais rápida, contudo, resultado das temperaturas mais elevadas pode ocorrer um sobreaquecimento do produto, danificando as suas propriedades. A secagem convencional, com recurso a combustíveis fósseis e a secagem solar representam outra forma de classificação baseada na fonte de calor utilizada. Os dois modos de classificação anteriores encontram-se interligados, uma vez que os convencionais estão associados a altas temperaturas e os solares a baixas temperaturas (Ekechukwu e Norton, 1999a).

Após esta classificação generalizada inserem-se na secagem solar outras formas de classificação. Desde logo uma divisão primária que divide a secagem ao ar livre e a secagem recorrendo a secadores. A classificação dos secadores não é restrita, tornando-se uma tarefa árdua na medida em que existem muitas configurações distintas e parte delas são construções empíricas. Os parâmetros a ter em conta na classificação são: o tipo de secador, a delimitação das temperaturas de operação, o tipo de produto submetido ao sistema e o tipo de operação (Belessiotis e Delyannis, 2011). De uma maneira genérica, os secadores solares podem ser classificados em dois grupos principais: ativos e passivos, estes subdivididos ainda em diretos, indiretos, mistos (Figura 2.3). Dados os avanços tecnológicos, alguns modelos que incluem uma fonte de energia auxiliar à energia solar inserem-se nos designados híbridos.

2.2.1. Secadores passivos

Nos sistemas passivos o ar circula por intermédio de forças de impulsão criadas por gradientes de pressão ou resultado do vento. A sua principal vantagem é o facto de serem economicamente competitivos. A ausência de um sistema de convecção forçada torna o investimento e os custos de manutenção menores (Ekechukwu e Norton, 1999a). Contudo, apresentam como principal inconveniente a limitação do processo pela inconstância do escoamento de ar, podendo esta ser melhorada através da introdução de chaminés (Belessiotis e Delyannis, 2011; Mustayen et al., 2014).

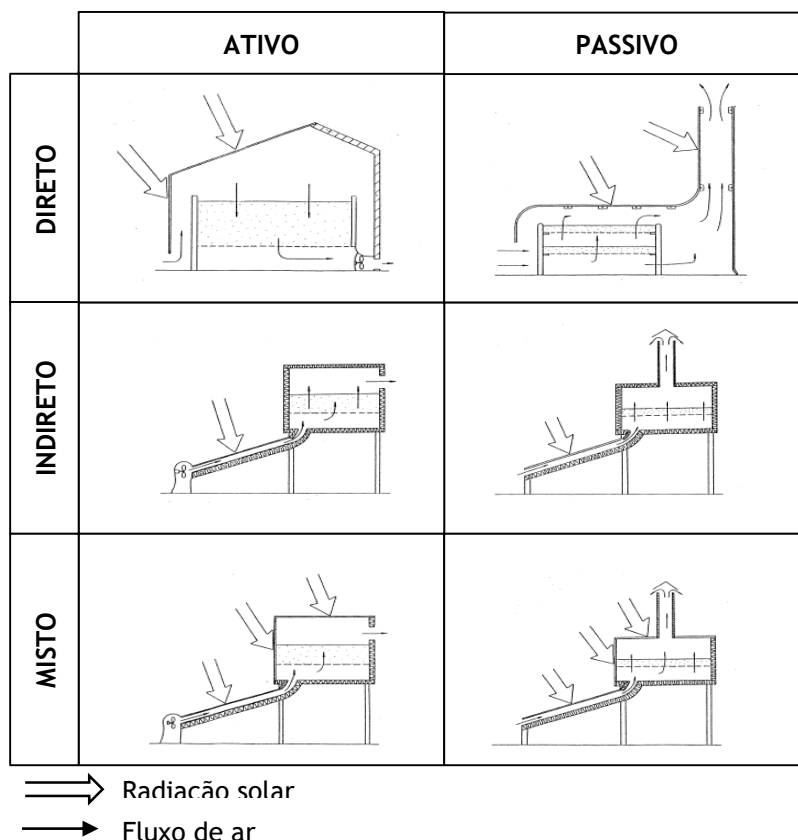


Figura 2.3 - Classificação de modelos de secadores solares (adaptado de Ekechukwu e Norton, 1999a)

2.2.2. Secadores ativos

Os secadores solares ativos têm na sua base de funcionamento a convecção forçada. Empregam para além de energia solar, energia elétrica para fornecerem energia aos ventiladores ou outros dispositivos que permitem uma circulação do ar constante. Estes sistemas estão associados a secagem de altas temperaturas onde é conveniente a existência de um caudal de ar elevado, evitando a exposição prolongada do produto ao ar sobreaquecido. Segundo Ekechukwu e Norton (1999a) os secadores de convecção forçada apresentam como principais vantagens os seguintes pontos:

- maior eficiência do secador;
- escoamento de ar independente das condições climáticas;
- maior controlo do processo de secagem.

Já Mustayen et al. (2014) apresentaram os pontos reversos que são:

- o maior investimento e custo de manutenção;
- a impossibilidade de implementação onde não exista eletricidade;
- o impacto ambiental negativo (caso envolva o consumo de combustíveis fósseis).

2.2.3. Secadores diretos

Na secagem envolvendo secadores diretos, os produtos são colados numa câmara de secagem com as paredes transparentes. A radiação solar é transmitida a partir da cobertura transparente e absorvida pelas superfícies interiores negras e pelo produto, reduzindo o teor de humidade do produto, e a HR do ar no interior da câmara, aumentando a capacidade de remoção de humidade. Isto faz com que a radiação seja o mecanismo de transferência de calor mais abundante neste sistema. Segundo Ekechukwu e Norton (1999a) os secadores diretos apresentam como principais vantagens o facto de:

- permitirem o amadurecimento e a coloração necessária de frutos numa fase inicial de maturação, através da decomposição do tecido de clorofila residual durante a desidratação;
- possuírem baixo investimento e simplicidade na construção.

Segundo Sharma et al. (2009) os pontos reversos deste método são:

- sobreaquecimento do ar e conseqüente danificação dos produtos;
- descoloração motivada pela exposição direta dos produtos;
- baixas taxas de secagem, motivadas pela pobre renovação do ar;
- condensação da humidade dentro no interior da cobertura, reduzindo a sua transmissividade.

2.2.4. Secadores indiretos

Os secadores solares indiretos (Figura 2.4) são uma técnica recente, ainda não padronizada, nem amplamente comercializada, que envolve dispositivos coletores de energia térmica (Belessiotis e Delyannis, 2011). Estes secadores são compostos por uma unidade coletora, uma câmara de secagem, um ducto bem isolado, que une os elementos anteriores, e uma chaminé. Os produtos são colocados em tabuleiros, posicionados dentro da câmara de secagem opaca, que conectada ao coletor recebe o ar quente proveniente deste. O principal modo de transferência de calor é a convecção entre o ar aquecido no coletor e o produto. Segundo Sharma et al. (2009) estes dispositivos permitem a conservação do valor nutricional dos produtos, nomeadamente a vitamina C, acrescentando-se a isto, uma melhor aparência e textura dos produtos. A única desvantagem é o capital inicial necessário para este modelo de secador face aos anteriormente abordados, incrementado caso o equipamento possua material auxiliar como tubagens, ventiladores, e instrumentação para melhorar o controlo do processo de secagem. Os secadores indiretos segundo Ekechukwu e Norton (1999a), Belessiotis e Delyannis (2011) e Sharma et al. (2009) apresentam como principais vantagens:

- ausência de caramelização dos produtos, pela não incidência de radiação de forma direta;
- preservação do conteúdo vitamínico e da coloração do produto, adversamente afetados pela exposição direta ao sol;
- maiores temperaturas de operação face aos secadores diretos;
- taxas de secagem elevadas.
- melhor controlo do processo de secagem.

Segundo Ekechukwu e Norton (1999a) as principais lacunas deste mecanismo são:

- inconstância das condições de operação motivada pelas alterações climáticas;
- dificuldade na carga e descarga dos produtos;
- maior investimento e maiores custos de manutenção caso adotem estruturas mais elaboradas.



Figura 2.4 - Secador solar indireto utilizado no estudo de Mohanraj e Chandrasekar (2009).

2.2.5. Secadores mistos

Os secadores mistos (Figura 2.5) combinam as características dos secadores diretos e indiretos. Ou seja, existe exposição direta do produto à radiação solar e circulação de ar aquecido numa unidade coletora. A sua estruturação é idêntica à dos secadores indiretos, com o facto de possuírem paredes na câmara de secagem transparentes (Ekechukwu e Norton, 1999a).

2.2.6. Secadores híbridos

Este tipo de secador possui uma fonte de energia auxiliar, que complementa a energia solar durante o processo de secagem. Esta fonte pode ser de natureza elétrica, geotérmica, fotovoltaica ou ainda com base em combustíveis fósseis e biomassa. Apresentam-se como boas alternativas à secagem convencional, para aplicação à larga escala comercial, proporcionando

reduções do consumo energético e uma continuidade do processo motivada pela ausência de variação das amplitudes térmicas (Belessiotis e Delyannis, 2011).



Figura 2.5 - Secador misto utilizado no estudo de Martins et al. (2010).

2.3. Tipos de Coletores Solares

Segundo Belessiotis e Delyannis (2011) os coletores solares representam a fonte de energia primária dos secadores solares indiretos. Estes são uma unidade empregada nos secadores solares para causarem um ganho térmico no fluido de trabalho, nesta situação ar, a partir da radiação solar incidente. Existem diferentes tipos de coletores, entre eles destacam-se os coletores planos e os concentradores, estes últimos com temperaturas de operação mais elevadas.

O conceito mais simples de um coletor consiste numa superfície absorvedora, geralmente pintada de preto fosco, que absorve radiação e transmite esse calor para um fluido de trabalho, que pode ser água ou ar, contudo nos coletores aplicados a secadores o funcionamento é baseado no ar. Para evitar perdas térmicas, as paredes laterais e na base do coletor são isoladas com materiais de baixa condutibilidade térmica. Pode ainda ser constituído por uma ou mais coberturas transparentes à radiação solar, com o intuito de diminuir as perdas por convecção e permitir um incremento na temperatura.

Para a secagem solar os coletores planos são os mais adequados numa perspetiva técnico-económica (Ekechukwu e Norton, 1999b; Vyas e Punjabi, 2014). Existem vários tipos de coletores planos com o ar como fluido de trabalho, apresentam-se de seguida alguns desses modelos.

2.3.1. Descobertos

Os coletores descobertos (Figura 2.6) são os mais simples. Possuem um canal de ar coberto por uma placa absorvedora e na base exibem um isolante térmico. Geralmente as perdas na transmissão de radiação solar através de uma cobertura transparente são de 10%. Ou seja, com este tipo de coletores, neste ponto, a eficiência é 10% superior aos cobertos. Contudo, devido à ausência de uma cobertura, as perdas térmicas são superiores. Consequência destes efeitos evidenciam baixas eficiências para temperaturas muito elevadas relativamente ao ambiente, todavia, para elevações inferiores a 10 °C face ao ambiente são mais eficientes.

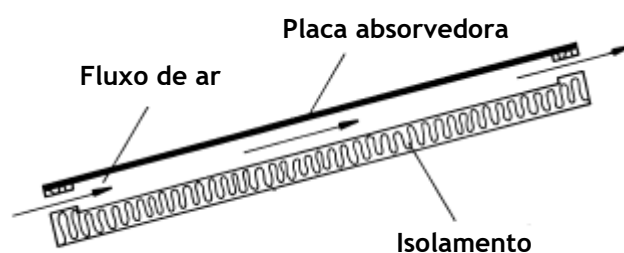


Figura 2.6 - Coletor descoberto (adaptado de Ekechukwu e Norton, 1999b).

2.3.2. Cobertos

As perdas térmicas de um coletor solar são minimizadas pelo uso de uma ou mais coberturas, colocadas por cima e paralelamente à placa absorvedora. Os materiais mais utilizados para o efeito são o vidro, o acrílico e plásticos transparentes. Com a implementação de estas coberturas as perdas convectivas são minimizadas, as perdas radiantes de elevados comprimentos de onda são reduzidas e existe uma maior proteção ao arrefecimento da placa, na eventualidade de precipitação. Os seus inconvenientes quanto aos descobertos são o maior investimento e a vulnerabilidade de algumas das soluções utilizadas. Apesar disto, a sua utilização é recomendada quando são necessárias elevações de temperatura entre os 10 e os 35 °C acima da temperatura ambiente (Ekechukwu e Norton, 1999b). As soluções dentro deste tipo de coletor plano são diversas e abordadas seguidamente, sendo que as principais diferenças são relativas à posição da placa absorvedora e à forma como o escoamento do ar é realizado.

2.3.2.1. Coletores de fluxo superior

Os coletores de fluxo superior (Figura 2.7) são uma configuração onde ar passa através de um duto, delimitado pela cobertura transparente acima e pela placa absorvedora e o isolamento abaixo. A transferência de calor para o ar ocorre na parte frontal da placa, daí a designação de coletores de fluxo superior.

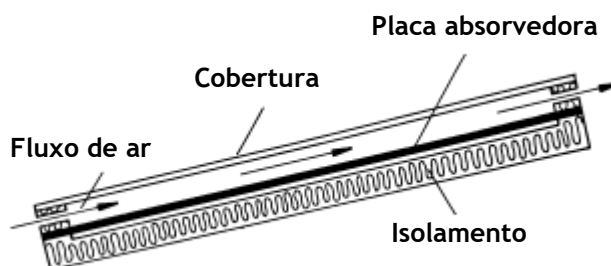


Figura 2.7 - Coletor de fluxo superior (adaptado de Ekechukwu e Norton, 1999b).

2.3.2.2. Coletores de fluxo inferior

Os coletores de fluxo inferior (Figura 2.8) são caracterizados por possuírem a placa absorvente posicionada imediatamente após a cobertura, espaçada de uma pequena porção de ar. A passagem de ar ocorre entre a placa e o isolamento, com a transferência de calor a proceder-se da parte posterior da placa para o ar, daí a designação de coletores de fluxo inferior.

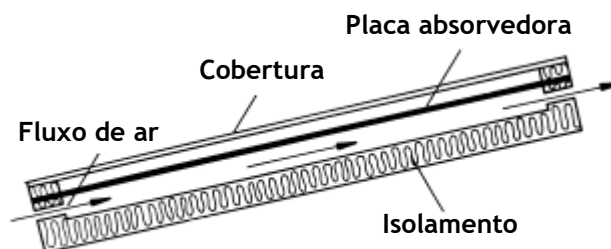


Figura 2.8 - Coletor de fluxo inferior (adaptado de Ekechukwu e Norton, 1999b).

2.3.2.3. Coletores de placa suspensa

Nos coletores de placa suspensa, a placa absorvente é colocada entre a cobertura e o isolamento. Isto permite aumentar a área de transferência de calor, contudo, origina menores temperaturas na placa e por isso irradia menos calor. Existem duas configurações distintas dentro deste tipo de coletores: os paralelos (Figura 2.9 a)) e os de passagem dupla (Figura 2.9 b))

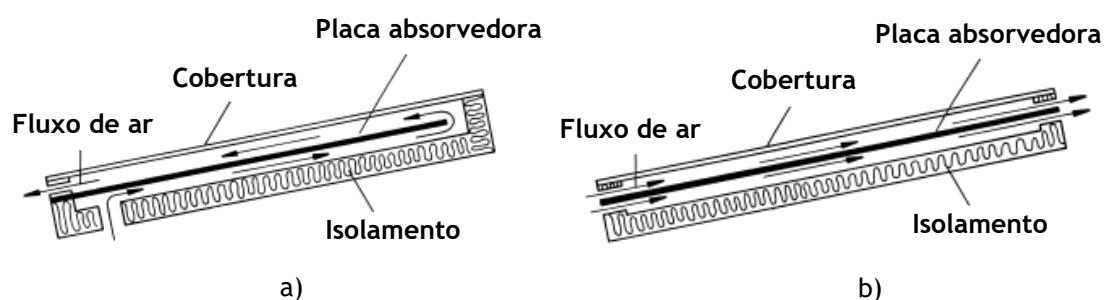


Figura 2.9 - Coletores de placa suspensa: a) paralelos; b) passagem dupla (adaptado de Ekechukwu e Norton, 1999b).

2.3.2.4. Coletores de placa perfurada

Os coletores de placa perfurada (Figura 2.10) são também conhecidos como coletores de matriz. Consistem numa superfície absorvente de elevada porosidade, como por exemplo redes metálicas ou aparas de madeira. A finalidade da sua implementação é fazer com que a transferência de calor entre o ar e a superfície absorvente aumente.

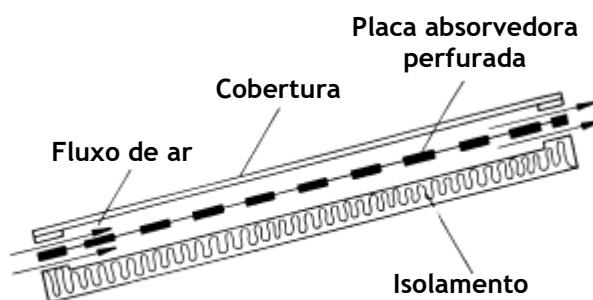


Figura 2.10 - Coletor de placa perfurada (adaptado de Ekechukwu e Norton, 1999b).

2.4. Fatores influentes no desempenho do coletor

Um dos pontos fundamentais no projeto de um coletor é analisar o melhor modelo para os objetivos definidos. Para isso é importante analisar todos os elementos do coletor, ao qual se pretende que absorva a maior quantidade de energia solar possível, estando esta dependente:

- do nível de insolação e orientação e inclinação do coletor;
- da absorvidade da placa;
- da transmissividade da cobertura (caso exista).

Para além destes fatores existem outros ligados aos vários elementos constituintes de um coletor solar, que afetam o seu desempenho, e que podem ser ajustados para a obtenção de rendimentos maiores. De seguida serão retratados alguns dos pontos essenciais, no domínio de cada elemento. Serão também abordados alguns fenómenos ocorridos num coletor solar, de maneira a contribuir para a tomada de decisão, na fase construtiva.

2.4.1. Orientação e inclinação

Os dados evidenciados anteriormente, na secção 2.1, acerca da energia que atinge a superfície terrestre, tinham como base a incidência num plano horizontal. A inclinação dos coletores é mais eficaz, comparativamente à sua colocação num plano horizontal, por duas razões. Primeiro, conseguem coletar mais energia solar quando a superfície dos coletores possui uma inclinação ótima. Segundo, devido à inclinação do coletor, o ar quente, menos denso, sobe e entra naturalmente na câmara de secagem (Sharma et al., 2009). A maior ou menor captação de energia solar, para além de ter conta a inclinação ótima do coletor deve considerar os eixos de azimute.

O ângulo de azimute que define o movimento do Sol, ao meio-dia encontra-se virado a sul no hemisfério norte. Em Portugal, todos os sistemas solares térmicos devem-se encontrar orientados a sul, por forma a maximizar as horas de exposição solar ao longo da trajetória solar (Benedito, 2010; Portal-Energia, 2004; Morais, 2009).

A inclinação do sistema solar térmico deve ter um desfasamento relativamente à horizontal, que varia com a latitude do local e o período de captação solar. Para otimizar a captação energética, a sazonalidade de operação do dispositivo é importante. Caso a implementação seja para um funcionamento anual, a inclinação deve ser a latitude do local menos 5°. Caso seja para utilização apenas em determinada estação, a inclinação deverá ser a latitude do local mais 15° no inverno e a latitude do local menos 15 °C no verão. Esta inclinação superior no inverno deve-se à menor altura solar (Benedito, 2010). Na Figura 2.11 está ilustrada a forma como deve variar a inclinação de um coletor, ao longo do ano.

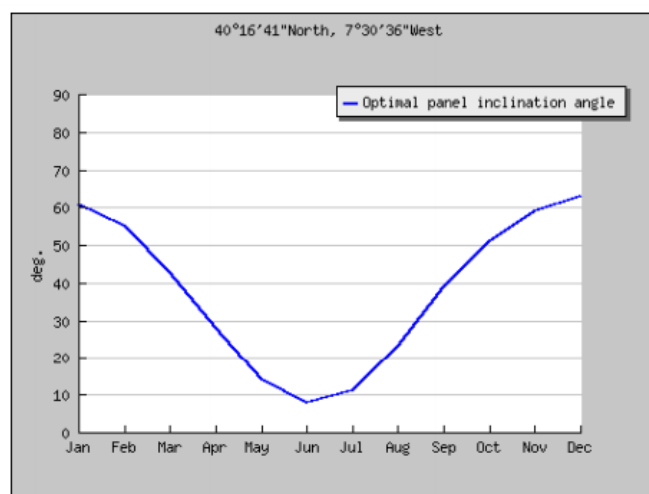


Figura 2.11 - Variação da inclinação do coletor ao longo do ano para as coordenadas da UBI (PVGIS, 2016).

Sistemas mal orientados e inclinados podem traduzir-se em perdas energéticas significativas. Atualmente existem *softwares* ou até mesmo ferramentas disponíveis *online* que para a localização geográfica exata calculam qual a melhor solução. Através da informação disponível *online* do *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)* do *Joint Research Centre (JRC)* da comissão europeia é possível a determinação das coordenadas geográficas do local escolhido, que em função disso fornece a inclinação ótima do sistema. A Figura 2.12 evidencia a forma como varia a inclinação ótima do coletor para um funcionamento anual na Europa.

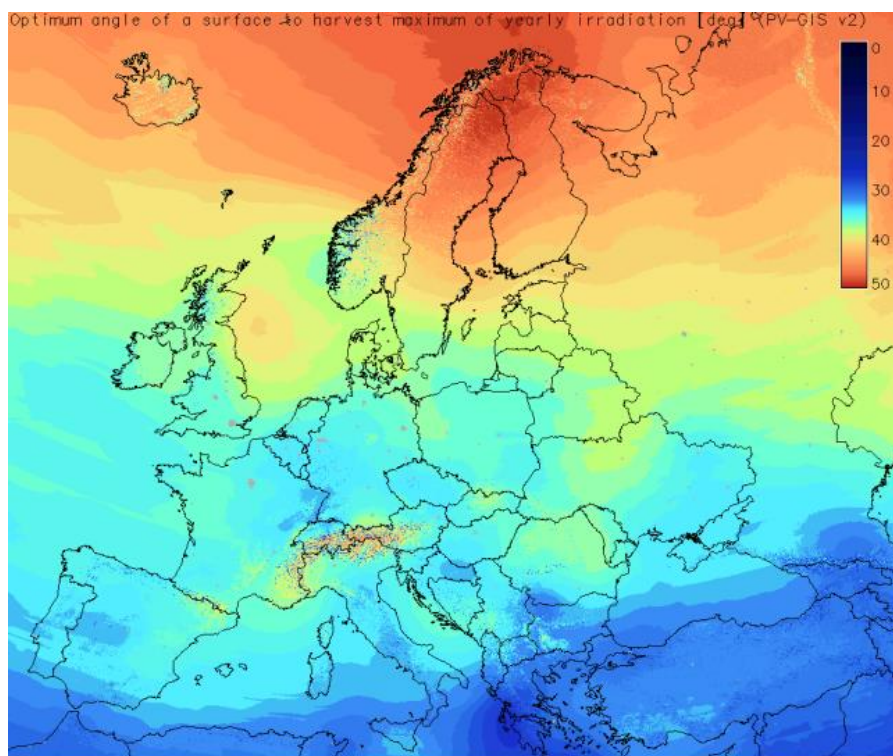


Figura 2.12 - Inclinação ótima do coletor nos países da Europa para funcionamento anual (PVGIS, 2016)

2.4.2. Cobertura

Quando uma superfície é atingida por radiação solar ocorrem três processos: absorção, reflexão e transmissão. A radiação solar que atinge o coletor é de baixo comprimento de onda, na ausência de uma cobertura parte dessa energia é refletida e parte é absorvida. A energia absorvida pela placa absorvedora é convertida em energia térmica, elevando a sua temperatura. Esta elevação faz com que seja libertada radiação de alto comprimento de onda para atmosfera sem a presença de uma cobertura. Com a utilização de uma cobertura, parte da radiação é refletida por esta para a atmosfera, e parte é transmitida para o interior do coletor. A diferença é que a radiação de alto comprimento de onda, em virtude do aumento de temperatura da placa, não vai ser libertada para a atmosfera pela presença do vidro, que é opaco a radiação de alto comprimento de onda (Sharma et al., 2009).

A transmissividade é um parâmetro fundamental de qualquer cobertura. Uma boa cobertura deve ter uma alta transmissividade na gama visível do espectro eletromagnético e baixa transmissividade para radiação infravermelha, uma vez que é nesta gama que a radiação irradiada pela placa se encontra. Outras qualidades que as coberturas devem possuir são: baixa absorvidade, resistência à quebra, durabilidade sob condições meteorológicas adversas e baixo custo. Todas estas características devem ser selecionadas mediante os objetivos e o orçamento disponível. O vidro define-se como o material mais utilizado. Este apresenta alta transmissividade na região visível, baixa transmissividade à radiação infravermelha e é estável a altas temperaturas. Os plásticos apesar de serem uma solução mais barata, sem risco de quebra, têm pouca durabilidade quando submetidos a condições climáticas desfavoráveis, especialmente devido à radiação ultravioleta (Belessiotis e Delyannis, 2011).

O vidro com baixo teor de ferro é o material mais utilizado na construção de coletores. Geralmente, um vidro comum transmite 91% da radiação que nele incide. Quanto à restante radiação, 1% é absorvida e 8% refletida (Portal-Energia, 2004). Segundo Bakaria et al. (2014) o vidro não deve ter espessuras inferiores a 3,3 mm.

2.4.3. Placa absorvedora

Um elemento essencial de um coletor plano é a sua placa absorvedora. Esta superfície deve possuir uma absorvidade elevada. Para além disto, o material usado na superfície deve ter baixa emissividade, boa condutibilidade térmica e deve ter baixa inércia térmica. Apesar de haver conhecimento que o aumento da área absorvedora implica um aumento da quantidade de transferência de calor para o ar, deve haver um compromisso tendo em conta a durabilidade, a massa por unidade de área e o preço. Os metais são os materiais mais utilizados, destacando-se o alumínio, o aço e o cobre, que geralmente são pintados de preto para melhorar as suas características de absorção (Ekechukwu e Norton, 1999b).

2.4.4. Perdas térmicas nos coletores

As perdas num coletor solar acontecem sob os três modos de transferência de calor: radiação, convecção e condução (Figura 2.13), mecanismos de calor abordados no subcapítulo 2.5. As perdas por condução ocorrem nos lados e na parte posterior do coletor. As perdas por convecção tomam lugar entre a placa absorvedora e a cobertura. As perdas por radiação ocorrem através da placa pela sua temperatura. As perdas da cobertura para o ambiente são de natureza convectiva e radioativa, sendo afetadas pela velocidade do vento e pela radiação de alto comprimento de onda. Estas perdas podem ser minimizadas pela utilização de superfícies

seletivas com elevada absorvidade e baixa emissividade de longos comprimentos de onda (Agbo e Okoroigwe, 2007).

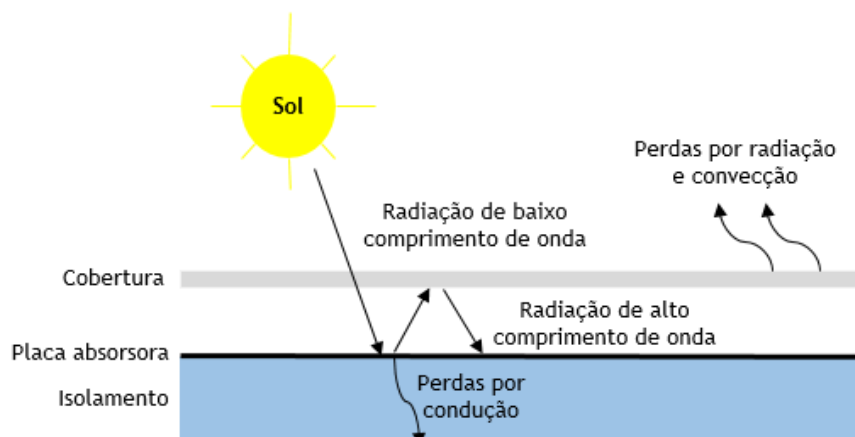


Figura 2.13 - Representação das perdas num coletor (adaptado de Agbo e Okoroigwe, 2007).

As perdas globais num coletor solar são afetadas pelo número de coberturas, velocidade do vento, ângulo de inclinação, caixa-de-ar entre a superfície coletora e a cobertura, emissividade da placa coletora e a diferença para com a temperatura ambiente (Agbo e Okoroigwe, 2007).

Agbo e Okoroigwe (2007) nesta questão afirmaram diversos pontos que são apresentados de seguida. Segundo eles a utilização de um vidro duplo minimiza as perdas globais em 44%. O aumento da velocidade do vento, faz aumentar as perdas convectivas e radiantes a partir da cobertura. Para inclinações variáveis entre 0 e 40°, as perdas são inferiores para valores mais elevados de inclinação. Relativamente ao espaço de ar as perdas diminuem com o aumento deste, sendo que esse nunca deve ser inferior a 5 cm para um bom desempenho do coletor. No que concerne a emissividade quando esta é reduzida de 0,86 para 0,10 as perdas são reduzidas em 47%, com isto a escolha da placa deve ter em conta não só a condutibilidade do material bem como a sua emissividade. Por último afirmam que as perdas no coletor aumentam para temperaturas ambiente mais elevadas, pelo que durante o período da manhã estas perdas são menores.

Segundo Agbo (2011) a eficiência do coletor aumenta ligeiramente com a diminuição da espessura do vidro. À medida que a espessura diminui, aumenta a transferência de calor por condução entre o vidro e o ar. Contudo, segundo o autor devem-se ter em conta fatores como a durabilidade, a resistência e a rigidez do material.

2.4.5. Chaminé

As chaminés são um elemento fundamental na conceção de um secador solar passivo, de forma a melhorar a circulação de ar no interior do secador, melhorando a eficiência do secador solar e aumentando a taxa de secagem (Bassey et al., 1994). Vários estudos mostram que a adição de

chaminés, nem sempre está associada a uma melhoria no desempenho do secador solar. Para que isto aconteça deve existir uma diferença de temperaturas entre o ambiente e a chaminé. Quando a temperatura da chaminé é mais elevada há um aumento do fluxo de ar e uma consequente melhoria no desempenho do secador (Bassey et al., 1994). Teoricamente o fenómeno ocorrido numa chaminé está associado a uma força de impulso. Segundo Ekechukwu e Norton (1997) a força de impulso necessária para gerar um escoamento de ar é diretamente proporcional à diferença entre a massa volúmica do ar no interior da chaminé e a massa volúmica do ar ambiente, representada por:

$$\Delta P_b = gH(\rho_a - \rho_{ch}) \quad (2.1)$$

Onde, ΔP_b é a queda de pressão devido à impulsão (N/m); g a aceleração da gravidade (m/s); h a altura da chaminé (m); ρ_a é a massa volúmica do ar ambiente (kg/m³); ρ_{ch} é a massa volúmica da chaminé (kg/m³).

Quando a temperatura do ar ambiente e a humidade se encontram nas mesmas condições das verificadas na chaminé, as massas volúmicas igualam-se, e caso o efeito de Bernoulli não seja criado pelo vento, então não haverá escoamento através da chaminé. Se contrariamente a isto, a temperatura do ar na chaminé for maior que a do ambiente, então $\rho_a > \rho_{ch}$, e será criada uma pressão que origina um escoamento para fora da chaminé.

2.5. Mecanismos de transferência de calor

Existem três modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. A transferência de calor é um processo que implica a necessidade de existir uma diferença de temperatura, ocorrendo da região mais quente para a mais fria. Estes mecanismos de calor estão presentes nos secadores solares quer no coletor quer no produto submetido ao processo (Ekechukwu e Norton, 1999b). De seguida abordar-se-á mais ao pormenor cada um destes mecanismos:

2.5.1. Condução

A condução é um modo de transferir calor que pode acontecer em sólidos, gases e líquidos. A quantidade de calor que é transferido depende do tipo de material, da sua espessura e ainda da diferença de temperatura entre dois pontos, e é dado pela *Lei de Fourier* (Silva, 2010):

$$q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

Onde q_{cond} é o fluxo de calor; dT/dx é o gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor °C/m ou K/m; A é a área da superfície (m²); dx é a espessura da parede; k condutibilidade térmica do material (W/mK); O sinal negativo na expressão é necessário uma vez que o calor flui na direção da menor temperatura, ou seja, no sentido oposto ao do gradiente de temperatura.

A condutibilidade térmica é uma propriedade que define a capacidade de um material conduzir calor. Apresenta valores característicos para cada tipo de material, que variam consoante a massa volúmica, temperatura e humidade. Pela *Lei de Fourier* vê-se que quanto maior for o valor da condutibilidade térmica do meio, maior é o fluxo de calor que o atravessa (Silva, 2010).

No âmbito da presente dissertação este parâmetro tem influência na secagem dos produtos e na atenuação das perdas térmicas no coletor. Na secagem porque pode ocorrer transferência de calor das superfícies onde são colocados os produtos e os próprios produtos, e ainda, caso exista, pelo contacto entre produtos. Na redução das perdas térmicas, pela utilização de um material isolante térmico, ou seja, com uma condutibilidade térmica baixa.

Metais como o alumínio ($k=240 \text{ W/mK}$) possuem uma condutibilidade térmica alta, e conseguem transmitir elevadas quantidades de calor, para pequenas variações de temperatura. Contrariamente a estes, o ar, caracterizado por ser um ótimo isolante ($k=0,023\text{W/mK}$) é muito usado entre duas superfícies (Everett, 2004).

2.5.2. Convecção

A transferência de calor por convecção ocorre entre uma superfície e um fluido adjacente em movimento. A transferência de calor pode ocorrer do fluido para a superfície ou vice-versa, dependendo das temperaturas em questão. A taxa de calor transferido por convecção é dada pela *Lei de Newton do arrefecimento* (Silva, 2010):

$$q_{conv} = Ah(T_s - T_\infty) \quad (2.3)$$

Onde, A é a área da superfície de permuta (m^2), h é o coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W/m}^2\text{K}$); T_s é a temperatura da superfície de permuta ($^\circ\text{C}$ ou K); T_∞ é a temperatura do escoamento não perturbado.

Tal como já foi referido, anteriormente na secção 2.2, existem dois tipos de convecção, a forçada e a natural. Na convecção forçada o movimento do fluido é realizado através de uma fonte externa (por exemplo: ventilador). Na convecção natural o movimento é derivado de forças de impulsão. De salientar que consoante o tipo de convecção o valor do coeficiente convectivo varia. Por exemplo, enquanto que em gases sob convecção natural pode variar de 2 a $25 \text{ W/m}^2\text{K}$, quando se encontra sob convecção forçada esses valores são de 25 a $250 \text{ W/m}^2\text{K}$.

O coeficiente convectivo, h , para além de variar com o tipo de convecção, onde a convecção forçada está associada a uma velocidade do escoamento superior, depende de fatores como: rugosidade da superfície, regime do escoamento, geometria da superfície e propriedades do fluido como a viscosidade, massa específica entre outros.

A determinação deste coeficiente para além de estar associada à área de transmissão e calor, engloba a área da dinâmica dos fluidos, com introdução de conceitos como a camada limite. Contudo, não será feita uma análise mais minuciosa dentro deste tema, uma vez que não se enquadra nos objetivos definidos.

2.5.3. Radiação

A radiação é uma forma de transferir calor, a partir de ondas eletromagnéticas, não necessitando, por isto, de um meio para se propagar. Todos os corpos têm a capacidade de emitir e absorver ondas eletromagnéticas, a taxa máxima de energia radiante que uma superfície pode emitir (W) é dada pela *Lei de Stefan-Boltzmann*:

$$q_{rad} = A\sigma T_s^4 \quad (2.4)$$

Onde, A é a área da superfície exposta (m²); σ , é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma=5,67 \times 10^{-8}$ W/m²K⁴); T_s é a temperatura absoluta da superfície (K). E contrariamente aos mecanismos condução e convecção a transferência de calor é proporcional à quarta potência da temperatura.

A expressão 2.4 é válida para corpos negros, que são os únicos com taxas máximas de energia emitida e absorvida, nas superfícies reais a expressão fica:

$$q_{rad} = A\epsilon\sigma T_s^4 \quad (2.5)$$

O termo novo, ϵ , diz respeito à emissividade da superfície que varia de 0 a 1. Que para um corpo negro apresenta o valor unitário e para uma folha de alumínio é de 0,07.

A transferência de calor entre dois corpos a emitir radiação é expressa por:

$$q_{rad} = A\epsilon\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (2.6)$$

A radiação térmica é geralmente distribuída de acordo com os seus comprimentos de onda no espectro eletromagnético (Figura 2.14).

Os comprimentos de onda com interesse nas aplicações da energia solar, como o da presente dissertação, variam do ultravioleta até à infravermelha, ou seja, dos 0,29 aos 25 μ m. Neste intervalo está presente a radiação visível, à qual o olho humano consegue detetar (Duffie e Beckman, 2013).

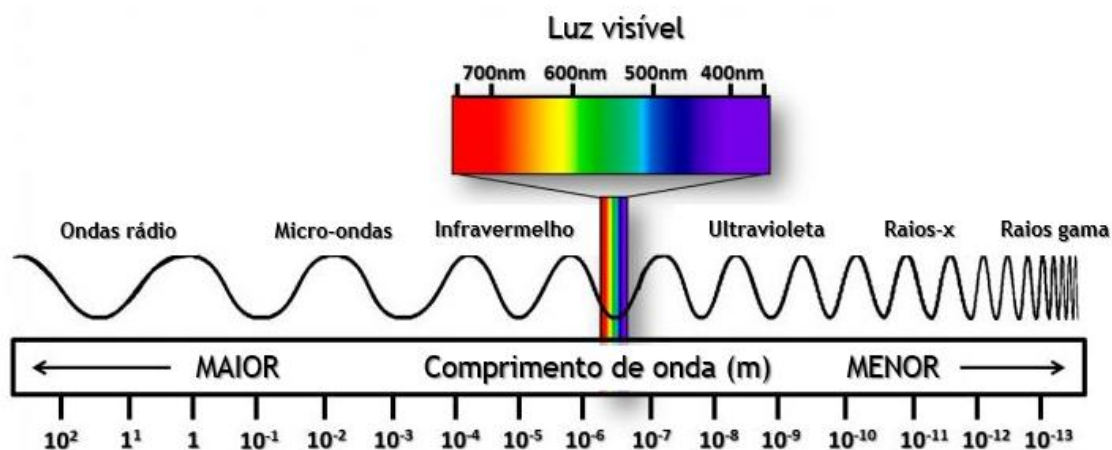


Figura 2.14 - Espectro eletromagnético (adaptado de NASA, 2016).

2.6. Secagem Solar

A secagem é um processo de remoção de humidade dum produto, este realizado já pelos primórdios da humidade. Todavia, só a partir de meados dos anos 50 é que os princípios básicos e fundamentais da teoria de secagem passaram a ser abordados mais minuciosamente. Existe atualmente um vasto domínio de métodos que permitem executar este processo. Dentro destes inserem-se a secagem química, a mecânica por compressão ou ação de forças centrífugas ou gravíticas. Todavia, a forma mais comum é a secagem térmica, que envolve a vaporização de humidade do interior do produto por ação do calor e por conseguinte a sua evaporação (Ekechukwu e Norton, 1999a). À pressão de 101,3 kPa, este processo engloba um consumo de 2258 kJ/kg para transformar água líquida em vapor (Belessiotis e Delyannis, 2011).

A transferência de humidade no processo de secagem divide-se em duas partes: primeiro, o transporte de humidade do interior do produto para a superfície; segundo, a transferência de humidade da superfície para o ar envolvente, em forma de vapor de água. Ou seja, é caracterizado por ser um processo que combina a transferência de calor e massa. O fluxo de humidade proveniente do interior do produto resulta de uma diferença de pressão entre o ambiente e o produto. O produto ao ser aquecido vê a pressão do seu vapor aumentada, contrastando com a pressão ambiente que é mais baixa (Ekechukwu, 1999).

2.6.1. Curvas de secagem

Todos os produtos possuem uma curva de secagem característica, ou seja, o seu teor de humidade evolui de forma distinta em função do tempo, devido à sua composição, estrutura e dimensões. O comportamento do teor de humidade de um produto está relacionado com a difusão da humidade no interior dos produtos e a respetiva libertação para o ambiente. Fenómenos que são dependentes de fatores como: a energia térmica e o caudal de ar envolvidos no processo, que são as variáveis mais influentes na remoção de humidade de um produto. Mas, contribuem ainda

fatores como a forma, o tamanho e a quantidade dos produtos exposta (Mohanraj e Chandrasekar, 2009; Onyinge et al., 2015). Na Figura 2.15 estão evidenciadas as curvas da evolução do teor de humidade, da temperatura do produto e da taxa de secagem ou também designada velocidade de secagem.

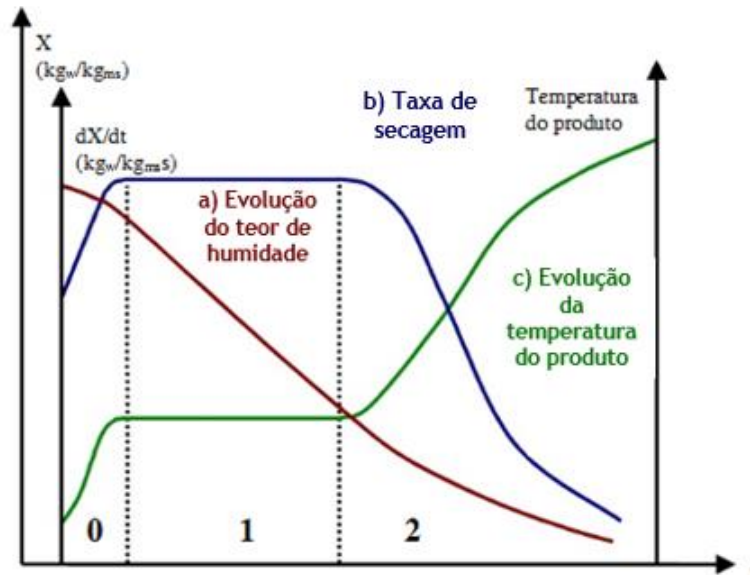


Figura 2.15 - Curvas de secagem (adaptado de Park et al., 2014).

A curva a) da Figura 2.15 diz respeito à forma como evolui o teor de humidade X , em função do tempo t , é uma curva obtida a partir de pesagens efetuadas ao longo de determinados ensaios de secagem (Park et al., 2014).

A curva b) da Figura 2.15 mostra a taxa de secagem do produto, isto é, a evolução do teor de humidade do produto por tempo dX/dt em função do tempo t (Park et al., 2014).

A curva c) da Figura 2.15 representa a forma como varia a temperatura do produto em função do tempo t (Park et al., 2014).

2.6.1.1. Determinação do teor de humidade

A quantidade de humidade presente num determinado material pode ser expressa na base húmida ou na base seca, de forma decimal ou percentual. Segundo Ekechukwu (1999) o teor de humidade na base humidade é dado pela massa da humidade presente no produto, por unidade de matéria húmida (W_0):

$$M_{wb} = \frac{W_o - W_d}{W_o} \quad (2.7)$$

Segundo Ekechukwu (1999) o teor de humidade na base seca, é dado pela razão entra a massa da humidade presente no produto e a massa da matéria seca do produto (W_d).

$$M_{db} = \frac{W_o - W_d}{W_d} \quad (2.8)$$

2.6.1.2. Taxa de Secagem

Na Figura 2.15 estão representados três períodos distintos que serão descritos de seguida.

O primeiro período, correspondendo à região 0 na Figura 2.15 é o início da operação. Nesta fase o produto encontra-se mais frio que o ar envolvente, e a pressão de vapor de água na superfície, a transferência de massa e a taxa de secagem são débeis. O calor do ar faz aumentar a temperatura do produto, aumentando a pressão e a taxa de secagem. Este período termina quando a transferência de calor iguala a transferência de massa. Comparado com o tempo total da secagem, a sua duração é insignificante.

O segundo período, correspondendo ao 1 na Figura 2.15, designa-se período de taxa constante. Neste, a secagem ocorre na superfície do produto removendo a água livre presente. Durante este período a água evaporada, caso o produto seja poroso é proveniente do seu interior. O fim deste regime é marcado pela diminuição do fluxo de humidade do interior do produto atingindo-se o teor de humidade crítico, ou seja, termina quando deixa de chegar à superfície a mesma quantidade de vapor de água que é evaporada. A maioria dos produtos alimentares não apresentam um período de taxa constante, visto que possuem teores de humidade próximos do ponto crítico, alcançando-o rapidamente (Belessiotis e Delyannis, 2011).

O terceiro período, correspondendo ao 2 na Figura 2.15, denomina-se período de taxa decrescente. Este tem início logo após o teor de humidade ponto critico, caracterizado por uma diminuição da pressão do vapor de água na superfície, motivado pela menor transferência de massa do interior do produto, que faz diminuir a taxa de secagem. No final, a taxa de secagem é nula, dado que o produto entra em equilíbrio com ar em termos de pressões.

A taxa de secagem é um parâmetro bastante utilizado para determinar o desempenho dos secadores solares. Segundo Nunes et al. (2016) pode ser expressa por:

$$DR = \frac{M_t - M_f}{M_o - M_f} \quad (2.9)$$

Onde, DR é a taxa de secagem adimensional; M_t é a massa do produto ao longo do tempo de secagem (kg); M_f é a massa do produto no final da secagem (kg); M_o é a massa inicial do produto (kg).

2.6.1.3. Teor de humidade de equilíbrio

A pressão do vapor de água é a responsável por definir se o produto absorve ou liberta humidade. Os produtos agrícolas são produtos higroscópicos, nestes, a humidade mantida no interior deles

é geralmente humidade “ligada”, contrariamente ao refletido nos produtos não higroscópicos cuja humidade está “livre”. Para estes últimos, a secagem pode ser realizada até o produto alcançar um teor de humidade nulo, enquanto que nos produtos agrícolas existe sempre uma humidade residual (Belessiotis e Delyannis, 2011).

O teor de humidade de equilíbrio de um produto higroscópico refere-se ao seu teor de humidade, depois de ser exposto a um ambiente particular, por um longo período de tempo. Para este teor de humidade, a pressão do vapor mantido no interior do produto iguala a pressão do vapor do ar envolvente, correspondendo a uma condição de equilíbrio, em que a quantidade de dessorção de humidade pelo produto é igual à quantidade de absorção de humidade do ar circundante. Se o ar que rodeia o produto for continuamente renovado por vapor de ar a baixa pressão, a diferença de pressão entre os dois permite realizar a dessorção de humidade do produto para esse ar. Este parâmetro é influenciado pela maturidade e composição de cada produto (Ekechukwu, 1999).

2.6.2. Atividade da água (a_w)

A atividade da água é um parâmetro importante na conservação de alimentos, e uma das principais razões para a ocorrência do processo de secagem, uma vez que é um critério de crescimento de micro-organismos. Em todos os produtos alimentares existe um limite de atividade abaixo do qual os micro-organismos não crescem, por exemplo, as bactérias com $a_w=0.85$, bolores e leveduras com $a_w=0.61$, fungos com $a_w < 0.70$ (Belessiotis e Delyannis, 2011).

A relação entre o teor de humidade e a atividade da água pode ser dado pelas isotermas de sorção (Figura 2.16), que apresentam a forma de histerese (Belessiotis e Delyannis, 2011).

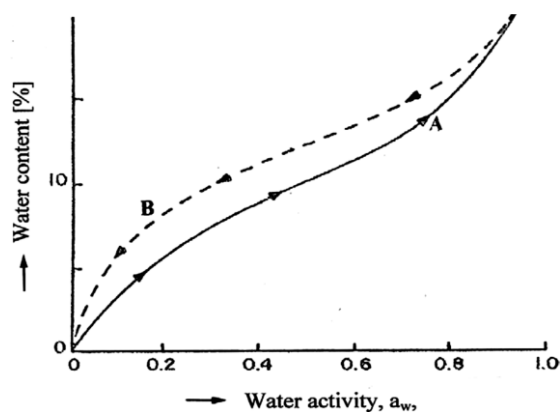


Figura 2.16 - Isotermas de sorção (Belessiotis e Delyannis, 2011).

2.6.3. Temperaturas preferenciais

A temperatura é um parâmetro muito importante na secagem de produtos agrícolas, quando a preservação do seu valor nutricional é essencial. Para além de existirem vitaminas sensíveis ao calor, a temperatura de secagem afeta ainda a cor, a textura e o sabor. A temperatura mais

baixa de secagem dá-se nos 30 °C, contudo em torno desta temperatura as taxas de secagem são muito lentas havendo o risco de apodrecimento. No geral, grande parte dos alimentos devem ser secos a temperaturas de 60 °C, muitos deles implicam que as temperaturas no início do processo de secagem sejam inferiores, posteriormente a essa primeira fase de secagem podem ser aumentadas para o valor adequado, exemplo do relatado são os pêssegos. Isto ajuda a que a pele do fruto não fique dura como aconteceria se fossem usadas apenas altas temperaturas. Belessiotis e Delyannis, 2011).

2.7. Nota conclusiva

Ao longo da secção que agora termina fez-se um enquadramento teórico acerca da secagem solar e aos fenómenos a ela associados. Começou-se por abordar a radiação solar, responsável pela geração de energia térmica no sistema. Foram ainda esquematizados os tipos de secadores solares existentes, enquadrando-os num sistema de classificação e referenciando os pontos mais fortes e os mais fracos associados a cada um. Enunciaram-se ainda aspetos relacionados com o coletor solar, que se apresenta como um elemento vital na conceção de um secador da natureza do apresentado no capítulo seguinte.

Avaliadas as teorias associadas à construção de um secador solar, seguiu-se a construção do secador solar tendo em conta os princípios abordados no presente capítulo. Descreve-se então no capítulo seguinte todos os métodos e materiais utilizados na conceção do equipamento de secagem solar.

3. Protótipo experimental

3.1. Introdução

Ao longo deste capítulo é descrito o sistema de secagem estudado na presente dissertação. Aqui são apresentados os materiais e os procedimentos utilizados na concepção de todos os elementos do secador solar. Para além disto, é enunciado o material utilizado na instrumentação, necessária para a avaliação do desempenho do secador.

3.2. Construção do Secador Solar

Indo ao encontro dos objetivos iniciais, pretendia-se desenvolver um equipamento que permitisse realizar ensaios de secagem, sob diferentes condições, e que assegurasse qualidade no produto final. Descreve-se então de seguida todo o processo inerente ao seu desenvolvimento.

Segundo Sharma et al. (1995) os critérios de escolha para a fabricação e projeto dos secadores devem ser baseados em parâmetros como: modo de operação (convecção natural ou forçada); qualidade dos produtos após secagem; disponibilidade de conhecimentos técnicos, recursos e rede de energia.

Definiu-se que os testes fossem realizados à larga escala, simulando, assim, a possibilidade de inserir este tipo de sistema a nível industrial. Para este fim, após uma análise dos prós e contras de cada método, e conciliando com um compromisso de uso exclusivo da energia solar, optou-se pela construção de um dispositivo de secagem indireto.

A escolha do secador indireto foi baseada em trabalhos de comparação entre os diretos, indiretos e mistos, alguns deles presentes na secção 1.3.2. Após a pesquisa, já mais focada nos pormenores dos secadores indiretos, constatou-se uma ténue presença de estudos que envolvem a variação da altura da caixa-de-ar do coletor. Nas poucas obras que fazem referência a este parâmetro verificou-se alguma discordância nas conclusões retiradas. Aliou-se então ao projeto de um secador solar indireto a presença de um coletor ajustável, que permita a modificação manual da altura de caixa-de-ar, e, com isto, as características térmicas do secador solar.

A presente construção atribui u peso significativo às conclusões presentes na literatura. A pesquisa realizada no domínio dos secadores já concebidos por outros autores visou:

- a análise ao tipo de secador apropriado;
- a apreciação de vários modelos de secadores indiretos;

- os materiais de construção utilizados, visando uma política de contenção de custos;
- as dimensões do secador;
- a análise ao tipo de acessórios presentes nestes sistemas (tabuleiros, chaminé, placa absorvedora, vidro, entre outros), bem como as suas características.

Após uma minuciosa análise das possibilidades foi projetado, no SolidWorks, um dispositivo que fosse constituído por um coletor solar de altura variável, conectado a uma câmara de secagem. Esta projeção envolveu várias mudanças estruturais do desenho, mas no final o modelo CAD 3D foi o representado na Figura 3.1, nela são perceptíveis os principais constituintes deste, e ainda as dimensões gerais do secador.

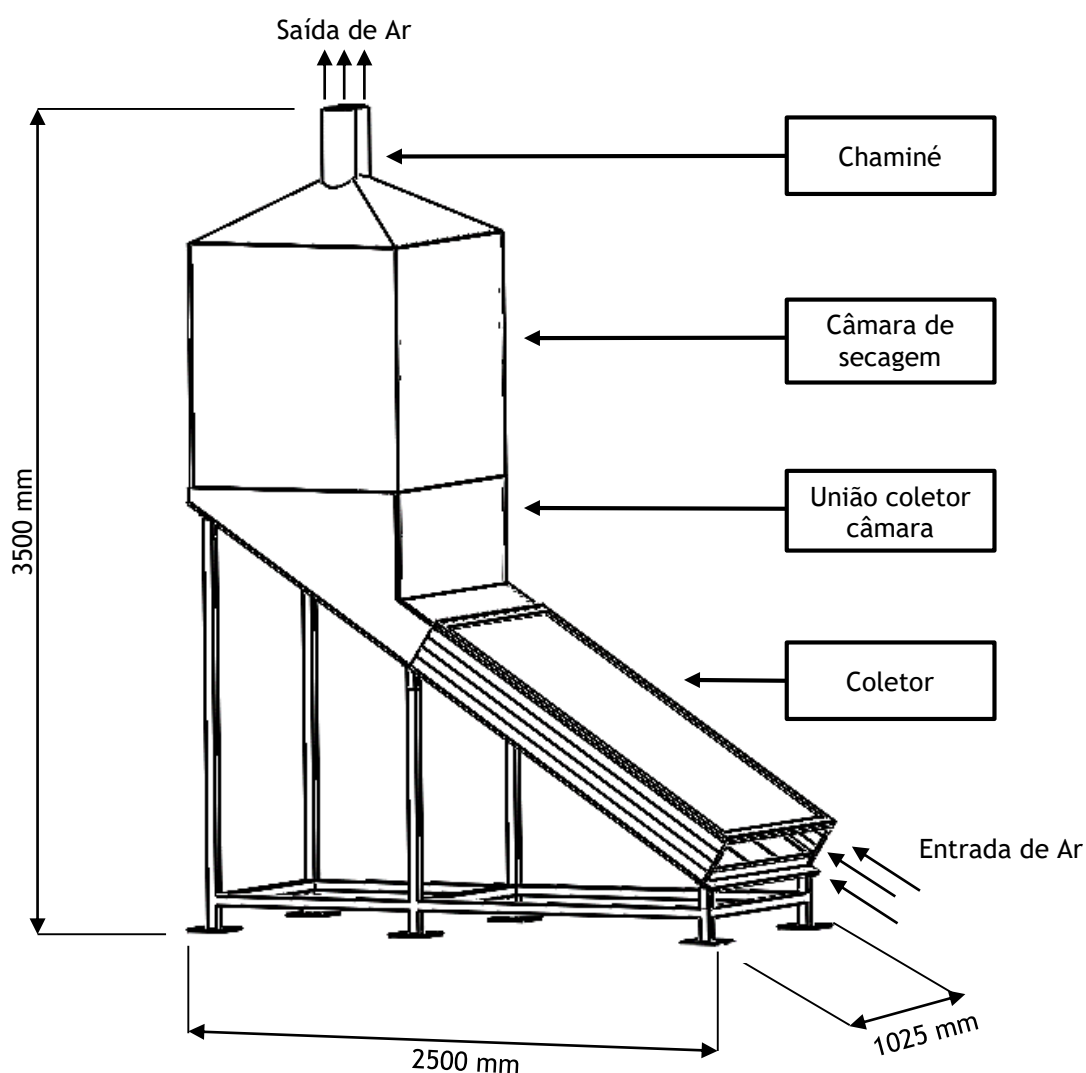


Figura 3.1 - Esquematização do CAD 3D do secador solar e respetivas dimensões gerais.

Como referido na secção 2.2.4, um secador solar indireto consiste em três componentes principais. O coletor solar, responsável pela elevação da temperatura do ar, a câmara de

secagem, onde o material a ser seco entra em contacto com o ar quente do coletor e reduz o seu teor de humidade, finalmente, a chaminé, que promove a saída do secador.

Neste projeto, um dos pontos tidos em conta numa fase embrionária foi que o modelo deveria ser construído por módulos, tornando o transporte do secador de elevadas dimensões menos complexa. O secador solar apresentado na Figura 3.1 divide-se em 4 módulos desagregáveis (Figura 3.2): a estrutura de apoio, o coletor, a câmara de secagem, e por fim, a unidade responsável pela exaustão do ar.

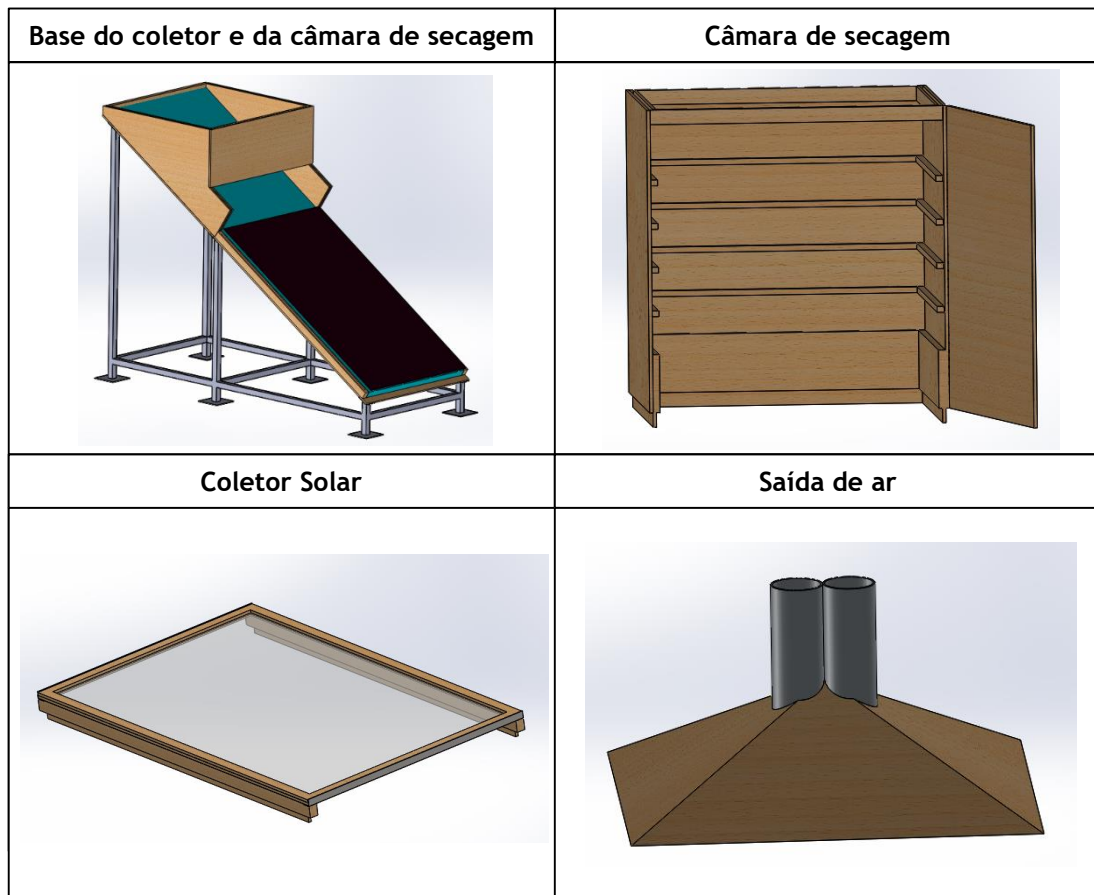


Figura 3.2 - Elementos desagregáveis do secador.

3.2.1. Estrutura de apoio

O suporte metálico é a raiz do secador, responsável pela sustentação de todo o sistema, e por isto, a fase construtiva do secador começou por este elemento. Utilizou-se uma tubagem em aço de perfil quadrado oco, com 40 mm de lado e 3 mm de espessura. Na parte inferior da estrutura anexaram-se 6 sapatas em aço quadradas de 170 mm de lado e 5 mm de espessura, que entram em contacto com o solo, e conferem estabilidade à estrutura.

Nas extremidades superiores das seis tubulações verticais foram soldadas 6 chapas quadradas do mesmo material com 85 mm de lado e 5 mm de espessura. Furaram-se as

mesmas nos quatro cantos, para posteriormente serem unidas à base plana do secador. Esta feita em MDF de 12 mm, com um comprimento total de 2925 mm e uma largura de 1025 mm. Na Figura 3.3 é retratado o momento após a fixação da base plana aos apoios da estrutura metálica, executada com recurso a parafusos.



Figura 3.3 - Pormenor da fixação da base plana à estrutura metálica.

Um dos pontos definidos logo na fase de projeto foi a inclinação do coletor. Apesar de ser o suporte que determina o ângulo de inclinação do coletor, será feita uma abordagem e este ponto apenas na secção destinada ao coletor (3.2.2.).

3.2.2. Coletor solar

Para o projeto de um coletor solar algumas hipóteses têm de ser tidas em conta, tais como: massa e teor de humidade inicial do produto, período de secagem, condições meteorológicas e eficiência do secador (Madhlopa, 2002).

Antes de partir para análise pormenorizada do coletor, é importante referir a inclinação adotada na fase de projeto.

A inclinação dos apoios do suporte metálico, que conferem a inclinação do coletor, foi estimada de modo a aumentar o rendimento do secador ao longo de todo o ano. Como visto na secção 2.4.1 para estas situações a inclinação deverá ser a latitude do local minorada de 5°. Dado que se conjecturava a aplicação do secador na Universidade da Beira Interior (UBI), sediada na cidade da Covilhã, procedeu-se da seguinte forma. Através da informação disponível online do *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)* do Joint Research Centre (JRC) da Comissão europeia é possível a determinação das coordenadas

geográficas do local escolhido. Para o local em questão observa-se através da Figura 3.4, após a sua seleção no mapa, que este possui uma latitude de 40,278 e uma longitude -7,508.

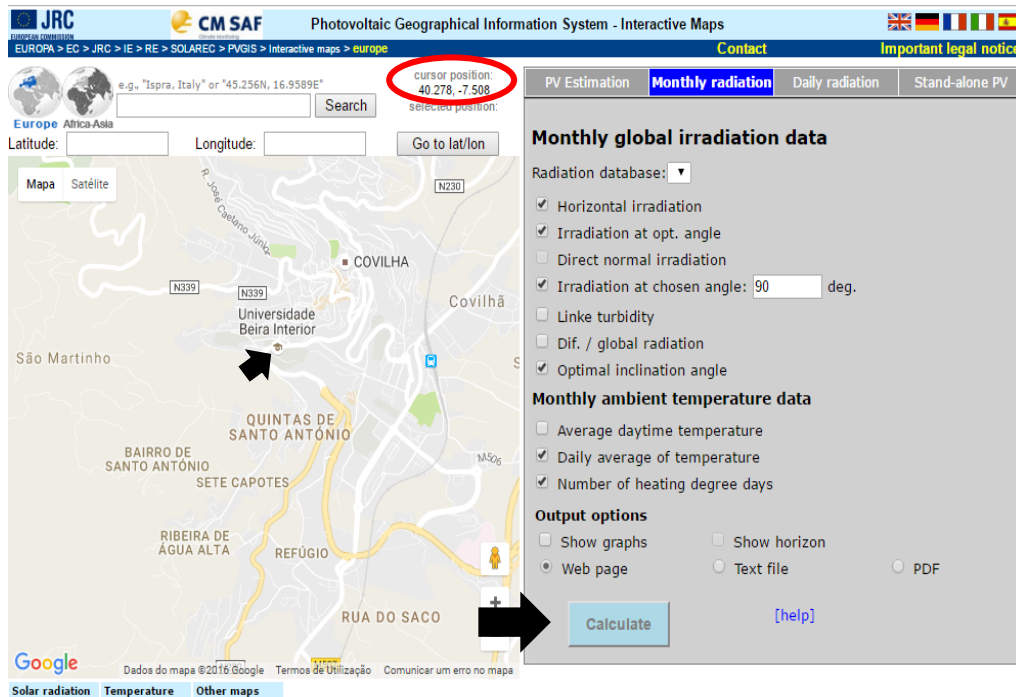


Figura 3.4 - Determinação das coordenadas geográficas do secador solar (adaptado de PVGIS, 2016).

A inclinação do coletor teria segundo a teoria da temática o valor da latitude (40°) reduzido de 5° , que levaria a uma inclinação de 35° para o coletor. Todavia, o PVGIS para as coordenadas selecionadas indica o ângulo ótimo da inclinação do mecanismo. Para as coordenadas referenciadas anteriormente e para uma altitude de 631 m, a informação obtida foi de que o sistema deveria possuir 33° , tendo-se por isso optado por esta inclinação.

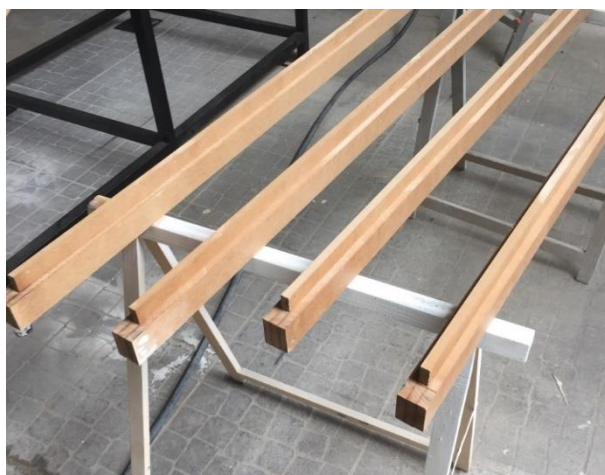
Após a escolha da localização do sistema, este sistema de informações online, fornece ainda informações como:

- Radiação horizontal diária e mensal
- Radiação com o ângulo ótimo;
- Temperaturas médias diárias e mensais;
- Grau de turbidez (da atmosfera).

Dentro dos coletores planos, com o ar como fluido de trabalho, existe uma variedade de modelos. Tendo como base os trabalhos realizados pelos vários autores, alguns deles comparativos das várias soluções, optou-se por conceber um modelo de fluxo superior, facilitando assim a incorporação de um mecanismo de geometria variável.

Construiu-se um coletor de altura variável com um comprimento total de 1635 mm e uma largura de 1025 mm. Este elemento foi idealizado e construído por forma a permitir o estudo do secador 3 alturas de caixa-de-ar distintas (5, 10 e 15 cm) no coletor.

A solução apresentada para a possibilidade de alteração da altura do coletor, passa pela implementação de um sistema de encaixes feito a partir do MDF disponível (Figura 3.5). Através de cola para madeiras e parafusos uniram-se 3 ripas de MDF com as mesmas dimensões, com um ligeiro desajuste de 30 mm da placa intermédia em relação às restantes, originando que os encaixes tenham 36 mm de largura.



a)



b)

Figura 3.5 - Encaixes do coletor para variação da altura: a) separados b) encaixados.

Os módulos de variação de altura encaixam em duas bases laterais que estão fixas à placa plana do secador, como ilustrado na Figura 3.6. No total foram feitos 3 pares de encaixes,

cada encaixe possui uma altura de 50 mm e um comprimento de 1635 mm, simbolizando o comprimento do coletor. As bases laterais apesar de possuírem a mesma altura não contribuem para a caixa-de-ar, isto porque o espaço entre elas é preenchido por material isolante.

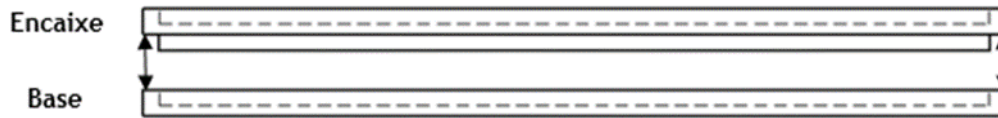


Figura 3.6 - Esquematização do sistema de encaixe.

No total foram feitos 3 pares de encaixes, cada encaixe possui uma altura de 50 mm e um comprimento de 1635 mm, simbolizando o comprimento do coletor. As bases laterais apesar de possuírem as mesmas dimensões não contribuem para a caixa-de-ar, isto porque o espaço entre elas é preenchido por isolamento.

Consoante a altura pretendida, colocam-se um, dois ou três pares de encaixes. Com a particularidade de um desses pares estar fixo à moldura do vidro e por isso o módulo constituinte do vidro possuir uma altura de 50 mm. Daí resulta que para a obtenção da altura de caixa-de-ar de 5 cm, apenas se encaixar à base o módulo do vidro. Para as duas restantes alturas basta adicionar-se um e dois pares de encaixes para a obtenção de uma caixa-de-ar de 10 e 15 cm respetivamente.

Após a certificação do correto funcionamento do sistema de variação de altura, seguiu-se a incorporação da cobertura do coletor a um dos pares do sistema de encaixes. A cobertura consiste num vidro de 1602 mm de comprimento, 995 mm de largura e 5 mm de espessura. De todos os trabalhos publicados nesta área, as espessuras de vidro mais utilizadas são as de 4, 5 e 6 mm, como visível na Tabela 1.1. Segundo Bakari et al. (2014) o vidro com espessura de 4 mm apresenta melhor eficiência como referenciado num estudo descrito na secção 1.3.4. Contudo, esta espessura comparativamente à de 5 mm apresenta maior fragilidade, tendo sido este o critério de escolha da espessura do vidro.

Mesmo com a espessura de 5 mm o vidro é um material conhecido pela sua fragilidade, daí a importância de o implementar numa estrutura sólida. Assim foi concebida uma moldura feita em MDF de 12 mm, tendo toda a sua periferia sido aprofundada 6 mm (Figura 3.7), com recurso a uma tупia, formando a zona de encaixe do vidro nesta estrutura.

Contrariamente às partes laterais da moldura que estão apoiadas nos encaixes, as partes superior e inferior encontram-se sujeitas à flexão. Uma forma de solucionar isto passa por fixar nessas partes um material de maior rigidez, oferecendo maior resistência à deformação. Optou-se por fixar duas cantoneiras de aço de abas iguais de 30 mm e com uma espessura de 3mm, como é visível na Figura 3.7.

Antes de colocar o vidro aplicou-se silicone em todo o perímetro de contacto do vidro com a madeira, que para além de servir como vedante, absorve parte dos impactos que seriam aplicados ao vidro no momento de mudança de altura de caixa-de-ar.

Após a colocação do vidro na moldura, aglomerou-se por intermédio de cola para madeiras e parafusos uma outra moldura, conferindo solidez ao vidro.

A conclusão do sistema de encaixes deu-se com a inserção de 2 pegas de heliaço de 8 mm de diâmetro, em cada lateral, permitindo que duas pessoas retirem o módulo constituinte do vidro para variar a altura da caixa-de-ar.



Figura 3.7 - Pormenor da moldura para acomodar o vidro e ainda das cantoneiras de aço.

A conversão da radiação solar em energia térmica consegue realizar-se sem a presença de uma placa absorvedora. Contudo, esta é responsável por um aumento, bastante superior, da temperatura no interior do coletor. Escolheu-se o alumínio como o material desta, que apresenta um comprimento de 1635 mm e largura de 953 mm. Para a espessura da placa, e de todas as apresentadas na Tabela 1.1, adotou-se 0,5 mm. Por fim, pulverizou-se a placa com tinta preta de elevada emissividade, de maneira a maximizar a absorção da radiação solar.

Para reduzir as perdas térmicas aplicou-se poliestireno extrudido, que possui baixa condutibilidade térmica, formando uma camada de isolante térmico com 5 cm de espessura. Por forma a minimizar as perdas por condução, através do contacto da placa e do isolante térmico, o contacto da placa com o isolante foi o menor possível. Daí terem sido coladas ao longo de todo o comprimento da placa, através de silicone de altas temperaturas, quatro tiras retangulares de 20 mm de largura e 15 mm de poliestireno extrudido, conforme visível na Figura 3.8.



Figura 3.8 - Esquemática da forma de colocação do isolamento e contacto deste com a placa absorvedora.

Concluída a fase de construtiva do coletor de volume de caixa-de-ar variável, este apresenta uma área de captação do coletor, denominada área útil do coletor de 1,556 de m². Esta despreza todas as paredes do coletor formadas em MDF de 12 mm de espessura, que faz com que o canal de ar do coletor apresente uma largura de 953 mm. Em função da altura imposta são apresentados na Tabela 3.1 o volume e a área de secção de entrada para cada situação.

Tabela 3.1 - Volume e área de secção do coletor em função da altura da caixa-de-ar.

<i>Altura da caixa-de-ar (m)</i>	<i>Volume da caixa-de-ar (m³)</i>	<i>Área da secção de entrada (m²)</i>
0,05	0,0778	0,04765
0,10	0,1556	0,09530
0,15	0,2334	0,14295

No final o coletor foi pintado de preto para melhor a absorção da radiação e para melhorar a estética do secador. Pode ser visto na Figura 3.9, 3.10 e 3.11, a configuração do secador para a altura de 5, 10 e 15 cm respetivamente.



Figura 3.9 - Coletor com a altura de caixa-de-ar de 5 cm.



Figura 3.10 - Coletor com a altura de caixa-de-ar de 10 cm.



Figura 3.11 - Coletor com a altura de caixa-de-ar de 15 cm.

Após esta fase, iniciou-se a construção da ligação do coletor à câmara de secagem, elemento que será apresentado de seguida.

3.2.3. União do coletor com a câmara de secagem

A função deste elemento é receber o ar aquecido e transmiti-lo para o interior da câmara de secagem. Derivado do sistema de variação de altura no coletor, projetou-se uma união que permitisse transmitir o calor sem perdas significativas e tentando um escoamento uniforme do ar. Esta base onde assentará a câmara de secagem, pela dimensão geral do secador foi concebida por forma a que a câmara possa ser removida, utilizando para esse efeito o mesmo fundamento dos encaixes do coletor.

Tal como no sistema de encaixes do coletor, as laterais basearam-se na junção de três placas com a mesma configuração da retratada na Figura 3.12, com a central com uma altura 5 cm inferior.



Figura 3.12 - Vista lateral da união do coletor com a câmara de secagem.

As placas laterais têm uma área de contacto com base a plana inclinada, bastante reduzida (3 x 12 mm). Para oferecer maior resistência aproveitaram-se as sobras das cantoneiras utilizadas no módulo do vidro, para aumentar a área de união entre a lateral e a base do secador, como representado na Figura 3.13. Nesta mesma figura pode observar-se parte da cavidade do encaixe da câmara, que é feito em “U”, com o plano na zona de captura da fotografia a não possuir cavidade.

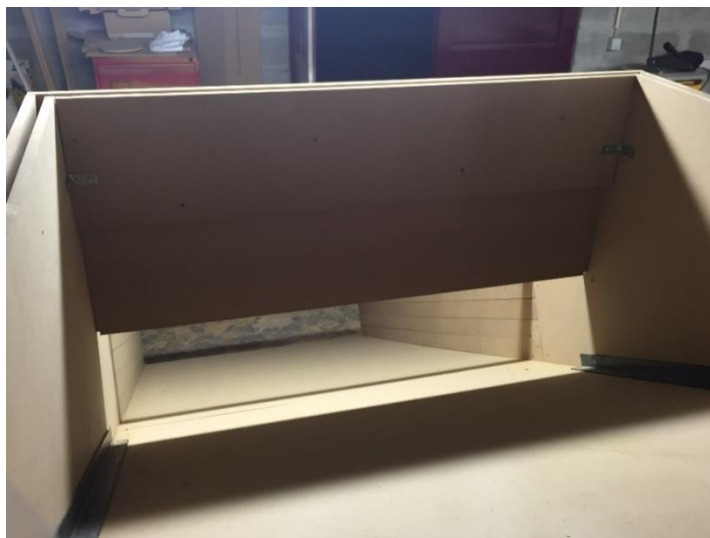


Figura 3.13 - Pormenor do interior da união, com destaque para a cavidade destinada ao encaixe da câmara.

Uma das dificuldades de implementar o sistema de variação de alturas foi o facto de a secção de saída do coletor ser variável, afetando a junção com o elemento de união entre o coletor e a câmara. A solução passou por criar um módulo diferente para cada uma das três alturas. Tratando-se de uma zona exatamente à saída do coletor, apresentando as maiores temperaturas, ter-se-ia de colocar um módulo com baixa condutibilidade térmica.

Os tampos foram então construídos com madeira e poliestireno extrudido. Quando imposta a altura de 15 cm, o tampo colocado possui uma placa de poliestireno extrudido de 3 cm (Figura 3.14a)). Para a altura de 10 cm foi utilizado uma placa com espessura de 5 cm (Figura 3.14b)) e para a altura de 5 cm uma placa de 10 cm (Figura 3.14c)).

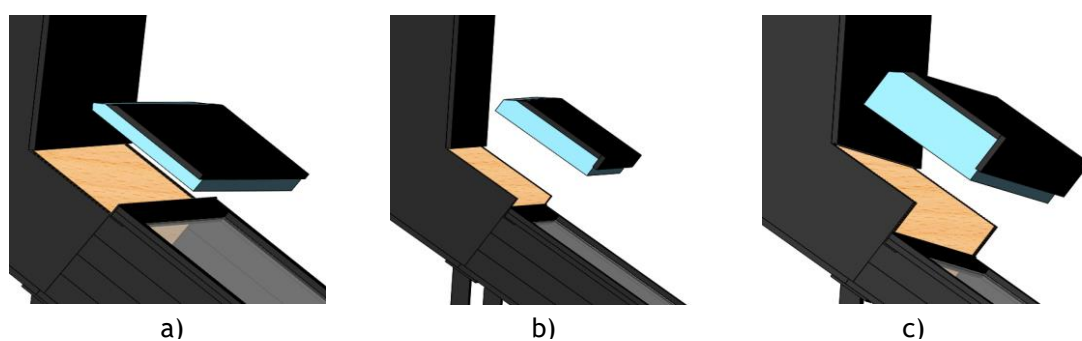


Figura 3.14 - Representação CAD dos tampos para as alturas de caixa-de-ar: a) 15 cm; b) 10 cm; c) 5 cm.

3.2.4. Câmara de Secagem

O projeto da câmara de secagem depende de muitos fatores como o produto a ser seco, a temperatura necessária, a velocidade do ar, a quantidade de produto submetida à secagem e a HR do ar que circula em redor do produto (Gatea, 2011).

A câmara de secagem paralelepípedica foi construída com dimensões de 1040 mm de altura, 1025 mm de largura e 980 mm de profundidade, formando um volume interno de aproximadamente 1 m³. A câmara foi feita em MDF de 12 mm de espessura. Na zona da saliência para o encaixe na cavidade da união foram coladas e aparafusadas três placas, criando o mesmo efeito que os encaixes do coletor apresentados na Figura 3.5. A saliência é apenas em formato de “U”, tal como é visível na Figura 3.15.

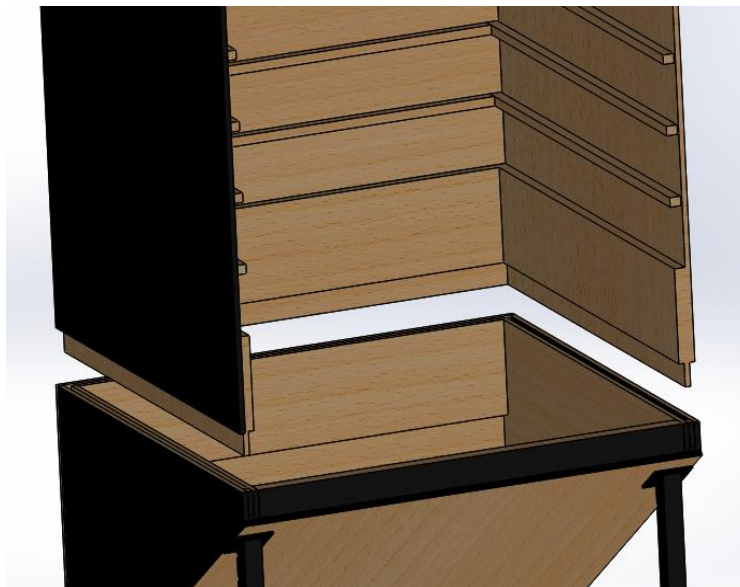


Figura 3.15 - Sistema de encaixe da câmara de secagem em CAD.

A colocação dos produtos uns em cima dos outros limita a área de exposição à secagem, resultando numa secagem pobre. Tal como esta fator, o excesso de carregamento também influencia a qualidade da secagem do produto. Por outro lado, o baixo carregamento faz diminuir a eficiência devido à não utilização ótima da área de abertura dos tabuleiros (Leon et al., 2002). Por estes motivos e visto que uma das características deste tipo de secador é a sobreposição dos tabuleiros, proporcionando uma maior área de secagem, era importante que os tabuleiros não se encontrassem demasiado juntos.

Os suportes para os tabuleiros foram concebidos através de 2 ripas de MDF sobrepostas e aparafusadas às paredes laterais e frontal da câmara. Foram construídos 5 níveis espaçados de 15 cm, cada um deles equivalente a uma posição de tabuleiro. A determinação da distância entre os suportes de tabuleiros foi baseada em Sharma et al. (1994), que aconselha esta distância para uma circulação uniforme do ar em torno do produto. Na parte superior da câmara usou-se o mesmo sistema de encaixes, para anexar a parte piramidal da saída de ar, descrita na secção seguinte. Através da Figura 3.16 são notórios todos os pormenores referidos neste parágrafo, através da vista interior da câmara de secagem.



Figura 3.16 - Vista interior da câmara de secagem.

Quanto aos tabuleiros, por forma a torná-los mais resistentes, optou-se por construir-se uma moldura usando uma cantoneira em aço de abas iguais de 15 mm com as dimensões de 970 x 950 mm, correspondendo esta última dimensão à superfície de apoio nas laterais do secador. Nesta estrutura foi aplicada uma rede de alumínio, com uma malha quadrada de 10 mm de lado, através do processo de soldadura por pontos ilustrado na Figura 3.17. No final para evitar a oxidação do material foram pintados com um spray de cor cinzenta.



Figura 3.17 - Pormenor do processo de união da rede com a cantoneira através de soldadura por pontos (à esquerda) e do tabuleiro posicionado na câmara de secagem (à direita).

3.2.5. Saída de ar

Um dos pontos cruciais do secador é a forma como o ar é removido do interior da câmara de secagem. Optou-se por uma saída em formato piramidal como a representada na Figura 3.18, concebida através da junção de 4 triângulos. Na base da saída, mais uma vez, optou-se pelo sistema de encaixes praticado até ao momento, com a cavidade de encaixe representada na parte superior da câmara de secagem ilustrada na Figura 3.16. Dada a altura do secador esta zona fica mais vulnerável ao vento, por este motivo e por forma a diminuir as fugas calafetou-se todo o perímetro de contacto da saída de ar com a câmara de secagem recorrendo-se a espuma de poliuretano.



Figura 3.18 - Pormenor da construção do afunilamento do ar após união das placas triangulares.

O secador desenvolvido pode funcionar em convecção natural ou em convecção forçada. Este último modo requer, no entanto, o consumo adicional de energia para o acionamento

de ventiladores. Quanto à operação do secador em convecção natural apresenta problemas associados ao controlo do processo de secagem. Por conseguinte, a incorporação de chaminés no secador torna-se vital para regular a permanência do ar de secagem no interior da câmara de secagem (Ekechukwu e Norton, 1999a).

Posto isto, perfuraram-se em formato circular duas secções de 130 mm de diâmetro a fim de colocar lá as chaminés. Utilizaram-se duas tubulações PVC com altura de 300 mm, e diâmetro externo e interno de 130 mm e 120 mm, respetivamente, para as saídas de ar do secador solar. Estas contribuem para uma área de secção de saída total de 0,02262 m², desprezando a válvula e o ventilador, apresentados de seguida.

Uma das características do sistema de remoção de ar do secador é a capacidade de regular o caudal do ar por duas formas distintas. Uma das formas é através do tubo posicionado à esquerda ilustrado na Figura 3.19, ao qual está acoplada uma válvula de borboleta, neste caso totalmente fechada. Esta foi construída à medida do tubo, permitindo aumentar ou diminuir o caudal de saída, obstruindo mais ou menos a saída do ar. A outra forma é através da incorporação de um ventilador axial Papst 4212, cujas características são apresentadas na Tabela 3.2, que como já foi referido antes, permite desenvolver testes comparativos do sistema de convecção natural com o de forçada. Na Figura 3.19 à direita é visível o ventilador axial, fixo num apoio de madeira adaptado ao ventilador e à configuração das tubulações. Contrariamente ao evidenciando na maioria dos trabalhos, que geralmente fornecem ar à entrada, nesta situação o aparelho extrai o ar do interior expelindo-o para o ambiente.

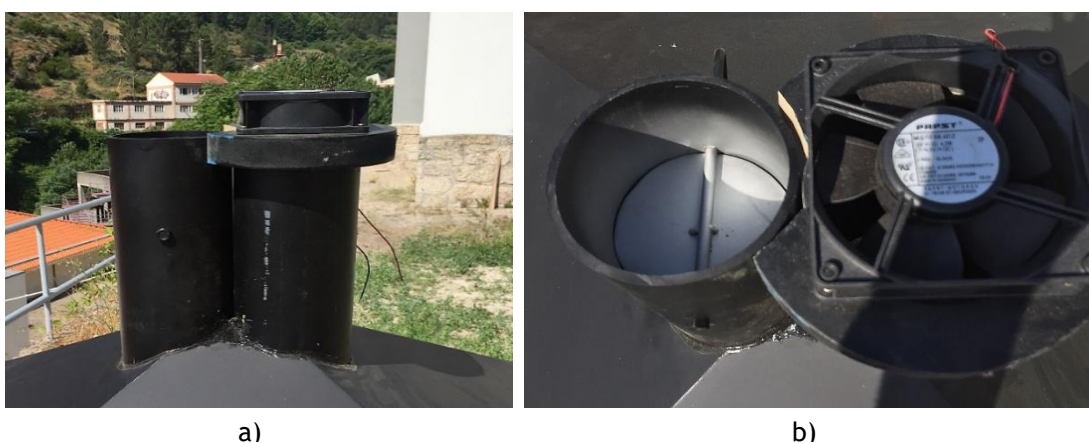


Figura 3.19 - Chaminés do secador solar com a válvula de borboleta à esquerda e o ventilador à direita: a) vista frontal; b) vista superior.

Tabela 3.2 - Características do ventilador axial Papst 4212.

Dimensões	119 x 119 x 38 mm
Diâmetro de saída	125 mm
Velocidade	3050 rpm
Potência	4,3 W
Tensão nominal	12 V DC
Caudal	165 m ³ /h

A configuração desta chaminé permite analisar o efeito da convecção de ar, nomeadamente, através da análise do desempenho do secador com e sem a presença de um ventilador, permitindo concluir se é benéfico o uso deste, para expulsar o ar húmido produzido pela evaporação da água contida nos alimentos.

A alimentação do ventilador é feita por intermédio de uma fonte de alimentação, proveniente de um computador obsoleto (Figura 3.20). Essa fonte permite o fornecimento de tensão na gama dos 5 ou 12 V. Através disto possibilita-se o funcionamento do ventilador com duas velocidades de rotação diferentes, implicando caudais de saída distintos.



Figura 3.20 - Ligação entre o ventilador e a fonte de computador.

As perdas no secador podem ser diminuídas utilizando um revestimento pintado de preto que permite absorver mais radiação (Agbo e Okoroigwe, 2007). No final do processo pintou-se então todas as superfícies exteriores de preto, tendo sido pulverizado na madeira, antes da aplicação da tinta preta, tapa poros, que faz o enchimento da madeira, diminuindo a quantidade de tinta absorvida por esta. O secador após todo o processo de construção ficou estruturado conforme evidenciado na Figura 3.21.



Figura 3.21 - Secador solar após a conclusão da construção.

3.3. Instrumentação

Concluída a fase de construção do secador, seguiu-se a sua fixação no terreno. O secador ficou localizado no edifício das Engenharias da UBI, perto da estação meteorológica deste mesmo edifício, conforme evidenciado na Figura 3.22. O dispositivo foi posicionado no terreno com a parte frontal do coletor orientada em direção ao sul, proporcionando assim uma maior captação de radiação solar durante todo o dia.



Figura 3.22 - Localização do secador.

Antes da realização dos testes de desempenho do secador e depois da fixação do secador, procedeu-se à instrumentação do secador. Seguidamente são descritos todos os aparelhos de medição que conduziram à realização do presente estudo. Todos eles encontravam-se disponíveis no laboratório de Transmissão de Calor, à exceção da estação meteorológica.

3.3.1. Estação meteorológica

Dados climáticos como a intensidade de radiação, a HR, a temperatura ambiente e a velocidade do vento foram dados pela estação meteorológica, Davis Wireless Vantage Pro 2 (Figura 3.23), cuja proximidade com o equipamento de secagem já foi ilustrada. Este modelo possui um coletor de chuva, um sensor de temperatura ($\pm 0,5$ °C), um sensor de humidade ($\pm 3\%$), um sensor de radiação solar que fornece informações da intensidade de radiação captada horizontalmente ($\pm 5\%$ do valor), um sensor ultravioleta (UV) e um anemómetro, que dá informação sobre a velocidade (± 1 m/s) e a direção do vento ($\pm 3^\circ$). Os sensores de temperatura e humidade estão protegidos da radiação solar, e recebem ar proveniente de um ventilador, de maneira a minimizar a influência destes parâmetros nas leituras dos sensores.

A informação proveniente da estação meteorológica pode ser consultada online através da WeatherLink, sendo que a periodicidade de atualização dos dados é de um minuto.



Figura 3.23 - Estação meteorológica Davis Wireless Vantage Pro 2 do edifício das Engenharias da UBI.

3.3.2. Anemómetro

A medição da velocidade do ar à entrada e à saída do secador foi realizada recorrendo a um anemómetro de turbina TESTO 416 (Figura 3.24). Este aparelho permite medir velocidades de escoamento com uma precisão de 0,2 m/s. Permite determinar diretamente o caudal que escoar numa secção definida, fornecendo-lhe a área de secção. No presente estudo este aparelho foi utilizado para monitorizar a velocidade à saída das duas chaminés durante o processo de secagem.



Figura 3.24 - Anemómetro de turbina TESTO 416.

3.3.3. Data-loggers e termopares

A base deste estudo é a análise da distribuição das temperaturas e humidades relativas no interior do secador. Para este fim usou-se um dispositivo denominado EL-USB-2-LCD+ LASCAR electronics (Figura 3.25). Este aparelho mede humidades relativas e temperaturas, e ao mesmo tempo guarda a informação, possibilitando que esta seja descarregada. Permite medir humidades relativas no intervalo 0 a 100%. Já no que toca ao intervalo de temperaturas admissíveis de operação, este varia dos -35° aos 80 °C. Uma outra funcionalidade deste instrumento de medida é que a qualquer momento se consegue ver no LCD a temperatura e HR presenciada naquele instante.

Este dispositivo abrange várias formas de iniciar as medições, isto é, permite que após configurado no computador, o início da medição seja imediato, comece a uma hora predefinida ou então que inicie quando o botão de *on-off* é pressionado. Para além disto, a periodicidade com que o aparelho guarda as temperaturas e humidades é estabelecida antes da configuração. Nos ensaios realizados utilizou-se um intervalo de 5 minutos para cada registo de valores no presente estudo.

Em termos de precisões quando se trata da HR este possui um erro de $\pm 2\%$ na gama dos 0 aos 90% e $\pm 4\%$ dos 90 aos 100%. No registo de temperaturas o erro máximo é de $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figura 3.25 - Data Logger USB LASCAR electronics.

Para os ensaios em vazio e durante o processo de secagem, dependendo do número de tabuleiros por ensaio, a disposição destes aparelhos no secador foi distinta.

Além deste sistema para uma monitorização instantânea foram colocados dois termopares de tipo T, com gamas de operação dos -270 aos $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, envolvidos em fita de alumínio por forma a minimizar o erro da medição. Um deles foi colocado por forma a medir a temperatura ambiente e outro à entrada da chaminé (Figura 3.26), representando a temperatura de saída do secador.



Figura 3.26 - Termopar tipo T colocado à entrada da chaminé.

Os terminais destes termopares foram ligados a um termómetro digital Fluke 54 II B de dupla entrada, com uma precisão de $\pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, que converte o sinal de tensão que recebe em temperatura, apresentando-a no visor.

Para monitorizar a temperatura à superfície e no interior da cereja foram utilizados dois termopares tipo K, instalados conforme apresentado na Figura 3.27.

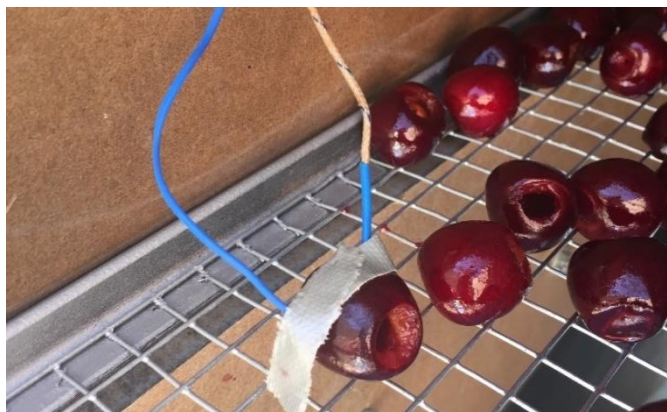


Figura 3.27 - Termopares tipo T para medição da temperatura no interior e na superfície da cereja.

3.3.4. Balança digital

Nos ensaios de secagem para a determinação da evolução da perda da massa decorrente do processo foi utilizada uma balança Ohaus FDseries (Figura 3.28). A gama de medição da balança vai dos 0 aos 15 kg.

Por forma a conseguir-se efetuar as medições dentro dos limites da balança utilizaram-se uns tabuleiros feitos com uma rede de alumínio maleável, conforme representado na Figura 3.29. As medições foram realizadas ao ar livre, o que envolve um maior cuidado nas pesagens, uma vez que podem ser influenciadas pelo vento.



Figura 3.28 - Balança digital Ohaus.



Figura 3.29 - Pesagem da cereja na rede de alumínio maleável.

3.3.5. Analisador de humidade

Outra forma utilizada para estudar a evolução do teor de humidade foi através de um analisador de humidade Ohaus MB35. Este aparelho indica qual o teor de humidade do produto, na base seca, através da sua secagem. A temperatura de secagem pode ser ajustada dos 50 aos 160 °C. A capacidade do aparelho é de 35 g, independentemente da quantidade devem ser colocados no prato de ensaio pedaços, o mais uniforme possível, e estes devem estar distribuídos homogeneamente. Na Figura 3.30 é apresentado o analisador de humidade, com ampliação do visor após a conclusão de uma medição, que apresentou um teor de humidade de 12,48% na base seca, com uma temperatura de secagem de 105 °C.



Figura 3.30 - Analisador de humidade Ohaus MB35 com ampliação do visor.

3.4. Nota conclusiva

Nos vários pontos deste capítulo descreveu-se o protótipo experimental, que permitiu realizar os estudos expostos no capítulo seguinte. Inicialmente foram descritas todas as etapas de construção do secador solar indireto, dividida por vários módulos como a estrutura de apoio, o coletor, a união do coletor com a câmara de secagem, a própria câmara e ainda a saída de ar do dispositivo. O capítulo terminou com a exposição dos aparelhos de medição, que permitiram instrumentar o secador, possibilitando assim a análise do seu desempenho.

O desempenho do secador será apresentado no próximo capítulo, com a apresentação de uma análise cuidada, primeiramente, através da caracterização do secador e posteriormente através da realização de dois ensaios de secagem com cereja.

4. Análise e discussão de resultados

Ao final do processo de construção sucederam-se os ensaios de avaliação comportamental do secador solar sob distintas condições. A descrição da forma como o secador foi submetido aos testes será descrita no capítulo que agora se inicia. Este encontra-se dividido em duas secções primordiais, o procedimento experimental e os ensaios realizados. No primeiro tópico é descrita a organização dos vários elementos inerentes ao estudo. Na segunda parte são apresentados e tratados os resultados obtidos para cada configuração de ensaio.

4.1. Procedimento experimental

Os ensaios do secador foram conduzidos na parte exterior do edifício das engenharias da UBI, todos eles realizados entre os meses de junho e agosto de 2016. Tendo em vista a avaliação comportamental do secador foram realizadas duas vertentes de ensaios. Na primeira, o secador foi testado sem fruta no seu interior, ou seja, o secador foi avaliado vazio, com a finalidade de o caracterizar. Na segunda parte, o secador foi carregado com cereja, no sentido de averiguar se este tipo de secador se apresenta como uma boa solução para a secagem deste fruto.

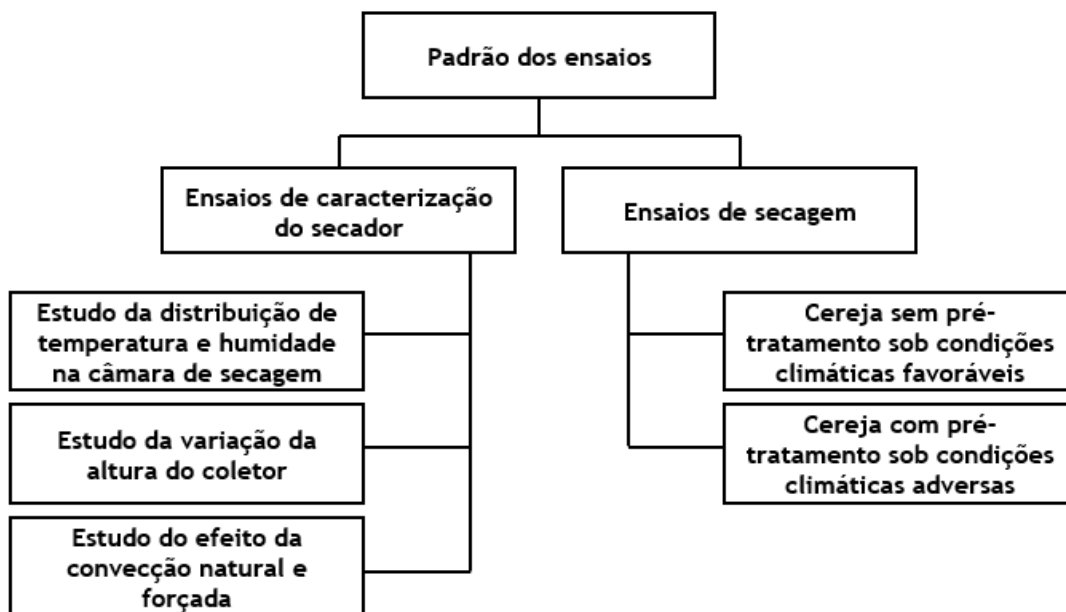


Figura 4.1 - Organograma dos ensaios realizados.

Pela Figura 4.1 pode-se observar os focos gerais do presente estudo. Relativamente à caracterização do secador, numa fase inicial, foi avaliada a temperatura e humidade na câmara de secagem. Este estudo foi realizado para a apreciação das diferenças de temperatura e HR no interior da câmara. Sendo pretendida de preferência uma uniformidade do valor destes parâmetros ao longo da câmara de secagem, traduzindo-se num bom isolamento do secador, i.e., sem grandes perdas térmicas. Um outro ponto dos ensaios vazios

foi ver a repercussão, na câmara de secagem, da variação da altura de caixa-de-ar do coletor. A caracterização culminou com a análise ao efeito da convecção natural e forçada. O processo de secagem estudado dividiu-se em duas partes. Na primeira foi secada cereja sem pré-tratamento e as condições climáticas eram propícias à realização da secagem. No segundo processo de secagem, as cerejas foram pré-tratadas com ácido ascórbico, contudo as condições ambientais vivenciadas eram adversas.

Seguidamente será abordada a organização dos data-loggers utilizados para registar os valores de temperatura e HR durante a efetuação dos vários ensaios.

Os três ensaios de caracterização do secador e o primeiro ensaio de secagem (sem pré-tratamento da cereja), realizaram-se em dois tabuleiros instrumentados. Os tabuleiros foram sobrepostos com um espaçamento de 30 cm e ocuparam a posição P2 e P4, de acordo com a denominação visível na Figura 4.2, que facilita a identificação das posições dos tabuleiros no secador. Em cada um dos tabuleiros foram colocados 3 data-loggers, adicionalmente colocou-se um outro no exterior de modo a registar os valores de temperatura e HR ambiente. A identificação dos vários instrumentos está representada na Figura 4.3, para que na altura de apresentação dos resultados seja mais fácil a sua referência.

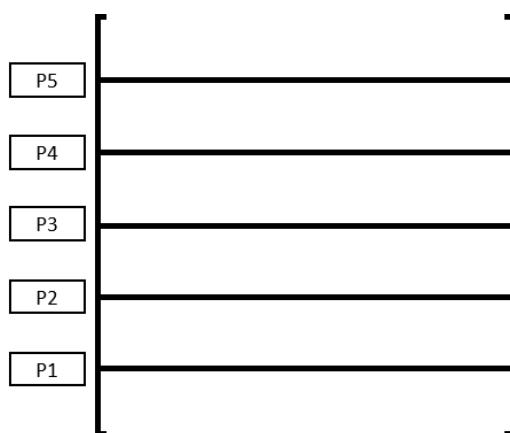


Figura 4.2 - Diferentes alturas e respetiva identificação dos tabuleiros.

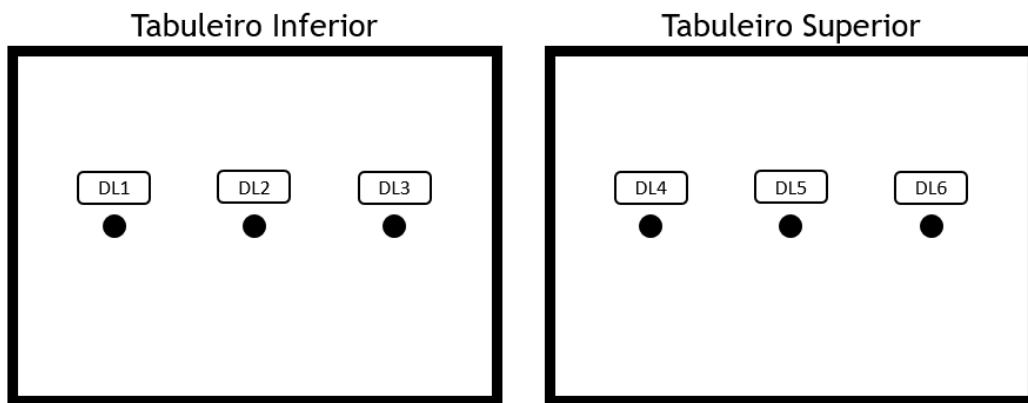


Figura 4.3 - Disposição e identificação dos data-loggers (DL1, DL2, DL3, DL4, DL5 e DL6) quando utilizados 2 tabuleiros.

O único ensaio em que foram utilizados os 5 tabuleiros, ou seja, a carga máxima do secador, foi no segundo processo de secagem, com a cereja pré-tratada e sob condições adversas. Para esta situação colocou-se um data-logger no centro de cada (Figura 4.4), e o sexto (DL6) fixou-se à entrada da união do coletor com a câmara de secagem, de acordo com o apresentado na Figura 4.5.

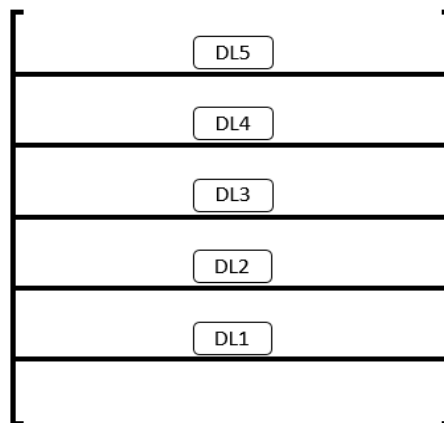


Figura 4.4 - Disposição e identificação dos data-loggers (DL1, DL2, DL3, DL4 e DL5) quando utilizados 5 tabuleiros.

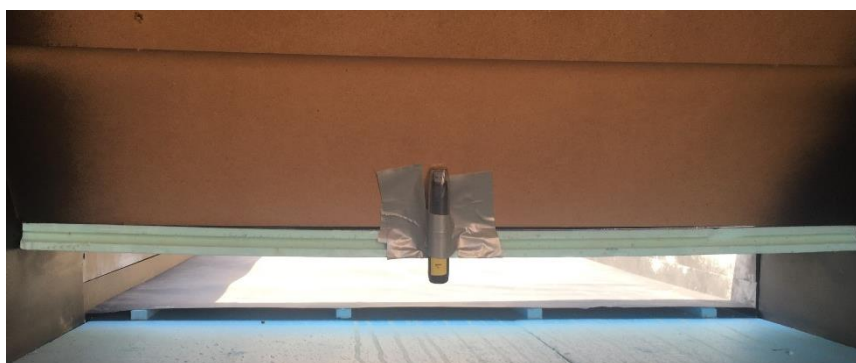


Figura 4.5 - DL6 à saída do coletor quando usados 5 tabuleiros na câmara de secagem.

4.2. Ensaio realizados

Conforme apresentado na secção anterior, foram realizados diversos ensaios visando a análise do desempenho do secador. No subcapítulo que agora se inicia serão retratados os resultados e simultaneamente discutidos. Cada estudo realizado corresponde a uma secção deste subcapítulo distinta. Atendendo ao organograma, representado anteriormente na Figura 4.1, serão de seguida abordados cinco estudos distintos. Os três primeiros intrínsecos aos ensaios de caracterização do secador, realizados sem fruta no interior. Os dois últimos envolvendo o processo de secagem de cereja.

4.2.1. Avaliação da temperatura e humidade relativa em função da posição na câmara de secagem

O presente ensaio com duração de 24 horas iniciou-se às 09h00, acabando no dia seguinte à mesma hora. Através dos data-loggers dispostos, como descrito no procedimento experimental, é possível estudar como varia a temperatura e a humidade em função da posição do aparelho de medição. Para tal, dado que foram posicionados 6 data-loggers em apenas dois tabuleiros estudou-se o efeito da deslocação vertical e horizontal no interior da câmara de secagem. A variação destes parâmetros com a altura no secador foi analisada pela comparação dos valores medidos entre o DL1 e o DL4, o DL2 e o DL5 e por fim entre o DL3 e o DL6. Para se analisar a variação dos parâmetros referidos para o mesmo tabuleiro compararam-se os dados traduzidos no DL1, DL2 e DL3.

A existência de três possibilidades de altura de caixa-de-ar, levaria à necessidade de realizar três ensaios para estudar este efeito. Todavia, optou-se por realizar este estudo com um espaçamento entre o vidro e a placa absorvedora de 10 cm. A variação do coletor não era um ponto relevante nesta análise, uma vez que visou apenas averiguar a uniformidade dos parâmetros temperatura e HR.

Primeiramente, neste estudo são apresentadas as condições climáticas refletidas no período de ensaio e feitas algumas analogias entre elas. Posteriormente, e tendo em conta os dados climáticos fornecidos pela estação meteorológica apresentam-se os resultados e a respetiva análise aos acontecimentos no interior do secador.

4.2.1.1. Dados climáticos

Os dados atmosféricos pertinentes de apresentar são os que têm influência direta no comportamento do secador, nomeadamente, radiação solar incidente (W/m^2), humidade ambiente relativa (%), temperatura ambiente ($^{\circ}C$) e velocidade do vento (m/s). Este último indicador tido em conta, devido a uma das condições impostas para este ensaio ter sido a convecção natural. É importante salientar que a intensidade de radiação apresentada foi

obtida pela estação meteorológica, tendo sido captada num plano horizontal e não no ângulo de inclinação do coletor.

Exibe-se na Figura 4.6 o comportamento da temperatura ambiente e da radiação incidente ao longo do ensaio.

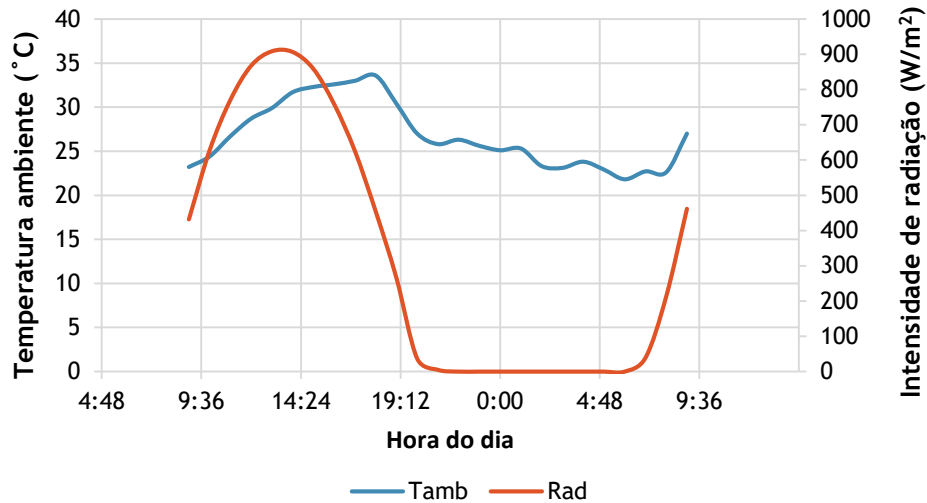


Figura 4.6 - Variação da radiação incidente e da temperatura ambiente ao longo das 24 horas de ensaio.

Verifica-se na Figura 4.6 que a curva de radiação tem forma parabólica durante o dia. A radiação máxima ocorreu às 13h30, atingindo um valor de 918 W/m^2 , coincidindo com o cume dessa parábola. A temperatura ambiente variou dos $21,7^\circ\text{C}$ aos $34,2^\circ\text{C}$. Era de esperar que a temperatura mais elevada ocorresse no período de maior intensidade, tal não se sucedeu, tendo esta ocorrido às 17h22. Neste instante, com radiações perto dos 400 W/m^2 exibiu-se uma descida da temperatura mais acentuada. Expõe-se na Figura 4.7 o comportamento da humidade ambiente e da radiação incidente ao longo do ensaio.

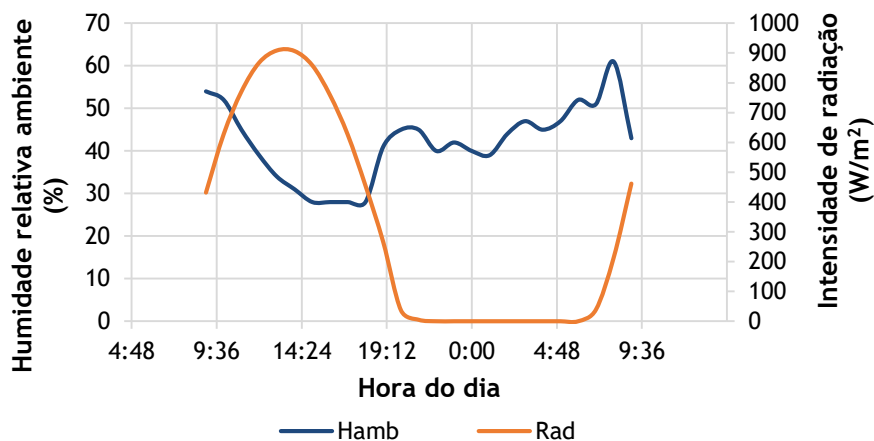


Figura 4.7 - Variação da radiação solar incidente e humidade relativa ambiente ao longo das 24 horas de ensaio.

Pela análise à Figura 4.7 é manifesto que a HR acompanha uma tendência inversa à radiação solar, ou seja, diminui quando a radiação solar aumenta (início do dia) e aumenta quando a intensidade de radiação diminui (final do dia). A HR menor, contrariamente ao previsto, não se deu quando a radiação solar foi máxima (15h00), mas sim às 18h00 com um valor de 28%. Para além do menor valor, as 18h00 correspondeu ao instante em que a subida da humidade se verificou mais acentuada, à medida que a radiação se inferiorizava aos 400 W/m² observados nesse momento. A HR mais elevada surgiu durante o dia com um valor de 61% às 08h00. Nota-se uma subida acentuada da humidade quando a radiação se inferioriza aos 400 W/m².

Como referido anteriormente, o ensaio deu-se sob convecção natural, ou seja, a velocidade do escoamento do ar no interior do secador é apenas afetada pela velocidade do vento. A variação da velocidade do vento durante o período do ensaio foi muito inconstante, variando dos 0 aos 4 m/s, apresentando um valor médio de 1,9 m/s nas 24 horas de ensaio. É importante referir que as velocidades evidenciadas durante o dia, não são as do interior do secador, uma vez que existem perdas de carga associadas e a direção do vento nem sempre coincidir com a entrada do secador.

4.2.1.2. Temperatura e humidade relativa na câmara de secagem

Dependendo das condições ambiente, o secador tem comportamentos distintos. Para os dados climáticos, anteriormente descritos, procedeu-se ao registo dos valores de temperatura e humidade na câmara de secagem, através dos data-loggers colocados nos tabuleiros. Para a análise da distribuição da temperatura e HR, tiveram-se em conta dois padrões de estudo. O primeiro foi a comparação das grandezas ao longo da direção vertical. O segundo traduziu-se na comparação das grandezas referidas na horizontal. A Figura 4.8 representa a variação da temperatura e humidade ao longo do ensaio para os data-loggers da posição central de cada altura bem como os respetivos valores ambientais.

No gráfico da Figura 4.8 é notório o comportamento inverso entre a temperatura e humidade no interior do secador, ou seja, quando estão presentes os valores mais elevados de temperatura evidenciam-se os mais baixos em termos de humidade. A temperatura máxima atingida pelo secador foi de 55,5 °C no DL5 às 14h00, coincidindo com o período de maior intensidade de radiação solar e com uma temperatura ambiente de 31,7 °C. Próximo desse instante registou-se o valor mais baixo de humidade (11,5%), para uma humidade ambiente de 28%. De seguida retratam-se os dados comparativos das duas alturas distintas.

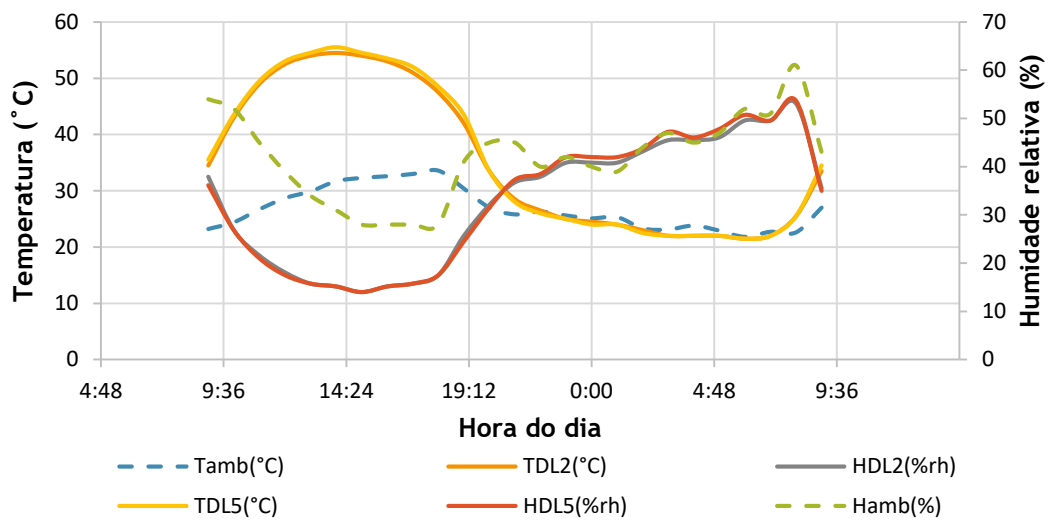


Figura 4.8 - Temperatura ambiente (T_{amb}) e HR ambiente (H_{amb}), e temperatura no DL2 e DL5 (T_{DL2} e T_{DL5}) e HR no DL2 e DL5 (H_{DL2} e H_{DL5}), correspondendo aos data-loggers da posição central de cada tabuleiro.

Começando pela análise das temperaturas, nas primeiras 12 horas de ensaio o DL2 apresentou uma temperatura média de 45,9 °C face aos 46,9 °C do DL5, quando no exterior foi de 29,2 °C. Essa superioridade de 1 °C verificou-se também na temperatura máxima atingida pelo DL5 que foi de 55,5 °C. Nas últimas 12 horas essa ligeira supremacia não se retratou, com uma temperatura média de 24,6 °C para os dois data-loggers, com o ambiente com uma média de temperatura de 24,2 °C. O maior ganho térmico alcançado foi conseguido pelo DL5 com 15,9 °C face ao ambiente. Durante a noite as diferenças de temperatura entre aparelhos foram praticamente nulas.

Em termos de HR, nas primeiras 12 horas a HR média foi de 19,3 e 19,0% para o DL2 e o DL5, respetivamente. Tal como esperado o DL2 com uma temperatura superficialmente mais reduzida alcançou um valor médio de humidade um pouco maior. Apesar desta ligeira diferença ambos registaram os mesmos valores mínimos de HR (12%). Durante a noite, motivado pela proximidade com a saída de ar o DL5 apresentou uma HR média superior com 37,7%, perante os 37,3% do DL2. Esta grandeza no exterior exibiu valores médios de 38,1% e 45,9% para as primeiras e últimas 12 horas respetivamente. Estes dados traduzem-se numa HR menor na câmara face ao ambiente nos dois intervalos. No primeiro período a descida de humidade foi na ordem dos 19% enquanto que durante a noite rondou os 8%.

Para se analisar o desempenho do secador com o deslocamento lateral ao longo do tabuleiro colocaram-se 3 data-loggers em linha, com espaçamento igual entre eles, como visível na Figura 4.4. Nas Figuras 4.9 e 4.10 é visível a variação da temperatura e humidade durante as 24 horas de ensaio em função da posição no tabuleiro.

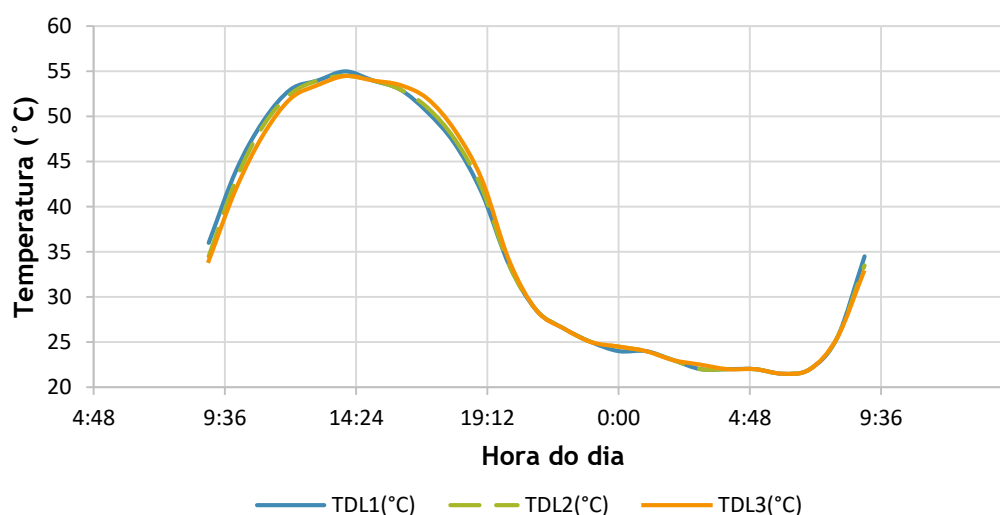


Figura 4.9 - Variação da temperatura no DL1, DL2 e DL3, posicionados no tabuleiro inferior.

Observando o gráfico da Figura 4.9 é explícito que não existe grande variação de temperatura entre as três posições do tabuleiro. Desta forma, estes dados são indicadores de um escoamento praticamente uniforme. Com uma análise mais minuciosa são visíveis 4 períodos distintos. O primeiro desde as 09h00 às 15h00, com o DL1 a registar as temperaturas mais elevadas, estabelecendo uma diferença de 1 °C para o DL2 e 2 °C para o DL3. O segundo período às 15h00 às 16h00 onde as temperaturas foram iguais nos 3 data-loggers. O terceiro das 16h00 às 19h00 onde o DL3 regista as temperaturas mais elevadas, diferenciando entre 1 °C a 1,5 °C para o DL2 e DL1, respetivamente. No último período, caracterizado pela ausência de radiação solar, as temperaturas nas três posições foram iguais. Estas pequenas variações resultam do movimento do Sol de Este para Oeste, que faz com que de manhã a lateral mais perto do DL1 (lado este) esteja exposta à radiação, ao contrário da face junto ao DL3 que se encontra sombreada. Durante a tarde dá-se o fenómeno inverso, daí os comportamentos distintos do data-loggers. Com este facto verifica-se que os ganhos térmicos no interior da câmara de secagem não são provenientes apenas do coletor, mas também da própria estrutura da câmara de secagem.

Pelo gráfico da Figura 4.10 de uma forma generalizada é perceptível um comportamento praticamente idêntico da humidade em relação à temperatura, com a modificação da posição no tabuleiro. Ao pormenor e em analogia com o gráfico da Figura 4.9 as pequenas variações de humidade ao longo do ensaio, estabelecem uma relação com a temperatura. Durante o dia, nos data-loggers onde se verifica a temperatura maior verifica-se neles a humidade mais baixa. Ao longo da noite o DL1 é o que evidencia menor valor de HR, variando esta de DL para DL no mesmo padrão que o verificado durante o dia, com variações de 0,5 a 2,5%.

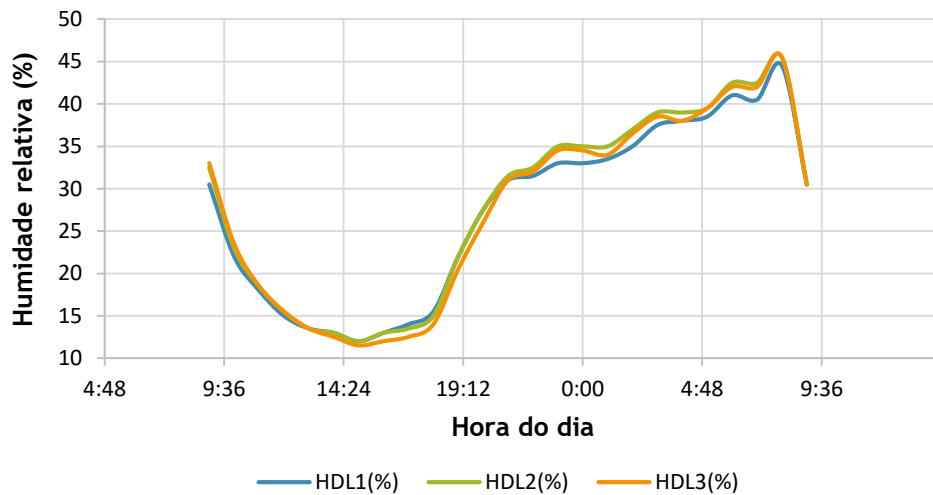


Figura 4.10 - Variação da temperatura no DL1, DL2 e DL3, posicionados no tabuleiro inferior.

Este estudo efetuou-se também para as mesmas posições do tabuleiro P4, contudo, verificaram-se fenómenos semelhantes aos verificados no tabuleiro inferior (P2) daí não serem apresentados.

Uma vez que para cada posição no tabuleiro, a variação de temperatura e humidade é distinta, fez-se a média de ambas as grandezas em cada tabuleiro, para cada instante. Tendo as temperaturas e humidades relativas médias, seguiu-se o estudo da variação da temperatura e humidade em função da altura do tabuleiro. Os resultados estão representados na Figura 4.11 e 4.12.

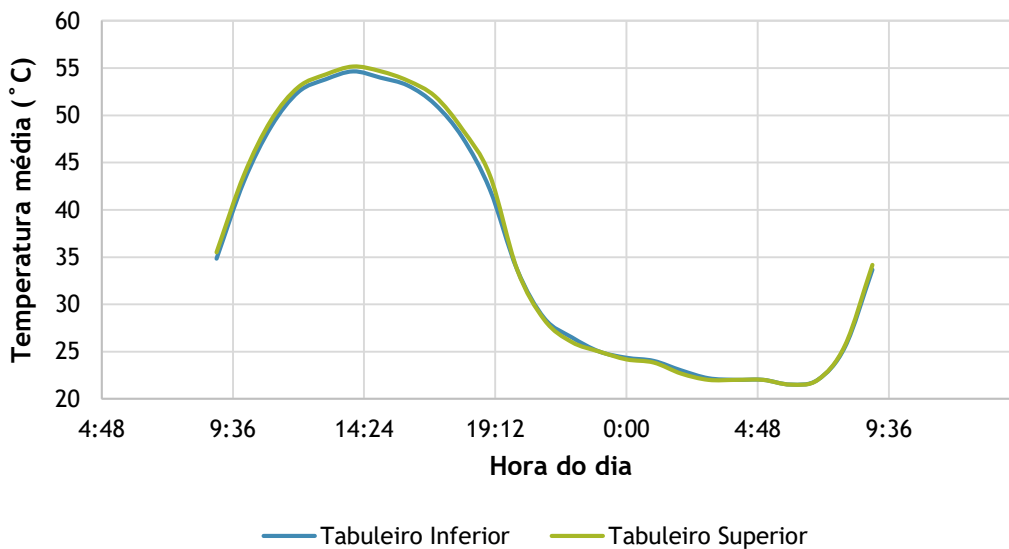


Figura 4.11 - Temperatura média nos dois tabuleiros utilizados ao longo do ensaio.

Durante as 24 horas de ensaio verificou-se, pela análise à Figura 4.11, que no intervalo entre as 09h00 e as 21h00 a temperatura no tabuleiro superior foi ligeiramente maior, apresentando discrepâncias variáveis de 0,5 a 1,5 °C. Quando a radiação é inexistente a dissimelhança é quase sempre nula.

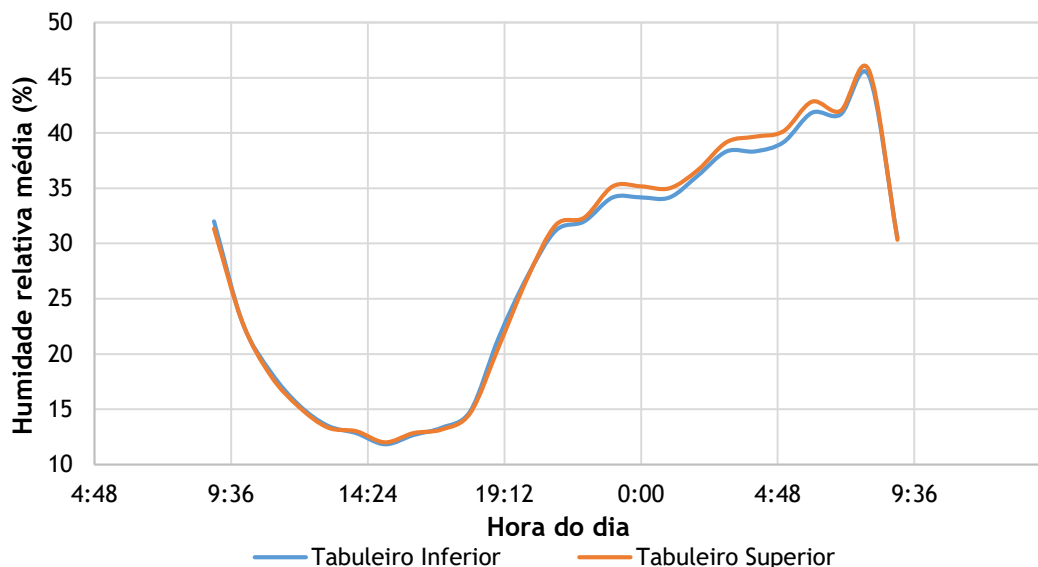


Figura 4.12 - Umidade relativa média nos dois tabuleiros ao longo do ensaio.

Tal como o verificado para a temperatura, na maioria do tempo, pela Figura 4.12 a discrepância de valores de umidade é quase nula. Contudo, contrariamente ao sucedido com a temperatura, para esta grandeza é no período noturno que essas diferenças são mais perceptíveis. Durante este intervalo é o tabuleiro superior que apresenta valores ligeiramente superiores de umidade, pela sua proximidade com a saída de ar, divergindo de 0,3% a 1%. Durante o dia essa dissimelhança é na grande maioria das vezes nula ou mais elevada 0,1% a 0,6% no tabuleiro inferior.

4.2.2. Avaliação da temperatura e umidade relativa em função da altura de caixa-de-ar do coletor

Um dos pontos pouco explorados no que toca ao estudo de secadores solares é o seu desempenho, confrontando-o com diferentes alturas, entre a cobertura e a placa absorvedora no coletor. Visando esta análise comportamental realizou-se um estudo com as alturas de 5, 10 e 15 cm. Consoante a altura adotada, a área de secção de entrada de ar no coletor varia, modificando o caudal de ar que entra.

Para o estudo da presente secção realizou-se apenas um ensaio de 24 horas para cada uma das alturas. Numa primeira fase apresentam-se os dados climáticos referentes aos 3 dias de ensaio. Seguindo-se o estudo do efeito da altura de caixa-de-ar do coletor na temperatura e HR no interior da câmara de secagem.

4.2.2.1. Dados Climáticos

Os ensaios com duração de 24 horas iniciaram-se em dias adjacentes no mês de julho, sempre com início às 09h00. Mais influente que a altura do coletor é o estado do clima, por isso, o presente estudo deve, primeiramente, ser bem caracterizado no que tange as condições climáticas. De seguida são apresentadas as condições atmosféricas verificadas durante os três ensaios, começando pela intensidade de radiação refletida na Figura 4.13, que esboça dados captados com uma periodicidade de dez minutos.

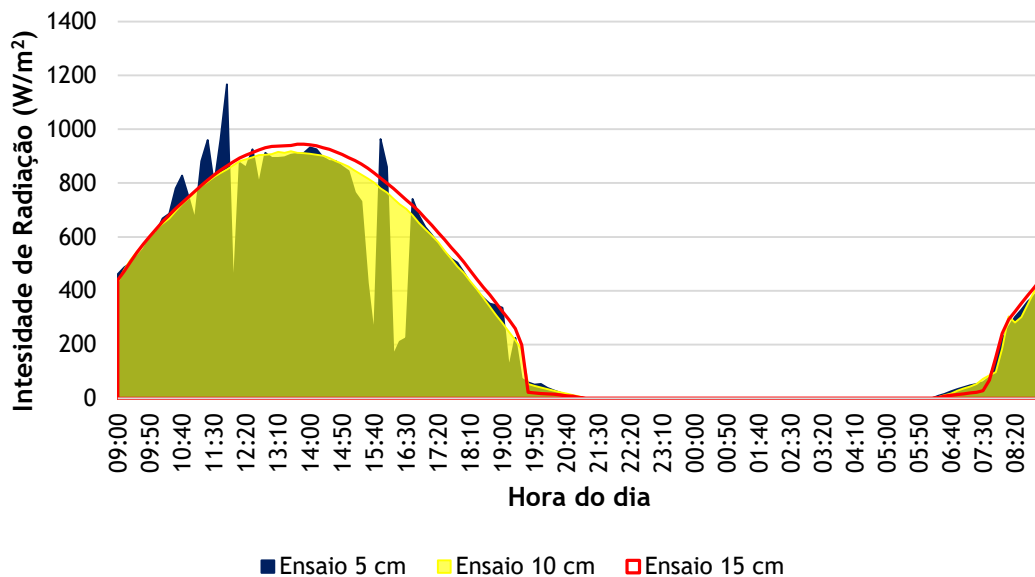


Figura 4.13 - Radiação incidente durante os ensaios de 5 e 10 cm para o mesmo intervalo de tempo. Confrontando a radiação solar durante os três ensaios, através da Figura 4.13, é explícito a similaridade das radiações para o ensaio com 10 e 15 cm. Estes apresentaram radiações médias de 325 e 336 W/m^2 , durante as 24 horas de ensaio. A ligeira supremacia no ensaio com 15 cm verificou-se ao longo do ensaio quase sempre com valores mais elevados. Para o ensaio de 10 cm a radiação máxima ocorreu às 13h30 atingindo um valor de 918 W/m^2 . Para o ensaio de 15 cm a radiação máxima ocorreu às 13h40 atingindo um valor de 944 W/m^2 . Os dois dias apresentaram uma curva com aspeto parabólico, que condiz com um dia de céu limpo. Já para o estudo de 5 cm a radiação apesar de ter o pico de radiação superior, 1167 W/m^2 às 11h50, espelhou uma grande frequência de variações ao longo do tempo, refletida nos 309 W/m^2 de radiação média durante o ensaio. Equiparando o ensaio com 5 cm com os restantes, este apresentou uma radiação de 909 W/m^2 , entre as 13h30 e as 13h40. Isto permite retirar que caso não existisse a interferência de nuvens o pico provavelmente ocorreria neste período com um valor mais elevado.

Na Figura 4.14 ilustra-se a variação das temperaturas ambientes para cada ensaio, baseada em dados recolhidos de hora a hora.

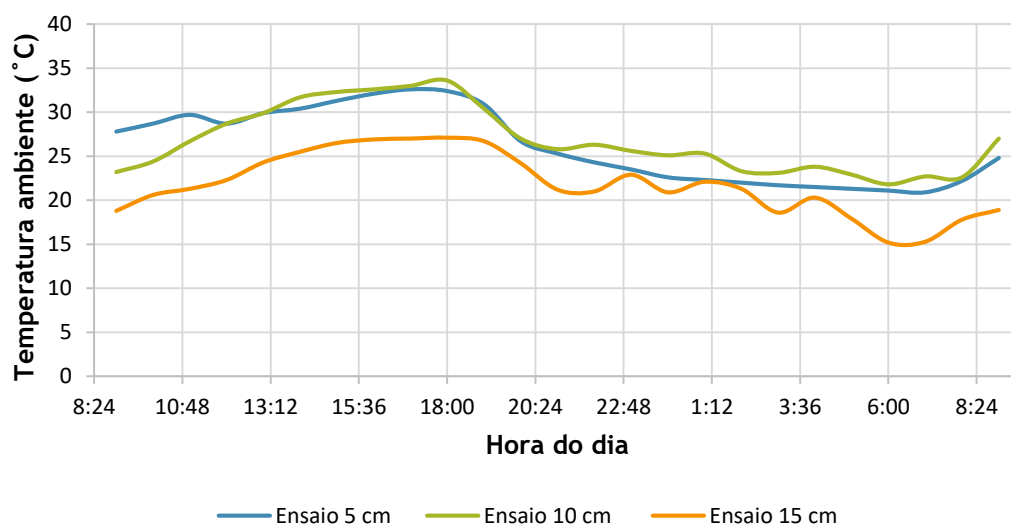


Figura 4.14 - Temperaturas ambiente para os ensaios com 5, 10 e 15 cm de altura de caixa-de-ar.

Constata-se na Figura 4.14 que apesar das radiações superiores evidenciadas ao longo do dia, o ensaio com 15 cm foi o que presenciou temperaturas ambiente mais baixas, com uma média nas 24 horas de ensaio de 21,7 °C. O ensaio com 10 cm conseguiu a temperatura ambiente mais elevada, com uma média de 26,7 °C, ligeiramente superior aos 26,2 °C do ensaio com 5 cm. As temperaturas máximas foram de 32,6 °C, 33,6 °C e 27,1 para o ensaio de 5, 10 e 15 cm, respetivamente. A temperatura mínima foi de 20,9, 21,8 e 15,2 °C para o teste com 5, 10 e 15 cm, respetivamente.

Na Figura 4.15 retrata-se a variação das humidades relativas ambientes para cada ensaio, baseada em dados recolhidos de hora a hora.

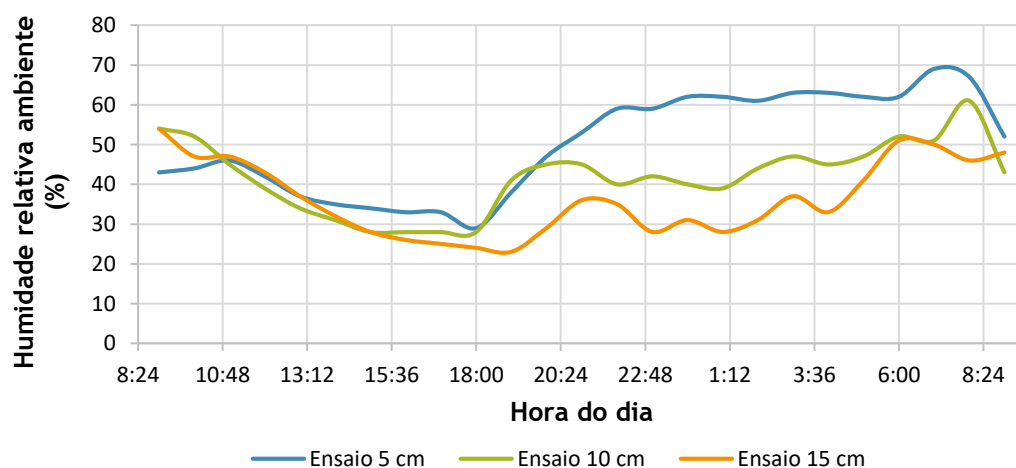


Figura 4.15 - Humidade relativa ambiente para os ensaios com 5, 10 e 15 cm de altura do coletor.

Verifica-se na Figura 4.15 que as humidades mais elevadas foram observadas no teste com 5 cm, apresentando divergências pronunciadas no período noturno e ainda uma média de HR de 50,2% na totalidade do ensaio. Apesar de ter espelhado as temperaturas mais baixas o ensaio com 15 cm foi o que se revelou mais seco, com um valor médio de HR de 36,4%. Já o ensaio com 10 cm esteve entre os dois anteriores, com uma média de 42 %. Os maiores valores de humidade foram de 69, 61 e 54% para o estudo com 5, 10 e 15 cm, respetivamente. Os menores foram de 29, 28 e 23% pela mesma ordem.

Tratando-se de uma avaliação do secador sob convecção natural, torna-se importante caracterizar a velocidade do vento, em parte, responsável pelo fluxo de ar no interior do secador. Devido à constante alteração dos valores de velocidade do vento apresenta-se apenas o valor médio para cada dia. As médias de velocidade foram então de 1,7, 1,4 e 2,1 m/s, para os ensaios de 5, 10 e 15 cm, respeitando a mesma ordem.

4.2.2.2. Temperatura e humidade relativa no interior da câmara de secagem

Definidos do ponto de vista climático os três dias de ensaios inicia-se agora a abordagem ao retratado no interior da câmara de secagem quanto à temperatura e HR. Os ensaios feitos em dias distintos, implicando condições atmosféricas distintas refletiram-se em diferentes padrões de temperatura e humidade relativa no interior do secador. Para efetuação da análise das grandezas em estudo, teve-se em conta que a temperatura e a HR variam ligeiramente com a altura e posição de cada tabuleiro. Como tal, calculou-se a média de cada grandeza para cada altura tendo em conta os valores refletidos em cada posição. Obtidas essas duas médias, calculou-se novamente o valor médio, agora entres as médias obtidas para cada tabuleiro, por forma a definir-se uma temperatura geral para cada instante.

Exibe-se na Figura 4.16 a oscilação de temperatura no interior e no exterior da câmara de secagem ao longo das 24 horas de cada um dos 3 ensaios.

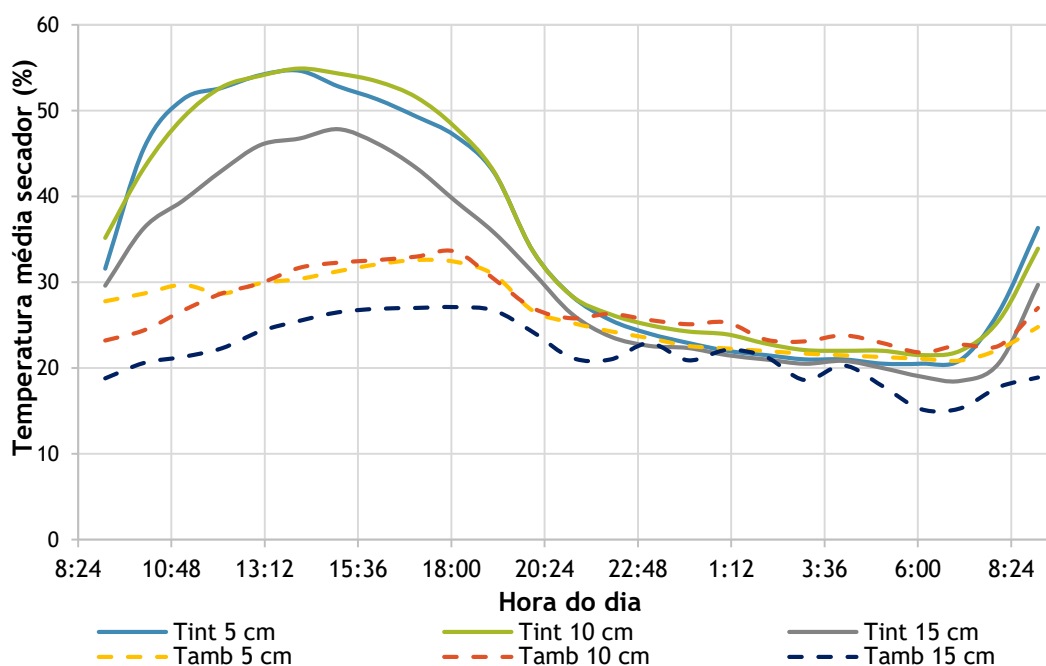


Figura 4.16 - Temperatura média no interior (Tint) do secador e no exterior do secador (Tamb) com 5, 10 e 15 cm de altura do coletor.

Apura-se da Figura 4.16 que de uma forma geral conseguiram-se ganhos térmicos significativos em todos os ensaios. Durante o dia, no intervalo compreendido entre as 09h00 e as 19h00 a temperatura média no interior da câmara foi de 48,5, 49,1 e 41,3 °C, para a altura de 5, 10 e 15 cm, respetivamente. Vivenciaram-se temperaturas médias relativas ao ambiente, nesse intervalo, de 30,4, 29,7 e 24,3 °C pela mesma ordem. Isto implicou que os incrementos de temperatura com base nestas médias fossem de 18,1 °C, 19,4 °C e 17,0 °C para 5, 10 e 15 cm de altura no coletor, respetivamente. Apesar do secador com uma altura de 10 cm no coletor ter um ganho térmico mais elevado, deve ser salientado a elevada inconstância em termos de radiação que o ensaio com 5 cm evidenciou. Em termos de temperaturas máximas atingidas o secador apresentou no seu interior valores de 54,7, 54,9 e 47,8 °C, com 5, 10 e 15 cm de altura, respetivamente. Com base nas máximas refletidas no exterior as diferenças foram de 22,1, 21,3 e 20,7 °C para a altura de 5, 10 e 15 cm no coletor, respetivamente. Verificou-se mais uma vez a supremacia do ensaio de 10 cm em termos de valores mais elevados de temperatura e a inferioridade do mesmo parâmetro com os 15 cm. Contudo, durante o período de maior intensidade de radiação, onde se destacam as temperaturas mais elevadas, o ensaio de 5 cm com menores radiações permitiu ganhos térmicos maiores comparativamente ao ensaio de 10 e 15 cm.

Como era de esperar no período noturno as diferenças entre as curvas das temperaturas interiores e exteriores são menos significativas. Os valores da temperatura interior rondam os valores da temperatura exterior, que no período entre as 19h00 e as 09h00 foi de 30,1, 30,4 e 26,7 °C para os ensaios com 5, 10 e 15 cm, respetivamente. Para estes valores as médias no interior foram de 42,8, 42,9 e 35,8 °C. Isto permite concluir que com a utilização da altura de 5 cm a manutenção da temperatura é maior, comparativamente às restantes, apresentando a altura de 15 cm o pior índice de manutenção de temperatura. No que toca às temperaturas mínimas, quando no exterior se presenciaram 20,9, 21,8 e 15,2 °C, no interior registaram-se valores de 20,5, 21,5 e 18,5 °C, para 5, 10 e 15 cm, respeitando esta ordem. No caso das alturas de 5 e 10 cm, houve uma diminuição da temperatura no interior, esta poderá ter sido motivada pela ligeira distância entre aparelhos de medição e respetivas diferenças de precisão. Para a altura de 15 cm essa temperatura mínima foi 3,3 °C superior no interior. Pela análise da HR no interior da câmara (Figura 4.17) ver-se-á se a humidade praticada para as três alturas está associada a este fenómeno.

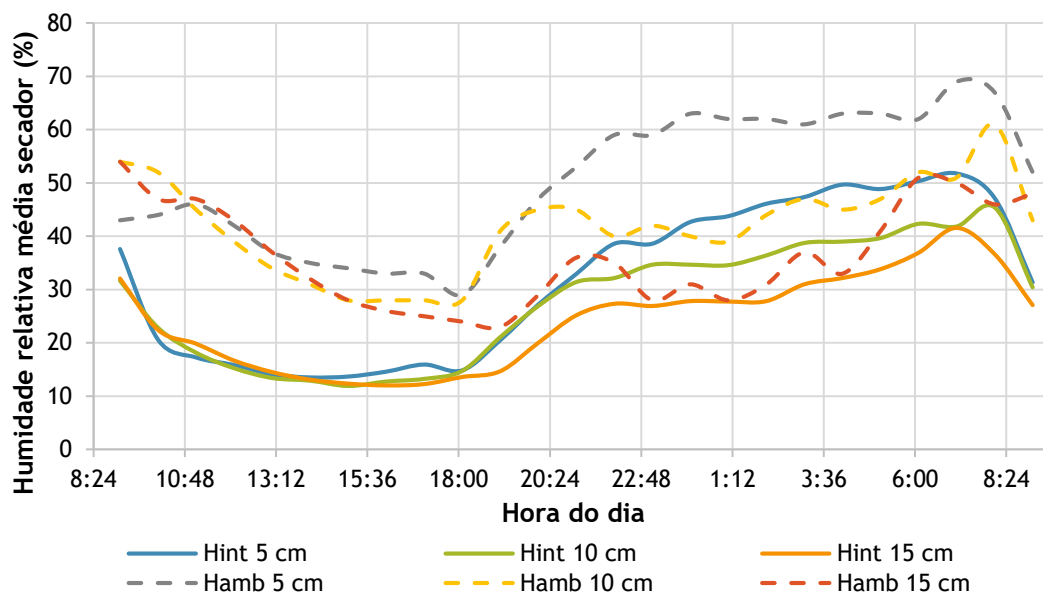


Figura 4.17 - Variação da humidade relativa média no interior e no exterior do secador com 5, 10 e 15 cm de altura do coletor.

Verifica-se pela Figura 4.17 uma sintonia nas curvas de HR no interior da câmara (Hint) durante o dia, contrariamente ao exposto no período da noite que se apresenta desalinhado. Posto isto, tal como para as temperaturas, será feita uma análise ao comportamento da humidade relativa durante o dia e a noite.

Durante o dia, no período de maior intensidade de radiação (por volta das 13h00) existe uma proximidade mais evidente entre os valores. As humidades na câmara neste instante foram de 14, 13 e 15%, para valores ambiente de 37, 34 e 37%, revelando uma maior diminuição de humidade para a altura de 15 cm, mesmo com uma intensidade de radiação inferior. Para

humidades relativas exteriores ao secador de 37,6, 37,1 e 35,1%, no interior a diminuição da humidade foi de 19,6, 20,0 e 18,4%. Mais uma vez, importa referir a frequente presença de nuvens ao longo do dia de ensaio com 5 cm. A HR mais baixa no interior da câmara foi de 11,9% para a altura de 10 cm, seguido dos 12,0% com 15 cm e dos 13,4% com 5 cm de altura no coletor. Para além de ter sido a mais baixa foi também a que salientou uma percentagem de descida maior com 16,1%, seguido dos 15,5% e dos 11,0% utilizando a altura de 5 e 10 cm, respetivamente. Com base nestes resultados, e em analogia com os dados climáticos, caso a altura de 5 cm não apresentasse frequentes variações no gráfico da radiação solar, a diminuição de humidade provavelmente seria maior com esta configuração.

O efeito da altura do coletor na humidade relativa, no interior do secador, é mais perceptível no período noturno, onde a intensidade de radiação solar é nula. Em termos médios a HR neste período desceu 17,6, 10,2 e 7,4% dos 58,7, 45,55 e 36,5% verificado no ambiente exterior para o ensaio com 5, 10 e 15 cm, respetivamente. A diferença do interior para o exterior quanto à HR foi então mais significativa para os 5 cm de altura no coletor, seguido dos 10 cm e por fim os 15 cm. Esta ordem era expectável, isto porque à medida que diminui a área de secção, maior é a obstrução à entrada de ar húmido ambiente, o perfil com menor área de secção torna-se de certa forma menos sensível à humidade noturna presente no ambiente exterior.

4.2.3. Avaliação da temperatura e humidade relativa em função do tipo de convecção

A ventilação apresenta uma vantagem ao processo de secagem, no que toca à imposição de um maior caudal de exaustão de ar humedecido, contudo pode traduzir-se numa diminuição da temperatura de secagem, podendo afirmar-se como desvantajoso. Na medida em que se deve encontrar um compromisso entre a HR e a temperatura no interior da câmara de secagem e o tipo de convecção utilizado. Para analisar esse contributo, estudou-se o efeito da ventilação na HR e na temperatura no interior da câmara, realizando-se ensaios sob convecção natural (CN) e forçada (CF), para as três alturas do coletor.

O ensaio utilizando a altura de 15 cm realizou-se no intervalo compreendido entre as 08h50 e as 18h40. Na Figura 4.18 é retratada a variação da radiação solar ao longo dos dois dias de ensaio em CN e CF, para esse intervalo de tempo.

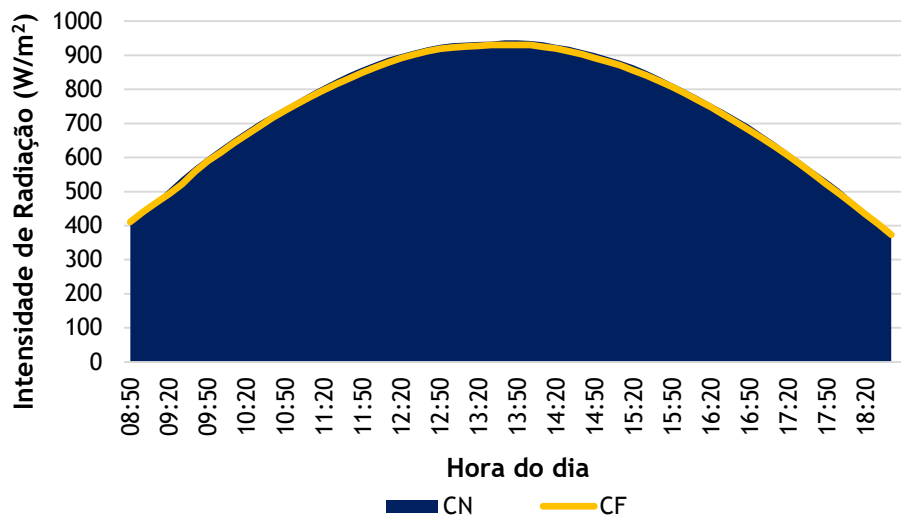


Figura 4.18 - Radiação solar incidente durante os ensaios em CN e CF para a altura de 15 cm no coletor.

Retira-se da Figura 4.18 que os dois dias de ensaio ocorreram sob condições de céu limpo. É notória ainda a semelhança de intensidade de radiação solar ao longo do dia de ensaio com as duas curvas a sobreporem-se quase completamente, apresentando radiações médias e máximas de 746 W/m² e 944 W/m² para o ensaio em CN, e 733 W/m² e 930 W/m² e para o de CF.

Na Figura 4.19 exibe-se a variação da temperatura ambiente e no interior da câmara de secagem para um dia de ensaio em convecção natural e outro em forçada, para a altura de 5 cm por parte do coletor.

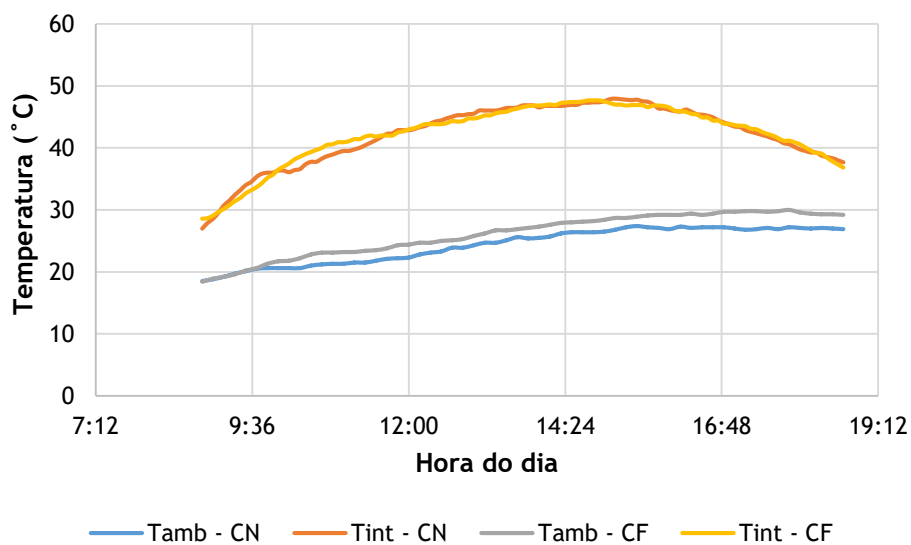


Figura 4.19 - Variação da temperatura exterior e interior do secador para o ensaio com convecção natural (CN) e forçada (CF) para altura do coletor de 15 cm.

Da visualização da Figura 4.19 é perceptível que o dia correspondente ao ensaio em CF evidencia uma temperatura ambiente máxima de 30 °C às 17h50, situando-se nos 27,2 °C para o ensaio em CN, à mesma hora. No ensaio sob condições naturais a temperatura ambiente máxima foi de 27,4 °C às 15h30, encontrando-se nos 28,9 °C para o ensaio em CF, à mesma hora. No que se refere à média das temperaturas nos dois dias, para CN foi de 24,3 °C face aos 26,6 °C de CF. Ao invés do traduzido pelas curvas da temperatura ambiente, a variação da temperatura no interior apresentou picos máximos às 15h10 e 14h40 com temperaturas de 47,9 °C e 47,5 °C, para CN e CF, respetivamente. Ostentando temperaturas médias de 42,1 e 42,2 °C, para CN e CF, respetivamente. Com isto, retira-se que mesmo para temperaturas ambiente mais baixas, o ensaio em convecção natural permitiu atingir a temperatura máxima mais elevada, inferiorizando-se apenas em uma décima em termos de temperaturas médias. Os ensaios em CN e CF tiveram ganhos térmicos, relativamente ao ambiente de 17,8 e 15,6 °C, respetivamente.

Na Figura 4.20 retrata-se a variação da HR ambiente e no interior da câmara de secagem (Hint) para um dia de ensaio em convecção natural e outro em forçada, para as alturas de 15 cm no coletor.

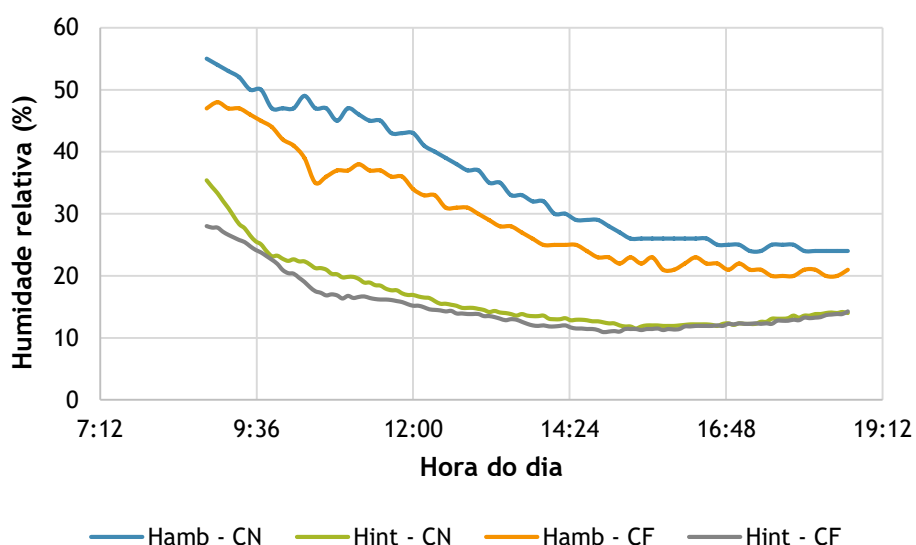


Figura 4.20 - Variação da humidade relativa exterior e interior do secador para o ensaio com convecção natural e forçada para altura do coletor de 15 cm.

Da apreciação da Figura 4.20 é visível que o dia correspondente ao ensaio em CF foi mais seco, com uma média de humidade relativa de 29% face aos 35% do ensaio em CN. Mesmo com essa diferença significativa, essa mesma média no interior do secador definiu-se como de 16 e 15% para CN e CF, respetivamente. Estabelecendo assim, uma diferença de 1% no interior da câmara entre os dois ensaios comparativamente aos 6% de diferença de HR ambiente. O valor de HR ambiente mínimo foi de 24% por volta das 17h10, para CN e de 20%

para CF a por volta das 17h30. Já no interior da câmara de secagem esses valores diminuíram ainda mais exibindo mínimos de 12% entre as 15h00 e as 17h15, e 11% entre as 14h40 e as 16h05, para CN e CF, respetivamente. Com estes resultados, conclui-se que a diferença expressa nas humidades ambiente tornou-se desprezável no interior da câmara de secagem, demonstrando a boa circulação de ar através da utilização da altura de 15cm. Os ensaios em CN e CF conseguiram descidas de HR, comparativamente às evidenciadas pelo ambiente de 19 e 14%, respetivamente.

O ensaio utilizando a altura de 10 cm realizou-se das 09h05 às 18h40. Na Figura 4.21 é mostrada a variação da radiação solar ao longo dos dois dias de ensaio em CN e CF, para esse intervalo de tempo.

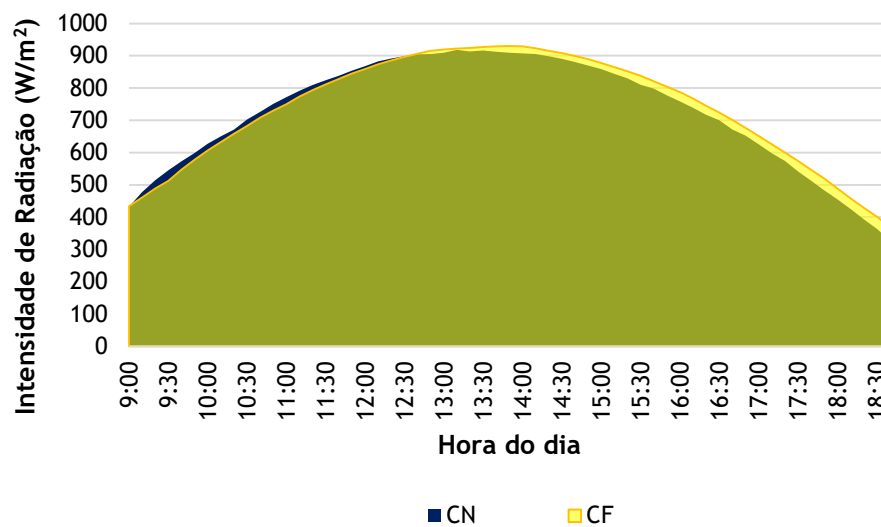


Figura 4.21 - Radiação solar incidente durante os ensaios em CN e CF para a altura de 10 cm no coletor.

Retira-se da Figura 4.21 que os dois dias de ensaio ocorreram sob condições de céu limpo. Verifica-se a ausência de nuvens durante os dois dias, pela forma parabólica sem oscilações da curva de intensidade de radiação. Presenciou-se durante o período da manhã uma maior incidência de radiação para o ensaio de CN comparativamente ao de CF, revertendo-se essa tendência durante a tarde. Denotaram-se radiações médias e máximas de 725W/m² e 918 W/m² para o ensaio em CN e 734 W/m² e 930 W/m² para o de CF.

Na Figura 4.22 exibe-se a variação da temperatura ambiente e no interior da câmara de secagem para um dia de ensaio em convecção natural e outro em forçada, para a altura de 10 cm por parte do coletor.

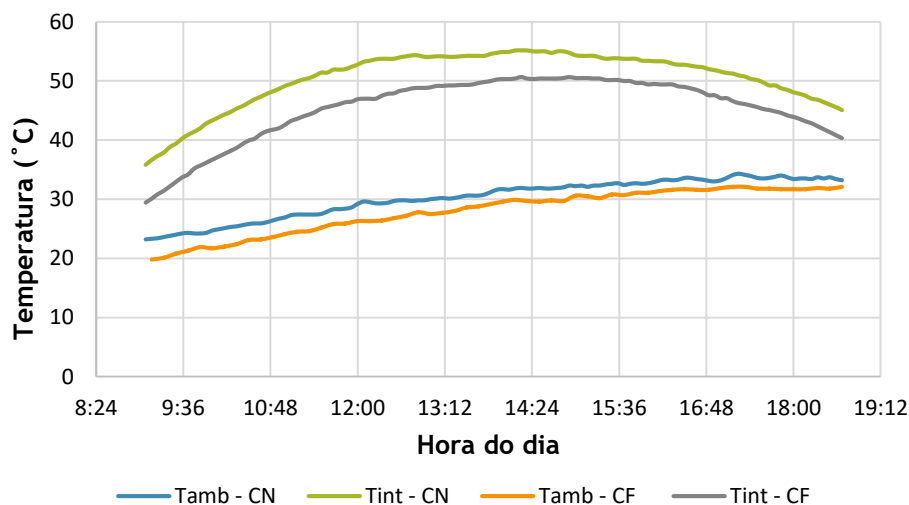


Figura 4.22 - Variação da temperatura exterior e interior do secador para o ensaio sob convecção natural e forçada para altura do coletor de 10 cm.

Da análise da Figura 4.22 constata-se que a temperatura na câmara, tal como o sucedido na altura de 15 cm é novamente mais elevada para o ensaio em CN. Este presenciou temperaturas ambiente médias de 30,2 °C, face aos 27,9 °C do ensaio em CF. As temperaturas no interior da câmara apresentaram valores médios de 50,5 e 45,4 °C, para CN e CF, respetivamente. Os padrões das curvas de temperatura, quer ambiente quer no seio do secador são semelhantes entre si, estando apenas desfasadas em termos de amplitude. As temperaturas máximas externas ao secador foram de 34,3 e 32,1 °C às 17h15 e 17h10, respetivamente. No que toca às temperaturas intrínsecas à câmara registaram-se valores máximos de 55,2 e 50,7 °C às 14h15 e 14h55, para os ensaios CN e CF, na mesma ordem. Os ensaios em CN e CF obtiveram ganhos térmicos, relativamente ao ambiente de 20,3 e 17,5 °C, respetivamente.

Na Figura 4.23 retrata-se a variação da HR ambiente e no interior da câmara de secagem para um dia de ensaio em convecção natural e outro em forçada, para as alturas de 10 cm no coletor.

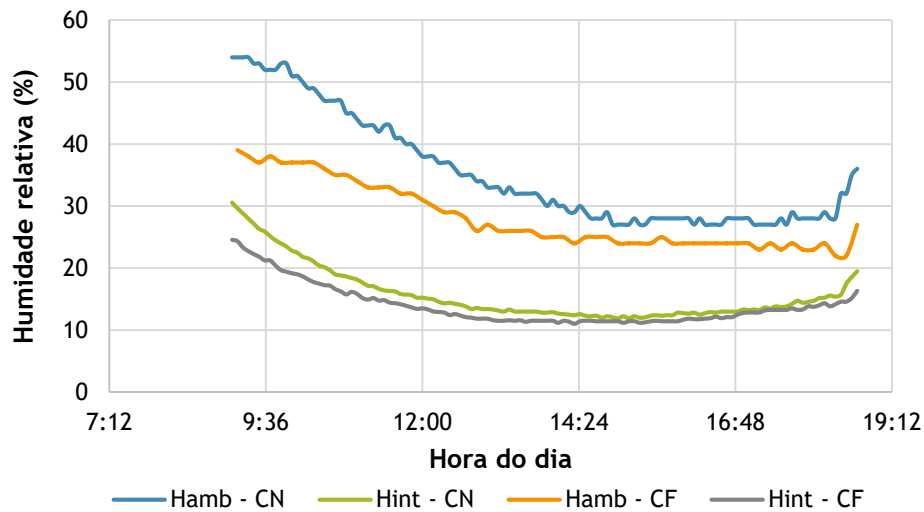


Figura 4.23 - Variação da umidade relativa exterior e interior do secador para o ensaio com convecção natural e forçada para altura do coletor de 10 cm.

Da observação da Figura 4.23 é visível que o dia correspondente ao ensaio em CF foi mais seco, com uma média de HR de 28% face aos 35% do ensaio em CN. Apesar dessa diferença significativa, no interior do secador evidenciaram-se valores de 16 e 14% para CN e CF, respectivamente. Estabelecendo assim, uma diferença de 2% entre os ensaios comparativamente aos 7% de diferença de umidade ambiente. O valor de HR ambiente mínimo foi de 27% entre as 14h55 e as 17h35, para CN, e de 22% para CF entre as 18h20 e as 18h30. Já no interior da câmara de secagem esses valores foram ainda mais inferiores, com cerca de 12% entre as 14h20 e as 15h50, e 11% entre as 13h35 e as 15h55, para CN e CF, respectivamente. Os ensaios em CN e CF conseguiram então descidas de HR, em relação ao ambiente, de 19% e 14%, respectivamente.

O ensaio utilizando a altura de 5 cm realizou-se das 09h10 às 18h40. Na Figura 4.24 é exibida a variação da radiação solar ao longo dos dois dias de ensaio sob CN e CF, para esse intervalo de tempo.

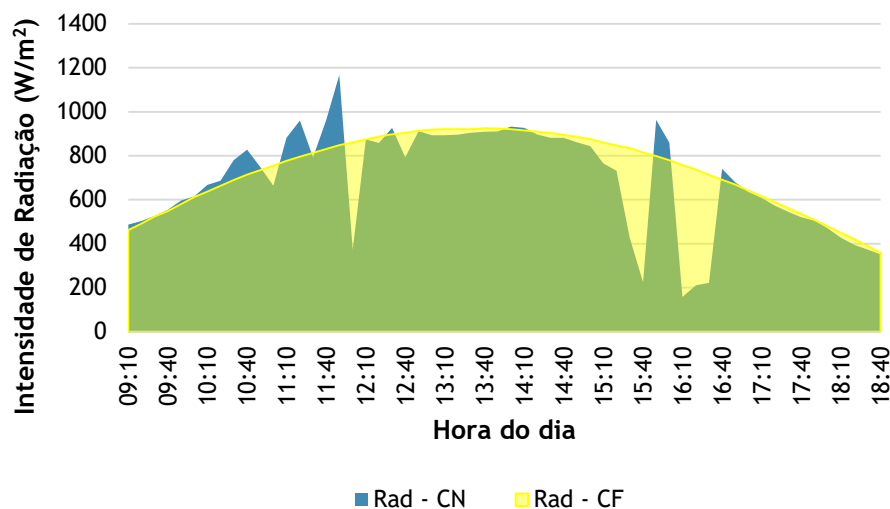


Figura 4.24 - Radiação solar incidente durante os ensaios em CN e CF para a altura de 5 cm no

Retira-se da Figura 4.24 que os dois dias de ensaio ocorreram sob condições distintas. O ensaio em CF sob condições de céu limpo, contrariamente ao ensaio em CN que foi caracterizado por uma densa presença de nuvens. Motivado pelas oscilações frequentes, o ensaio em CN apresentou uma radiação média de 692W/m^2 enfrentando os 736W/m^2 do ensaio em CF. Em termos valor máximo a superioridade foi para o ensaio em CN com 1167W/m^2 às 11h50, face aos 925W/m^2 para CF às 13h40.

Na Figura 4.25 exhibe-se a variação da temperatura ambiente e no interior da câmara de secagem para um dia de ensaio em convecção natural e outro em convecção forçada, para a altura de 5 cm por parte do coletor.

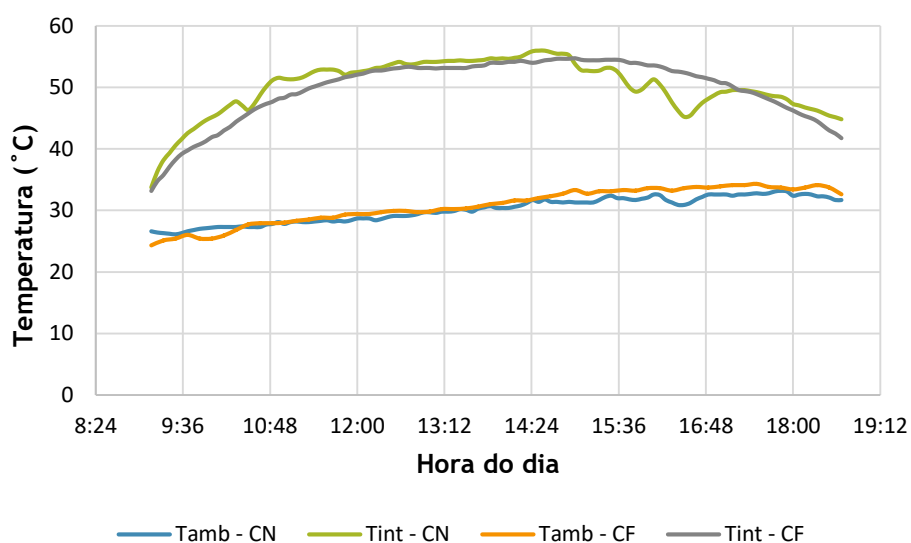


Figura 4.25 - Variação da temperatura exterior e interior do secador para o ensaio com convecção natural e forçada para altura do coletor de 5 cm.

Observando a Figura 4.25 desde logo é perceptível uma curva de temperatura interna, para o ensaio em CN, com bastante oscilação. Esta motivada pela nebulosidade frequente ao longo do período do ensaio que faz diminuir a temperatura da placa absorvedora. Ainda assim, essas variações refletiram-se menos na temperatura ambiente, apresentando uma média de 30,1 °C para CN e 30,7 para CF. Também em termos máximos, a temperatura ambiente foi superior para o ensaio em CF com 34,3 °C opondo-se aos 33,2 °C do ensaio em CN. De forma geral, excetuando o período entre as 15h00 e as 17h20, caracterizado por uma nebulosidade mais cerrada, os resultados indicam uma ligeira superioridade quanto às temperaturas internas para o ensaio de CN. Para este a média das temperaturas no interior foi de 50,2 °C, ligeiramente superior à do ensaio em CF, que foi de 50,0 °C. Supremacia também evidente em termos das temperaturas máximas dentro do secador, com 56 °C às 14h30 face aos 54,8 °C às 15h00, para o ensaio em CF. Os ensaios em CN e CF tiveram ganhos térmicos, em relação ao ambiente de 20,1 °C e 19,3 °C, respetivamente.

Na Figura 4.26 retrata-se a variação da HR ambiente e no interior da câmara de secagem para um dia de ensaio em convecção natural e outro em forçada, para as alturas de 5 cm no coletor.

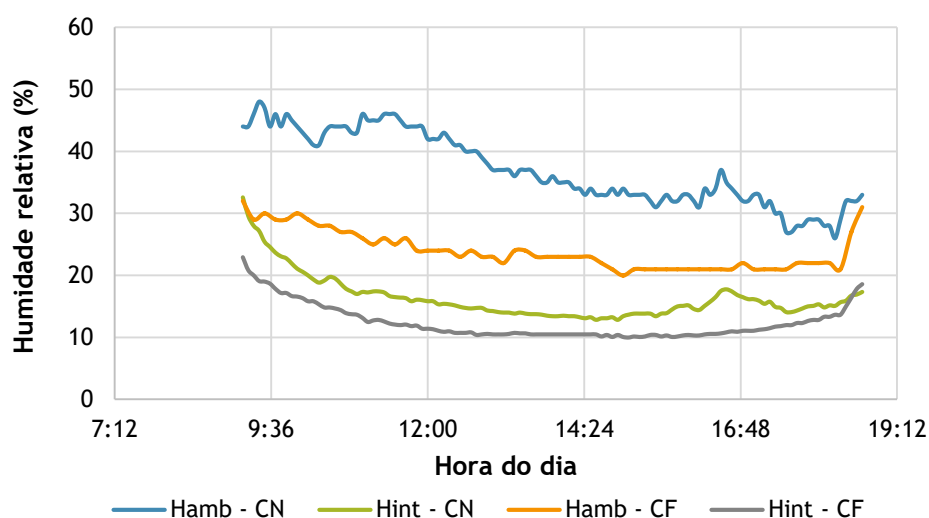


Figura 4.26 - Variação da humidade relativa exterior e interior do secador para o ensaio com convecção natural e forçada para altura do coletor de 5 cm.

Da observação da Figura 4.26 é visível que o dia correspondente ao ensaio em CF foi mais seco, com uma média de humidade relativa de 24% face aos 37% do ensaio em CN. Mesmo com essa diferença percentual, essa mesma média no interior do secador definiu-se como de 16 e 12% para CN e CF, respetivamente. Estabelecendo assim, uma diferença de 4% entre os ensaios comparativamente aos 13% de diferença de HR ambiente. A HR ambiente mínima foi de 26% às 18h15, para CN e de 20% para CF às 15h00. Já no interior da câmara de secagem essa decadência foi ainda mais significativa com mínimos de 13% às 14h55, e 10% às 15h00,

para CN e CF, respetivamente. Os ensaios em CN e CF conseguiram então descidas de HR, em relação ao ambiente, de 21 e 12%, respetivamente.

Por forma a facilitar a análise dos resultados na Tabela 4.1 são apresentados todos os parâmetros referidos anteriormente para cada tipo de ensaio, com variação de altura ou de convecção.

Tabela 4.1 - Comparação de resultados de temperatura e humidade relativa no interior do secador com as do exterior em função do tipo de convecção, tendo em conta a radiação incidente.

	Ensaio 15 cm		Ensaio 10 cm		Ensaio 5 cm	
	CN	CF	CN	CF	CN	CF
Intensidade de Radiação média (W/m²)	746	733	725	734	692	736
Temperatura ambiente média (°C)	24,3	26,6	30,2	27,9	30,1	30,7
Temperatura interior média (°C)	42,1	42,2	50,5	45,4	50,2	50,0
Ganho térmico (°C)	17,8	15,6	20,3	17,5	20,1	19,3
Humidade relativa ambiente média (%)	35	29	35	28	37	24
Humidade relativa interior média (%)	16	15	16	14	16	12
Diminuição de humidade relativa (%)	19	14	19	14	21	12

Os resultados obtidos e apresentados na Tabela 4.1 permitem retirar algumas informações úteis. Do ponto de vista das temperaturas alcançadas no interior do secador, nota-se que foi sob CN que foram obtidos os maiores ganhos térmicos. Comparando os ensaios sob convecção natural para cada uma das alturas vê-se que o maior ganho térmico se verificou no ensaio de 10 cm. O expectável era que essa supremacia ocorresse no coletor com altura de 5 cm, tal como o sucedido para o caso dos valores de ganho térmico sob CF. Em CN isso não ocorreu porque foi um dia caracterizado pela forte presença de nuvens, refletida pela média mais baixa de radiação solar, originando descidas significativas na temperatura interior do secador. Os ganhos térmicos menos significativos ocorrem no caso do coletor com 15 cm de altura, com 17,8 °C e 15,6° para CN e CF, respetivamente.

Relativamente às diferenças entre a HR ambiente e a do interior do secador verificou-se uma maior diminuição de HR quando o ensaio foi realizado sob CN. Dos valores de descida de HR entre os três ensaios não são manifestas diferenças expressivas, com a obtenção de valores iguais para as alturas de 15 e 10 cm. Com o coletor a retratar a altura de 5 cm a foi conseguida uma descida de mais 2% face aos restantes ensaios. Contudo, para o caso de CF

a descida foi 2% inferior à dos restantes ensaios, com um valor de 12% face aos 14% do ensaio com 10 e 15 cm.

Um dos pontos críticos da secagem é o período noturno, daí que seja importante caracterizar-se o secador neste período. Para isto, comparam-se de seguida os resultados obtidos em termos de temperatura e HR verificada durante uma noite sob convecção natural e outra sob convecção forçada, considerando o período das 18h40 às 08h00. Traduz-se na Figura 4.27 o contraste da variação das temperaturas e humidades ambiente com as do interior do secador ao longo da noite, exposto ao ambiente e sob convecção natural.

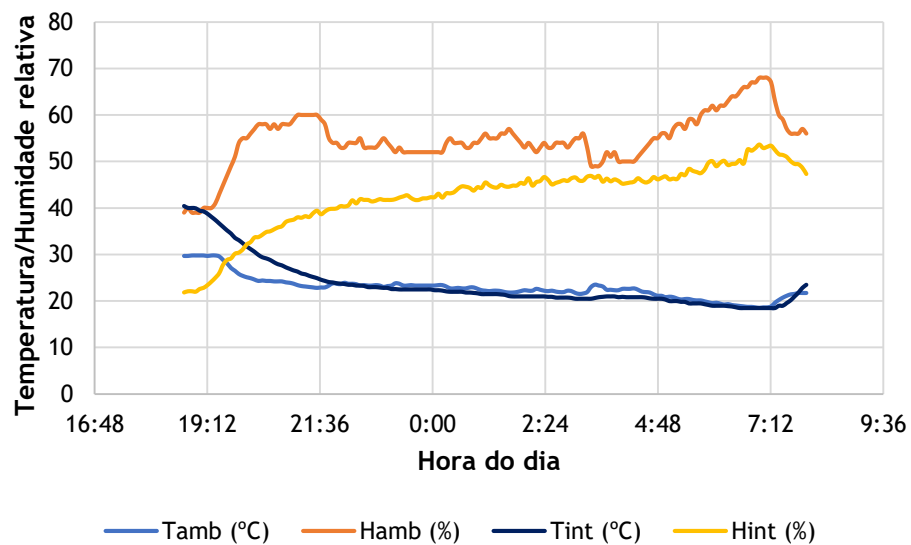


Figura 4.27 - Variação da temperatura e humidade ambiente e temperatura e humidade no interior do secador sob convecção natural.

Esmiçando a Figura 4.27, é visível que a temperatura no início, dentro do secador, é superior à ambiente. Contudo, devido à inexistência de radiação deixa de haver ganhos térmicos e o secador a partir das 21h52 atinge a mesma temperatura que o exterior. Nesse instante a temperatura no interior passa a ser ligeiramente superior. Essa diferença insignificante pode estar associada à ligeira diferença posicional do secador e da estação meteorológica. Já a humidade no interior da câmara de secagem é sempre inferior à ambiente. Esta diferença de humidades é em média de 12%, evidenciando uma diferença máxima e um mínima de 24 % e 2%, respetivamente. De salientar ainda o declive mais acentuado no início e no final da curva da humidade ambiente, reforçando a interligação com a radiação solar. Isto é, no início da curva quando deixa de haver radiação à um crescimento acentuado da humidade ambiente, contrariamente a isto, no final com o surgimento da radiação dá-se um decréscimo acentuado da humidade ambiente. A Figura

4.28 contrasta a variação das temperaturas e humidades ambiente com as do interior do secador ao longo da noite, exposto ao ambiente e sob convecção forçada.

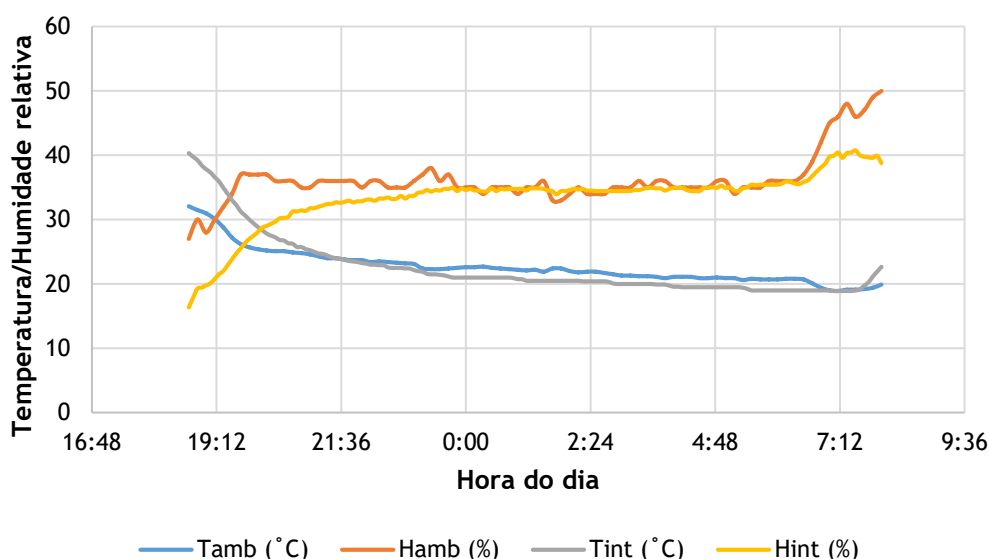


Figura 4.28 - Variação da temperatura e humidade ambiente, e temperatura e humidade no interior do secador sob convecção forçada.

Em analogia com a Figura 4.27 é possível ver a influência da ventilação principalmente na humidade. Para convecção forçada a humidade ambiente e a do interior apresentam a maioria do tempo valores semelhantes, contrariamente ao visualizado para o ensaio sob CN que apresentava humidades inferior no interior do secador. Em termos de temperatura tinha-se visto sob CN que a temperatura no interior do secador era ligeiramente inferior, para esta situação espelhou-se o mesmo, mas com uma diferença ligeiramente maior.

4.2.4. Secagem solar de cereja sem pré-tratamento sob condições climáticas favoráveis

A colheita da cereja ocorre entre os meses de maio a julho, o que permite a sua secagem nos meses de maior pico de radiação solar, tornando o processo menos moroso. Após a caracterização do secador solar, seguiu-se o desenvolvimento do estudo do processo de secagem. Para tal descarçaram-se 15 kg de cereja “de saco”, e colocaram-se de forma uniforme em dois tabuleiros na posição P2 e P4, conforme a identificação ilustrada na Figura 4.2. Os produtos submetidos ao processo foram condicionados após colheita numa câmara de refrigeração, por forma a conservá-los até ao início dos ensaios de secagem.

O desenvolvimento deste estudo teve como ponto essencial a análise organolética das cerejas após a conclusão da desidratação, estudo não referenciado no presente trabalho uma vez que o foco é o desempenho do secador em termos de temperaturas e humidades relativas.

Por forma a permitir uma maior renovação do ar no interior da câmara de secagem, optou-se por realizar o presente ensaio com a altura de 15 cm de caixa-de-ar, correspondendo à maior área de secção de entrada no coletor. A escolha desta altura resultou de um compromisso entre a temperatura conseguida na câmara de secagem e o caudal necessário para a exaustão da humidade no interior da cereja sob convecção natural.

O processo de secagem teve inicio às 10h50 do dia 27 de junho de 2016, terminando dia 2 de julho de 2016, tendo ocorrido de forma contínua, isto é, durante a noite as cerejas não foram removidas do secador.

Antes da colocação da cereja no secador determinou-se o teor de humidade desta, exibindo um valor de 74,22% medido na base seca através do analisador de humidade. Tal como realizado por Mohanraj e Chandrasekar (2009) o teor de humidade inicial foi calculado baseado da medição de 5 diferentes amostras, por forma a diminuir o erro da medição associada ao diferente calibre dos produtos.

Os períodos da realização dos estudos foram previamente tratados, uma vez que era imperativo o processo ser realizado sob condições favoráveis. De seguida são apresentados os dados climáticos de todo o ensaio, para posteriormente ser abordado o comportamento do secador, através de um estudo de caso de secagem de cerejas.

4.2.4.1. Dados climáticos

O comportamento da secagem no interior do secador pode ser influenciado por fatores externos, nomeadamente a radiação solar, insolação, velocidade do ar e ainda temperatura e HR ambiente.

São apresentadas sob a forma de gráfico de área as intensidades de radiação (I) presenciadas ao longo dos 6 dias de secagem. Este parâmetro tem uma forte influência no desempenho do secador, uma vez que é ele que atribui a quantidade de energia que é captada pelo coletor solar. Os dados climáticos foram coletados de minuto a minuto a partir da estação meteorológica.

A localização do secador solar permite que haja radiação incidente no coletor das 8h às 18h40, para este intervalo são apresentados na Figura 4.29 os gráficos da variação da intensidade de radiação para cada dia de ensaio.

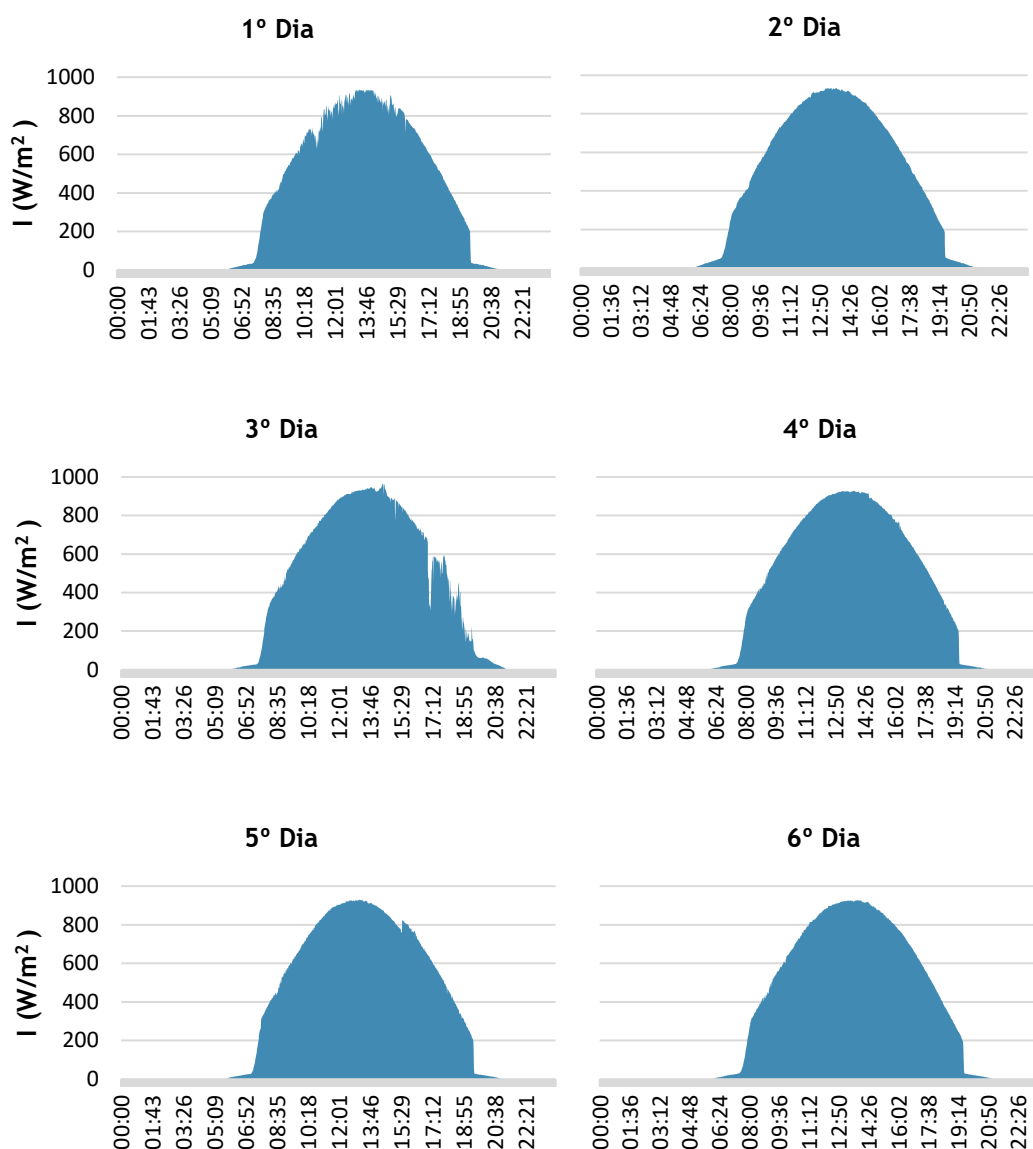


Figura 4.29 - Variação da intensidade de radiação solar ao longo dos seis dias de ensaio do 1º processo de secagem.

Analisando os dados da Figura 4.29 pode-se verificar que este primeiro ensaio de secagem se deu sob condições solares favoráveis. De forma geral, o 1º processo de secagem foi caracterizado pela existência de poucas flutuações da radiação solar diária. Excetuam-se o 1º e 3º dias de ensaio, onde houve alguma interferência de nuvens, daí apresentarem maior frequência de variações. Por este facto, o 1º dia apesar de apresentar o segundo maior pico de radiação solar é o que apresenta em média menores valores de radiação. O 3º dia apesar de presenciar o maior pico de radiação solar é o que apresenta a segunda média mais alta dos picos de radiação. De salientar que os picos de radiação ocorreram entre as 13h12 e as 14h23.

Uma vez que a cereja não foi retirada do secador no período noturno, serão apresentados gráficos distintos em termos de temperatura e HR ambiente, visando analisar as condições climáticas diurnas e noturnas. O intervalo diurno é definido das 8h e às 19h, o noturno das 19h às 8h do dia seguinte. A Figura 4.30 ilustra a variação das temperaturas exteriores durante o período diurno ao longo do processo de secagem.

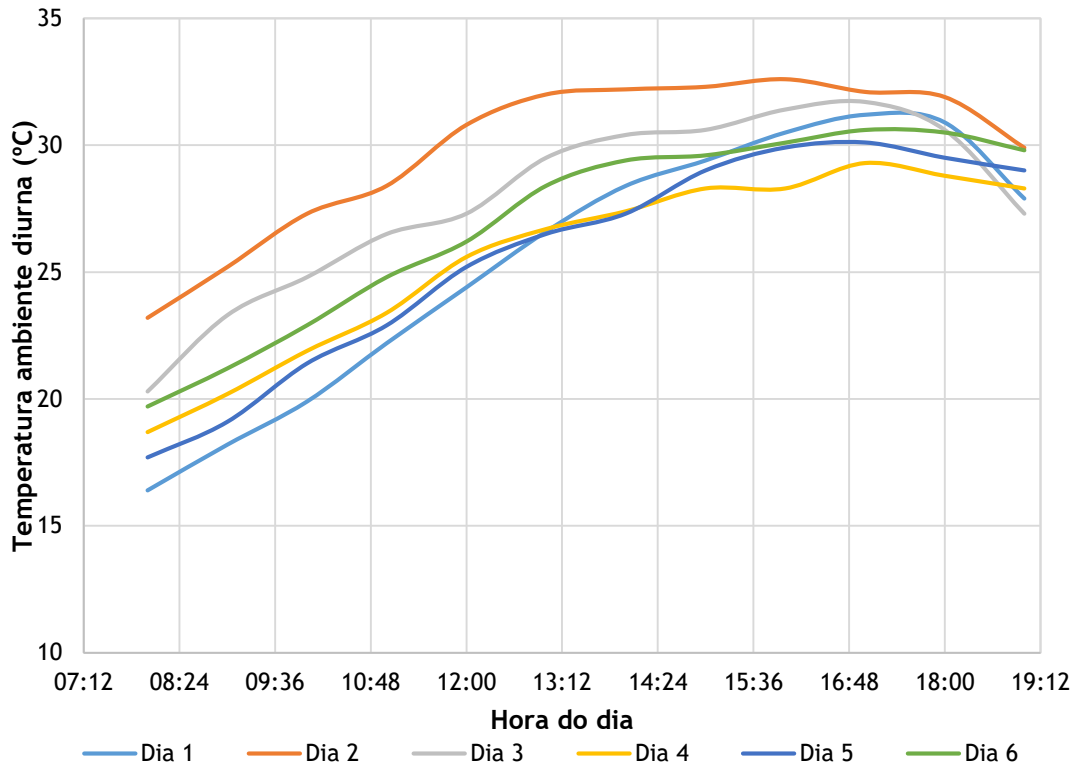


Figura 4.30 - Variação da temperatura ambiente ao longo do período diurno dos seis dias do processo de secagem.

Constata-se da análise à Figura 4.30 que o segundo dia de ensaio vigorou em termos de temperatura ambiente, apresentando um valor máximo de 32,6 °C e um mínimo de 23,2 °C. Contrariamente a este dia, o primeiro surge como aquele onde as temperaturas foram mais baixas, muito devido às flutuações de radiação verificadas neste dia. O valor máximo de temperatura verificado foi de 31,2 °C e o mínimo de 16,4 °C. A variação da HR exterior durante o dia ao longo do ensaio de secagem são exibidos na Figura 4.31.

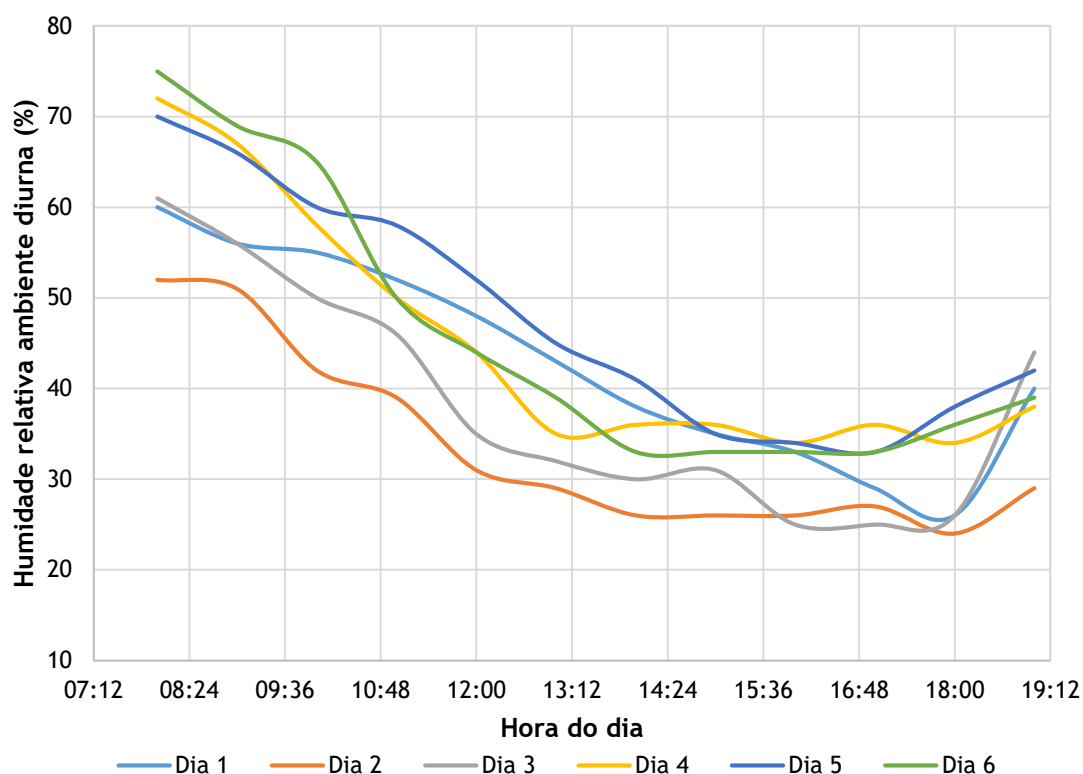


Figura 4.31 - Variação da umidade ambiente ao longo do período diurno dos seis dias do processo de secagem.

Constata-se da análise à Figura 4.31 que no segundo dia evidenciaram-se humidades relativas inferiores, explicado pelas temperaturas mais elevadas verificadas nesse dia. A HR máxima foi de 52% e a mínima de 24%. Os últimos 3 dias apresentaram os maiores valores de umidade, com humidades máximas de 72, 70 e 75 e mínimas de 34, 33 e 33% para o quarto, quinto e sexto dia de ensaio, respetivamente. Foi notória a existência de uma analogia com a temperatura, uma vez que é nos períodos de carência solar que se manifestam os valores mais altos de HR.

Todo o processo de secagem no período diurno se realizou sob convecção natural, daí torna-se importante analisar também os dados relativos à velocidade do ar exterior, que tem influência no caudal de entrada no coletor. Os valores obtidos estão expostos na Tabela 4.2, tendo sido baseados em dados coletados de minuto a minuto pela estação meteorológica das 08h00 às 19h00.

Tabela 4.2 - Velocidade do ar exterior média, máxima e mínima para cada dia da secagem.

<i>Dia</i>	<i>Velocidade do ar exterior média (m/s)</i>	<i>Velocidade do ar exterior máxima (m/s)</i>
1	1,2	3,1
2	1,3	4,5
3	0,8	2,2
4	1,1	2,2
5	1,0	3,6
6	1,5	4,9

É visível a partir da Tabela 4.2 que em média não existem grandes variações em termos da velocidade do vento. Contudo, o último dia de secagem apresentou velocidades mais elevadas, face ao terceiro dia que apresentou as velocidades mais baixas.

4.2.4.2. Temperatura e humidade relativa na câmara de secagem

Os valores de temperatura foram medidos através de data-loggers que estavam programados para coletarem informação de 5 em 5 minutos. O posicionamento dos data-loggers foi a mesma que a evidenciada para os ensaios de caracterização do secador (Figura 4.4). Na Figura 4.32 exibe-se a temperatura média do secador ao longo dos 6 dias de secagem, resultante da média de temperaturas dos 6 data-loggers.

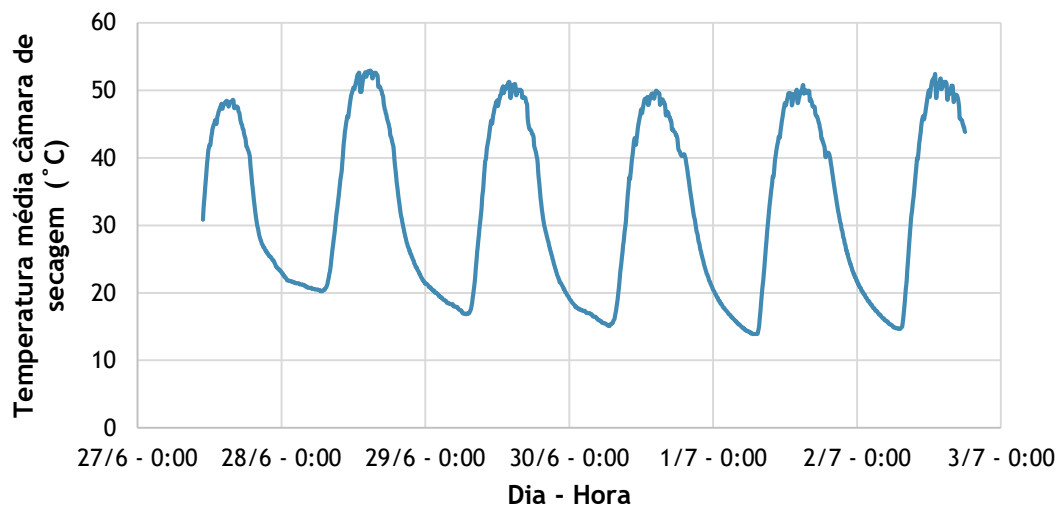


Figura 4.32 - Temperatura média no interior do secador ao longo dos 6 dias de secagem.

Da apreciação da Figura 4.32 é visível que foi no segundo dia em que a câmara de secagem atingiu temperaturas mais elevadas, com um valor máximo de 52,9 °C. No primeiro dia verificou-se a menor média de intensidade de radiação e temperatura ambiente. Juntamente com a elevada humidade da cereja, no início do processo de secagem, fizeram com que apresentasse menores temperaturas no interior da câmara, com um valor máximo

de 48,6 °C. A maior frequência de oscilações nos picos das curvas para cada dia deve-se à abertura da porta da câmara para a realização das pesagens, onde se verificou uma descida de 2 a 6 °C. A temperatura média foi de 44,1, 45,4, 44,0, 42,3, 43,3 e 44,7 °C, para cada dia de ensaio, respetivamente, não incorporando os valores de temperatura refletido durante a noite. De referir que o número de horas de ensaio no primeiro dia foi menor daí apresentar um valor tão elevado de temperatura média. Apesar de no início do processo a humidade removida da cereja ser em maior quantidade, o segundo dia conseguiu ser o dia com maiores temperaturas no interior da câmara, isto devido à conciliação da maior temperatura ambiente e menor humidade relativa exterior, verificadas nesse dia. Note-se ainda que se verificam temperaturas acima dos 50 °C para quase todos os dias, durante as 12h00 e as 16h00. Na Figura 4.33 exibe-se a HR média do secador ao longo dos 6 dias de secagem, resultante da média de temperaturas dos 6 data-loggers.

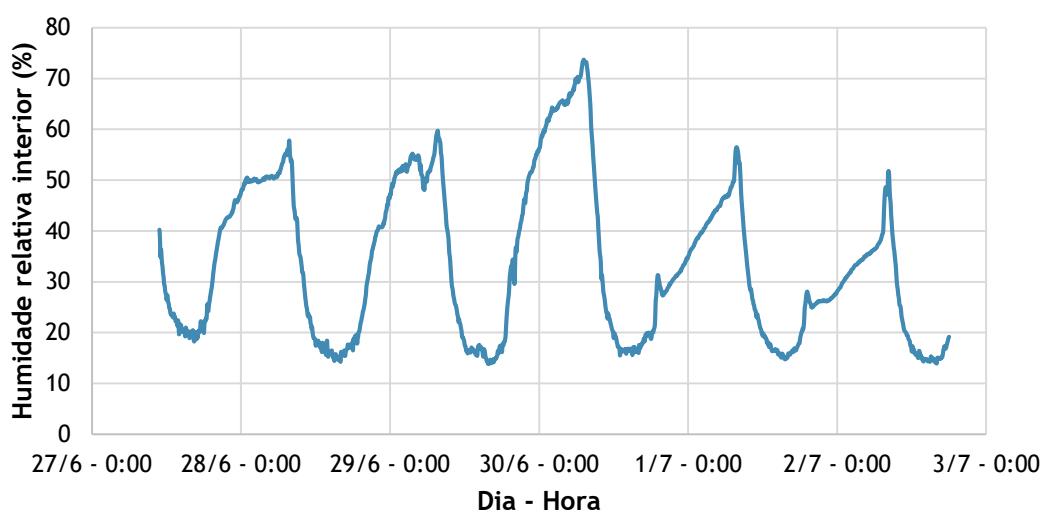


Figura 4.33 - Humidade relativa média no interior do secador ao longo dos 6 dias de secagem.

A análise que se segue é feita às regiões apresentadas na Figura 4.33, que correspondem à HR no interior do secador no período diurno, definido das 08h00 às 19h00. Desde logo, a Figura 4.31 encontra-se relacionada com a Figura 4.30, apenas no facto de as menores humidades relativas se situarem no horário de maiores temperaturas no interior da câmara. Apesar de o segundo dia ter apresentado as temperaturas ambiente maiores e humidades relativas menores, a menor média de humidades relativas no interior verificou-se no último dia com 21%, face aos 22% do segundo dia. O dia que apresentou o menor valor mínimo de HR no interior foi o primeiro, resultado da combinação da menor intensidade de radiação exibida nesse dia, com o facto de no primeiro dia a humidade libertada pelo produto ser superior. Os valores mínimos para cada dia foram de 18, 14, 14, 16, 15 e 14%, do primeiro ao sexto dia respetivamente, contrastando com os valores mínimos do ambiente que foram de 26, 24, 25, 34, 33 e 33%. Apesar de teoricamente serem expectáveis humidades relativas

inferiores nos últimos dias, pela menor quantidade de humidade libertada pela cereja, isto não se refletiu. Este acontecimento pode ser explicado pelo facto de os últimos 3 dias terem apresentado os maiores valores de humidade, com humidades máximas de 72, 70 e 75% e mínimas de 34, 33 e 33%. Também nas curvas de humidade existem oscilações com mais frequência, contudo, neste gráfico evidenciam-se nos vales, o motivo é o mesmo que o abordado para a temperatura.

4.2.4.3. Comportamento noturno do secador

Na literatura consultada verifica-se que a maioria dos autores retira a fruta do secador ao fim do dia, por forma a evitar ganho de humidade durante a noite. Durante 6 dias de secagem, o processo testemunhou 5 noites. O procedimento para cada uma delas foi distinto e dependente da fase de secagem, uma vez que tem de haver um compromisso entre a humidade ambiente e a do produto. Para se realizar a avaliação do desempenho do secador sob estas condições é necessário fazer-se uma comparação dos valores de temperatura e humidade praticados no interior e exterior do secador. Fez-se uma leitura de valores prévia em termos de humidades praticadas ao longo das noites, para se agir em conformidade. Dependendo do teor de humidade da cereja ser superior ou inferior à HR noturna exterior, as condições impostas foram diferentes. Nessas condições inserem-se a utilização da convecção forçada e a colocação de uma cobertura encerada (10 x 8 m), por forma a proteger o secador.

Após uma análise às humidades relativas médias e máximas verificadas em 5 noites consecutivas, para auxiliar na decisão do tipo de condição imposta no secador durante a noite, verificou-se que as humidades máximas se compreenderam entre os 57 e os 74%. Já as médias variaram dos 38 aos 56%. Nos primeiros dias a exaustão da humidade era imperial, caso contrário a acumulação de humidade na câmara de secagem poderia ser prejudicial. Atendendo aos valores de HR pronunciados pelo ambiente, optou-se pela colocação do encerado nas primeiras 3 noites, este de forma a não obstruir a entrada e saída de ar do secador. O sistema funcionou ainda sob convecção forçada, favorecendo a exaustão da humidade através da permanente renovação do ar. Nas duas últimas noites a humidade da cereja já se situava abaixo da evidenciada pelo ambiente, tendo-se optado nesta circunstância pela cobertura total e sem ventilação. De seguida é feita uma análise minuciosa a cada noite, através das Figuras 4.34, 4.35, 4.36 e 4.37, que retratam as humidades e temperaturas exteriores e interiores do secador para cada situação.

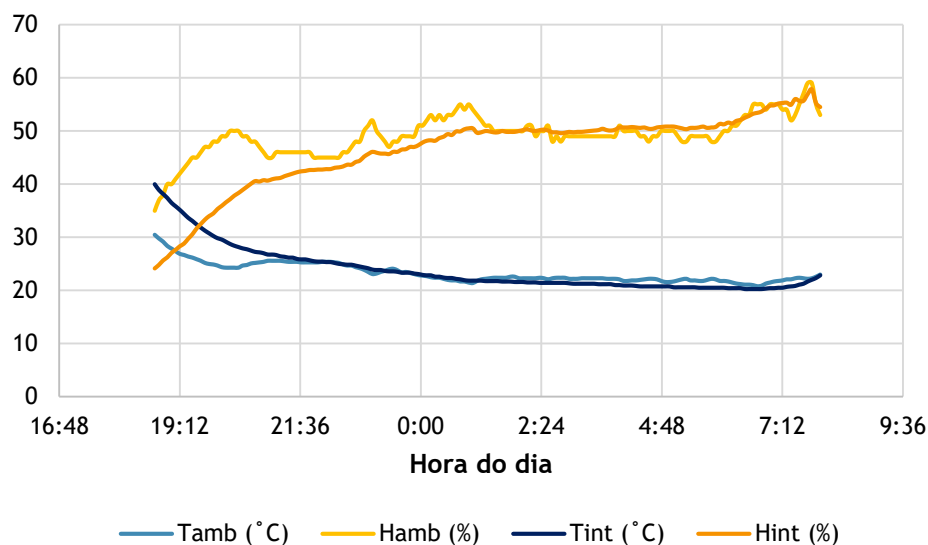


Figura 4.34 - Variação da temperatura e humidade ambiente, e temperatura e humidade no interior do secador para a 1ª noite.

Nota-se pela Figura 4.34 que a humidade no interior do secador segue o padrão da humidade exterior, o mesmo acontecendo para as temperaturas. As temperaturas no exterior e interior igualam-se nos instantes próximos das 21h30 e mantêm-se praticamente iguais até à 01h30. A partir deste instante a temperatura no interior do secador é ligeiramente inferior, podendo ser explicado pela humidade neste período ser ligeiramente superior. Este acréscimo de humidade no interior deve-se ao processo estar numa fase embrionária, com elevada libertação de humidade do produto.

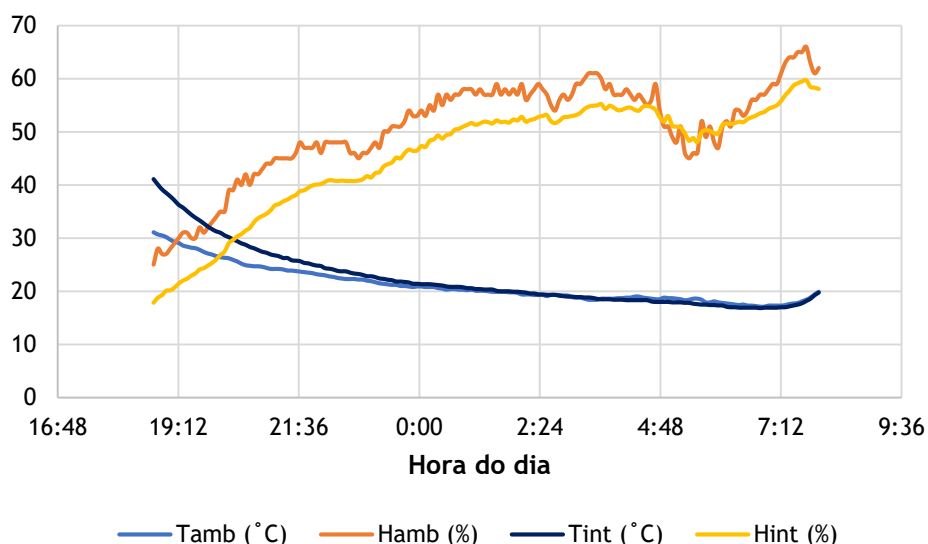


Figura 4.35 - Variação da temperatura e humidade ambiente, e temperatura e humidade no interior do secador para a 2ª noite.

É visível pela Figura 4.35 que a humidade no interior do secador segue o padrão da humidade exterior, o mesmo acontecendo para as temperaturas. As temperaturas no exterior e interior igualam-se próximo da meia-noite, mantendo-se praticamente iguais até às 04h50. A partir deste instante até às 06h00 a temperatura no interior do secador é ligeiramente inferior, podendo ser explicado pela humidade neste período ser ligeiramente superior. É visível que a diferença entre a humidade exterior e interior já é superior à da 1ª noite, com valores no seu interior grande parte das vezes 5% inferiores. Isto motivado pela diminuição de humidade do produto face ao primeiro dia.

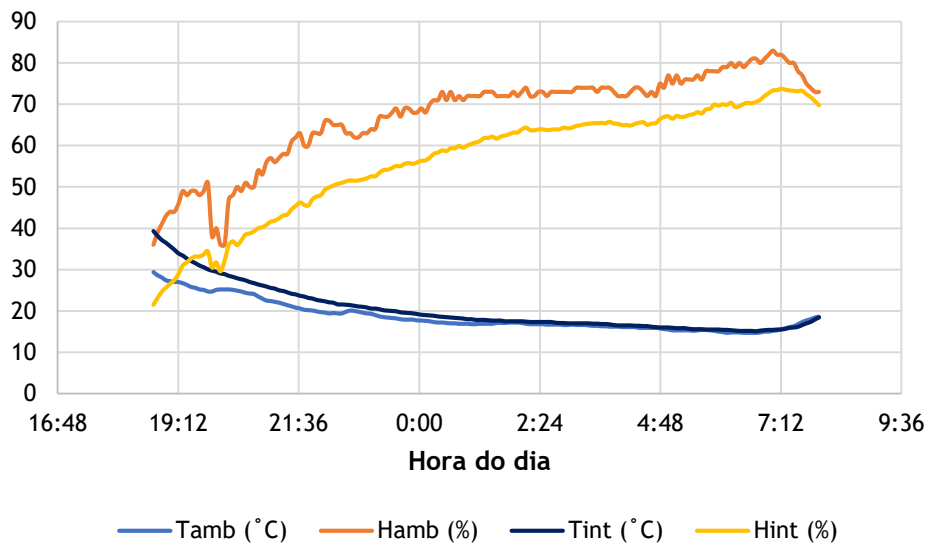


Figura 4.36 - Variação da temperatura e humidade ambiente, e temperatura e humidade no interior do secador para a 3ª noite.

Percebe-se pela Figura 4.36 que a humidade no interior do secador segue o padrão da humidade exterior, o mesmo acontecendo para as temperaturas. As temperaturas no exterior e interior igualam-se próximo da 01h30, mantendo-se praticamente iguais até ao fim. Vê-se que a humidade no interior do secador é quase sempre 10% inferior à do exterior, mesmo nesta fase onde a ventilação está ligada e a entrada e saída de ar estão desimpedidas. Em analogia com as noites anteriores, apresenta valores inferiores, derivado da humidade da cereja ser também inferior.

A análise que se segue diz respeito às duas últimas noites, com a cobertura total do secador e sem ventilação, evitando a passagem de ar húmido no interior do secador.

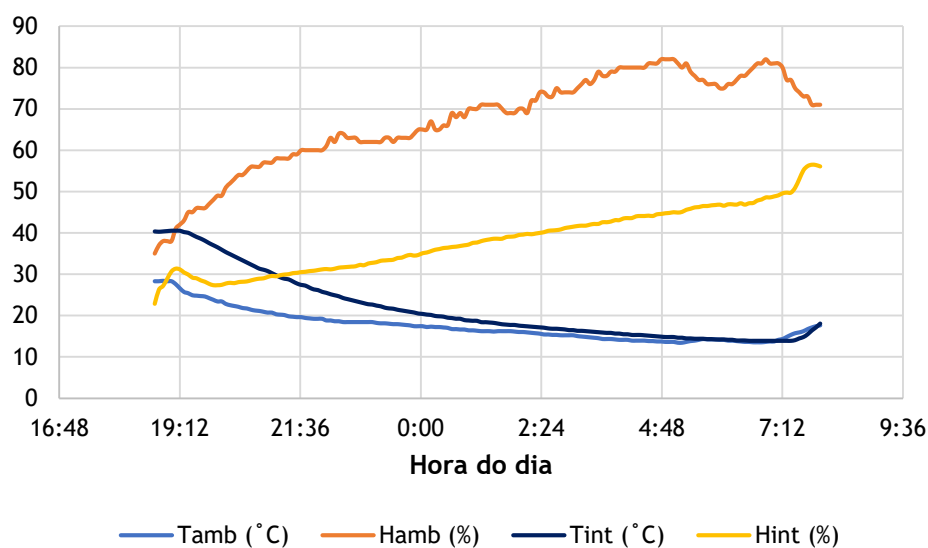


Figura 4.37 - Variação da temperatura e umidade ambiente, e temperatura e umidade no interior do secador para a 4ª noite.

Para a Figura 4.37 pode-se ver que através da colocação do encerado, de maneira a cobrir todo o secador nesta fase do processo, são conseguidas humidades na maioria das vezes 30% inferiores no interior do secador. Também a temperatura no interior consegue ser quase na totalidade do tempo superior à do ambiente, exceção a partir das 07h12 onde o secador começa a ser atingido por radiação solar o que faz elevar a umidade e com isto diminuir a temperatura no interior do secador.

Para a última noite a configuração foi semelhante à abordada imediatamente atrás. Tendo-se verificado padrões semelhantes aos das curvas da Figura 4.37. Tal como para a 4ª noite, existiram picos de umidade no início e no final da curva, motivados pela radiação solar que atinge o secador, que como já se encontra coberto vê aumentada a sua umidade.

Através dos dados anteriormente apresentados comprovaram-se distintos comportamentos em termos de HR e temperatura, quando existem mudanças no padrão das condições impostas ao secador, durante a noite. Em termos de temperaturas vê-se que no início as noites 1, 2 e 3 divergem da 4 e 5. No caso da umidade vê-se também no início do período noturno um pico de umidade. Isto acontece porque, enquanto que nos primeiros 3 dias o encerado foi colocado por forma a deixar a entrada e saída livres, nos últimos dois a cobertura do secador foi total, por forma a evitar o fluxo de ar no interior da câmara de secagem, originando no cair da noite e no início do dia declives mais acentuados de umidade e temperatura.

4.2.4.4. Evolução da secagem

De maneira a caracterizar o processo de secagem das cerejas, colocaram-se em dois tabuleiros de pequenas dimensões feitos com de malha de alumínio maleável, duas amostras. A primeira amostra disposta no tabuleiro superior apresentava uma massa inicial (M_0) de 688g. A segunda colocada no tabuleiro inferior continha uma massa de inicial de cerejas de 564g. A Figura 4.38 ilustra a disposição da amostra no tabuleiro P4, onde é visível a disposição dos data-loggers.



Figura 4.38 - Amostra colocada no tabuleiro superior, correspondente a P4, e disposição dos data-loggers no tabuleiro.

Com o intuito de determinar a taxa de secagem, realizaram-se pesagens de hora a hora desde as 10h00 às 18h00. Através da expressão apresentada na equação (2.10) foi determinada a taxa de secagem ao longo do ensaio que terminou ao fim de 124 horas apresentando uma massa final de 200 e 156 g para o tabuleiro superior (P4) e inferior (P2), respetivamente. A Figura 4.39 mostra a curva da taxa de secagem em função das 124 horas de ensaio. Nela pode-se observar que existiram diferenças entre a taxa de secagem de um tabuleiro para o outro. Até serem alcançadas as 100 horas de secagem a taxa de secagem para o tabuleiro inferior foi ligeiramente superior face ao outro tabuleiro. De referir ainda que o processo de secagem no tabuleiro inferior alcançou o valor nulo de taxa de secagem 2 horas antes do tabuleiro superior. Analisando as curvas mais minuciosamente é perceptível uma fase inicial com declives mais acentuados, ilustrativos de taxas de secagem maiores. Vê-se ainda que os intervalos não preenchidos por medições, correspondentes ao período noturno, apresentam menores declives. Estes dados permitem concluir que, apesar de o

realizar em menor quantidade, durante a noite também ocorre evaporação de humidade das cerejas.

4.2.5. Secagem solar de cereja com pré-tratamento sob condições climáticas adversas

Uma das desvantagens da secagem solar é a inconstância de condições climáticas favoráveis ao processo. Após o estudo da secagem do secador solar sob condições propícias, seguiu-se

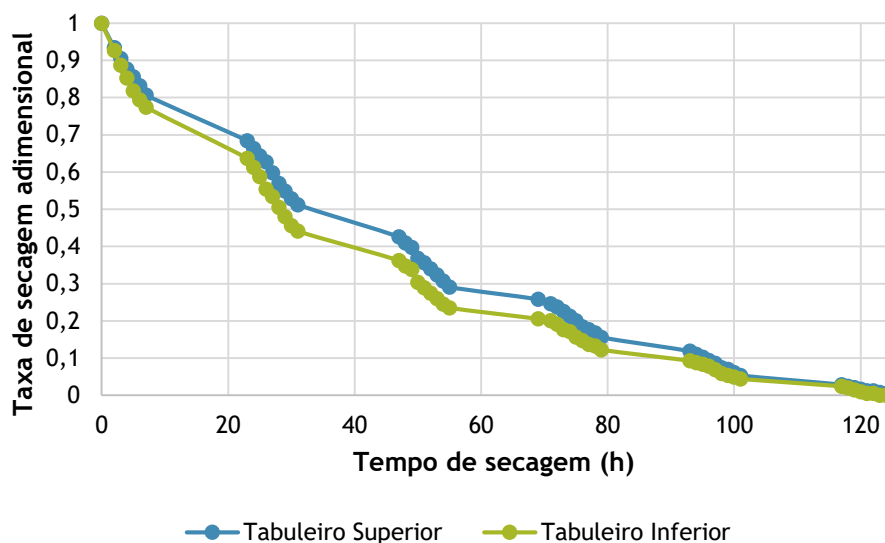


Figura 4.39 - Curvas da taxa de secagem para as amostras de cereja do 1º processo de secagem. o estudo de um processo de secagem sob condições adversas. Para tal descarçaram-se 25 kg de cereja “de saco”, e colocaram-se de forma uniforme em 5 tabuleiros colocados no secador, conforme apresentado na Figura 4.4.

Segundo Belessiotis e Delyannis (2011) a secagem de alimentos é um processo bastante sensível, que deve ser realizada sem que o valor nutricional, cor, sabor e textura dos produtos seja afetado, podendo ser aplicado um pré-tratamento ter menos possibilidades de se suceder. Neste processo com o intuito de melhorar a transferência de massa do produto, as cerejas levaram um pré-tratamento ácido ascórbico.

Pelas mesmas razões apresentadas na secção anterior optou-se por realizar o presente ensaio com a altura de 15 cm de caixa-de-ar. O processo com estas características teve inicio às 10h15 do dia 5 de julho de 2016, terminando dia 12 de julho do mesmo ano. Tal como o evidenciado na secagem anterior, ocorreu de forma contínua. Antes da colocação da cereja no secador a cereja continha um teor de humidade de 76,78% medido na base seca através do analisador de humidade.

Apesar dos testes terem sido realizados em meses de maiores picos de intensidade de radiação solar, aproveitou-se o facto de uma das previsões realizadas apontar para uma forte nebulosidade e possibilidade de queda de chuva, para se analisar o desempenho do secador sob condições mais hostis. Estes fatores e apesar do tratamento da madeira possibilitar uma melhor tolerância a intempéries, houve uma constante preocupação em colocar a cobertura encerada sempre que fossem manifestas condições adversas, por forma a não comprometer a estrutura do secador e as cerejas. No 1º e 2º dia foi necessário recorrer-se à cobertura parcial do secador, com a entrada desimpedida e a saída de ar com ventilação forçada anexada a uma tubagem que encaminhava o ar para o ambiente. Opção tomada em virtude da fase embrionária do processo, com forte libertação de humidade do produto, que através da convecção forçada obriga a uma renovação permanente do ar no interior do secador. De seguida são retratados os dados climáticos de todo o ensaio para posteriormente ser abordado o comportamento do secador através de um estudo de caso de secagem de cerejas com pré-tratamento.

4.2.5.1. Dados climáticos

Durante o 1º processo de secagem as condições meteorológicas foram favoráveis, com dias ensolarados, sem presença de nuvens. Contrariamente a isto, e também um dos motivos para a realização do estudo, este 2º processo testemunhou condições desfavoráveis, que para além da grande quantidade de períodos nublados, foi ainda acompanhado por precipitação. Dadas estas condições, o procedimento foi distinto do 1º estudo realizado.

Na Figura 4.40 é apresentada a quantidade de radiação solar incidente sobre o dispositivo de secagem ao longo dos oito dias do processo. Este parâmetro tem uma forte influência no desempenho do secador, uma vez que é ele que atribui a quantidade de energia que é captada pelo coletor solar. Os dados climáticos foram coletados de minuto a minuto a partir da estação meteorológica.

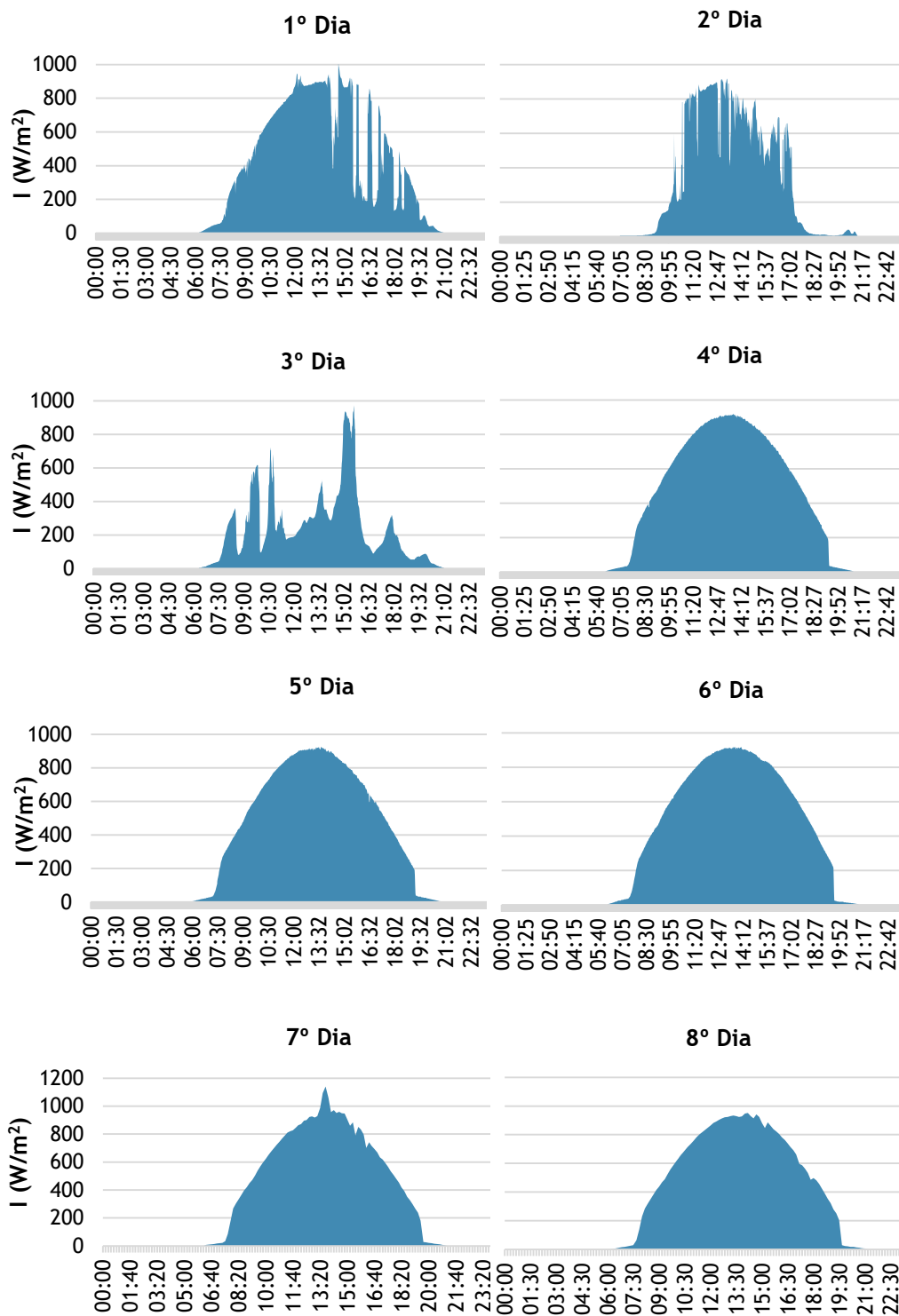


Figura 4.40 - Intensidade de radiação solar ao longo de cada dia do 2º processo de secagem.

Analisando os dados inerentes à Figura 4.40 pode-se verificar que aproximadamente metade deste segundo ensaio de secagem se deu sob condições desfavoráveis, com frequente nebulosidade, e ainda precipitação. Numa perspectiva geral este ensaio foi caracterizado por duas fases distintas. Uma inicial, que abrange os 3 primeiros dias e que impossibilitou o secador de funcionar no seu estado normal. E uma segunda onde se incluem os dias subsequentes, onde existiu uma semelhança de variação de radiação solar com o 1º processo de secagem, isto é, sem grandes períodos nebulados. O 7º dia proporcionou as melhores condições em termos de radiação solar, com uma média de 714 W/m^2 e um pico de 1140 W/m^2 . O dia menos favorável a este método de secagem foi o terceiro com uma radiação solar média de 326 W/m^2 , com um pico de 972 W/m^2 . À exceção do 3º dia que apresentou o seu pico de radiação às 15h39, os restantes situaram-se no período entre as 13h00 e as 14h00.

Tal como no 1º processo a cereja não foi retirada do secador no período noturno. Contudo a análise que se segue evidencia apenas os dados relativos ao período diurno uma vez que o procedimento durante a noite teve em conta os mesmos pontos abordados anteriormente no primeiro processo de secagem. A Figura 4.41 ilustra a variação das temperaturas exteriores durante o dia para cada dia do processo de secagem.

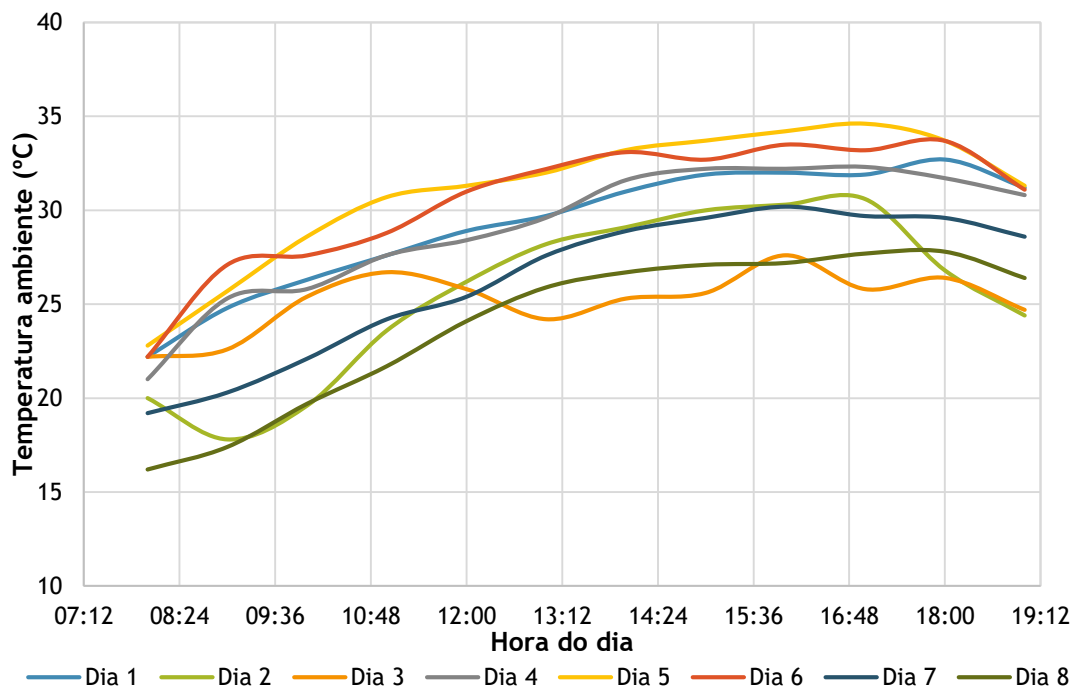


Figura 4.41 - Variação das temperaturas exteriores durante o período diurno para cada dia do processo de secagem.

Constata-se da Figura 4.41 que o quinto dia de ensaio vigorou em termos de temperaturas ambiente, apresentando a maior média, máxima e mínima, com valores de 31,0, 34,6 e 22,8 °C respetivamente. Contrariamente a este, o terceiro surge como aquele onde as temperaturas foram mais baixas, com valores de 25,2, 27,6 e 22,2 °C de média, máxima e mínima, estes suscitados pela fraca incidência solar e queda de chuva. Apresenta-se agora na Figura 4.42 a variação das humidades exteriores para cada dia do processo de secagem.

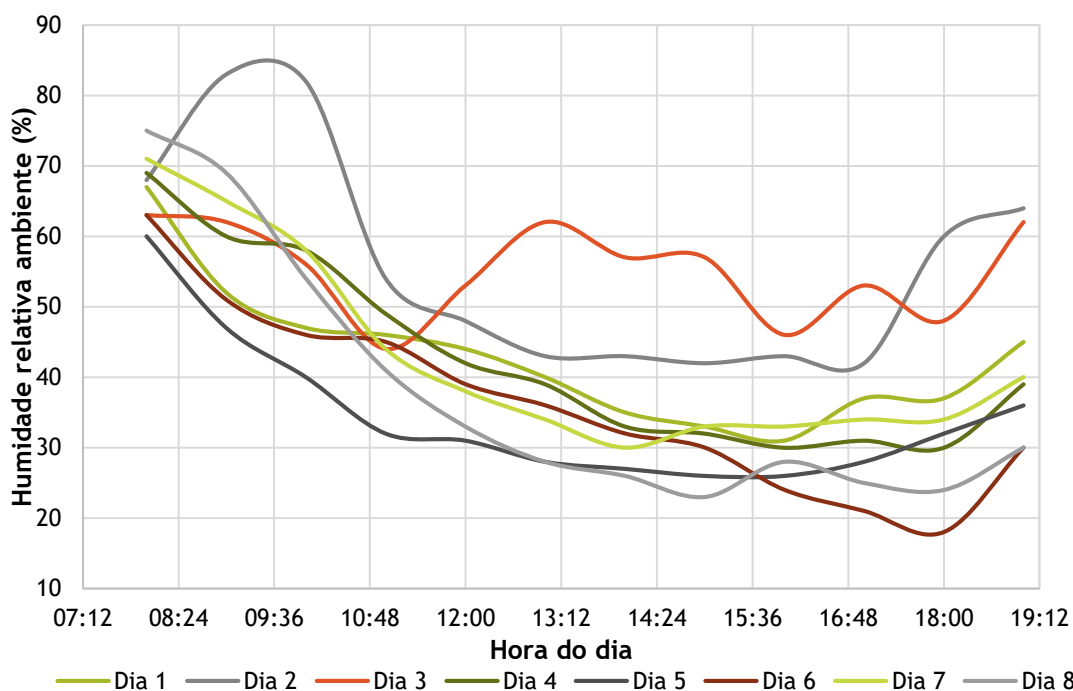


Figura 4.42 - Variação das humidades relativas exteriores durante o período diurno para cada dia do processo de secagem.

Constata-se da análise da Figura 4.42 que as curvas do 2º e 3º dia se destacam das restantes por possuírem picos pouco comuns na curva de humidade durante o dia. Mais, ao pormenor pode-se ver que os dois picos da curva do 2º dia ocorrem que em alturas de ausência de radiação em que houve uma tendência para uma subida de humidade. Para a curva do 3º dia a explicação é exatamente a mesma, com a diferença de que a frequência e a densidade da nebulosidade se revelou maior, tendo mesmo ocorrido queda de aguaceiros. Estes mesmos dias correspondem àqueles que vivenciaram uma humidade média superior, com valores médios, máximo e mínimos de 56, 83 e 42% para o segundo dia e 55, 63 e 44% para o terceiro. O dia que apresentou menor média de humidade foi o 5º com uma humidade média, máxima e mínima de 34, 60 e 26%, respetivamente. Isto causado pela supremacia verificada comparativamente aos restantes dias em termos de intensidade de radiação. Com isto, mais uma vez se retira que a HR e a intensidade de radiação são inversamente proporcionais.

Como se pode observar mais à frente, houve a necessidade de algumas vezes durante o dia cobrir o secador, implicando o uso de convecção forçada. De qualquer das maneiras, a velocidade do vento variou são num domínio de 0,8 a 1,2 m/s.

4.2.5.2. Temperatura e humidade na câmara de secagem

Os valores de temperatura foram medidos através dos 5 data-loggers, que estavam programados para coletarem informação de 5 em 5 minutos. Para esta segunda secagem a distribuição dos data-loggers foi diferente, um em cada um dos cinco tabuleiros. Este segundo processo de secagem ocorreu durante 8 dias, mais dois que o primeiro. Na Figura 4.43 exibe-se a temperatura do secador ao longo dos 8 dias de secagem, à saída do coletor e no interior da câmara de secagem.

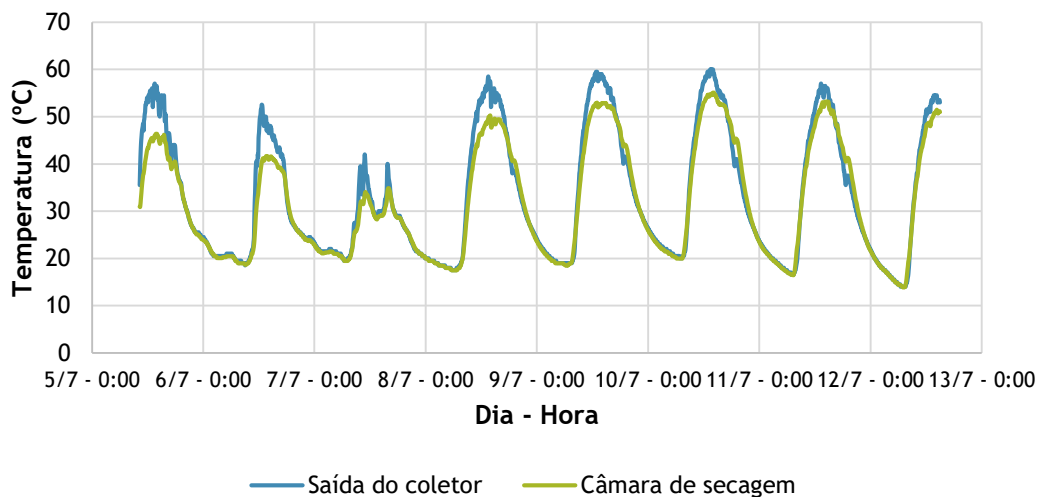


Figura 4.43 - Temperatura à saída do coletor e no interior da câmara de secagem ao longo dos 8 dias de secagem.

Da apreciação da Figura 4.43 é visível o efeito da nebulosidade na temperatura da câmara de secagem e saída do coletor, com os 2º e 3º dia a apresentarem as menores temperaturas quer no coletor quer na câmara. Na totalidade as temperaturas máximas obtidas na câmara foram de 46,4 °C, 41,7 °C, 34,9 °C, 50,3 °C, 53,0 °C, 55,1 °C, 53,2 °C, 51,5 °C, do 1º ao 8º dia, respetivamente. O 3º dia foi o que apresentou uma menor temperatura máxima, com apenas 34,9 °C. Depois desse dia, todos os restantes rondaram valores máximos de 50 °C, com o 6º dia a apresentar o mais elevado com 55,1 °C. Apesar de ter sido o 5º dia que apresentou as condições meteorológicas mais propícias à obtenção de temperaturas mais elevadas no interior da câmara, foi o 6º que as praticou. Este facto pode ser explicado por no 5º dia apesar da temperatura média ambiente ter sido superior, a intensidade de radiação foi inferior à do 6º dia. Podendo ter contribuído ainda a libertação de humidade da cereja que é maior ao 5º dia, e que leva a uma ligeira queda da temperatura. Em termos de radiação foi o 7º dia que obteve valores mais elevados, contudo pela inferioridade de temperatura média ambiente, com cerca de 4°C obteve apenas a segunda temperatura mais elevada no

interior. Observando a primeira curva verifica-se após o pico de maiores temperaturas uma oscilação da curva. Este período coincide com o intervalo entre as 16h50 e 18h06, altura em que se cobriu o secador, desimpedindo a entrada e anexando a tubagem de saída, com ventilação ligada, uma tubagem que enviava o ar para o exterior, como ilustrado na Figura 4.35. A curva do terceiro dia apresenta diferenças em relação às restantes, formando um vale numa altura em que se as condições meteorológicas fossem favoráveis corresponderia a uma zona onde se atingiria a temperatura máxima. Como dito anteriormente este dia testemunhou queda de chuva, essa queda teve início às 12h30 com término às 15h30. Neste período o secador foi coberto, mas a circulação de ar foi uma condição imposta, com a entrada de ar livre e o ventilador ligado com uma tubagem para o exterior da cobertura. Da visualização da Figura 4.34 vê-se que o vale abrange este intervalo de tempo a voltando a aumentar a temperatura quando a radiação solar aumenta e a superfície coletora é destapada.

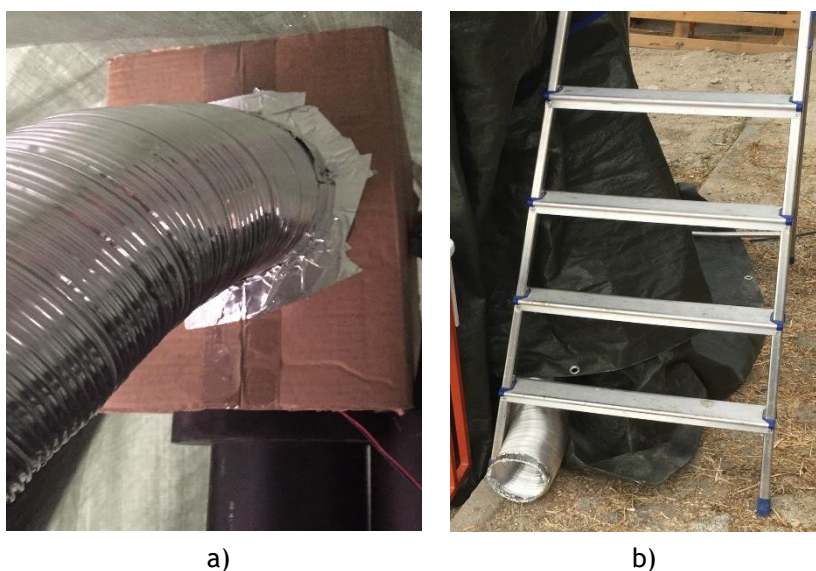


Figura 4.44 - Pormenor da tubagem de saída de ar: a) ligação com a chaminé do ventilador b) saída para o exterior.

Focando mais a diferença de temperatura entre os dois pontos abordados na Figura 4.43, vê-se uma tendência de diminuição desta. Comparando os dados obtiveram-se diferenças máximas de 11,5, 12,4, 8,4, 8,9, 6,3, 5,4, 4,9 e 4,2 °C entre a saída do coletor e o interior da câmara, com o coletor a apresentar as temperaturas mais elevadas nos picos de radiação tal como era expectável. A razão para esta diminuição da diferença entre temperaturas, quase de forma linear, é mais uma vez, a quantidade elevada de humidade libertada na fase inicial do processo, que vai diminuindo com o tempo de secagem.

Apesar de não ser ilustrado sob a forma de grafismos, as temperaturas, tal como o verificado por El-Sebaii et al. (2002) descem à medida que se sobe ao longo da vertical da câmara de secagem. Contudo, essa discrepância entre valores foi mais significativa no primeiro dia de

secagem com uma diferença de 5°C. Nos restantes dias as diferenças oscilaram entre 1 a 2 °C. Este fenómeno apesar de não se ter verificado nos ensaios em vazio verificou-se nos ensaios de secagem. Isto acontece porque parte do calor é consumido na vaporização da humidade do produto.

Na Figura 4.45 exibe-se a humidade relativa à saída do coletor e no interior da câmara ao longo dos 8 dias de secagem.

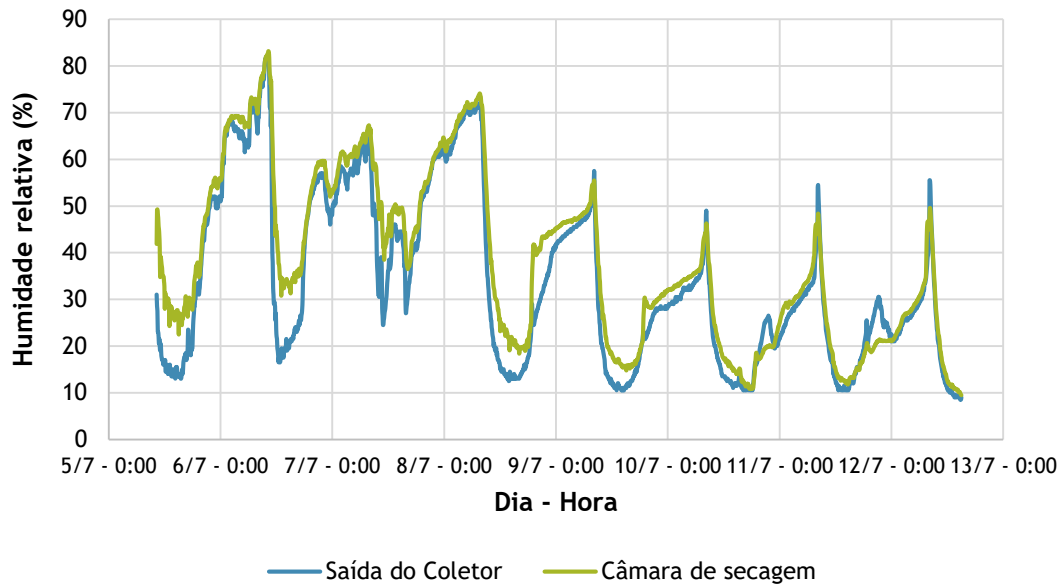


Figura 4.45 - Humidade relativa à saída do coletor e no interior da câmara de secagem ao longo dos 8 dias de secagem.

Apesar de ser visível na Figura 4.45 o comportamento noturno em termos de humidade no interior do secador, far-se-á apenas referência à humidade durante o dia. Vê-se então desde logo um compromisso entre a temperatura e humidade praticadas. Mostrou-se que a temperatura tinha sido inferior para o 3º dia e superior para o 6º. Pode-se então concluir que a humidade relativa no interior da câmara é inversamente proporcional à temperatura, uma vez que foi no 3º dia que a câmara de secagem esteve mais húmida e no 6º que esteve mais seca. De forma geral foram obtidas humidades relativa mínimas de 23, 31, 37, 18, 15, 11, 12 e 9 %, no interior do secador. Inferiores, portanto, às humidades mínimas do ambiente que foram de 31, 42, 44, 30, 26, 18, 30 e 23%, do 1º ao 8º dia de secagem. Neste parâmetro já é mais notório o impacto da humidade do produto, com o último dia, apesar de forma pouco significativa, a ser o que apresentou menor valor de humidade, face ao 6º dia que tinha atingido as temperaturas mais elevadas. De forma bastante evidente, na Figura 4.45 observa-se que quando o secador é coberto o declive é muito mais acentuado, simbolizando rápidos aumentos de humidade, passando-se o mesmo para a descobertura, todavia o declive acentuado neste caso representa descidas rápidas da humidade. Comparando as humidades evidenciadas à saída do coletor e no interior da câmara é visível a presença de maiores

diferenças entre elas no início da secagem durante o dia. Nos últimos dois dias essas diferenças são praticamente nulas. No geral, a diferença máxima de HR entre a câmara e a saída do coletor foi de 25,2, 25,4, 18,4, 14,6, 8,2, 5,4, 2,8 e 2,6 do 1º ao 8º dia respectivamente. É notória a tendência de atenuação das diferenças verificadas nos dois pontos, com o desenrolar do processo. Motivado como já foi dito pela maior vaporização de humidade do produto no início.

4.2.5.3. Evolução da secagem

A secagem da cereja neste 2º processo é incomparável com a do primeiro pelo pré-tratamento da cereja e pelas condições climáticas diferenciadas. Tal como já foi referido utilizaram-se 5 tabuleiros, da mesma forma que foi avaliada a evolução da secagem, utilizaram-se duas amostras. A diferença para o primeiro método é que estas foram colocadas no tabuleiro P1 e P5 (Figura 4.2). A primeira amostra disposta no tabuleiro superior apresentava uma massa inicial (M_0) de 250 g. A segunda colocada no tabuleiro inferior continha uma massa de inicial de cerejas de 248g.

Contrariamente ao procedimento executado para determinar a taxa de secagem do 1º processo, as pesagens não se realizaram de hora a hora. Devido às condições ambientais adversas nem sempre foi possível realizarem-se pesagens. Após o ensaio, que terminou ao fim de 149 horas apresentando uma massa final (M_f) de 60 e 52 g para o tabuleiro superior (P5) e inferior (P1), respectivamente. A Figura 4.46 mostra a curva da taxa de secagem em função do tempo total de secagem. Em analogia com o gráfico da Figura 4.39 vê-se que as diferenças entre as curvas dos dois tabuleiros foram inferiores para esta situação, apesar da maior distância entre tabuleiros e do maior carregamento do secador. Ao invés do verificado no 1º processo as duas amostras nesta situação alcançaram o valor nulo de taxa de secagem ao mesmo tempo (após 149 horas). Apesar de se poder dar como concluído o processo neste instante optou-se por alongar o processo até ao dia seguinte para ver o comportamento da curva. Tal como o verificado anteriormente, o declive no primeiro dia é mais acentuado que nos restantes. O segundo dia e o terceiro foram caracterizados pelas baixas taxas de secagem apresentadas apesar da fase embrionária do processo. Isto verificou-se pelas condições climáticas adversas presentes nesses dias. O quarto da já com condições favoráveis apresentou uma melhor taxa de secagem que os dois anteriores. Tal como no primeiro processo os dados dos gráficos não acompanhados por medições dizem respeito ao período noturno. Mais uma vez, apesar do declive menos acentuado, é visível que a vaporização da humidade do produto também ocorre neste intervalo.

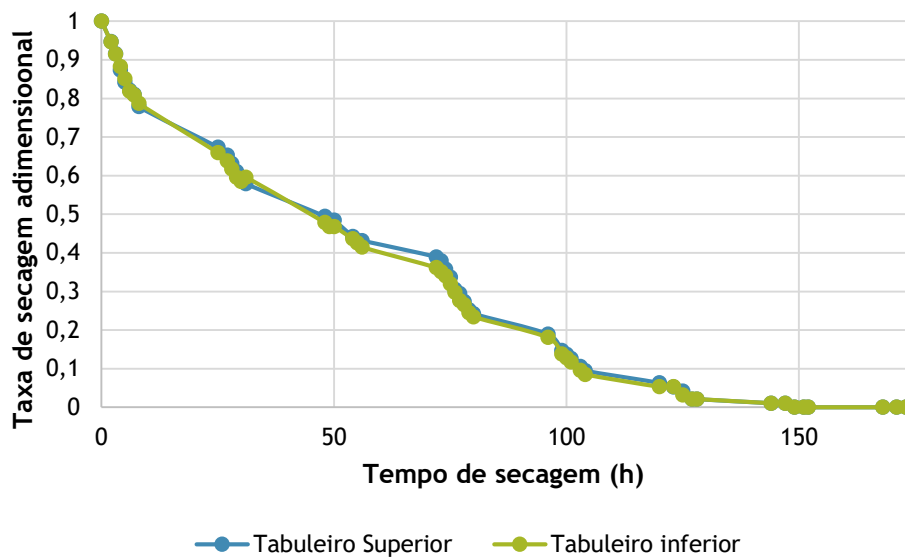


Figura 4.46 - Curvas da taxa de secagem para as amostras de cereja do 2º processo de secagem.

4.3. Nota conclusiva

No decorrer do capítulo que agora termina foi analisado o desempenho do secador construído e descrito no capítulo 3. O ponto em comum de todos os testes realizados foi a necessidade de existir um acompanhamento constante das condições climáticas, e por isso a sua presença nos estudos foi imprescindível. Numa primeira fase, de avaliação do secador em vazio, foram realizados testes com a duração de 24 horas com foco em três pontos. O primeiro visando a distribuição da temperatura e HR no interior da câmara de secagem, consoante a posição no secador. O segundo consistiu numa avaliação do contributo das alturas de caixa-de-ar de 5, 10 e 15 cm, na amplitude de temperatura e HR conseguida na câmara de secagem. E por fim, no sentido de averiguar a diferença de desempenho do secador sob convecção forçada e natural, realizaram-se estudos intercalando as três alturas com estes dois modos de funcionamento. Com o secador caracterizado, seguiram-se dois ensaios envolvendo um caso de estudo, a secagem de cerejas. Apesar do produto e o dispositivo de secagem terem sido os mesmos, algumas diferenças tornaram os ensaios distinguíveis. No primeiro o secador não foi totalmente carregado, os 15 kg de cereja utilizados foram dispostos somente em dois tabuleiros. No segundo, e apesar de não ser representativo da plena capacidade de carga do secador, foram repartidos 25 kg de cereja por 5 tabuleiros. Às diferenças refletidas entre ensaios, juntam-se ainda as condições climáticas e o pré-tratamento dos produtos. Isto porque, no primeiro processo de secagem sem pré-tratamento da cereja, as condições do ambiente exterior ao dispositivo foram propícias ao processo, ao invés do verificado no segundo processo com pré-tratamento, que evidenciou adversidades como chuva e frequente nebulosidade nos três primeiros dias de ensaio.

No que toca ao comportamento do secador em vazio verificaram-se temperaturas ligeiramente superiores no tabuleiro superior, e humidades relativas ligeiramente inferiores. Durante a noite o efeito foi contraditório, devido aos tabuleiros cimeiros estarem mais perto da saída de ar e com isto, do ambiente exterior. Durante os ensaios de caracterização alcançaram-se temperaturas a rondar os 55,5 °C e os 11,5% de humidade relativa, nos ensaios de caracterização, para uma temperatura ambiente de 31,7 °C e uma humidade de 28%.

Na análise tendo em conta a posição no tabuleiro verificou-se um escoamento praticamente uniforme, em termos de temperaturas e humidades relativas, quando avaliadas em três posições distintas no tabuleiro. As divergências evidenciadas permitiram responsabilizar o movimento do sol que se realiza de Este para Oeste. A face do lado este, exposta à radiação na parte da manhã, apresentou temperaturas superiores e humidades relativas inferiores. No período da tarde a face virada a oeste é quem apresenta este comportamento.

Quando avaliadas as várias alturas de caixa-de-ar de 5, 10 e 15 cm os ganhos térmicos foram de 18,1, 19,4 e 17 °C respetivamente. Contudo, estes resultados foram baseados num dia de ensaio para a altura de 5 cm com presença de nuvens. Mesmo assim permitiu que nos períodos com semelhante intensidade de radiação, gerasse ganhos térmicos superiores. Em termos de conservação da temperatura no interior, a altura de 5 cm apresentou os melhores resultados, contrariamente à altura de 15 cm que apresentou os piores.

Para modos de funcionamento sob convecção natural e forçada, mesmo para temperaturas ambiente mais baixas, o ensaio em convecção natural permitiu atingir temperaturas mais elevadas. Relativamente às diferenças entre a HR ambiente e a do interior do secador verificou-se uma maior diminuição quando o ensaio foi realizado sob CN. Mais, a humidade no interior da câmara é sempre inferior à do ambiente sob convecção natural, mesmo durante a noite. Contudo, quando submetido a convecção forçada, durante a noite, os valores de humidade igualam-se na maioria das vezes.

Ao longo do primeiro processo de secagem, que demorou 124 horas para se concluir, as temperaturas no pico de radiação conseguiram ultrapassar os 50 °C em todos os dias com exceção do primeiro. Isto foi de encontro à menor intensidade de radiação verificada, e à maior libertação de humidade no início do processo. Em termos de humidades relativas no interior da câmara, verificaram-se menores valores no último dia de secagem, com um valor médio de 21% e um mínimo de 14%. Neste processo realizou-se uma análise ao comportamento noturno do secador. Após a análise ao secador neste período com e sem cobertura e ventilação, concluiu-se que a cobertura total permite manter o valor de HR na maioria do tempo 30% abaixo do valor ambiente. Conseguiu-se ainda, neste período, recorrendo por vezes à ventilação, que fosse removida humidade do produto, ainda que em

menores quantidades. Através dos dados obtidos da evolução da taxa de secagem concluiu-se que o tabuleiro inferior terminou o seu processo de secagem 2 horas antes do cimeiro.

O segundo processo de secagem apesar do pré-tratamento demorou 149 horas para se concluir, influência das condições climáticas verificadas nos primeiros dias. O contributo desta análise foi ligeiramente diferente, uma vez que a distribuição dos aparelhos de medição foi distinta. Foi possível, com isto, a comparação dos valores à saída do coletor e no interior da câmara de secagem. A diferença máxima entres as duas partes registou-se ao segundo dia com 12,4 °C, e a mínima no último dia com 4,2 °C, sempre com temperaturas superiores à saída do coletor durante o dia. Isto explica-se pela elevada quantidade de humidade libertada na fase inicial do processo, que foi diminuindo com o tempo de secagem, contribuindo para um decaimento da diferença da temperatura nos dois elementos. Este facto foi ainda comprovado pela comparação dos valores de HR nestes dois pontos, com a mesma tendência a verificar-se. De salientar ainda que neste processo se verificaram temperaturas superiores nos tabuleiros inferiores comparativamente aos cimeiros. Relativamente à secagem, esta terminou, contrariamente ao indicado no 1º processo, ao mesmo tempo para os dois tabuleiros que continham amostras.

5. Conclusão

A secagem baseada em equipamentos sem consumo energético, apresenta-se como uma solução sustentável, sem custos de operação na produção de fruta desidratada. O foco do presente trabalho foi o desenvolvimento e a avaliação comportamental de um secador solar indireto. Este, com características estruturais que permitem concluir o processo de secagem preservando as qualidades organolépticas e nutricionais dos produtos, uma vez que o produto não é exposto diretamente à radiação solar.

Serve o presente capítulo para esquematizar o abordado no presente documento, com a inclusão ainda de um ponto, onde são expostas algumas sugestões para trabalhos futuros.

5.1. Recapitulação

O presente documento apresenta, além de toda a componente teórica e de revisão bibliográfica envolvente, o projeto, a construção e o estudo experimental de um mecanismo de secagem baseado exclusivamente na energia solar, para neste caso efetuar a secagem de cerejas.

A fase inicial, afetiva ao desenvolvimento do secador, começou pela procura do modelo mais indicado ao processo. Concluiu-se que a melhor solução seria a utilização de um secador solar indireto, com o coletor e a câmara de secagem funcionando separadamente. Contrariamente a outros modelos, este, permite a preservação de dos aspetos sensoriais e nutricionais do produto. Após a definição do tipo de secador, uma vez analisados os elementos constituintes, seguiu-se a projeção do equipamento. Durante a fase de projeto do secador, que envolveu uma revisão dos trabalhos já realizados na área, realizou-se um levantamento dos aspetos construtivos inerentes aos vários elementos. Começando pelo coletor, onde se decidiu usar um coletor de fluxo de ar superior à placa. Um dos pontos analisados na bibliografia envolveu a determinação da altura entre a cobertura e a placa absorvedora. Pesquisa que se refletiu como ineficaz uma vez que não existe uma concordância entre os autores, em qual a altura ideal. Posto isto, decidiu-se construir um coletor com a possibilidade de variar a altura entre a cobertura e a placa absorvedora. Ainda neste período, foram tomadas as decisões inerentes aos detalhes da configuração de cada elemento, nomeadamente em termos de dimensões e materiais utilizados.

A segunda etapa da presente dissertação, albergou o processo prático construtivo do secador. Começou pela construção de uma estrutura metálica, dotada de rigidez, que viria a suportar todos os elementos associados ao secador propriamente dito. A esta estrutura foi anexada uma placa de MDF retangular que representaria a base do secador. Nela foram posteriormente fixos a base do coletor e a base da câmara de secagem, que serve também

como elo de ligação entre o coletor e a câmara. O processo de construção do módulo coletor de altura variável, baseou-se na sobreposição de placas de MDF, por forma a conceber um sistema de encaixes. Com esta configuração, conseguiu-se obter um coletor com três alturas de caixa-de-ar variáveis, 5, 10 e 15 cm. Um dos pontos de maior complexidade do sistema não envolveu o sistema de encaixes, mas sim a forma como a variação dessa altura iria interferir na ligação com o elo de ligação entre este elemento e a câmara. Este problema foi solucionado recorrendo a três distintos módulos concebidos por madeira MDF e poliestireno extrudido, cada um deles condizente com uma das alturas. Dada a construção à larga escala, optou-se por separar unidades, ou seja, a configuração da câmara de secagem permitiu que esta fosse desagregada do conjunto. Adotou-se para este efeito, o mesmo sistema que utilizado na variação da altura, ou seja, o sistema de encaixes intercalando placas de MDF 12 mm. Um dos pontos discutidos na fase de projeto foi que seria favorecido o escoamento natural de ar no interior do secador, descredibilizando o uso de convecção forçada sempre que possível. Para isto, no cimo da câmara de secagem, juntou-se um elemento em formato piramidal com duas saídas de ar cilíndricas feitas com PVC. Apesar de possuírem dimensões semelhantes, a uma das chaminés foi anexada uma válvula de borboleta e na outra um ventilador. Estes dois elementos permitem assim a regulação do caudal de saída de ar, apesar de não ter sido um foco da presente dissertação.

À construção do modelo, seguiu-se a avaliação do seu desempenho, permitindo assim obter respostas sobre a hipótese de se apresentar como uma boa solução para a realização do processo de secagem. Nesse sentido, foram conduzidos ensaios com diferentes padrões, essencialmente, para avaliar a temperatura e humidade relativa no interior da câmara de secagem. Efetuaram-se ensaios de caracterização do secador vazio, isto é, sem a presença de fruta, e ensaios de secagem com cereja. No primeiro padrão de ensaio, foram avaliadas as temperaturas e humidades relativas no interior do secador variando a posição ao longo da câmara de secagem, a altura de caixa-de-ar e o tipo de convecção utilizado. Posteriormente, realizaram-se ensaios com cereja somente com a altura de caixa-de-ar de 15 cm. Estes, também no sentido de verificar as temperaturas e humidades relativas, consumaram-se de duas formas. Na primeira o processo vigorou sob condições climáticas favoráveis e a cereja sem qualquer tipo de pré-tratamento. Na segunda as condições já foram adversas numa fase inicial e a cereja apresentou um pré-tratamento em ácido ascórbico.

A fase final desta dissertação, remete a análise e discussão dos resultados, que foi elaborada à medida que os ensaios de avaliação do desempenho iam sendo abordados. No traduzido pelos resultados obtidos na análise do comportamento em vazio, conclui-se que durante o dia as temperaturas são ligeiramente superiores e as humidades relativas inferiores para o tabuleiro colocado mais acima. À noite pela maior proximidade com os canais de exaustão,

o efeito é contraditório. Durante estes ensaios a temperatura máxima verificada foi de 55,5 °C às 14h00, coincidindo com uma temperatura e uma HR ambiente de 31,7 °C e 28%, respetivamente, e uma intensidade de radiação de 918 W/m². Variando o ponto de registo de valores, no mesmo tabuleiro, retirou-se que o movimento do Sol origina discrepâncias pouco significativas entre a face ao sol e a sombreada. Quando analisado o desempenho do secador, quando impostas as alturas de 5, 10 e 15 cm, verificou-se ganhos térmicos mais significativos para a altura de 10 cm (19,4 °C). A esta, seguiram-se as alturas de 5 e 15 cm, com 18,1 e 17,0 °C, pela mesma ordem. Contudo, os ensaios foram submetidos sob condições atmosféricas distintas, com o ensaio de 5 cm caracterizado pela forte nebulosidade em alguns períodos. Para modos de funcionamento distintos, após a análise dos resultados sob convecção natural e forçada aferiu-se que o uso do ventilador contribui para uma diminuição da temperatura do interior da câmara, e, por conseguinte, uma menor diferença entre a HR praticada pelo ambiente e no interior do secador. Mais, durante a noite, a humidade no interior da câmara por menor que seja a diferença, consegue sempre ser inferior à retratada no ambiente, contrariamente ao sucedido quando utilizado o sistema de ventilação, que são apresentam valores iguais.

Nos ensaios relativos à secagem da cereja, os comportamentos do secador foram distintos. Essa diferença era expectável uma vez que não havia ligação entre as características dos ensaios. No primeiro ensaio de secagem os 15 kg de cereja, efetuaram o seu processo de secagem em 124 horas. Comparando as amostras colocadas em dois tabuleiros espaçados por 30 cm, o tabuleiro inferior concluiu o seu processo 2 horas antes do localizado no cimo. Conseguiram-se obter temperaturas acima dos 50 °C, exceto no primeiro, muito devido à maior quantidade de humidade libertada pela cereja nesta fase. Que também se traduziu na análise à humidade no interior que foi mínima no interior com um valor mínimo de 14%. O segundo ensaio, se por um lado evidenciava um ponto favorável à rapidez do processo (pré-tratamento), por outro caracterizou-se pela forte nebulosidade e alguma queda de chuva nos primeiros dias de ensaio. Isto originou um atraso do processo relativamente ao 1º, de 25 horas. O que permite retirar que caso se verificasse sob condições propícias, provavelmente se teria realizado num menor tempo. De salientar que apesar da maior distância entre os tabuleiros das amostras, estes, terminaram a secagem ao mesmo tempo.

5.2. Sugestão para trabalho futuro

No sentido de dar continuidade ao trabalho desenvolvido na presente dissertação sugerem-se os seguintes trabalhos:

- Estudo da eficiência do coletor solar e do secador solar;
- Analisar o comportamento do secador, através da variação do caudal de saída, que pode ser realizado na situação de convecção natural, pela variação da abertura da válvula de borboleta, ou em convecção forçada, variando a velocidade de rotação do ventilador;
- Estudar o efeito da variação da espessura da placa absorvedora, nas temperaturas geradas à saída do coletor;
- Utilizar materiais PCM e analisar o seu impacto noturno na conservação da temperatura da câmara de secagem;
- Analisar a secagem da cereja com e sem pré-tratamento sob condições climáticas semelhantes.

Referências bibliográficas

Agbo, S., 2011. Analysis of the performance profile of the NCERD thermosyphon solar water heater. *Journal of Energy in Southern Africa*, 22(2), pp.22-26.

Agbo & Okoroigwe, 2007. Analysis of Thermal Losses in the Flat-Plate Collector of a Thermosyphon Solar Water Heater. *Research Journal of Physics*, 1(1), pp.35-41. Available at: <http://www.scialert.net/abstract/?doi=rjp.2007.35.41>.

Ayensu, A., 1997. Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy*, 59, pp.121-126.

Bakari, R., Minja, R.J. a. & Njau, K.N., 2014. Effect of Glass Thickness on Performance of Flat Plate Solar Collectors for Fruits Drying. *Journal of Energy*, 2014, pp.1-8. Available at: <http://www.hindawi.com/journals/jen/2014/247287/>.

Bassey, M.W., Oosthuizen, P.H. & Sarr, J., 1994. Using heated chimneys and reduced collector air gap height to improve the performance of indirect passive solar dryers. *Renewable Energy*, 4(2), pp.169-178.

Belessiotis, V. & Delyannis, E., 2011. Solar drying. *Solar Energy*, 85(8), pp.1665-1691. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.001>.

Benedito, T., 2010. *Práticas de Energia Solar Térmica*, Publindustria.

Bennamoun, L. & Belhamri, A., 2003. Design and simulation of a solar dryer for agriculture products. *Journal of Food Engineering*, 59(2-3), pp.259-266.

Bhargava, Garg & Agarwal, 1991. Study of a hybrid solar system solar air heater combined with solar cells. *Energy Conversion Management*, 31(5), pp.471--479.

Bolaji, B.O. & Olalusi, A.P., 2008. Performance Evaluation of a Mixed-Mode Solar Dryer. *AU Journal of Technology*, 11(4), pp.225-231. Available at: http://www.journal.au.edu/au techno/2008/apr08/journal114_article05.pdf.

Celma, A.R. & Cuadros, F., 2009. Energy and exergy analyses of OMW solar drying process. *Renewable Energy*, 34(3), pp.660-666. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2008.05.019>.

Daikin, 2013. Qual a diferença entre calor sensível e calor latente? Available at: <http://www.daikin.pt/support-and-manuals/faq/general/faq13.jsp> [Acedido Agosto 30, 2016].

Duffie, J. a., Beckman, W. a. & Worek, W.M., 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes, 4nd ed.*, Available at: <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=qkaWBrOuAEgC&pgis=1>.

Ekechukwu, O., 1999. Review of solar-energy drying systems I: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management*, pp.593-613.

Ekechukwu, O.V. & Norton, B., 1997. Design and measured performance of a solar chimney for natural - circulation solar energy dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10, pp.81-90.

Ekechukwu, O. & Norton, B., 1999a. Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management*, 40(6), pp.615-655. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890498000934>.

Ekechukwu, O. & Norton, B., 1999b. Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications. *Energy Conversion and Management*, 40(6), pp.657-667. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890498000946>.

El-Sebaili, A.A., Aboul-Enein, S., Ramadan, M. R. I., El-Gohary, H. G., 2002. Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer. *Energy Conversion and Management*, 43(16), pp.2251-2266.

Everett, R., 2004. Solar Thermal Energy. *Renewable Energy*. Oxford University Press, pp. 17-63.

Finck-Pastrana, A.G., 2014. NOPAL (*Opuntia Lasiantha*) drying using an indirect solar dryer. *Energy Procedia*, 57, pp.2984-2993. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.334>.

Forson, F.K., Nazha, M. A. A., Akuffo, F. O., Rajakaruna, H., 2007. Design of mixed-mode natural convection solar crop dryers: Application of principles and rules of thumb. *Renewable Energy*, 32(14), pp.2306-2319.

Gatea, A.A., 2011. Performance evaluation of a mixed-mode solar dryer for evaporating moisture in beans., 3(April), pp.65-71.

Hegde, V.N., Hosur, V.S., Rathod, Samyukthkumar K., Harsoor, Puneet, A., Narayana, K., Badari, 2015. Design, fabrication and performance evaluation of solar dryer for banana. *Energy, Sustainability and Society*, 5(1), p.23. Available at: <http://energysustainsoc.springeropen.com/articles/10.1186/s13705-015-0052-x>.

Huld, T., Müller, R. & Gambardella, A., 2012. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Solar Energy*, pp.1803-1815.

Irtwange, S. V & Adebayo, S., 2009. Development and performance of a laboratory-scale passive solar grain dryer in a tropical environment. *Journal of Agricultural Extension and Rural Development*, 1(2), pp.42-49.

Jain, D. & Tewari, P., 2015. Performance of indirect through pass natural convective solar crop dryer with phase change thermal energy storage. *Renewable Energy*, 80, pp.244-250. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.012>.

Jangam, S. V., 2011. An Overview of Recent Developments and Some R&D Challenges Related to Drying of Foods. *Drying Technology*, 29(12), pp.1343-1357. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2011.594378>.

JRC, Geographical Assessment of Solar Resource and Performance of Photovoltaic Technology. *European Commission, Joint Research Centre Institute for Energy, Renewable Energy Unit*. Available at: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

Koyuncu & Turhan, 2006. Performance of various design of solar air heaters for crop drying applications. *Renewable Energy*, 31(7), pp.1073-1088.

Kumar, M., Sansaniwal, S.K. & Khatak, P., 2016. Progress in solar dryers for drying various commodities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, pp.346-360. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.158>.

LEITÃO, A.E.B., 1998. Estudos De Secagem Solar De Produtos Agro-Alimentares., (June), p.234.

Leon, M.A., Kumar, S. & Bhattachaya, S.C., 2002. A comprehensive procedure for performance evaluation of solar dryers. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 6, pp.367-393.

Madhlopa, A., Jones, S.A. & Saka, J.D.K., 2002. A solar air heater with composite - absorber systems for food dehydration. *Renewable Energy*, 27, pp.27-37.

Martins, T.D.O., 2010. Simulação numérica do escoamento de ar dentro de um secador solar. *VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA*.

Mohanraj, M. & Chandrasekar, P., 2009. Performance of a forced convection solar drier integrated with gravel as heat storage material for chili drying. *Journal of Engineering Science and Technology*, 4(3), pp.305-314.

Montero, I., Blanco, J., Miranda, T., Rojas, S. Celma, A. R. 2010. Design, construction and performance testing of a solar dryer for agroindustrial by-products. *Energy Conversion and Management*, 51(7), pp.1510-1521. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.02.009>.

Morais, J., 2009. *Sistemas Fotovoltaicos da Teoria à Prática*, PUBLINDUSTRIA.

Mustayen, A.G.M.B., Mekhilef, S. & Saidur, R., 2014. Performance study of different solar dryers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, pp.463-470. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.020>.

NASA, 2016. Electromagnetic Radiation. Available at: <http://www.ces.fau.edu/nasa/module-2/radiation-sun.php> [Acedido Setembro 20, 2016].

Nunes, J, Silva, P.D. Pires, L. Gaspar, P.D. Andrade, L. P, 2016. The cherry drying as a complementary conservation process to conservation in cold. *VI Congresso Ibero-Americano de Ciências e Técnicas do Frio*, pp.3-6.

Onyinge, G., Oduor, A. & Othieno, H., 2015. The design and testing of an indirect cabinet solar dryer, for thin layer drying of *Rastrineobola argentea* fish, under the climatic conditions of Maseno, Kenya. , 9(January), pp.1-16. Available at: [http://www.academicjournals.org/article/article1421316963_Onyinge et al .pdf](http://www.academicjournals.org/article/article1421316963_Onyinge%20et%20al.pdf).

Pangavhane, D., Sawhney, R. & Sarsavadia, P., 2002. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. *Energy*, 27, pp.579-590. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544202000051>.

Park, B. K. J., Alonso, L. F. T., Cornejo, F. E. P. Maria, I. D. F., 2014. Secagem: fundamentos e equações. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, 16(1), pp.93-126.

Portal-Energia, 2004. *Energia Solar Térmica - manual sobre tecnologias, projeto e instalação*,

Romero, V.M., Cerezo, E., Garcia, M. I., Sanchez, M. H. 2014. Simulation and validation of vanilla drying process in an indirect solar dryer prototype using CFD Fluent program. *Energy Procedia*, 57, pp.1651-1658. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.156>.

Sarsilmaz, C., Yildiz, C. & Pehlivan D., 2000. Drying of apricots in a rotary column cylindrical dryer (RCCD) supported with solar energy. *Renewable Energy*, 21(2), pp.117-127. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0033732283&partnerID=40&md5=9921072c5c2da1cccae1dee7d1af342a>.

Shanmugam, V. & Natarajan, E., 2007. Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without reflective mirror. *Applied Thermal Engineering*, 27(8-9), pp.1543-1551.

Sharma, A., Chen, C.R. & Vu Lan, N., 2009. Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), pp.1185-1210.

Sharma, V.K., Colangelo, A. & Spagna, G., 1995. Experimental investigation of different solar dryers suitable for fruit and vegetable drying. *Renewable Energy*, 6(4), pp.413-424.

Shrivastava, V. & Kumar, A., 2015. Experimental investigation on the comparison of fenugreek drying in an indirect solar dryer and under open sun. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, pp.1-10. Available at: "<http://dx.doi.org/10.1007/s00231-015-1721-1>."

Silva, P.D., 2010. *Apontamentos de Transmissão de Calor*.

Singh, S. & Kumar, S., 2012. New approach for thermal testing of solar dryer: Development of generalized drying characteristic curve. *Solar Energy*, 86(7), pp.1981-1991. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.04.001>.

Šúri, M., Huld, T.A., Dunlop, E.D., Ossenbrink, H.A., 2007. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries., pp.1295-1305. Available at: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>.

Umogbai, V.I. & Iorter, H., 2013. Design, construction and performance evaluation of a passive solar dryer for maize cobs. *African Journal of Food Science and Technology*, 4(5)(5), pp.110-115.

Vijayavenkataraman, S., Iniyan, S. & Goic, R., 2012. A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), pp.2652-2670. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.007>.

Vlachos, N.A., Karapantsios, T. D., Balouktsis, A. I., Chassapis, D., 2006. Design and Testing of a New Solar Tray Dryer. *Drying Technology*, 20(6), pp.1243-1271. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1081/DRT-120004050#.VddvKfkb8SI>.

Vyas, S. & Punjabi, S., 2014. Thermal Performance Testing of a Flat Plate Solar Air Heater Using Optical Measurement Technique. *International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering (IJMECH) Vol.3, No.4, November 2014*, 3(4), pp.69-84. Available at: <http://wireilla.com/engg/ijmech/papers/3414ijmech07.pdf>.

WeatherLink, 2016. Dados da estação meteorológica Covilhã - UBI edifício das engenharias. Available at: <http://www.weatherlink.com/user/cmade/index.php?view=summary&headers=1>.

WeatherOnline, 2016. Total de horas de sol. Available at: <http://www.weatheronline.pt/> [Acedido Setembro 3, 2016].