

Adriana Luísa de Carvalho Garcia

Conceção e calibração experimental de um modelo de apoio ao projeto de um dispositivo de arrefecimento por vácuo

Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica
na Especialidade de Energia e Ambiente

10 de julho de 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Conceção e calibração experimental de um modelo de apoio ao projeto de um dispositivo de arrefecimento por vácuo

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Autor

Adriana Luísa de Carvalho Garcia

Orientador[es]

José Manuel Baranda Moreira da Silva Ribeiro

Jorge Campos da Silva André

Júri

Presidente Professor Doutor José Carlos Miranda Góis
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor José Manuel Baranda M. da Silva Ribeiro
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Mestre Francisco José C. B. P. Lamas
Professor Convidado da Universidade de Coimbra

Coimbra, julho, 2017

Agradecimentos

A dissertação aqui se apresentada foi apenas possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Ao Professor Doutor José Manuel Baranda da Silva Ribeiro pela constante transmissão de conhecimentos e pelo seu empenho na orientação da dissertação.

Ao Professor Doutor Jorge Campos da Silva André pela constante transmissão de conhecimentos e pelo seu empenho na orientação da dissertação.

A todos os meus professores da Universidade Coimbra pela transmissão de conhecimentos.

Ao Abílio, à Cristiana, à Rita e à Vânia por toda a ajuda e apoio prestados.

Ao Rui Pedro pelo apoio prestado ao longo do curso.

Ao meu irmão Miguel Pedro pela colaboração no *design* da capa deste trabalho.

Por último um agradecimento especial aos meus pais cujo apoio foi a chave mestra para a realização deste curso.

Resumo

Hoje em dia, há a necessidade de melhorar e controlar os fenómenos de transferência de calor e massa para que os processos industriais sejam mais rápidos e eficientes. Posto isto, tem sido realizada bastante investigação através de diversos projectos, para encontrar alternativas para otimizar esses processos. A vaporização sob baixa pressão é uma dessas tecnologias, sendo o seu estudo o propósito principal desta tese.

Numa primeira fase, desenvolve-se um modelo matemático da evolução da pressão em duas câmaras de vaporização de diferentes dimensões. A partir deste modelo verifica-se que a taxa de redução da pressão é superior na câmara de menor tamanho comparando com a da câmara maior. Foi também construída uma instalação experimental de modo a validar o modelo matemático. A segunda fase deste trabalho destina-se a analisar o comportamento da vaporização sob baixa pressão de água livre num sistema adiabático. Neste âmbito, realizaram-se dois procedimentos experimentais com duas câmaras com volumes distintos, onde se observou o efeito que diferentes parâmetros iniciais têm sobre a evolução da temperatura da água e da pressão no interior das câmaras de vaporização ao longo do tempo. A última fase tem como propósito o estudo da vaporização sob baixa pressão de água livre num sistema não adiabático. Desta forma, foi construída uma instalação experimental com uma câmara de vaporização, cujo ambiente termodinâmico onde o sistema está inserido é não adiabático. Paralelamente à fase anterior, o objectivo é a análise das evoluções temporais da temperatura da água e da pressão no interior da câmara de vaporização. Por último, compara-se o desempenho dos dois sistemas termodinâmicos anteriormente descritos, constatando-se que os resultados são inconclusivos.

Esta dissertação visa mostrar a importância do estudo desta tecnologia (vaporização sob baixa pressão), uma vez que a sua utilização pode melhorar os fenómenos de transferência de calor e massa, permitindo a criação de novos produtos ou equipamentos relevantes para processos industriais.

Palavras-chave: Bomba de vácuo; vaporização a baixa pressão, refrigeração evaporativa.

Abstract

Nowadays, there is a need to improve and control the phenomena of heat and mass transfer for a greater efficiency and speed of industrial processes. Therefore, research has been conducted throughout several projects in order to find alternatives to optimize these processes. Low pressure vaporization is one of those technologies, being its study the main purpose of this paper.

In a first phase, a mathematical model of the pressure development in two vaporization chambers of different dimensions is developed. From this model it is verified that the pressure reduction rate is higher in the smaller chamber when compared to the bigger chamber. An experimental setup was also constructed to validate the mathematical model. The second phase of this work aims to analyze the behavior of low pressure vaporization of free water in an adiabatic system. In this area, two experimental procedures with two chambers of distinct volumes are carried out, in which the effect of different initial parameters on the evolution of water temperature and pressure inside the vaporization chambers over time is analyzed. The final phase has the purpose of studying low pressure vaporization of free water in a non-adiabatic system. In this way, an experimental installation with a vaporization chamber was developed, whose thermodynamic environment where the system is inserted is non-adiabatic. Parallel to the previous phase, the purpose of this phase is to analyze the temporal evolutions of the water temperature and the pressure inside the vaporization chamber. Finally, the performance of the two thermodynamic systems is compared, and the results are inconclusive.

This dissertation aims at showing the importance of the study of this technology, since its use can improve the phenomena of heat and mass transfer, enabling the development of new products or equipment that are relevant for the industrial processes.

Keywords Vacuum pump; low pressure vaporization, evaporative cooling.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xii
Simbologia e Siglas	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. Estado da Arte	3
2.1. Fenómeno de vaporização	3
2.2. Fenómeno de vaporização sob baixa pressão	4
2.2.1. A vaporização sob baixa pressão na refrigeração.....	5
2.2.2. Estudo matemático e experimental da vaporização sob baixa pressão	7
3. Vaporização sob baixa pressão – Estudo da evolução da pressão.....	11
3.1. Modelação.....	11
3.1.1. Modelo físico.....	11
3.1.2. Modelo matemático	12
3.1.3. Apresentação e discussão dos resultados.....	15
3.2. Caracterização experimental do processo de extração de ar do interior das câmaras de vácuo.....	17
3.2.1. Metodologia e configuração experimental	17
3.2.2. Apresentação e discussão dos resultados.....	18
4. Vaporização sob baixa pressão de água livre num sistema adiabático.....	23
4.1. Trabalho Experimental	23
4.1.1. Metodologia e configuração experimental	23
4.1.2. Apresentação e discussão dos resultados.....	25
4.1.3. Comparação dos resultados das duas câmaras	31
5. Vaporização sob baixa pressão de água livre num sistema não adiabático.....	33
5.1. Trabalho Experimental	33
5.1.1. Metodologia e configuração experimental	33
5.1.2. Apresentação e discussão dos resultados.....	35
5.1.3. Comparação dos resultados obtidos no sistema não adiabático com os obtidos no sistema adiabático.....	37
6. Conclusão	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama esquemático do modelo físico (Augusto, C. V. M, 2013).....	8
Figura 3.1 Diagrama esquemático de um sistema de vaporização sob baixa pressão (adaptado de Augusto, C.V.M (2013)).....	11
Figura 3.2 Curva de instalação da bomba de vácuo <i>Busch R5 RA 0025 F</i> (Catálogo <i>Busch Vacuum Pumps and Systems</i>).	13
Figura 3.3 Curva característica da bomba de vácuo e a sua linha de tendência.....	14
Figura 3.4 Evolução temporal da pressão na câmara grande.	15
Figura 3.5 Evolução temporal da pressão na câmara pequena.	16
Figura 3.6 Evolução temporal da pressão na câmara grande e na câmara pequena.	17
Figura 3.7 Componentes da montagem experimental: (a) câmara de vaporização; (b) bomba de vácuo; (c) sensor de pressão; (d) placa de aquisição de dados.	18
Figura 3.8 Resultados experimentais da variação temporal da pressão na câmara grande.	19
Figura 3.9 Representação comparativa dos valores obtidos na modelação e dos valores experimentais na câmara grande.	20
Figura 3.10 Resultados experimentais da variação temporal da pressão na câmara pequena.	21
Figura 3.11 Representação comparativa dos valores obtidos na modelação e dos valores experimentais na câmara pequena.	21
Figura 3.12 Resultados experimentais da câmara grande e da câmara pequena.	22
Figura 4.1 Câmaras de vaporização. Esquerda – câmara pequena; direita – câmara grande.	24
Figura 4.2 Termopares tipo K ligados ao dispositivo de aquisição de dados da <i>Pico</i> ®.	24
Figura 4.3 Resultados experimentais da evolução da pressão e da temperatura da água para um volume inicial de 80 ml, na câmara grande.....	25
Figura 4.4 Resultados experimentais da evolução da pressão e da temperatura da água para um volume inicial de 120 ml, na câmara grande.....	26
Figura 4.5 Evolução da temperatura da água na câmara grande para dois volumes de água iniciais. Volume1 = 80 ml; Volume2 = 120 ml.....	27
Figura 4.6 Evolução da pressão total da câmara grande para dois volumes de água iniciais. Volume1 = 80 ml; Volume2 = 120 ml.	28
Figura 4.7 Resultados experimentais da evolução da pressão e da temperatura da água para um volume inicial de 80 ml, na câmara pequena.	29
Figura 4.8 Resultados experimentais da evolução da pressão e da temperatura da água para um volume inicial de 120 ml, na câmara pequena.	29

Figura 4.9 Evolução da temperatura da água na câmara pequena para dois volumes de água iniciais. (a) vista geral; (b) vista pormenorizada; Volume1 = 80 ml; Volume2 = 120 ml	30
Figura 4.10 Evolução da pressão total na câmara pequena para dois volumes de água iniciais. Volume1 = 80 ml; Volume2 = 120 ml.	31
Figura 4.11 Evolução da temperatura da água nas duas câmaras para dois volumes de água iniciais. Volume1 = 80 ml; Volume2 = 120 ml	31
Figura 4.12 Evolução da pressão total nas duas câmaras para dois volumes de água iniciais. Volume1 = 80 ml; Volume2 = 120 ml.	32
Figura 5.1 Câmara de vaporização grande.	34
Figura 5.2 Evolução da temperatura da água na câmara grande para dois volumes de água iniciais num sistema não adiabático. Volume1 = 80 ml; Volume2 = 120 ml.	35
Figura 5.3 Evolução da pressão total da câmara grande para dois volumes de água iniciais num sistema não adiabático. Volume1 = 80 ml; Volume2 = 120 ml.	36
Figura 5.4 Evolução da temperatura da água para um volume de 120 ml, num sistema adiabático e num sistema não adiabático.	37
Figura 5.5 Evolução da temperatura da água para um volume de 80 ml, num sistema adiabático e num sistema não adiabático.	38
Figura 5.6 Evolução da temperatura da água para um volume de 80 ml, num sistema não adiabático.	38
Figura 5.7 Evolução da pressão total na câmara grande para dois volumes de água iniciais para os dois sistemas termodinâmicos. Volume1 = 80 ml; Volume2 = 120 ml. ...	39

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 Pontos retirados da curva de instalação da bomba de vácuo.	13
Tabela 3.2. Constantes utilizadas para o desenvolvimento do modelo matemático.	14
[Remover se não aplicável.]	

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

\dot{m}_a – Caudal mássico de extração de ar (kg s^{-1})

M_a – Massa molar do ar seco = 28,97 (kg kmol^{-1})

P_a – Pressão do ar no interior da câmara (Pa)

R – Constante universal dos gases perfeitos = 8314,5 ($\text{J kmol}^{-1}\text{K}^{-1}$)

t – Tempo (s)

$T_{\text{água}}$ – Temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$)

T_c – Temperatura da câmara ($^{\circ}\text{C}$) ou (K)

V_c – Volume da câmara de vaporização (m^3)

\dot{V}_e – Caudal volúmico de extração de ar da bomba de vácuo ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

ρ_a – Densidade do ar (kg m^{-3})

Siglas

BV – Bomba de vácuo

CV – Câmara de vaporização

CV1 e CV2 – Volumes de controlo um e dois, respectivamente

P – Sensor de pressão

PA – Sistema de processamento e armazenamento de dados

PAD – Placa de aquisição de dados

SA – Sistema adiabático

SNA – Sistema não adiabático

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo introdutório tem como objetivo descrever o trabalho desenvolvido ao longo do semestre, cujo tema é “Conceção e calibração experimental de um modelo de apoio ao projecto de um dispositivo de arrefecimento por vácuo”. O assunto principal desta dissertação é a vaporização sob baixa pressão. Muito sucintamente, este fenómeno pode ser descrito como vaporização comum afectada por uma queda abrupta da pressão no meio onde ocorre. É caracterizado por ser um processo de rápida mudança de fase de líquido para vapor, que é devida à descida repentina da pressão. Este assunto irá ser abordado mais detalhadamente ao longo deste relatório.

O projeto desenvolvido tem como finalidade aperfeiçoar um modelo de um dispositivo de arrefecimento por vácuo que foi primeiramente objeto de estudo de Augusto, C.V.M. (2013) (Tese de Doutoramento), cujo trabalho se concentrou na formulação de um modelo semi-empírico de simulação do dispositivo. Para além disto, também foi estudado o processo de vaporização sob baixa pressão em condições diferentes, de modo a que o seu comportamento fosse inteiramente compreendido.

A importância deste estudo deve-se ao facto de que hoje em dia, com o aumento do meio industrial e com a exigência que a sociedade tem para melhorar as condições de vida, há a necessidade de criar tecnologias que tenham um funcionamento rápido e eficiente. Deste modo, o principal objectivo desta dissertação é estudar a vaporização sob baixa pressão e mostrar como este fenómeno pode funcionar como uma tecnologia de aperfeiçoamento dos processos de transferência de calor e massa podendo contribuir no melhoramento de vários processos industriais, nomeadamente a refrigeração.

A tese está estruturada em seis capítulos de forma a que a sua leitura seja de fácil compreensão. Este primeiro capítulo destina-se a contextualizar o trabalho desenvolvido. O capítulo 2 consiste na exposição do estado da arte dos processos de vaporização e vaporização sob baixa pressão, assim como na apresentação de trabalhos de diversos autores que se focaram no estudo da vaporização sob baixa pressão e das suas aplicações na refrigeração.

O capítulo *Vaporização sob baixa pressão – Estudo da evolução da pressão* é onde se encontra o estudo acerca da evolução da pressão sem evaporação de água. É

apresentado o modelo matemático que foi desenvolvido e também o trabalho experimental que serviu de suporte aos resultados obtidos teoricamente.

No capítulo Vaporização sob baixa pressão de água livre num sistema adiabático está exposto o trabalho experimental a respeito do processo de vaporização sob baixa pressão. Este processo foi abordado através de condições iniciais diferentes, tais como o volume de água inicial, e a câmara de vaporização. Nesta secção são analisadas as evoluções da pressão da câmara e da temperatura da água, de modo a se interpretar correctamente a vaporização sob baixa pressão. O capítulo *Vaporização sob baixa pressão de água livre num sistema não adiabático* tem uma abordagem similar ao anterior, com a diferença de que o trabalho experimental é realizado apenas com uma câmara e o sistema termodinâmico é não adiabático.

O capítulo 6 é aquele onde são apresentadas as conclusões mais relevantes deste trabalho.

2. ESTADO DA ARTE

Este capítulo tem o propósito de descrever os processos de vaporização e vaporização sob baixa pressão através da análise de trabalhos científicos publicados. Primeiramente é feita uma exposição dos trabalhos publicados sobre a vaporização. Posteriormente é abordado a vaporização sob baixa pressão através de estudos específicos acerca desta temática e as suas principais aplicações na indústria.

2.1. Fenómeno de vaporização

Nesta secção são explicados os dois tipos de vaporização, evaporação e ebulição, e são expostos alguns trabalhos de interesse para ajudar a sua compreensão.

A vaporização é um fenómeno físico em que ocorre uma mudança de fase do estado líquido para o estado gasoso. Erbil (2012) descreveu a vaporização como um fenómeno natural que acontece quando a atmosfera que rodeia um líquido não está saturada com o seu vapor. No entanto, em condições de vapor saturado, gotas pequenas também evaporam, uma vez que a pressão de vapor no seu interior é superior à pressão de saturação do exterior (Erbil, 2012). Nestas condições, a vaporização é igualmente chamada de evaporação, podendo-se considerar um processo de difusão, tal como foi concluído por Erbil (2012). O trabalho da análise experimental da evaporação de gotas de água, que foi desenvolvido por Cioulachtjian et al. (2010), tem como propósito conceder novos parâmetros físicos à modelação da evaporação de gotas sob influência dos gases que as circulam. A importância deste estudo está relacionada com a *molhabilidade* (capacidade que um líquido tem em manter contacto com uma superfície sólida) que tem bastante peso em várias áreas, tanto científicas como industriais. Foi concluído que os meios onde as gotas estão inseridas têm bastante influência no processo evaporação, principalmente no volume inicial da gota, no ângulo de contacto e na taxa de evaporação.

A ebulição é um outro tipo de vaporização, e está normalmente associada a processos de transferência de calor que ocorrem quando um líquido fica em contacto com uma superfície aquecida cuja temperatura é superior à temperatura de saturação do líquido. É caracterizada pelas baixas diferenças de temperatura e altos fluxos de calor. Há vários estudos publicados que abordam especificamente este tema, tal como por exemplo o

trabalho de Wen e Wang (2002) que estudaram o efeito da *molhabilidade* superficial na transferência de calor em ebulição nucleada em soluções tensoativas (substâncias que diminuem a tensão superficial ou influenciam a superfície de contacto entre dois líquidos), tendo concluído que é um parâmetro importante para o fenómeno. Outro trabalho desenvolvido é o de Peng et al. (2002), que é focado no estudo do comportamento dinâmico da superfície de uma bolha durante a ebulição. Estes autores concluíram que este fenómeno é muito complexo e que é preciso realizar mais estudos para a sua total compreensão em vários ambientes.

Uma das aplicações, que foi alvo do estudo de vários autores (Figueiredo e Costa, 2004; Meng e Hu, 2005; Zhao et al., 2008; Chen, 2011), é a utilização da vaporização para controlar a temperatura de edifícios e de proteções térmicas de chamas.

2.2. Fenómeno de vaporização sob baixa pressão

A vaporização sob baixa pressão é um processo caracterizado pela rápida mudança de fase líquido-vapor que é provocada por uma redução repentina da pressão. Numa primeira fase, esta redução provoca turbulência e uma forte agitação no líquido, o que aumenta a sua energia cinética, que por sua vez promove uma maior taxa de vaporização comparando com o processo de evaporação em condições normais (Augusto, C.V.M., 2013) A rápida redução da pressão faz com que o líquido chegue à sua pressão de saturação em poucos instantes, iniciando-se o processo de ebulição, o que causa a formação de bolhas de vapor dentro do volume do líquido e observa-se uma brusca mudança de fase. A mudança de fase requer uma quantidade significativa de calor latente, obtida a partir do calor sensível do líquido e assim levando à diminuição da sua temperatura. A continuação do processo de remoção do vapor com a bomba de vácuo faz com que mais água se evapore e mais baixa seja a temperatura da água remanescente – o que faz baixar a pressão de saturação. A vaporização sob baixa pressão é, portanto, um processo contínuo, que permite que se atinja rapidamente o ponto de ebulição, o que gera taxas de transferência de calor e massa muito altas, provocando um efeito de arrefecimento rápido. O estágio que predomina na vaporização sob baixa pressão é a ebulição; no entanto, este fenómeno envolve vários regimes (Hahne e Barthau, 2000).

Nos últimos anos foram desenvolvidos e publicados vários trabalhos experimentais e modelos que abordam e caracterizam o processo de vaporização sob baixa pressão. Também foram analisados vários parâmetros que poderiam ser importantes para aplicações utilizando a vaporização sob baixa pressão. Hahne e Barthau (2000) desenvolveram um projeto que mostra e ilustra satisfatoriamente os diferentes estágios e regimes de pressão num processo adiabático de vaporização sob baixa pressão em diferentes condições iniciais. Dois dos trabalhos experimentais mais importantes desta área foram desenvolvidos por Saury D. et al (2002, 2005), fornecendo uma contribuição analítica importante para a caracterização da vaporização sob baixa pressão. No primeiro trabalho experimental realizado por Saury et al. (2002) foram analisados numa película de água, um conjunto de parâmetros que estão inseridos no processo de vaporização sob baixa pressão. Os parâmetros em questão são o *flashing time* (tempo que demora a se atingir o *flash point*, que é, em condições normais, o ponto onde termina a evaporação) e a massa evaporada, e foi feita posteriormente uma comparação entre os resultados analíticos e os experimentais. Para a realização da experiência foram tomados diferentes valores iniciais de sobreaquecimento (diferença entre a temperatura inicial e a temperatura de equilíbrio térmico da água) e diferentes regimes de vaporização sob baixa pressão. Foi concluído que a temperatura inicial e o sobreaquecimento influenciam diretamente a cinética do processo de vaporização sob baixa pressão, e há uma proporcionalidade entre a massa final evaporada e o sobreaquecimento. Saury et al. (2005) também estudaram como é que a altura do líquido e a taxa de despressurização afetam diferentes parâmetros da vaporização sob baixa pressão, tais como a turbulência do processo, o *flashing time* e a massa evaporada. Kim et al. (2007) redigiram uma nota técnica acerca do crescimento do tamanho de bolha em ebulição nucleada em piscina sob um ambiente com uma pressão abaixo da pressão atmosférica; através de uma comparação com o crescimento do tamanho de bolha à pressão atmosférica eles concluíram que a taxa de crescimento da bolha é menor sob um ambiente com uma pressão inferior à pressão atmosférica. .

2.2.1. A vaporização sob baixa pressão na refrigeração

Hoje em dia, a maior parte da sociedade mundial está provida de equipamentos de refrigeração para conservação de alimentos, que são indispensáveis no quotidiano. No entanto, os métodos de refrigeração convencionais apresentam algumas características

negativas, entre as quais se salienta o tempo de arrefecimento. Esta particularidade tem motivado a procura e pesquisa de novos métodos de refrigeração, estando entre eles a utilização do processo de vaporização sob baixa pressão. Esta tecnologia tem-se tornado promissora, principalmente no processamento de produtos de *fast-food*, pois tem apresentado características mais vantajosas em relação aos métodos convencionais, tais como o tempo de arrefecimento e o consumo de energia. O facto de se melhorar as condições de qualidade e segurança permite que o tempo de armazenamento dos produtos seja maior, o que faz com que sejam feitos esforços para alargar esta tecnologia a todos os setores alimentares.

O uso da vaporização sob baixa pressão tem sido alvo de estudo em vários Laboratórios, sendo alguns departamentos da *Universidade Nacional da Irlanda* os principais pioneiros nesta área. Um dos trabalhos mais notáveis foi desenvolvido por Drummond e Sun (2008a e 2008b), que desenvolveram uma nova tecnologia que combina a imersão dos produtos em água com a refrigeração por vácuo (*refrigeração por vácuo de imersão*). Esta nova tecnologia foi desenvolvida de modo a contrariar algumas desvantagens que foram observadas na *refrigeração por vácuo*, tais como a perda de humidade nos alimentos, o tempo de refrigeração e a segurança microbiológica. Drummond e Sun (2008a) desenvolveram um modelo matemático para a refrigeração por vácuo de um sólido imerso num líquido. Deste modo, implementaram o método das diferenças finitas no modelo matemático da transferência de calor e massa durante a refrigeração por vácuo de imersão de bife cozinhado e registaram as temperaturas do bife e do líquido envolvente, e também a evolução da perda de massa. A conclusão que foi retirada é que a perda de massa é maior no primeiro estágio. No trabalho experimental desenvolvido por Drummond e Sun (2008b), acerca da *refrigeração por vácuo de imersão* em bife cozinhado, e esta tecnologia foi comparada com outras mais convencionais, tais como a utilização de jatos de ar e *refrigeração por vácuo* sem imersão num líquido. Concluíram que o tempo de refrigeração utilizando a *refrigeração por vácuo de imersão* é inferior ao tempo de refrigeração com jatos de ar; no entanto, é superior comparando com o tempo de refrigeração utilizando a *refrigeração por vácuo*. O tamanho da amostra foi bastante afetado devido ao uso desta tecnologia (*refrigeração por vácuo de imersão*). O modelo também demonstrou que não houve um crescimento significativo da bactéria *Clostridium perfringens* aquando da refrigeração do bife.

Um outro grupo de investigadores da *Universidade Técnica Checa em Praga* (Houska et al., 1996) desenvolveu o primeiro modelo matemático de *refrigeração por vácuo* de líquidos. Posteriormente, este trabalho foi melhorado por Dostal e Petera (2004) pois estes autores declararam que o primeiro modelo, desenvolvido por Houska et al. (1996), não estava completo, afirmando que o modelo desenvolvido por eles respeitava as convenções *standard* dos fenómenos de transporte e da física da *refrigeração por vácuo*.

Há mais laboratórios espalhados pelo mundo que expuseram os seus trabalhos acerca da *refrigeração por vácuo*. Entre eles encontram-se os autores Ozturk e Ozturk (2009) da *Universidade de Pamukkale* na Turquia, cujo trabalho centrou-se no estudo da *refrigeração por vácuo* de alface iceberg, concluído que esta tecnologia é 13 vezes mais rápida que os métodos convencionais. Outro laboratório encontra-se na *Universidade Nacional de Tecnologia de Taipé* em Taiwan onde foi feita uma observação morfológica de água arrefecida por vácuo e de água congelada, mostrando os diferentes estágios durante o processo (Cheng e Lin, 2007).

2.2.2. Estudo matemático e experimental da vaporização sob baixa pressão

Augusto, C. V. M (2013), desenvolveu uma tese de doutoramento cujo foco de estudo foi o processo de vaporização sob baixa pressão. O trabalho desta autora iniciou-se na composição de um estado da arte elaborado, onde foram expostos diversos estudos e trabalhos experimentais desenvolvidos ao longo dos anos. Foi concluído que este processo tem sido alvo de muita análise devido à capacidade que este possui de melhorar a qualidade dos procedimentos de várias indústrias.

Posteriormente, elaborou um modelo matemático de previsão do fenómeno de vaporização sob baixa pressão no processo adiabático de água livre. O seu trabalho está essencialmente focado na diferenciação e definição dos dois estágios de vaporização que ocorrem durante o processo de vaporização sob baixa pressão: evaporação e ebulição. A autora dividiu o modelo físico em dois volumes de controlo, sendo o primeiro correspondente ao volume de água livre presente num recipiente (tendo assumido que a temperatura inicial é uniforme) (CV1), e o segundo corresponde ao volume da câmara de vaporização imediatamente acima da superfície livre da água (CV2), tal como está representado na Figura 2.1. O que se pode constatar da observação deste diagrama é a

utilização de um condensador de modo a aumentar a taxa de vaporização, que é necessária para o processo de vaporização sob baixa pressão. Augusto, C. V. M. (2013), decidiu utilizar este equipamento para a modelação porque é normalmente estabelecido que a utilização de apenas uma bomba de vácuo não é suficiente para gerar a taxa de vaporização necessária para o processo.

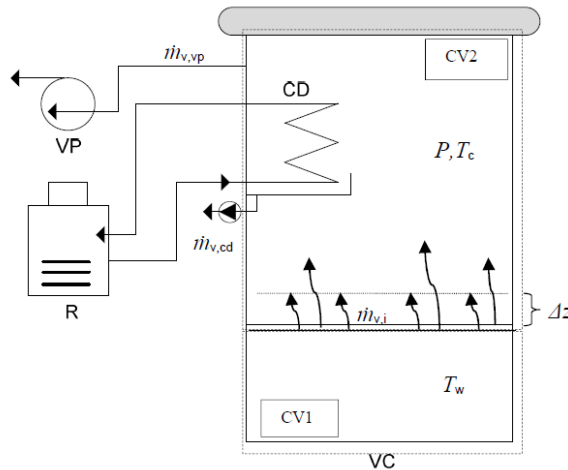


Figura 2.1 Diagrama esquemático do modelo físico (Augusto, C. V. M, 2013)

O início da modelação partiu do pressuposto de que tanto o ar como o vapor se comportam como gases perfeitos. Desta forma, a equação fundamental dos gases perfeitos foi o ponto de partida para a modelação, cujas equações diferenciais resultantes foram resolvidas através do método de Euler para equações diferenciais utilizando o programa *EES – Engineering Equation Solver*. Os resultados obtidos mostraram que o modelo desenvolvido consegue descrever os resultados experimentais do processo de vaporização sob baixa pressão que estão disponíveis em outras obras. Augusto, C. V. M (2013) concluiu que os valores resultantes do modelo indicam que o primeiro estágio (evaporação) tem uma forte contribuição na totalidade do processo de vaporização sob baixa pressão. A autora também mostrou que o processo é governado pela evolução temporal da pressão parcial do vapor de água contido dentro da câmara de vaporização, que por sua vez é controlado pelo caudal de extração de ar da bomba de vácuo e pela temperatura de operação do condensador.

Augusto, C. V. M (2013) realizou, posteriormente, um trabalho experimental onde estudou a influência do volume inicial e temperatura da água na evolução do processo de vaporização sob baixa pressão, de modo a se compreender os seus diferentes estágios e

regimes. Os resultados deste trabalho demonstraram que tanto o volume inicial, como a temperatura inicial têm grande influência na pressão e na temperatura da água ao longo do tempo. Através da análise dos resultados experimentais, foi-lhe possível fazer algumas correlações entre as condições iniciais e o produto final. Entre elas encontram-se as seguintes:

- ❖ Quanto maior é o volume e a temperatura iniciais da água, mais abrupta é a descida de temperatura após o *flash point*;
- ❖ Quanto maior é o volume e a temperatura iniciais, maior é a massa de água vaporizada até um certo momento do processo de vaporização sob baixa pressão;
- ❖ O volume inicial tem mais influência na variação da temperatura do que a temperatura inicial;
- ❖ Quanto maior é o volume inicial de água maior é o grau de sobreaquecimento, e portanto a taxa de produção de vapor por unidade de massa de água é também superior, promovendo uma redução da pressão mais rápida.

Para além destes pontos, Augusto, C. V. M (2013) também concluiu que o processo de vaporização sob baixa pressão está dividido em dois estágios, estando o segundo dividido em dois regimes. O primeiro é caracterizado por uma intensa ebulição no volume de água, e o segundo é caracterizado por uma ebulição menos acentuada, localizada abaixo da superfície livre do fluido.

Á *posteriori*, esta autora desenvolveu um trabalho de calibração experimental do modelo matemático, comparando os resultados experimentais com os resultados obtidos teoricamente. Esta calibração teve como objetivos a determinação do tempo de *flash point*, do tempo de transição entre o primeiro e o segundo regime de ebulição, a diferença entre a pressão da interface líquido-vapor e a pressão calculada experimentalmente no espaço livre da câmara de vaporização. As soluções obtidas nesta calibração permitiram que a autora concluísse que os resultados experimentais corroboram as funções determinadas para diferentes parâmetros.

Augusto, C. V. M (2013) também desenvolveu um estudo similar ao mencionado anteriormente, cuja diferença foi a utilização de um meio poroso em conjunto com a água no processo de vaporização sob baixa pressão. A autora pretendia avaliar os

efeitos e os benefícios da utilização do meio poroso, com intuito de melhorar a taxa de vaporização sob baixa pressão da água. Paralelamente ao que foi descrito no parágrafo anterior, esta autora elaborou, calibrou e validou através de um procedimento experimental um modelo matemático da vaporização sob baixa pressão de água num meio poroso. As principais conclusões que a autora retirou deste trabalho são que o modelo calibrado descreve satisfatoriamente os resultados experimentais e que é um bom modelo de referência para as demais aplicações e estudos.

3. VAPORIZAÇÃO SOB BAIXA PRESSÃO – ESTUDO DA EVOLUÇÃO DA PRESSÃO

3.1. Modelação

Este subcapítulo descreve o desenvolvimento de um modelo matemático que tenta reproduzir a evolução experimental do processo de vaporização sob baixa pressão.

Para a construção do modelo assumiu-se como volume de controlo o volume de uma câmara onde se vai extrair o ar, ou vapor interior, através de uma bomba de vácuo. As equações diferenciais obtidas foram resolvidas utilizando o programa *EES – Engineering Equation Solver*.

3.1.1. Modelo físico

O sistema físico utilizado para a modelação encontra-se esquematizado na Figura 3.1. São considerados dois grandes componentes: a câmara de vácuo (CV) e a bomba de vácuo (BV). A instrumentação é também composta por um sensor de pressão (P), por uma placa de aquisição de dados (PAD) e por um sistema de processamento e armazenamento de dados (PA).

A baixa pressão requerida para o processo de vaporização sob baixa pressão é obtida através da bomba de vácuo que suga o ar até ao valor de pressão mínimo.

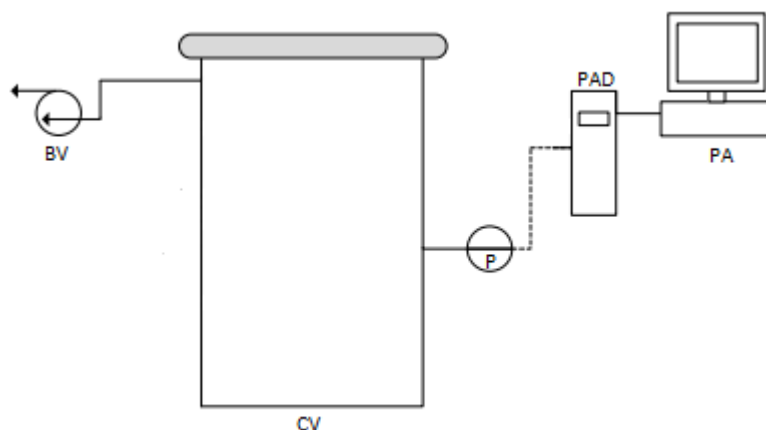


Figura 3.1 Diagrama esquemático de um sistema de vaporização sob baixa pressão (adaptado de Augusto, C.V.M (2013)).

3.1.2. Modelo matemático

Augusto, C. V. M (2013) desenvolveu um modelo de vaporização sob baixa pressão de água livre, em que considerava dois volumes de controlo: o volume que a massa de água livre ocupava e a região da câmara de vaporização acima da superfície da água livre. Este modelo foi desenvolvido com o intuito de se estudar a vaporização sob baixa pressão na sua totalidade, analisando a sua evolução temporal tanto nos campos de pressão como de temperatura.

O modelo matemático que foi desenvolvido nesta dissertação é baseado no modelo anterior descrito (Augusto, C. V. M., 2013), com a diferença de que a câmara de vaporização se encontra vazia, ou seja, não ocorre o processo vaporização, e é apenas analisada a variação temporal da pressão. Em adição, são consideradas duas câmaras de vaporização de dimensões diferentes. Doravante a câmara de maior tamanho será denominada de *câmara grande*, e a de menor tamanho de *câmara pequena*. Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** estão os valores de volume de cada câmara, assim como outras constantes consideradas para a modelação.

A pressão da câmara de vaporização deve-se apenas à pressão do ar interior, P_a . Assumindo que o ar se comporta como um gás perfeito, a taxa de variação da pressão do ar é definido por:

$$\frac{dP_a}{dt} = \frac{\dot{m}_a R T_c}{M_a V_c}, \quad (3.1)$$

em que R é a constante universal dos gases perfeitos, M_a é a massa molar do ar, V_c e T_c são, respetivamente, o volume e a temperatura da câmara, e \dot{m}_a é o caudal mássico de extração de ar da câmara.

O caudal mássico de ar extraído da câmara corresponde à taxa do fluxo de massa de ar que é extraído pela bomba de vácuo, que é dado pela equação (3.2):

$$\dot{m}_a = \frac{dm_a}{dt} = -\dot{V}_e \rho_a, \quad (3.2)$$

em que \dot{V}_e é o caudal volúmico de extração de ar da bomba de vácuo. Este valor não é considerado constante, pelo que foi necessário determinar a sua variação. Através da curva de instalação da bomba de vácuo (Figura 3.2) retirou-se os dados necessários para determinar a equação que traduz o comportamento do caudal volúmico de

extração da bomba. Primeiramente recolheram-se pontos da curva *RA 0025 F* a 50 Hz (Tabela 3.1), de modo a construir-se a curva característica da bomba, tal como está representado na Figura 3.3, e utilizou-se uma linha de tendência polinomial de segundo grau que descreve a tendência da curva característica, dando origem à equação (3.3).

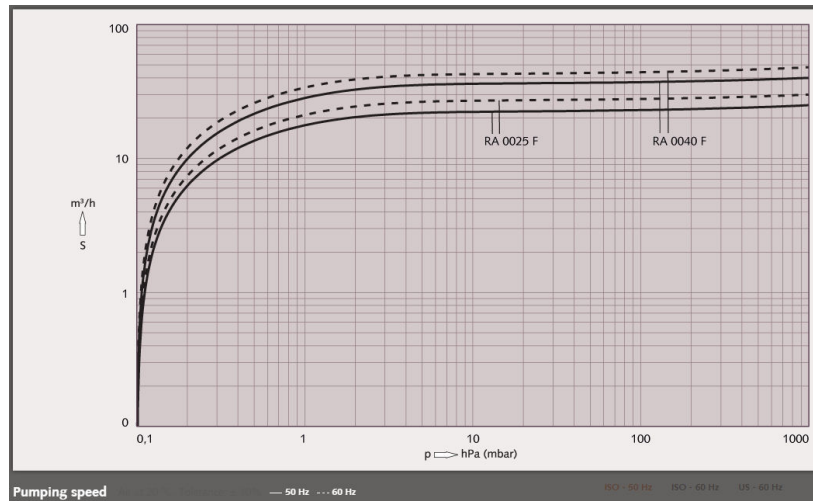


Figura 3.2 Curva de instalação da bomba de vácuo *Busch R5 RA 0025 F* (Catálogo *Busch Vacuum Pumps and Systems*).

Tabela 3.1 Pontos retirados da curva de instalação da bomba de vácuo.

Pontos	\dot{V}_e (m ³ /h)	\dot{V}_e (m ³ /s)	P_a (hPa)	P_a (kPa)
1	0	0	0,1	0,01
2	2	5,56E-06	0,11	0,011
3	6	1,67E-05	0,20	0,02
4	10	2,78E-05	0,30	0,03
5	12	3,33E-05	0,40	0,04
6	15	4,17E-05	0,60	0,06
7	16	4,44E-05	0,80	0,08
8	17	4,72E-05	1	0,1
9	20	5,56E-05	2	0,2
10	20,5	5,69E-05	4	0,4
11	21	5,83E-05	10	1
12	21	5,83E-05	20	2
13	21	5,83E-05	100	10
14	21,5	5,97E-05	200	20
15	22	6,11E-05	900	90
16	22,1	6,14E-05	1000	100

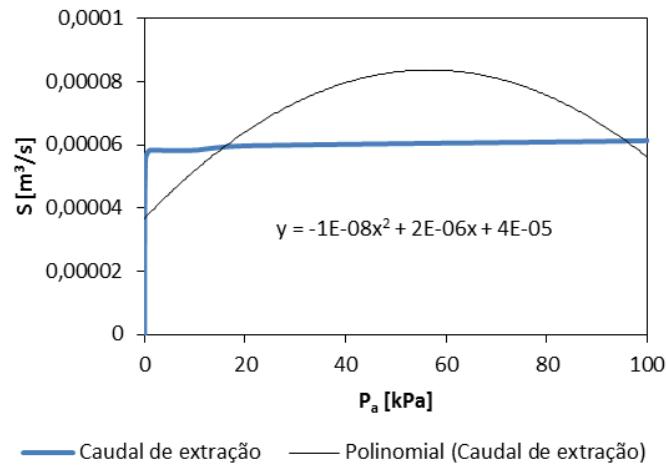


Figura 3.3 Curva característica da bomba de vácuo e a sua linha de tendência.

$$\dot{V}_e = -1 \times 10^{-8} P_a^2 + 2 \times 10^{-6} P_a + 4 \times 10^{-5}. \quad (3.3)$$

Substituindo a Eq.(3.3) na Eq.(3.2), o caudal mássico de ar extraído da câmara é dado por:

$$\dot{m}_a = -(-1 \times 10^{-8} P_a^2 + 2 \times 10^{-6} P_a + 4 \times 10^{-5}) \rho_a. \quad (3.4)$$

ρ_a , é a densidade do ar, que não é constante, e é dado por:

$$\rho_a = \frac{P_a M_a}{RT_c}. \quad (3.5)$$

Substituindo a Eq.(3.4) e a Eq.(3.5) na Eq.(3.1), a taxa de variação de pressão na câmara é dado por:

$$\frac{dP_a}{dt} = - \frac{(-1 \times 10^{-8} P_a^2 + 2 \times 10^{-6} P_a + 4 \times 10^{-5}) \times P_a}{V_c}. \quad (3.6)$$

Tabela 3.2. Constantes utilizadas para o desenvolvimento do modelo matemático.

Constantes utilizadas no modelo		
Volume da câmara de vaporização (câmara grande)	V_c (m ³)	1,7E-02
Volume da câmara de vaporização (câmara pequena)	V_c (m ³)	6,5E-04
Temperatura da câmara	T_c (°C)	25
Pressão inicial do ar	$P_{a,0}$ (Pa)	100000

3.1.3. Apresentação e discussão dos resultados

Esta secção irá apresentar os resultados obtidos da modulação. A secção vai ser dividida em três partes: câmara grande, câmara pequena e comparação entre as duas.

3.1.3.1. Câmara grande

A Figura 3.4 mostra a evolução prevista da pressão dentro da câmara grande. Tal como mostra o gráfico, os valores de pressão diminuem ao longo do tempo, desde um máximo de 100 kPa até aproximadamente 15 kPa, num tempo de 10s, apresentando uma curva com cariz exponencial negativa com tendência para zero

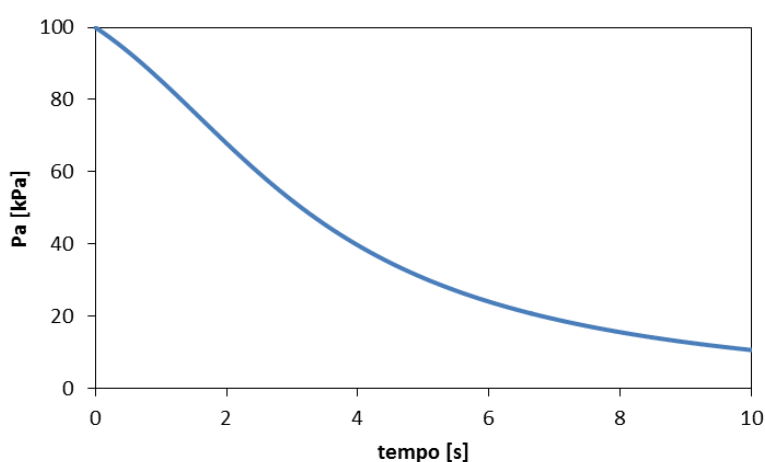


Figura 3.4 Evolução temporal da pressão na câmara grande.

3.1.3.2. Câmara pequena

A Figura 3.5 demonstra graficamente o comportamento previsto da pressão dentro da câmara pequena. Através da sua análise observa-se que a pressão varia de um máximo de 100 kPa e atinge um valor muito próximo de zero muito rapidamente, apresentando uma evolução exponencial negativa.

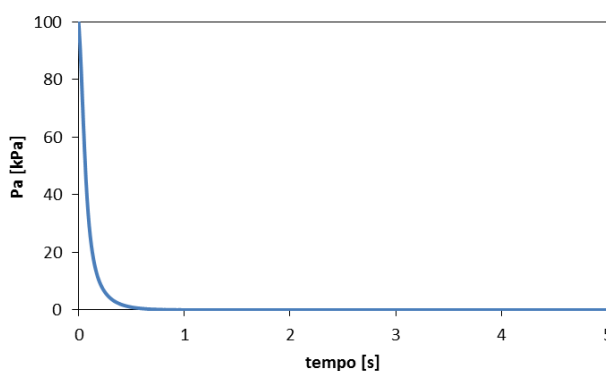


Figura 3.5 Evolução temporal da pressão na câmara pequena.

3.1.3.3. Comparação entre as duas câmaras

Este estudo é importante pois, tal como foi referido no capítulo Estado da Arte, para que ocorra o processo de vaporização sob baixa pressão é necessário uma descida repentina da pressão.

Este capítulo tem o propósito de apresentar uma análise comparativa do que foi constatado anteriormente. A Figura 3.6 apresenta os resultados acima mencionados (Figura 3.4 e Figura 3.5), porém, esta representação permite uma melhor análise comparativa. Observando-se as duas curvas chega-se à conclusão que a pressão na câmara pequena atinge um valor mínimo mais rapidamente que a pressão na câmara grande. A evolução temporal das duas linhas tem uma explicação muito óbvia, uma vez que o volume da câmara pequena é menor do que o da câmara grande. Assim sendo, é necessário menos tempo para produzir vácuo na câmara pequena do que na câmara grande, considerando que são utilizadas as mesmas condições iniciais de pressão, temperatura, e aspiração de ar (utilização do mesmo equipamento de produção de vácuo).

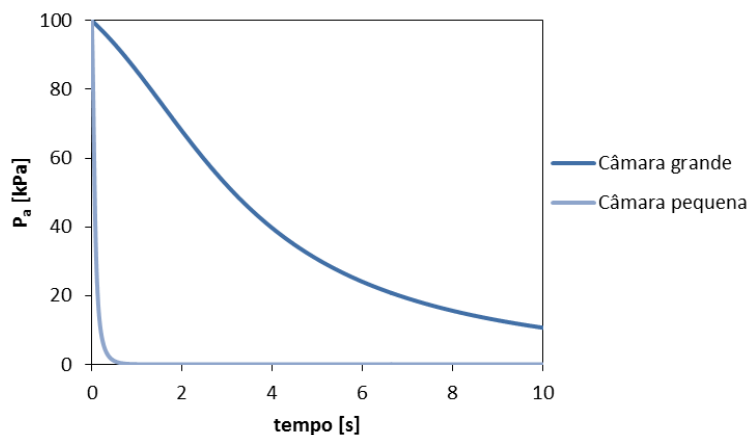


Figura 3.6 Evolução temporal da pressão na câmara grande e na câmara pequena.

3.2. Caracterização experimental do processo de extração de ar do interior das câmaras de vácuo

Este subcapítulo apresenta o estudo experimental realizado e tem como finalidade suportar a modelação matemática anteriormente descrita. A parte experimental foi concebida através da montagem de uma câmara de aço inoxidável ligada a uma bomba

de vácuo. A pressão foi medida através de um transdutor de pressão com o auxílio de uma placa de aquisição de dados.

3.2.1. Metodologia e configuração experimental

O trabalho experimental tem dois componentes principais que são a câmara e a bomba de vácuo (Figura 3.7(a) e Figura 3.7(b) respetivamente). As câmaras utilizadas são cilíndricas de aço inoxidável: a câmara grande tem um volume de 0.017 m^3 ($d \times h = 0,210 \times 0,500$); e a câmara pequena tem um volume de $0,00065 \text{ m}^3$ ($d \times h = 0,090 \times 0,230$). A bomba de vácuo utilizada é a *Busch R5 RA 0025 F*, e tem uma capacidade volumétrica de aspiração de ar de $0,00694 \text{ m}^3/\text{s}$. O propósito da bomba é despressurizar a câmara de vácuo, que estão conectadas por uma conduta flexível, até atingir um valor mínimo de pressão. A pressão é medida através de um sensor *Infinicon Porter™ CDG020D* (exatidão: 0,5% de leitura), cujo tempo de resposta é de 100 ms (Figura 3.7 (c)). Este sensor está ligado a uma placa de aquisição de dados da *National Instruments™* (Figura 3.7 (d)), que por sua vez está ligada a um computador pessoal, onde o sinal é tratado e armazenado utilizando um *software* do programa *LabView™ 9.0.1*.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.7 Componentes da montagem experimental: (a) câmara de vaporização; (b) bomba de vácuo; (c) sensor de pressão; (d) placa de aquisição de dados.

O objetivo deste estudo é medir a pressão dentro da câmara e ver se os resultados experimentais corroboram com os resultados teóricos. De maneira a se obter uma correta replicação de resultados foram realizados cinco ensaios com as mesmas condições iniciais para cada câmara. O que se espera destes ensaios é um decréscimo temporal da pressão, tal como foi observado no capítulo Modelação.

3.2.2. Apresentação e discussão dos resultados

De maneira a se discriminar os resultados obtidos em cada câmara, a apresentação e discussão está dividida em três secções: a primeira referente à câmara grande, a segunda à câmara pequena, e uma terceira parte onde é feita uma comparação dos resultados de ambas as câmaras.

3.2.2.1. Câmara grande

Os resultados obtidos para esta câmara encontram-se representados na Figura 3.8.

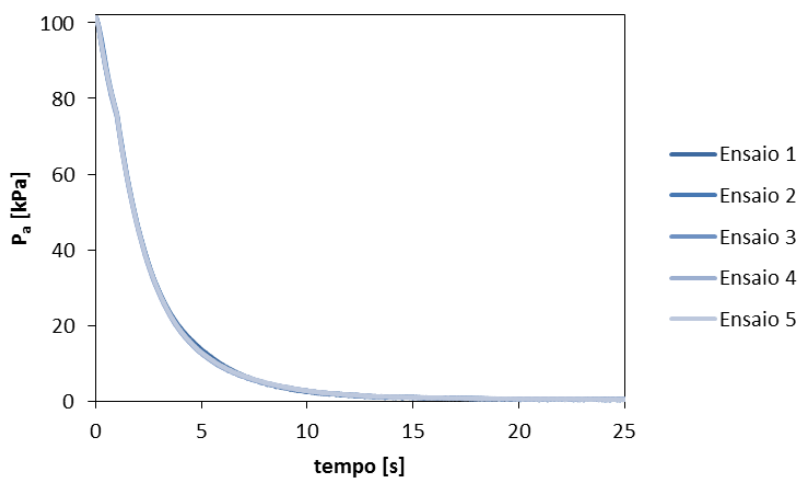


Figura 3.8 Resultados experimentais da variação temporal da pressão na câmara grande.

Analisando-se este gráfico verifica-se que os valores de todos os ensaios são coincidentes, significando que o trabalho experimental foi bem desenvolvido. Os resultados da pressão obtidos têm um comportamento exponencial, cuja curva tende para zero ao longo do tempo.

É importante referenciar a resposta nos primeiros 5 segundos, uma vez que a pressão decai muito rapidamente. Este acontecimento é muito relevante para o estudo da

vaporização sob baixa pressão, pois, tal como foi mencionado anteriormente, para que este fenómeno aconteça é necessário uma queda repentina da pressão no interior da câmara.

De modo a se estudar mais profundamente este cenário é necessário compararem-se com os resultados obtidos na Modelação. Na Figura 3.9 estão representadas duas curvas: a curva referente aos resultados obtidos na modulação (traço interrompido) e a curva referente aos resultados experimentais (traço contínuo). A análise gráfica desta figura demonstra que os resultados experimentais corroboram o modelo desenvolvido. A ligeira diferença que se observa é devida às perdas que não se consideraram na montagem experimental, tal como por exemplo as perdas de pressão associadas à conduta flexível que conecta a bomba de vácuo à câmara.

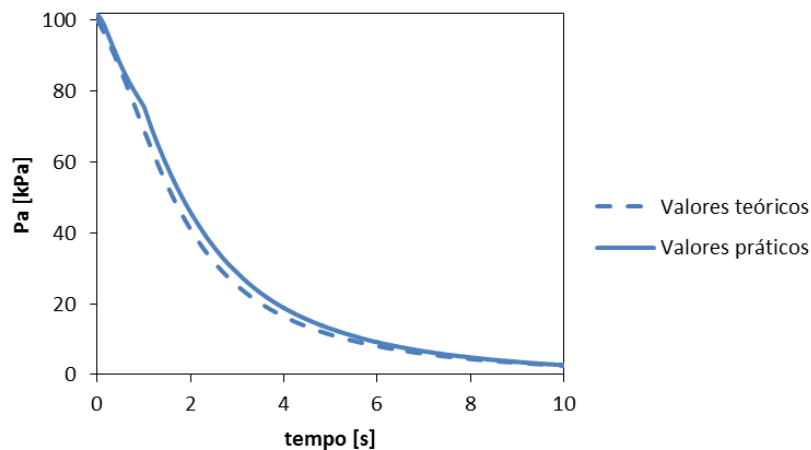


Figura 3.9 Representação comparativa dos valores obtidos na modelação e dos valores experimentais na câmara grande.

3.2.2.2. Câmara pequena

Paralelamente à secção anterior, o objetivo do trabalho experimental desenvolvido para a câmara pequena é sustentar os valores obtidos na modelação para este caso.

Na Figura 3.10 estão representados os gráficos relativos aos ensaios que foram realizados para a câmara pequena. As curvas têm todas um comportamento exponencial, cujos valores de pressão diminuem ao longo do tempo, estabilizando num patamar muito próximo de zero. Apesar de os resultados apresentarem um desenvolvimento similar, observam-se algumas variações no declive das curvas compreendidas entre 0 a 2 segundos. A origem deste comportamento poderá estar no tempo de resposta do transdutor de

pressão. No entanto, as variações que se verificam são muito pequenas, pelo que não são muito relevantes para o caso em estudo.

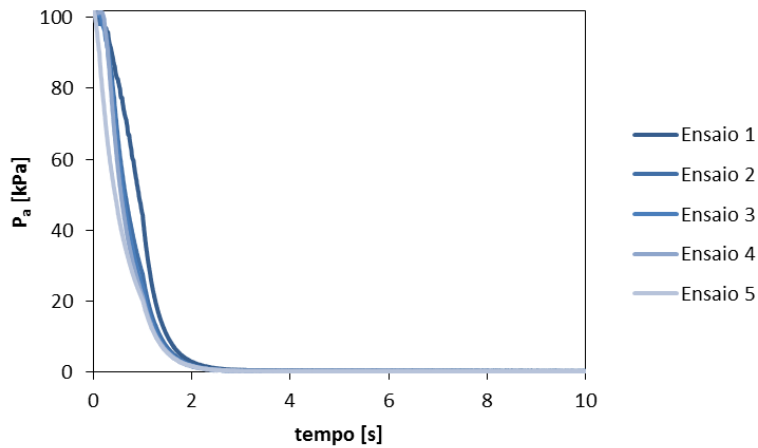


Figura 3.10 Resultados experimentais da variação temporal da pressão na câmara pequena.

A fim de se compreender melhor os ensaios experimentais, é de seguida apresentada uma análise que relaciona o modelo desenvolvido com os resultados laboratoriais. Assim como se pode observar na Figura 3.11, a curva dos resultados teóricos decresce mais rapidamente do que a curva dos resultados experimentais. Tal comportamento tem como base o tempo de resposta do transdutor de pressão, justificando o facto de a curva referente aos resultados experimentais se evoluir mais tardiamente em relação à curva referente ao modelo.

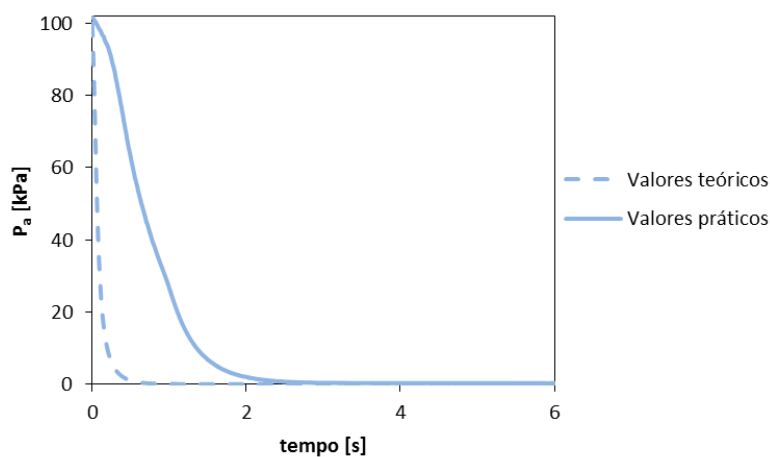


Figura 3.11 Representação comparativa dos valores obtidos na modelação e dos valores experimentais na câmara pequena.

3.2.2.3. Comparação dos resultados entre as duas câmaras

Esta secção tem como objetivo a comparação dos resultados obtidos na câmara grande e na câmara pequena. Através da análise do gráfico é possível constatar-se que a pressão da câmara pequena atinge valores perto de zero mais rapidamente do que a pressão da câmara grande. Esta situação é expectável, uma vez que o volume da câmara pequena é significativamente inferior ao da câmara grande, pelo que é necessário menos tempo para que o ar da câmara menor seja totalmente extraído. O propósito desta dissertação é estudar uma forma rápida de refrigeração. Através da análise da Figura 3.12 verifica-se que a câmara pequena apresenta uma taxa de redução de pressão maior, portanto a capacidade para promover a vaporização será maior. Desta forma, a câmara pequena é a mais acertada para aplicações práticas.

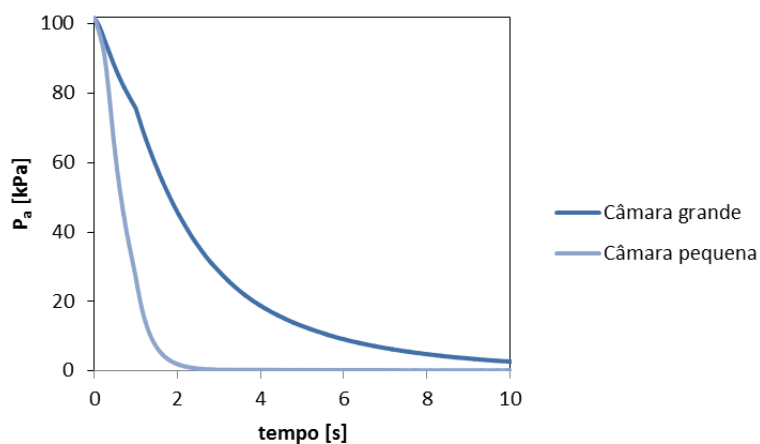


Figura 3.12 Resultados experimentais da câmara grande e da câmara pequena.

4. VAPORIZAÇÃO SOB BAIXA PRESSÃO DE ÁGUA LIVRE NUM SISTEMA ADIABÁTICO

4.1. Trabalho Experimental

O trabalho experimental desenvolvido tem como propósito demonstrar o fenómeno de vaporização sob baixa pressão de água e como ele se comporta sobre diferentes parâmetros iniciais. Deste modo, foi elaborado um procedimento experimental onde se incluíram diferentes volumes de água iniciais. O principal propósito desta secção é medir a evolução da temperatura da água e da pressão no interior da câmara de vaporização. A pressão foi medida através de um transdutor de pressão com o auxílio de uma placa de aquisição de dados. A temperatura foi medida com o auxílio de dois termopares do tipo K, que estavam conectados a um dispositivo de leitura, que por sua vez estava ligado a um computador pessoal. Todos os ensaios experimentais foram realizados em condições adiabáticas.

4.1.1. Metodologia e configuração experimental

A configuração experimental comporta dois grandes componentes: o sistema de despressurização e a câmara de vaporização. Similarmente ao trabalho experimental do capítulo anterior foram utilizadas duas câmaras cilíndricas de aço inoxidável com dimensões diferentes: a câmara grande tem um volume de $0,017 \text{ m}^3$ ($d \times h = 0,210 \times 0,500$); e a câmara pequena tem um volume de $0,00065 \text{ m}^3$ ($d \times h = 0,090 \times 0,230$) (Figura 4.1). O sistema de despressurização utilizado consiste numa bomba de vácuo, denominada *Busch R5 RA 0025 F* (Figura 3.7 (b)), e tem uma capacidade volúmica de aspiração de ar de $0,00694 \text{ m}^3/\text{s}$. O sistema de despressurização está conectado à câmara de vaporização através de uma mangueira por onde o ar é puxado. Tal como foi mencionado anteriormente, os parâmetros a medir são a pressão no interior da câmara de vaporização e a temperatura da água ao longo do tempo. A pressão é medida através de um sensor *Infinicon Porter™ CDG020D* (exatidão: 0,5% de leitura) (Figura 3.7 (c)), cujo tempo de resposta é de 100 ms. Este sensor está ligado a uma placa de aquisição de dados da *National Instruments™* (Figura 3.7 (d)), que por sua vez está ligada a um computador

peçoal, onde o sinal é tratado e armazenado utilizando um *software* do programa *LabView™ 9.0.1*. A temperatura da água é medida através de dois termopares do tipo K, que estão conectados a um dispositivo de aquisição de dados de 8 entradas de termopares da *Pico®*, que está ligado a um computador peçoal (Figura 4.2). O *software* utilizado para armazenar, analisar e exibir os dados é o *PicoLog* da *Pico®*.



Figura 4.1 Câmaras de vaporização. Esquerda – câmara pequena; direita – câmara grande.

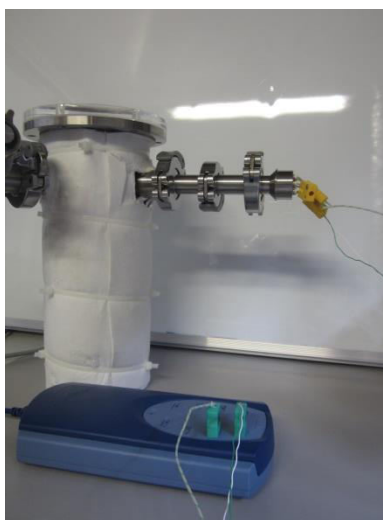


Figura 4.2 Termopares tipo K ligados ao dispositivo de aquisição de dados da *Pico®*.

A metodologia deste trabalho experimental consiste essencialmente na introdução de água num recipiente que está colocado dentro da câmara de vaporização, e diminuir abruptamente a pressão da câmara para que se processe a vaporização sob baixa pressão do líquido. De maneira a se obter uma correta replicação de resultados, foram realizados cinco ensaios com as mesmas condições iniciais para cada câmara. Com o princípio de se analisar este processo mais detalhadamente foram utilizados dois volumes

iniciais de água (0,00008 e 0,00012 m³), e o recipiente usado foi uma garrafa de água com 0,00033 m³ de volume (aproximadamente d = 59 mm e h = 173 mm (dados retirados de um documento logístico da empresa *Caldas da Penacova*TM)). Tratando-se de um processo adiabático, a transferência de calor para o exterior é teoricamente impossível. Deste modo, e como a câmara grande não dispõem de qualquer isolamento, o recipiente foi revestido com uma camada de lã de rocha. Contrariamente, a câmara pequena está isolada com um camada de cortiça, pelo que não foi necessário revestir o recipiente.

4.1.2. Apresentação e discussão dos resultados

A exposição dos resultados está dividida em três secções. A primeira está destinada à análise dos resultados obtidos na câmara grande, que está centralizada na relação dos valores obtidos para os dois volumes iniciais de água, tanto para a análise da evolução da pressão como para a evolução da temperatura. A segunda secção é análoga à primeira, com a distinção de que a análise é feita para os valores da câmara pequena. Por fim, o terceiro segmento está reservado a uma análise comparativa dos resultados obtidos em ambas as câmaras.

4.1.2.1. Câmara grande

Os resultados experimentais para os volumes iniciais de 80 ml e 120 ml, obtidos para esta câmara, encontram-se na Figura 4.3 e na Figura 4.4, respectivamente.

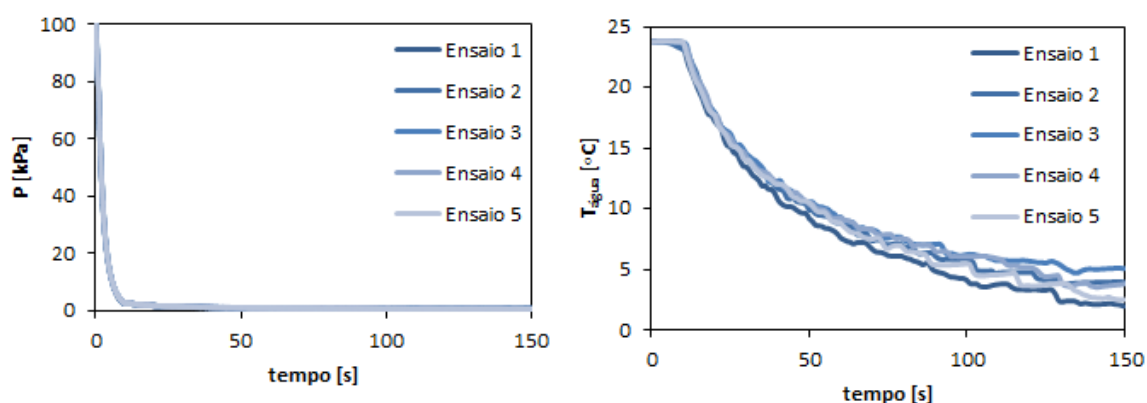


Figura 4.3 Resultados experimentais da evolução da pressão e da temperatura da água para um volume inicial de 80 ml, na câmara grande.

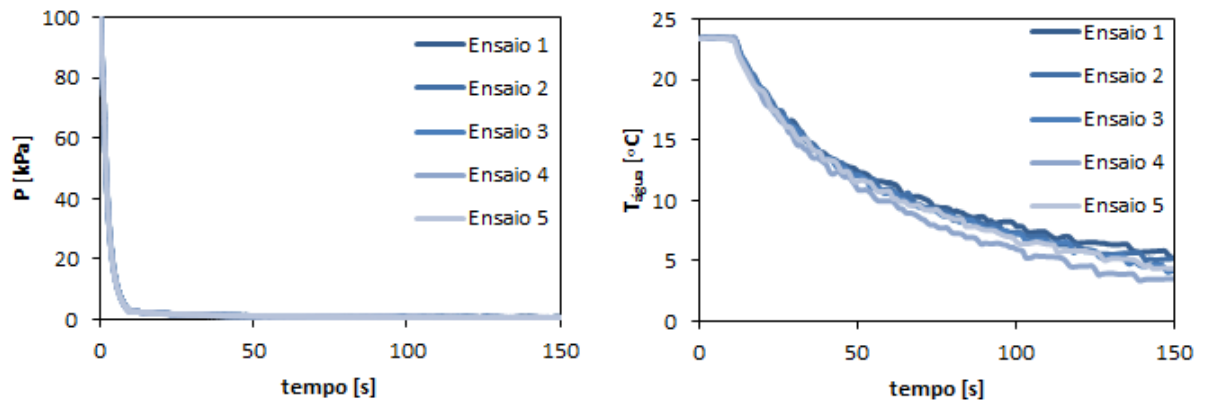


Figura 4.4 Resultados experimentais da evolução da pressão e da temperatura da água para um volume inicial de 120 ml, na câmara grande.

Os resultados apresentados na Figura 4.5 e na Figura 4.6 são os valores médios dos resultados apresentados na Figura 4.3 e na Figura 4.4. O processo de vaporização sob baixa pressão está dividido em dois estágios, tal como foi mencionado anteriormente. O primeiro estágio é a evaporação e considera-se que a vaporização ocorre na superfície livre da água e que se rege pela difusão do vapor de água no ar que se encontra acima da superfície livre do líquido. Este regime encontra-se representado na Figura 4.5, que ocorre desde o início do processo de vaporização sob baixa pressão até ao *flash point* (ponto onde se inicia a descida abrupta da temperatura).

A Figura 4.5 demonstra a evolução temporal da temperatura da água de dois volumes iniciais de água distintos. Tal como se pode observar, quanto menor é o volume inicial, mais abrupta é a descida de temperatura após o *flash point*. Também se pode verificar que quanto maior é o volume, mais linear é a resposta. Contrariamente, quando o volume inicial é menor a evolução tende a manifestar um comportamento exponencial.

Augusto, C. V. M. (2013) desenvolveu um estudo muito similar a este, mas para além de usar vários volumes iniciais, também utilizou diferentes temperaturas iniciais. Ela chegou à conclusão de que o volume inicial de água tem muita mais influência no processo de vaporização sob baixa pressão do que a temperatura inicial.

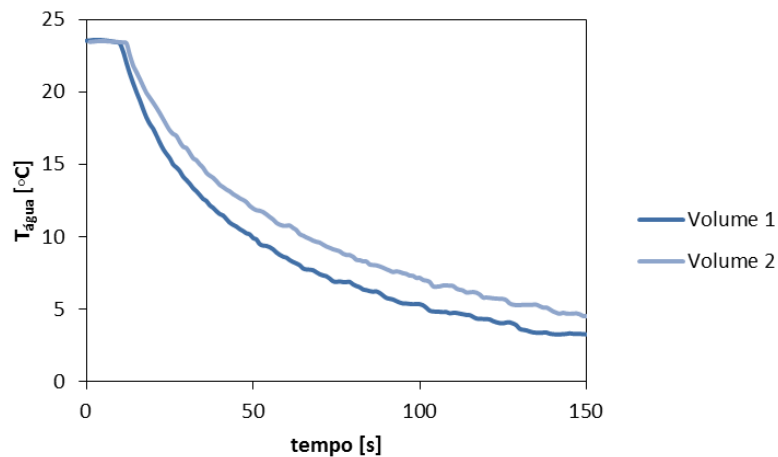


Figura 4.5 Evolução da temperatura da água na câmara grande para dois volumes de água iniciais. Volume1 = 80 ml; Volume2 = 120 ml.

Vários autores chegaram à conclusão que o segundo estágio do processo de vaporização sob baixa pressão, cujo início ocorre após o *flash point*, tem dois regimes diferentes de vaporização (Hahne e Barthau, 2000; Saury et al., 2002,2005). Neste âmbito, considera-se que o primeiro regime começa exatamente no *flash point* e que é caracterizado pela sua grande turbulência, uma vez que a superfície livre da água é corrompida devido à formação de bolhas de vapor em todo o seu volume. Ora, o segundo regime inicia-se prontamente após o primeiro, quando a taxa de redução de pressão reduz, como se observa na Figura 4.6. Os resultados aqui apresentados dizem respeito à evolução temporal da pressão total de dois volumes iniciais de água diferentes. Pode-se identificar o primeiro estágio do processo (evaporação) na zona do gráfico onde não distingue as curvas, cuja taxa de pressão de decaimento de pressão é muito alta. Também se pode observar que nesta zona a pressão total se encontra acima da pressão de saturação da água e a taxa de evaporação é muito baixa.

Através da análise do gráfico (Figura 4.6) é possível distinguirem-se dois pontos em zonas diferentes. No ponto 1 a pressão atinge a pressão de saturação da água, o que significa que, em condições normais, este ponto é o *flash point*. A partir desta zona o primeiro estágio termina e inicia-se o segundo. Tal como foi mencionado anteriormente, o primeiro regime do segundo estágio caracteriza-se por uma forte ebulição. O estudo do gráfico permite chegar à conclusão que este regime encontra-se entre os pontos 1 e 2. Um dos efeitos da descida abrupta da pressão é a vaporização rápida de água, o que leva a que a temperatura decresça rapidamente, diminuindo também o grau de sobreaquecimento.

Como consequência, a taxa de produção de vapor diminui e apenas ocorre numa zona bem definida abaixo da superfície livre da água. Este acontecimento marca o início do segundo regime, cujo ponto de partida está assinalado pelo ponto 2. Passado algum tempo, o que se pode observar, é que a pressão atinge valores aproximadamente constantes, ou seja, é atingido um equilíbrio entre taxa de produção de vapor e a taxa de vapor que é removido pelo sistema de depressurização.

Augusto, C. V. M (2013) chegou à conclusão que a temperatura inicial tem influência no tempo do *flash point*. No entanto, ela também concluiu que este parâmetro inicial não afeta a pressão final do processo de vaporização sob baixa pressão.

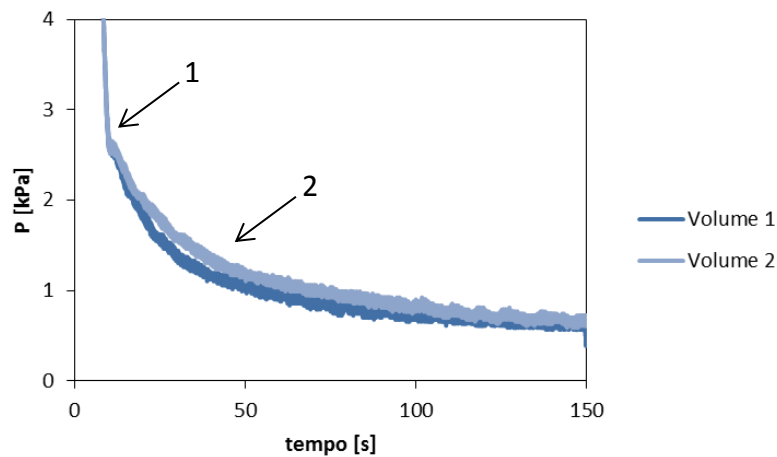


Figura 4.6 Evolução da pressão total da câmara grande para dois volumes de água iniciais. Volume1 = 80 ml; Volume2 = 120 ml.

4.1.2.2. Câmara pequena

Os resultados experimentais para os volumes iniciais de 80 ml e 120 ml, obtidos para esta câmara, encontram-se na

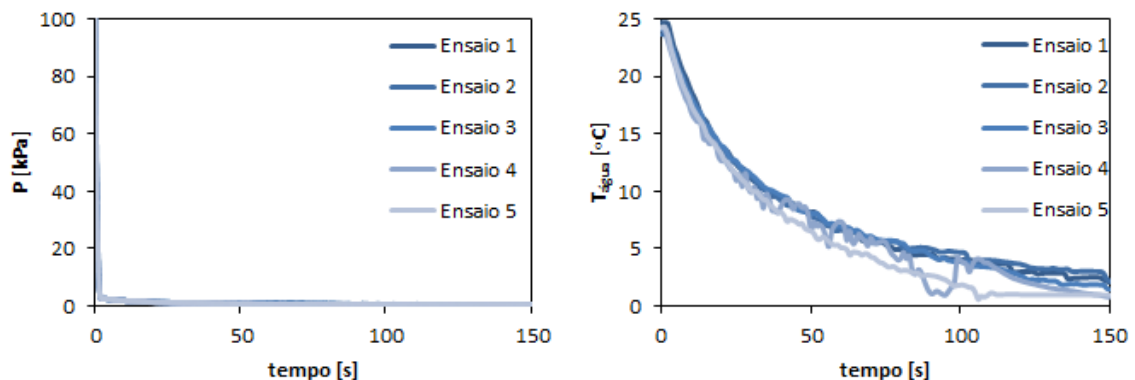


Figura 4.7 e na Figura 4.8, respectivamente.

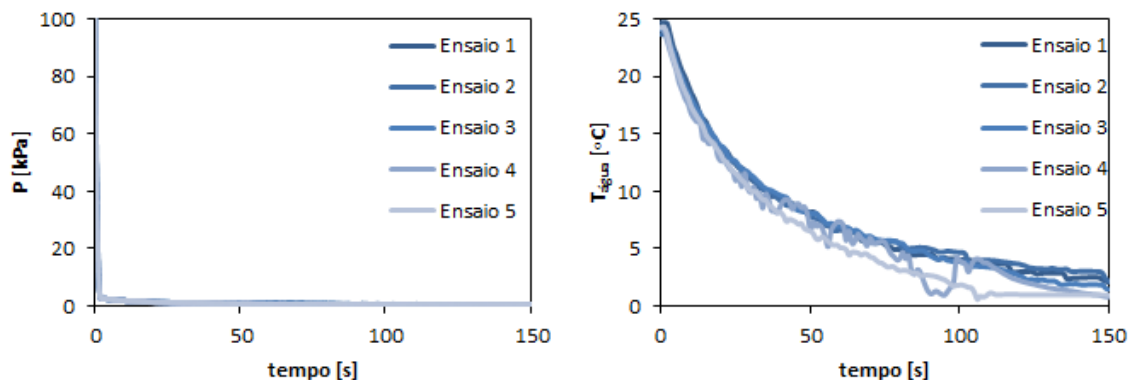


Figura 4.7 Resultados experimentais da evolução da pressão e da temperatura da água para um volume inicial de 80 ml, na câmara pequena.

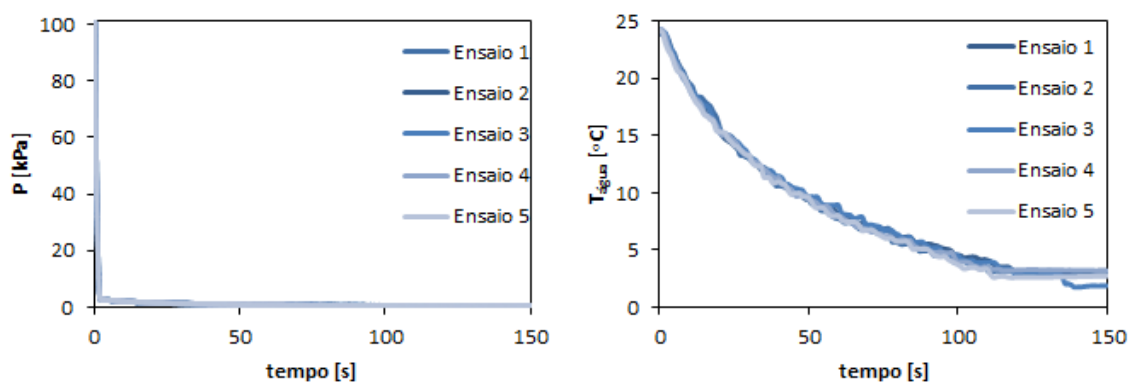


Figura 4.8 Resultados experimentais da evolução da pressão e da temperatura da água para um volume inicial de 120 ml, na câmara pequena.

Os gráficos da Figura 4.9 e da Figura 4.10 foram construídos com base nos valores médios dos ensaios da Figura 4.7 e da Figura 4.8. Para a elaboração da curva média da evolução da temperatura da água para o volume inicial de 80 ml, não se considerou o Ensaio 4, porque os resultados deste ensaio desviaram-se dos restantes significativamente.

A Figura 4.9 representa a evolução da temperatura da água de dois diferentes volumes iniciais de água. O processo de vaporização sob baixa pressão, cujas características foram mencionadas algumas vezes ao longo deste trabalho, tem dois estágios de vaporização: o primeiro é a evaporação e o segundo é a ebulição. A evaporação é o estágio em que a vaporização ocorre na superfície livre da água. Este estágio encontra-se perfeitamente representado na Figura 4.9 (b), que é uma vista pormenorizada da Figura 4.9 (a). Em condições normais, a evaporação tem ponto de partida no início do processo de vaporização sob baixa pressão e termina no *flash point* (instante em que a pressão total é igual à pressão de saturação do líquido). Analisando o segundo gráfico, observa-se que os

valores de temperatura começam a descer com mais declive a partir dos 2 segundos, aproximadamente. Este ponto é o *flash point*, salvo as condições sejam anormais. Analogamente ao que se concluiu no subcapítulo anterior, verifica-se que quanto menor é o volume inicial de água, mais íngreme é a resposta posteriormente ao *flash point*.

A câmara pequena tem dimensões muito reduzidas comparativamente à câmara grande, ou seja, é necessário menos tempo para que o processo de vaporização sob baixa pressão ocorra.

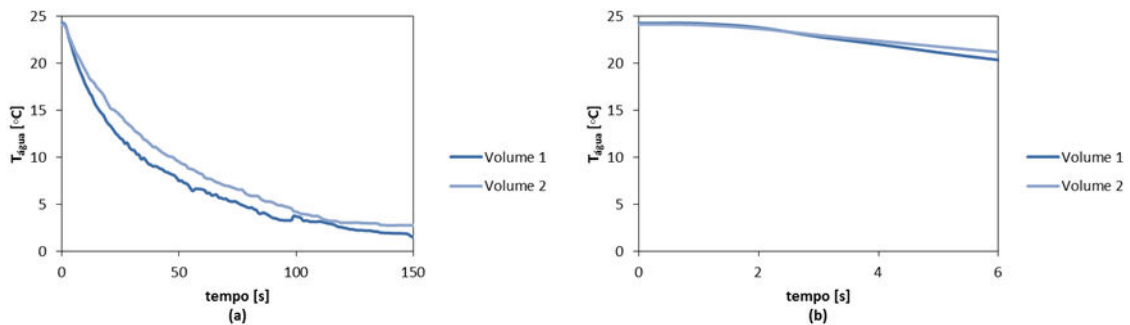


Figura 4.9 Evolução da temperatura da água na câmara pequena para dois volumes de água iniciais. (a) vista geral; (b) vista pormenorizada; Volume1 = 80 ml; Volume2 = 120 ml

O segundo estágio da vaporização sob baixa pressão (ebulição) inicia-se no *flash point*, e está dividido em dois regimes. Analisando-se as curvas da Figura 4.10, consegue-se distinguir ambos os regimes para os dois volumes de água. O primeiro regime tem início imediatamente após o *flash point*, e a taxa de formação de bolhas de vapor é alta. A duração desta fase está assinalada pelos pontos 1 e 2. Neste gráfico também está evidenciado o início do segundo regime, que está marcado pelo ponto 2. O comportamento deste regime pode ser explicado pela vaporização rápida da água induzindo assim uma rápida descida da temperatura, que por sua vez faz com que o grau de sobreaquecimento diminua. A redução deste último parâmetro provoca uma diminuição da taxa de produção do vapor que é produzido abaixo da superfície livre do líquido, indicando assim o princípio do segundo regime. Após alguns instantes, observa-se que a pressão atinge valores mais constantes, significando que a taxa de produção de vapor é igual à taxa de remoção de vapor promovido pelo sistema de despressurização.

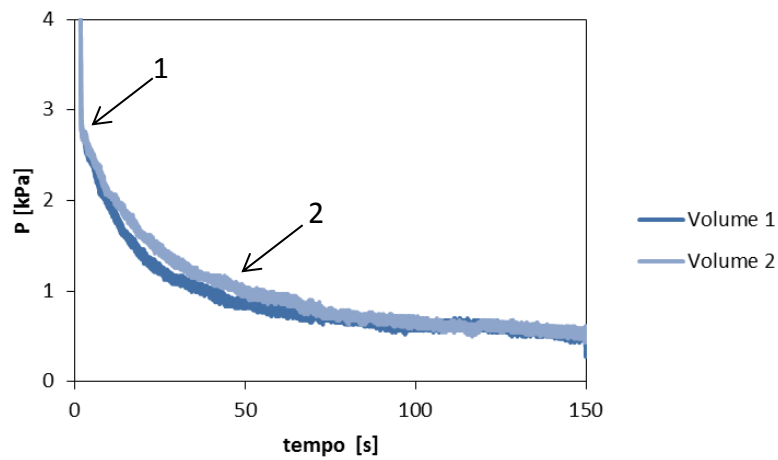


Figura 4.10 Evolução da pressão total na câmara pequena para dois volumes de água iniciais. Volume1 = 80 ml; Volume2 = 120 ml.

4.1.3. Comparação dos resultados das duas câmaras

A comparação dos resultados de ambas as câmaras é feita através da análise dos gráficos da Figura 4.11 e da Figura 4.12.

Da análise da primeira figura pode-se concluir que quanto menor é a câmara, mais rapidamente a pressão total se iguala à pressão de saturação da água, ou seja, mais rapidamente ocorre o *flash point*, indicando que a evaporação dura menos tempo, e a ebulição inicia-se mais rapidamente.

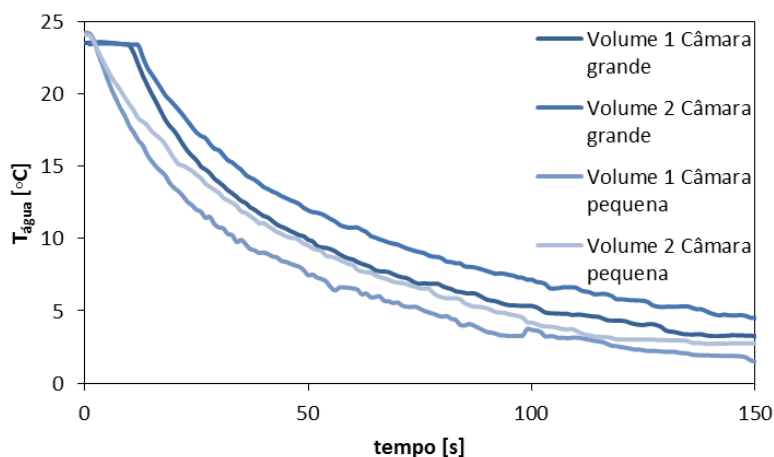


Figura 4.11 Evolução da temperatura da água nas duas câmaras para dois volumes de água iniciais. Volume1 = 80 ml; Volume2 = 120 ml

Em relação à Figura 4.12, as conclusões que se tiram são as seguintes:

- ❖ O segundo estágio da vaporização sob baixa pressão está dividido em dois regimes. O primeiro caracteriza-se por uma intensa ebulição da massa de água e o segundo caracteriza-se por uma ebulição muito menos violenta, que ocorre abaixo da superfície do líquido;
- ❖ Quanto maior é o volume inicial de água, maior é o grau de sobreaquecimento, logo maior é a taxa de produção de vapor;
- ❖ Não se verifica nenhuma alteração nas taxas de decréscimo de pressão, o que significa que o tamanho das câmaras não tem influência neste parâmetro;
- ❖ A diferença dos volumes das câmaras não tem influência na duração do primeiro regime do segundo estágio da vaporização sob baixa pressão;
- ❖ O tempo que a pressão demora a atingir valores mais constantes na câmara pequena é menor, pois demora-se menos tempo a atingir o *flash point*. Assim, o tempo de arrefecimento é menor na câmara pequena do que na câmara grande.

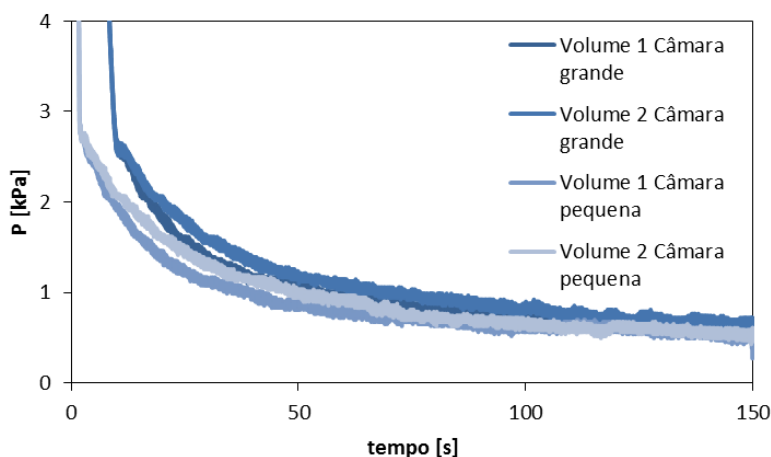


Figura 4.12 Evolução da pressão total nas duas câmaras para dois volumes de água iniciais.
Volume1 = 80 ml; Volume2 = 120 ml.

As diferenças observadas na evolução da pressão no ponto de transição entre o primeiro e o segundo regime do segundo estágio da vaporização sob baixa pressão podem ser explicadas a partir da quantidade de água que de repente fica sobreaquecida (fenómeno causado pela descida abrupta da pressão). Comparando o mesmo volume inicial de água

em câmaras de dimensões diferentes, verifica-se que quanto maior é o volume da câmara, maior é a quantidade de água sobreaquecida.

5. VAPORIZAÇÃO SOB BAIXA PRESSÃO DE ÁGUA LIVRE NUM SISTEMA NÃO ADIABÁTICO

5.1. Trabalho Experimental

O trabalho experimental elaborado para esta secção tem como papel a demonstração do processo de vaporização sob baixa pressão de água num sistema não adiabático e se se pode concluir se este sistema é mais favorável que o sistema adiabático. O procedimento utilizado é similar ao do capítulo anterior, isto é, foram utilizados parâmetros iniciais diferentes, mais concretamente dois volumes iniciais de água distintos. O objetivo deste estudo é medir e avaliar a evolução da temperatura da água e da pressão no interior da câmara de vaporização. Os valores de pressão foram medidos através de um medidor de pressão cujos resultados se armazenaram através de uma placa de aquisição de dados. A temperatura foi medida com o auxílio de dois termopares do tipo K que estavam conectados a um dispositivo de leitura.

5.1.1. Metodologia e configuração experimental

Analogamente ao capítulo 4.1.1, o perfil do trabalho experimental é composto pelo sistema de despressurização (bomba de vácuo) e pela câmara de vaporização. A configuração utilizada para a realização dos ensaios experimentais é a seguinte:

- ❖ Câmara de vaporização: uma câmara cilíndrica de aço inoxidável com $0,017 \text{ m}^3$ ($d \times h = 0,210 \times 0,500$) (Figura 5.1);
- ❖ Sistema de despressurização: uma bomba de vácuo *Busch R5 RA 0025 F* que tem uma capacidade de aspiração de ar por unidade de volume de $0,00694 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 3.7 (b));
- ❖ Ferramentas de medição da pressão: transdutor *Infinicon Porter™ CDG020D* (exactidão: 0,5% de leitura), cujo tempo de resposta é de 100 ms. Este sensor está ligado a uma placa de aquisição de dados da *National Instruments™*, que por sua vez está ligada a um computador pessoal, onde o sinal é tratado e armazenado utilizando um *software* do programa *LabView™ 9.0.1* (Figura 3.7 (c) e (d));

- ❖ Ferramentas de medição da temperatura: dois termopares do tipo K, que estão conectados a um dispositivo de aquisição de dados de 8 entradas de termopares da *Pico*®, que está ligado a um computador pessoal. O *software* utilizado para armazenar, analisar e exibir os dados é o *PicoLog* da *Pico*® (Figura 4.2).



Figura 5.1 Câmara de vaporização grande.

A metodologia que foi seguida é similar à do capítulo anterior, e que consiste na introdução de um recipiente com água na câmara de vaporização seguida de uma grande redução da pressão no seu interior. Os volumes iniciais de água são de 80 ml e 120 ml, e o recipiente (uma garrafa de água) tem um volume de 330 ml. Tal como o nome do capítulo indica, os ensaios experimentais foram realizados num sistema não adiabático, ou seja, são permitidas trocas de calor com o exterior da câmara. Desta forma, não é necessário isolar a garrafa de água nem a câmara de vaporização. Para este procedimento foi apenas usada a câmara grande, pois a utilização da câmara pequena implicava a remoção do isolamento que esta possui. De maneira a se obter uma correta replicação de resultados foram realizados cinco ensaios com as mesmas condições iniciais para cada câmara.

5.1.2. Apresentação e discussão dos resultados

Esta secção destina-se à apresentação e análise dos resultados da pressão e da temperatura da água do processo de vaporização sob baixa pressão do sistema não adiabático, para os dois volumes de água iniciais. Os resultados obtidos para este parâmetro inicial são analisados e a partir daí caracterizam-se os estágios da vaporização sob baixa pressão.

Tal como foi mencionado anteriormente, a vaporização sob baixa pressão é um processo que possui dois estágios. O primeiro é denominado de evaporação e é caracterizado pelo facto de a vaporização ocorrer na superfície livre da água, e decorre desde o início da descida da pressão até se atingir o *flash point*. Este estágio pode ser observado na Figura 5.2, e o que se pode retirar é que a temperatura se mantém aproximadamente constante até ao *flash point*, que é o momento exatamente antes da descida abrupta de temperatura.

A Figura 5.2 representa a evolução temporal da temperatura da água de dois volumes de água iniciais diferentes. Da análise deste gráfico pode-se constatar que quanto menor é o volume inicial, mais abrupta é a descida de temperatura após o *flash point*.

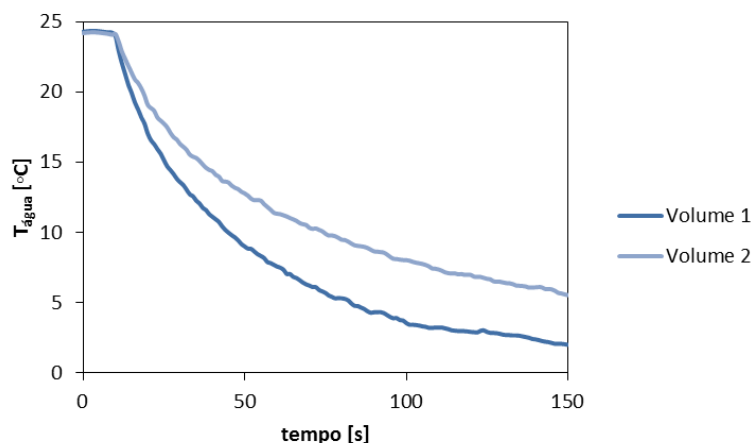


Figura 5.2 Evolução da temperatura da água na câmara grande para dois volumes de água iniciais num sistema não adiabático. Volume1 = 80 ml; Volume2 = 120 ml.

Nos capítulos 2 e 3 foi mencionado que o segundo estágio do processo de vaporização sob baixa pressão tem dois regimes diferentes. O primeiro tem início no *flash point* e é identificado pela forte ebulição no volume de água. O segundo regime inicia-se quando a taxa de redução da pressão diminui, tal como se verifica na Figura 5.3 (Ponto 2).

Este gráfico diz respeito à evolução da pressão total ao longo do tempo, para dois volumes iniciais de água diferentes. Também se pode verificar o primeiro estágio da vaporização sob baixa pressão, que ocorre na zona onde a taxa de redução de pressão é maior, em que a pressão total ainda é superior à pressão de saturação da água e a taxa de evaporação é muito baixa. O ponto onde a estas duas pressões se igualam, também denominado de *flash point*, está assinalado pelo número 1. Neste ponto dá-se o início do segundo estágio, cujo primeiro regime decorre entre os pontos 1 e 2. O segundo regime do segundo estágio do processo de vaporização sob baixa pressão tem origem no ponto 2, onde a taxa de produção de vapor começa a diminuir. Passados alguns instantes verifica-se que a pressão no interior da câmara tende a atingir valores mais constantes, o que significa que a taxa de produção de vapor se equipara com a taxa de vapor que é removido pelo sistema de despressurização.

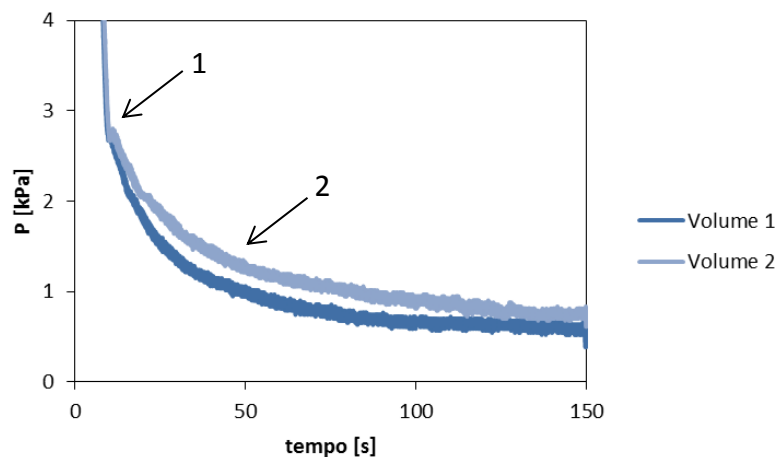


Figura 5.3 Evolução da pressão total da câmara grande para dois volumes de água iniciais num sistema não adiabático. Volume1 = 80 ml; Volume2 = 120 ml.

A seguinte secção está destinada à análise e comparação dos resultados obtidos para os dois sistemas (adiabático e não adiabático).

5.1.3. Comparação dos resultados obtidos no sistema não adiabático com os obtidos no sistema adiabático

Hoje em dia, com o crescimento de várias indústrias e da exigência da sociedade para se obter melhores condições de vida, é necessário ter em atenção diferentes tecnologias e analisar se alterações em certos parâmetros são ou não necessárias para se aperfeiçoar os processos de modo a que tenham um funcionamento rápido, eficiente e sustentável. Neste âmbito, os resultados obtidos nos dois sistemas devem ser comparados.

A Figura 5.4 demonstra a evolução temporal da temperatura da água de um volume de água inicial de 120 ml, para os dois sistemas termodinâmicos (adiabático e não adiabático). Analogamente, a Figura 5.5 é a representação gráfica da evolução da temperatura de 80 ml de água, tanto num sistema adiabático, como num sistema não adiabático. As curvas das duas imagens correspondem a uma série de resultados que são a média dos cinco ensaios que foram realizados para cada sistema termodinâmico, à exceção da curva que traduz a evolução da temperatura de um volume de água inicial de 80 ml, num sistema não adiabático (Figura 5.5), que corresponde à média dos três últimos ensaios. Tal como se pode observar na imagem Figura 5.6, nos ensaios 1 e 2 obtiveram-se resultados com um desvio significativo, pelo que não foram considerados na análise de resultados.

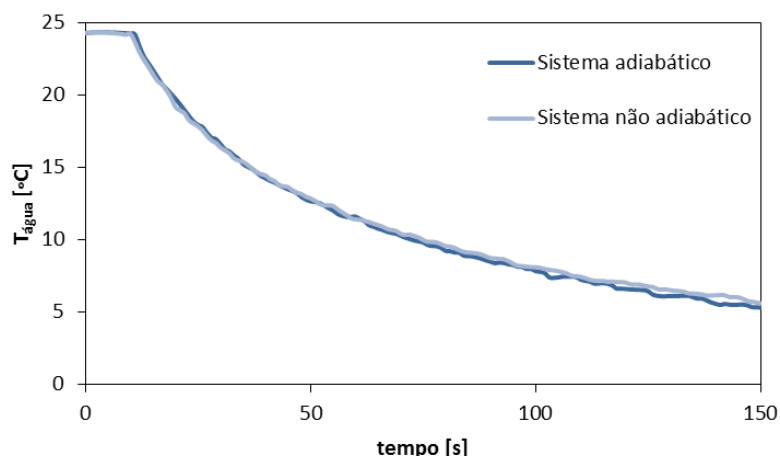


Figura 5.4 Evolução da temperatura da água para um volume de 120 ml, num sistema adiabático e num sistema não adiabático.

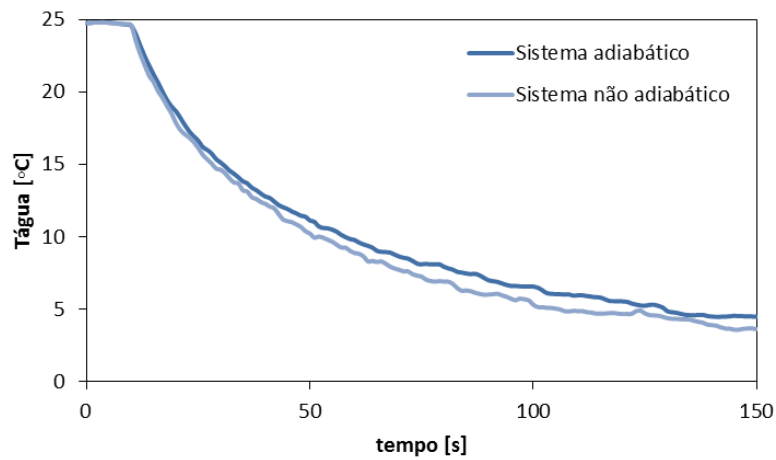


Figura 5.5 Evolução da temperatura da água para um volume de 80 ml, num sistema adiabático e num sistema não adiabático.

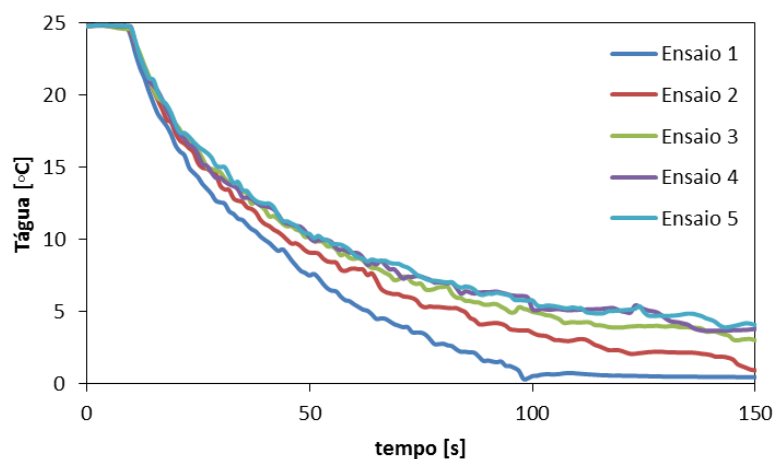


Figura 5.6 Evolução da temperatura da água para um volume de 80 ml, num sistema não adiabático.

O que se constata dos gráficos representados na Figura 5.4 e na Figura 5.5 é que os resultados são inconclusivos. Dado que num sistema não adiabático existem transferências de calor entre a câmara e o meio exterior, seria previsível que a curva da evolução da temperatura do sistema não adiabático estaria acima da curva do sistema adiabático. Contrariamente ao que seria expectável, nenhuma das curvas referentes ao sistema não adiabático está acima da curva relativa ao sistema adiabático, verificando-se mesmo, na Figura 5.5, que a evolução da temperatura da água do sistema adiabático está acima da do sistema não adiabático. Isto significa que o processo experimental não foi bem otimizado, logo as trocas de calor não foram maximizadas. Uma das razões que está na origem deste comportamento foi a escolha do recipiente (garrafa de água de plástico), uma

vez que a área de contacto entre a base da câmara e a da garrafa era muito reduzida, condicionando, assim, as trocas de calor.

A Figura 5.7 representa a evolução temporal da pressão no interior da câmara de vácuo. A análise dos gráficos permite constatar que diferentes ambientes termodinâmicos não têm qualquer influência na evolução da pressão ao longo do tempo, pois todas as curvas apresentam o mesmo comportamento.

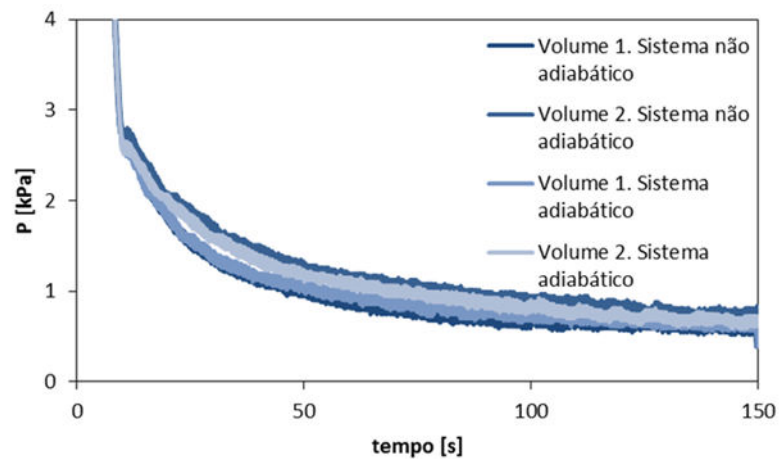


Figura 5.7 Evolução da pressão total na câmara grande para dois volumes de água iniciais para os dois sistemas termodinâmicos. Volume1 = 80 ml; Volume2 = 120 ml.

6. CONCLUSÃO

Hoje em dia, a otimização dos fenómenos de transferência de massa e calor têm sido alvo de um intenso estudo de modo a aumentar a eficiência e rapidez dos processos industriais. Esta dissertação teve como principal foco o estudo da vaporização sob baixa pressão, analisando como é que esta pode otimizar a transferência de massa e calor, permitindo ou não a sua aplicabilidade em várias áreas industriais. Desta forma, este projeto foi dividido em cinco partes, demonstrando em cada uma um estudo específico abordando diferentes aspetos desta temática. O capítulo 1 teve como propósito a introdução desta dissertação onde se expuseram a motivação e a sua estrutura. No segundo capítulo foi apresentado o estado da arte, onde foram referidos trabalhos anteriores de vários autores que abordaram o processo de vaporização sob baixa pressão e também a sua aplicabilidade industrial. Os capítulos 3, 4 e 5 são o cerne deste trabalho, onde foi abordado mais profundamente o processo de vaporização sob baixa pressão. O capítulo 6 está destinado para descrever os factos mais relevantes que concluem esta dissertação.

No capítulo *Vaporização sob baixa pressão – Estudo da evolução da pressão* está apresentado um modelo matemático da previsão da evolução temporal da pressão em duas câmaras de vaporização, cujos resultados concluíram que a taxa de redução da pressão é inferior na câmara grande do que na câmara pequena. Foi realizado um trabalho experimental para servir de suporte ao modelo matemático, e concluiu-se que os resultados experimentais corroboram os resultados teóricos. O estudo experimental é constituído por duas câmaras de vaporização de dimensões distintas, o que deu origem a duas curvas de pressão diferentes, sendo a mais favorável a correspondente à câmara pequena.

No capítulo *Vaporização sob baixa pressão de água livre num sistema adiabático* apresentou-se a metodologia e configuração do trabalho experimental que serviu como base para o estudo da vaporização sob baixa pressão num sistema adiabático. Este estudo foi feito através de duas câmaras com dimensões distintas, e foram utilizados volumes de água iniciais diferentes. Conclui-se que o volume de água inicial tem bastante influência na evolução da temperatura da água e da pressão no interior da câmara, principalmente nos instantes onde ocorre mudança de regime. Confirmou-se que o processo de vaporização sob baixa pressão está dividido em dois regimes, tendo o segundo

regime dois estágios. Concluiu-se que, em termos práticos, a câmara mais favorável seria a mais pequena. A escolha desta câmara implica uma refrigeração mais rápida e com menos perda de massa de água, visto que a taxa de produção de vapor é menor. Estas vantagens são muito importantes, pois são dos principais aspectos a se ter em conta aquando a escolha de um equipamento de rápido arrefecimento.

O capítulo *Vaporização sob baixa pressão de água livre num sistema não adiabático* foi reservado para a apresentação da metodologia e configuração do trabalho experimental que foi desenvolvido para se analisar a evolução temporal da temperatura da água e da pressão quando ocorre vaporização sob baixa pressão num sistema não adiabático. Este estudo constou apenas da câmara de maiores dimensões, e também foram utilizados volumes de água iniciais diferentes. Similarmente ao parágrafo anterior, também se observaram os diferentes regimes e estágios do processo de vaporização sob baixa pressão. Por fim, foi feita uma análise comparativa entre os resultados do SA e os resultados do SNA. Desta comparação constatou-se que os resultados não são conclusivos. Uma forma de resolver este problema seria alterar o procedimento experimental de modo a que as trocas de calor e massa fossem maximizadas, como por exemplo, recorrer a um recipiente de metal, cuja superfície da base esteja totalmente em contacto com a base da câmara. Para além disto, quanto maior for a área de contacto da base do recipiente com a da câmara, melhor otimizados serão os fenómenos de transferência de calor e massa.

Em suma, pode-se concluir que esta dissertação não teve o fim esperado, pois não foi possível retirarem-se muitas conclusões no capítulo 5. No entanto, através do trabalho aqui apresentado pode-se afirmar que a vaporização sob baixa pressão é uma boa opção como processo capaz de otimizar os fenómenos de transferência de calor e massa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Augusto, C. V. M., 2013. “Mathematical and experimental study of low-pressure-vaporization phenomena”. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade de Coimbra.
- Chen, W., 2011. “Thermal analysis on the cooling performance of a wet porous evaporative plate for building”, *Energy Conversion and Management*, 52, 2217-2226.
- Cheng, H. -P, Lin, C. -T., 2007. “The morphological visualization of the water in vacuum cooling and freezing process”, *Journal of Food Engineering*, 78, 569-576.
- Cioulachtjian, S., Launay, S., Boddaert, S., Lallemand, M., 2010. “Experimental investigation of water drop evaporation under moist air or saturated vapour conditions”, *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 859-866.
- Dostal, M., Petera, K., 2004. “Vacuum cooling of liquids: mathematical model”, *Journal of Food Engineering*, 61, 533-539.
- Drummond, L., Sun, D. -W, 2008a. “Temperature evolution of mass losses during immersion vacuum cooling of cooked beef joints – A finite difference model”, *Meat science*, 80, 885-891.
- Drummond, L., Sun, D. -W, 2008b. “Immersion vacuum cooling of cooked beef – Safety and process considerations regarding beef joint size”, *Meat science*, 80, 738-743.
- Erbil, H. Y., 2012. “Evaporation of pure liquid sessile and spherical suspended drops: a review”, *Advances in colloid and interface science*, 170, 67-86.
- Figueiredo, A. R., Costa, J.J., 2004. “Experimental analysis of the use of wet porous media for thermal protection against high intensity heat fluxes”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 11-19.
- Hahne, M., Barthau, G., 2000. “Evaporation waves in flashing processes”, *International Journal of Multiphase flow*, 26, 531-547.
- Houska, M., Podloucky, S., Zitny, R., Gree, R., Sestak, J., Dostal, M., Burfoot, D., 1996. “Mathematical Model of the Vacuum Cooling of Liquids”, *Journal of Food Engineering*, 29, 339-348.
- Kim, J., Huh, C., Kim, M. H., 2007. “On the growth behavior of bubbles during saturated nucleate pool boiling at sub-atmospheric pressure”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 3695-3699.
- Meng, Q., Hu, W., 2005. “Roof cooling effect with humid porous media”, *Energy and Buildings*, 37, 1-9.
- Ozturk, H. M., Ozturk, H. K., 2009. “Effect of pressure on the vacuum cooling of iceberg lettuce”, *International Journal of Refrigeration*, 32, 402-410.
- Peng, X. F., Wang, Z., Lee, D. J., 2002. “Dynamic behavior of bubble interface during boiling”, *Journal of Thermal Science*, 11, 308-319.

- Saury, D. Harmand, S., Siroux, M., 2002. “Experimental study of flash evaporation of a water film”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 3447-3457.
- Saury, D. Harmand, S., Siroux, M., 2005. “Flash evaporation from a water pool: Influence of the liquid height and of the depressurization rate”, *International Journal of Thermal Sciences*, 44, 953-965.
- Wen, D., Wang, B., 2002. “Effects of surface wettability on nucleate pool boiling heat transfer for surfactant solutions”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 1739-1747.
- Zhao, X., Liu, S., Riffat, S. B., 2008. “Comparative study of heat and mass exchanging materials for indirect evaporative cooling systems”, *Building and Environment*, 43, 1902-1911.
- Caldas de Penacova, “Dados logísticos”. Acedido a 1 de junho 2017 em: <http://www.caldasdepenacova.pt/pdf/dados-logisticos.pdf>