



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Engenharia

Estudo experimental da formação de gelo em evaporadores

António Pedro da Fonseca Firme

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

Orientador: Prof. Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva

Covilhã, Outubro de 2015

Agradecimentos

A realização de um trabalho desta índole exige o empenho de um conjunto de individualidades. Pretendo assim expressar um agradecimento profundo aos que de algum modo contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Professor Doutor Pedro Dinho da Silva expresso um sincero agradecimento por toda a compreensão, tempo e ajuda disponibilizada, enaltecendo a confiança no meu trabalho depositada e os inúmeros conhecimentos transmitidos. Ao Professor Doutor Pedro Dinis Gaspar agradeço toda a disponibilidade e dedicação demonstrada.

A todos os meus amigos agradeço a presença e incentivo que, ao longo deste percurso, me foram prestando. Em especial o apoio dos que me são mais próximos que com toda a perseverança, paciência e companheirismo me ajudaram na conclusão desta tão importante etapa da minha vida.

Aos meus pais reconheço o enorme esforço realizado durante os últimos anos e agradeço a educação e os enormes valores transmitidos ao longo de toda a minha vida. À minha avó sempre presente na minha educação agradeço toda a enorme preocupação e dedicação. À minha namorada e irmãos agradeço o enorme apoio prestado em todas as fases da minha vida.

Ao Sr. João Correia, técnico do laboratório de Termodinâmica Aplicada e Transmissão de Calor agradeço todo o tempo dispensado na preparação do protótipo experimental.

Por fim, um agradecimento especial aos professores que ao longo do meu percurso escolar me transmitiram os conhecimentos que hoje possuo. Em especial aos professores do Departamento de Engenharia Eletromecânica que, com todo o seu empenho permitiram a minha atual formação.

Resumo

A eficiência energética assume atualmente uma das maiores preocupações da sociedade, aos pequenos e grandes consumidores de energia exige-se o uso racional e eficiente das fontes de produção existentes, e aos fabricantes de sistemas elétricos exige-se o desenvolvimento e produção de equipamentos energeticamente eficientes. A refrigeração assume uma das frações mais significativas do consumo energético a nível mundial, pelo que o aumento da eficiência dos sistemas de refrigeração é um desafio no seio da engenharia.

A necessidade de obtenção de temperaturas inferiores às existentes no meio ambiente para conforto térmico e conservação de alimentos é atualmente inevitável, assim exige-se que os sistemas de refrigeração, em particular o componente evaporador, operem a temperaturas inferiores às do ponto de congelação da água, facto que inequivocamente propicia a formação de gelo nas suas superfícies. A formação de gelo é prejudicial para o sistema a nível energético e térmico pelo que, a sua atenuação ou remoção é essencial de modo a garantir as condições de funcionamento desejadas. Para determinar as medidas de atenuação da formação de gelo mais eficientes é importante perceber quais os fatores que influenciam a sua formação e qual a sua contribuição individual.

Com o presente trabalho analisou-se a influência da temperatura do ar, humidade do ar e caudal volúmico do ar na formação de gelo num permutador de calor. A acoplação deste componente a uma unidade de tratamento de ar permitiu com o auxílio de uma unidade de ar condicionado e uma unidade de arrefecimento a variação das condições de ensaio. A adequada monitorização de todo o sistema possibilitou a observação minuciosa da formação de gelo nas diversas situações distintas. Adicionalmente realizaram-se dois ensaios com interrupção da unidade de arrefecimento com intuito de observar a eficácia de uma medida de atenuação da formação de gelo inovadora proposta neste trabalho.

Dos resultados obtidos concluiu-se que a formação de gelo acentua-se com o aumento da humidade relativa do ar, com a diminuição da temperatura do ar ou com a diminuição do caudal volúmico do ar. Verificou-se ainda que a existência de um ciclo de descongelação estratégico durante o tempo de funcionamento é benéfico para o sistema de refrigeração em estudo, atenuando significativamente a formação de gelo no permutador de calor.

Palavras-chave

Formação de gelo, sistema de refrigeração, evaporador, permutador de calor

Abstract

The energy efficiency currently takes one of the largest concerns of society, for small and large consumers of energy it's required the rational and efficient use of existing production sources, and to the manufacturers of electrical systems it's required the development and production of energy-efficient equipment. The cooling takes on a significant fraction of the energy consumption in the world, for that the increase of the efficiency of the refrigeration systems is a challenge in engineering.

The need to obtain lower temperatures that exists in the environment for thermal comfort and food preservation is now inevitable, therefore it is required that the cooling systems, in particular the evaporator component, operate at lower temperatures than the water freezing point, a fact which clearly favors the formation of ice on their surfaces. The ice formation is detrimental to the system at thermal and energy level's, reason why its mitigation or removal is essential to ensure the desired operating conditions. In order to determinate the most efficient attenuation measurements in the ice formation it's important to realize which factors influence it's formation and what is their contribution.

The present study examined the influence of air temperature, air humidity and volume flow of air in ice formation in a heat exchanger. The union of this component to an air handler allowed, with the assistance of an air conditioner unit and a cooling unit, the variation in the testing conditions. A proper monitoring of the entire system allowed the thorough observation of the ice formation in distinct situations. Additionally, two trials were conducted with interruption of the cooling unit in order to observe a measure of attenuation in ice formation.

From the results obtained it was concluded that the ice formation is accentuated with the increase of relative air humidity, with a decrease in the air temperature or with decreasing the volume flow of air. It was also found that the existence of a defrosting cycle during the operation time is beneficial for the cooling system in study, significantly reducing the ice formation in the heat exchanger.

Keywords

Ice formation; refrigeration system; evaporator; heat exchanger; Numerical modeling

Índice

Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Índice	v
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tabelas	xi
Nomenclatura	xii
1. Introdução	1
1.1. Perspetiva geral.....	1
1.2. O problema em estudo e a sua relevância	2
1.3. Revisão bibliográfica	3
1.4. Objetivos e contribuição da dissertação	6
1.5. Visão geral e organização da dissertação	7
2. Fundamentos teóricos	8
2.1. Introdução	8
2.2. Sistemas de refrigeração	8
2.2.1. Sistema de compressão de vapor.....	9
2.2.2. Componentes do sistema de refrigeração	11
2.3. Mecanismos da formação de gelo.....	16
2.3.1. Caracterização do gelo e das suas diferentes fases.....	16
2.3.2. Caracterização da formação de gelo	18
2.4. Medidas de atenuação da formação de gelo.....	19
2.4.1. Medidas eficientes de limpeza.....	19

2.4.2.	Medidas de descongelação e drenabilidade	20
2.5.	Métodos de descongelação	20
2.5.1.	Descongelação com interrupção de ciclo	20
2.5.2.	Descongelação por resistência elétrica	20
2.5.3.	Descongelação por gás quente	21
2.5.4.	Descongelação por pulverização de água	21
2.6.	Nota conclusiva	22
3.	Protótipo experimental.....	23
3.1.	Introdução	23
3.2.	Equipamento experimental	23
3.2.1.	Unidade de Ar Condicionado	25
3.2.2.	Unidade de Tratamento de Ar (UTA)	26
3.2.3.	Unidade de Arrefecimento (Chiller)	27
3.3.	Instrumentação	28
3.3.1.	Controlador de temperatura	28
3.3.2.	Higrómetro digital	29
3.3.3.	Cameras de captação de imagem	30
3.3.4.	Termopares.....	32
3.3.5.	Anemómetro de turbina.....	32
3.4.	Nota conclusiva	33
4.	Análise e discussão de resultados	34
4.1.	Procedimento Experimental	34
4.2.	Ensaio realizados	35
4.2.1.	Ensaio de variação de caudal volúmico de ar	36
4.2.2.	Ensaio de variação de humidade	41
4.2.3.	Ensaio de variação de temperatura.....	46
4.2.4.	Ensaio com interrupção do Chiller	50

4.3. Nota conclusiva	56
5. Conclusão	57
5.1. Recapitulação	57
5.2. Sugestão para trabalho futuro.....	58
Referências bibliográfica.....	59

Lista de Figuras

Figura 2.1 Esquema básico do sistema de compressão de vapor	9
Figura 2.2 Diagrama P-h do ciclo teórico de compressão de vapor	10
Figura 2.3 Tipos de compressores: (a) compressor alternativo; (b) compressor centrífugo; Compressor axial; (d) compressor de parafuso (Koelet, 1997).....	11
Figura 2.4 Diferentes tipos de condensadores, (I) Refrigerado a ar; (II) Refrigerado a água; (III) Evaporativo (Jabardo, et al., 2002).....	12
Figura 2.5 Evaporador de sistema de alimentação do tipo seco	14
Figura 2.6 Evaporador de sistema de alimentação do tipo inundado.....	15
Figura 2.7 Diagrama de fases da água	17
Figura 2.8 Representação da molécula de água	17
Figura 2.9 Evolução da formação de gelo ao longo do tempo sobre uma superfície plana (Tao, et al., 1993)	18
Figura 2.10 Sentido de fluxo de ar no evaporador	19
Figura 3.1 Esquema detalhado do Protótipo experimental.	24
Figura 3.2 Unidade de Ar Condicionado A573.....	25
Figura 3.3 Unidade de tratamento de ar ECOAR	27
Figura 3.4 Chiller MTA 031 TAE EVO	28
Figura 3.5 Controlador de temperatura da unidade de AC	29
Figura 3.6 Dispositivo de registo HYDROLOG NT2	30
Figura 3.7 Software de aquisição de temperatura e humidade relativa SL-HW4	30
Figura 3.8 Posição da camera 1 no protótipo experimental	31
Figura 3.9 Posição da camera 2 no protótipo experimental	31
Figura 3.10 Disposição de termopares na superfície frontal e traseira do permutador	32
Figura 3.11 Anemómetro Testo 416	33
Figura 4.1 Temperatura do ar depois de atravessar o permutador ao longo do ciclo de congelação para os diferentes valores de caudal volúmico ensaiados	36
Figura 4.2 Potência térmica ao longo do ciclo de congelação durante os três ensaios de variação de caudal realizados.	37
Figura 4.3 Superfície frontal do permutador de calor nos três ensaios de variação de caudal realizados aos 175 minutos e aos 270 minutos do ciclo de congelação.	38

Figura 4.4 Superfície traseira do permutador de calor nos três ensaios de variação de caudal realizados aos 175 minutos e aos 270 minutos do ciclo de congelação.	39
Figura 4.5 Temperatura na superfície frontal do permutador de calor durante os três ensaios de variação de caudal realizados	40
Figura 4.6 Temperatura na superfície frontal do permutador de calor durante os três ensaios de variação de caudal realizados	40
Figura 4.7 Temperatura do ar depois de atravessa o permutador ao longo do ciclo de congelação durante os ensaios de variação de humidade relativa do ar.....	41
Figura 4.8 Potência térmica transferida ao longo do ciclo de congelação durante os três ensaios de variação de humidade relativa realizados.	42
Figura 4.9 Superfície Frontal e Traseira do permutador de calor nos três ensaios de variação de humidade realizados aos 160 minutos do ciclo de congelamento.	43
Figura 4.10 Superfície Frontal e Traseira do permutador de calor nos três ensaios de variação de humidade realizados no final do ciclo de congelamento.....	44
Figura 4.11 Temperatura na superfície frontal do permutador de calor durante os três ensaios de variação de humidade realizados	45
Figura 4.12 Temperatura na superfície traseira do permutador de calor durante os três ensaios de variação de humidade realizados	45
Figura 4.13 Temperatura do ar depois de atravessar o permutador ao longo do ciclo de congelação durante os três ensaios de variação de temperatura realizados.....	46
Figura 4.14 Potência térmica ao longo do ciclo de congelação durante os três ensaios de variação de temperatura realizados.....	47
Figura 4.15 Superfície Frontal e Traseira do permutador de calor nos três ensaios de variação de temperatura realizados no final do ciclo de congelamento.	48
Figura 4.16 Temperatura na superfície frontal do permutador de calor durante os três ensaios de variação de temperatura realizados	49
Figura 4.17 Temperatura na superfície frontal do permutador de calor durante os três ensaios de variação de humidade realizados	49
Figura 4.18 Temperatura do ar depois do permutador ao longo do ciclo de congelação nos ensaios com e sem interrupção de funcionamento da unidade de arrefecimento.	51
Figura 4.19 Potência térmica transferida pelo permutador de calor ao longo do ciclo de congelação nos ensaios com e sem interrupção de funcionamento da unidade de arrefecimento.	52
Figura 4.20 Superfície frontal do permutador de calor nos dois ensaios realizados no momento de interrupção da unidade de arrefecimento, 180 minutos, e no final de cada ensaio, aos 270 minutos.	53
Figura 4.21 Superfície traseira do permutador de calor nos dois ensaios realizados no momento de interrupção da unidade de arrefecimento, 180 minutos, e no final de cada ensaio, aos 270 minutos.	53
Figura 4.22 Temperatura depois do permutador ao longo do ciclo de congelação nos ensaios com e sem interrupção de funcionamento da unidade de arrefecimento.....	54

Figura 4.23 Potência no permutador de calor ao longo do ciclo de congelação nos ensaios com e sem interrupção de funcionamento da unidade de arrefecimento.....55

Lista de Tabelas

Tabela 2-1 Condutibilidade térmica e densidade do gelo e da geada	17
Tabela 3-1 Características do permutador de calor em estudo	26
Tabela 3-2 Características do Controlador de Temperatura Digi-Sense R/S.....	29
Tabela 4-1 Mapa de ensaios experimentais realizados	35
Tabela 4-2 Mapa de ensaios de interrupção do funcionamento do Chiller	50

Nomenclatura

Geral:

D	Diâmetro do tubo	
F_a	Passo das alhetas	
F_t	Passo transversal dos tubos	
F_l	Passo longitudinal dos tubos	
h_e	Altura do evaporador	
k	Comprimento da alheta	
K	Condutibilidade térmica	W m ⁻¹ K
l	Largura do evaporador	
m	Massa	Kg
N	Número de filas de tubos	
P	Pressão	N/m ²
\dot{Q}_{evap}	Potência frigorífica	W
\dot{Q}_{cond}	Potência transferida pelo condensador	W
t	Tempo	s
T	Temperatura	K
V	Volume	m ³
\dot{W}_{comp}	Potência do compressor	W
w	Número de alhetas	
z	Número de tubos	

Simbologia grega:

φ	Humidade relativa	% HR
ρ	Densidade	Kg m ⁻³

Acrónimos:

<i>DEM</i>	Departamento de Engenharia Eletromecânica
<i>HR</i>	Humidade Relativa
<i>UBI</i>	Universidade da Beira Interior
<i>UTA</i>	Unidade de Tratamento de Ar

1. Introdução

1.1. Perspetiva geral

Na sociedade moderna o consumo de energia de forma irracional e ineficiente suscitou uma colossal preocupação. A importância da preservação do meio ambiente, o crescente aumento do custo da energia e a diminuição da capacidade produtiva, constituem os principais indícios da escassez deste recurso, assim perante as evidências verifica-se a necessidade de uma ampla reestruturação sustentável e responsável nas formas de geração, produção mas fundamentalmente de consumo deste recurso tão valioso. Durante a última década, as economias mais influentes do mundo têm adotado diversos programas de eficiência energética, garantindo assim a sensibilização da população, da indústria e dos governos.

Os programas de eficiência energética, elaborados e adotados pelos maiores consumidores de energia a nível mundial, são bastante objetivos relativamente aos desafios e às estratégias a adotar. A ampla utilização das energias renováveis, por forma a diminuir a dependência mundial dos combustíveis fósseis, e o aumento da eficiência dos equipamentos contribuindo diretamente para um decréscimo das necessidades energéticas, representam os principais desafios dos diferentes programas de eficiência, este último é o fundamento crucial da realização deste presente trabalho.

A utilização dos sistemas de refrigeração tornou-se imprescindível na sociedade atual, como consequência o consumo de energia significativo por parte destes sistemas tornou-se também ele inevitável. Apesar da crescente utilização das energias renováveis, a poluição ambiental é ainda uma realidade, assim a racionalização do consumo de energia através da otimização dos equipamentos representa um dos maiores desafios da engenharia na atualidade, devido à vasta gama de aplicações e elevados consumo elétricos os sistemas de refrigeração têm sido alvo de diversos estudos que visam melhorar a sua eficiência.

Nas diversas aplicações dos sistemas de refrigeração existe a inevitabilidade de obtenção de temperaturas inferiores às disponíveis no ambiente envolvente, a utilização de superfícies alhetadas é a forma mais comumente utilizada para aumentar a transferência de calor por convecção, na refrigeração esta técnica é utilizada particularmente nos evaporadores (Amini, et al., 2014). Nestes equipamentos a formação de gelo é uma realidade, resultante essencialmente do contacto entre o ar húmido proveniente do ambiente envolvente e a superfície fria, na qual a temperatura é inferior à de congelação (Amini, et al., 2014). Este fenómeno prejudica substancialmente o desempenho do permutador, uma vez que provoca um aumento da perda de carga e da resistência térmica do ar (Seker, et al., 2004).

Na atualidade os sistemas de refrigeração são limitados na detecção fiável da formação de gelo. Apesar dos diferentes estudos para criação de métodos de descongelamento eficientes a detecção e posterior atuação é ainda a principal dificuldade, verifica-se na aplicação da maioria dos métodos manuais e automáticos de descongelamento um excesso de ciclos de descongelação, que resulta numa ineficiência desnecessária dos sistemas (Miller, et al., 2003).

Os ganhos térmicos no interior da zona afeta ao evaporador, resultantes da descongelação, revelam-se bastante prejudiciais para o sistema (Miller, et al., 2003). O presente estudo da detecção fiável da formação de gelo associado a alternativas de melhoramento energético dos sistemas de refrigeração representa um desafio real aliado às atuais exigências de eficiência energética dos equipamentos, revelando-se o seu aprofundamento de todo pertinente.

1.2. O problema em estudo e a sua relevância

Ao longo dos últimos anos a procura dos sistemas de refrigeração para os mais diversos fins a que se destinam sofreu um incremento significativo, a conservação de produtos e o conforto térmico são as aplicações de maior relevância nas últimas décadas, verificadas essencialmente devido à necessidade da indústria em aumentar as capacidades produtivas e ao crescimento da qualidade e comodidade da sociedade moderna (Carl, 2005).

A importância que os sistemas de refrigeração representam no consumo de energia elétrica a nível mundial é bastante considerável, pelo que a sua eficiência energética assume uma extrema relevância na atualidade.

Os fatores que influenciam o desempenho dos sistemas de refrigeração são bastante diversificados, no presente trabalho o estudo recairá sobre um problema particular de funcionamento destes sistemas denominado, as consequências da formação de gelo nas superfícies do componente evaporador.

O Evaporador é um permutador de calor que se encontra presente nos diversos sistemas de refrigeração, têm como função primordial a transferência de calor do meio que se pretende arrefecer para o meio ambiente. A temperatura de evaporação é habitualmente inferior a zero, o que induz a formação de gelo sobre a superfície alhetada, que resulta num decréscimo da taxa de transferência de ar e num acréscimo da queda de pressão gerada (Seker, et al., 2004), influenciando negativamente o desempenho do permutador de calor.

1.3. Revisão bibliográfica

Nesta secção apresenta-se a revisão bibliográfica elaborada no âmbito do presente estudo, permitindo assim um adequado enquadramento contextualizado de todo o trabalho realizado com anteriores investigações já realizadas.

Assim, apresentam-se diversos trabalhos de investigação numérica e experimental relativamente ao problema de formação de gelo nos sistemas de refrigeração, mais concretamente em evaporadores. As preocupações de eficiência energética aliadas as necessidades de evolução dos sistemas de refrigeração motivaram a partir da segunda metade do século XX a necessidade de identificar as variáveis pelas quais se rege a formação de gelo e as suas diferentes fases, bem como as alterações de projeto a ser efetuadas para um melhor desempenho dos evaporadores.

Ali and Ismael (2007) investigaram experimentalmente e teoricamente de que forma a formação inicial de uma fina camada de gelo afeta o evaporador em ambiente húmido e em ambiente seco, concluindo que em ambiente seco a condutibilidade do evaporador é 38,8% superior à verificada em ambiente húmido

Amini *et al.* (2014) estudaram experimentalmente o crescimento de gelo num tubo de calor de espessura reduzida por convecção natural. Os ensaios foram realizados para temperaturas do fluido refrigerante de 10, 15, 20 e 30°C e a humidade relativa fixa entre os 50% e 70%. Tendo-se concluído que a formação de gelo depende diretamente do tempo e localização do tubo na instalação, e que por outro lado a espessura da camada de gelo depende diretamente da velocidade, da temperatura e da velocidade do ar. Com este trabalho constatou-se ainda que durante a fase inicial a espessura da camada de gelo cresce rapidamente, sofrendo um decréscimo de crescimento gradual até ao final do ensaio.

Tassou and Datta (1999) quantificaram o efeito das condições psicométricas do ar sobre a formação de gelo em sistemas de refrigeração comercial, analisando os produtos armazenados e a eficiência energética de cada equipamento. Por forma a realizar os ensaios experimentais utilizaram-se dois equipamentos semelhantes, sendo um instalado numa camara com temperatura e humidade controlada e o outro num supermercado. Da análise dos resultados obtidos concluiu-se que a humidade relativa do ar, que geralmente não é controlada, representa a variável com maior efeito sobre o número de ciclos de descongelação necessários, tendo-se percebido que a exigência de um maior número de ciclos de descongelação relaciona-se diretamente com o aumento da humidade relativa do ar a qual o equipamento se encontra sujeito

Piucco (2008) estudou a formação de gelo em sistema de refrigeração domésticos através da consideração das condições psicométricas do ar e da rugosidade da superfície. Com o intuito de realizar ensaios experimentais críveis o autor desenvolveu um aparato experimental com capacidade de observação das diversas fases de formação de gelo, nucleação, crescimento e saturação. No decorrer desta investigação desenvolveu-se ainda um modelo matemático para prever sob que condições pode ocorrer a formação de geada e estimar a espessura que pode ser atingida em função do tempo.

Aljuwayhel (2006) estudou numericamente e experimentalmente a formação de gelo e descongelção por gás quente num evaporador constituído por tubos de aço galvanizado e por alhetas de alumínio, a operar à temperatura de 34°C e utilizando amónia como fluido refrigerante. O investigador procedeu á medição precisa da temperatura, humidade e velocidade do ar na entrada e saída do evaporador, a massa de gelo acumulada foi possível determinada através do balanço de massa. Através dos resultados experimentais e numéricos obtidos identificou-se o momento ideal para o início do ciclo de descongelção, identificado pela equivalência entre as perdas de eficiência do sistema provocadas pela acumulação de gelo e as perdas resultantes do período de descongelção. Da análise de resultados cuidada observou-se que o melhor desempenho térmico do sistema é atingido quando existe uma fina camada de gelo acumulada no evaporador. É ainda de salientar que como resultado deste estudo desenvolveram-se e validaram-se dois modelos matemáticos distintos, um para a etapa da formação e posterior acumulação de gelo e outro para o ciclo de descongelção por gás quente.

Cui et al (2011) aplicaram técnicas de CFD (Computational Fluid Dynamics) para modelar a formação de gelo, empregando um escoamento de ar húmido sobre uma placa plana refrigerada e acoplada no interior de uma camara adiabática. Ao longo desta investigação a camada de gelo foi tratada como sendo um meio poroso no qual a densidade se calculou através da fração volumétrica das partículas de gelo em relação a fase gasosa. Os resultados obtidos para a espessura da camada de gelo foram matematicamente justificados, no entanto as condições dos ensaios realizados diferem das condições as quais normalmente os sistemas de refrigeração estão sujeitos, pelo que foi reconhecido pelos investigadores a necessidade de realizar mais ensaios.

Liu et al (2010) estudaram experimentalmente a atenuação da formação da camada de gelo através da prévia aplicação da pintura anti geada. Assim, como resultado da experiência verificou-se que com o revestimento da superfície metálica o início da formação da camada de gelo foi retardado 15 minutos e a espessura de gelo reduzida em 40%, quando comparada com uma superfície livre de qualquer tipo de revestimento.

Getu and Bansal desenvolveram um estudo experimental sobre o crescimento da camada de gelo em evaporadores do tipo tubo alhetado, como objetivo do trabalho os investigadores definiram o desenvolvimento de correlações empíricas para a determinação das propriedades da espessura da camada de gelo. Para o controlo da temperatura, humidade e caudal de ar foi utilizado um túnel de vento. A espessura da camada de gelo foi observada através de uma camera digital e de um sistema de processamento de imagem, enquanto a massa da camada de gelo foi determinada através da variação de massa entre o início e o final do aparato experimental. Devido às limitações do sistema experimental somente foi possível desenvolver correlações para a fase de nucleação da cama de gelo, empregando um método de regressão multilinear os autores geraram correlações para a espessura, densidade e condutibilidade térmica da camada de gelo.

De uma forma geral, apesar dos inúmeros artigos existentes que retratam a formação de gelo em evaporadores encontram-se diversas inconsistências e dificuldades na padronização e resolução deste problema crucial para a refrigeração. As diferentes correlações empíricas utilizadas pelos modelos, as diferentes condições de trabalho e as diferentes geometrias dos permutadores representam as principais causas deste obstáculo para uma refrigeração mais eficiente.

A revisão bibliográfica evidencia ainda que apesar dos fatores que influenciam a formação de gelo serem adequadamente explorados em superfícies simples como placas planas ou cilindros, e em menor escala, em permutadores de calor do tipo tubo alhetado, a variação e a influência do caudal, temperatura e humidade que ocorre ao longo do processo real de refrigeração ainda não foi minuciosamente explorado.

Assim, a presente tese apresenta um estudo minucioso da formação de gelo num permutador de calor específico acoplado a uma unidade de tratamento de ar, onde a humidade, temperatura e caudal do ar são controláveis através de uma unidade de ar condicionado. A adequada monitorização de todo o sistema permitirá ao longo do estudo uma cuidada deteção da formação de gelo no evaporador para diversas condições de funcionamento. A versatilidade de toda a instalação permitirá ainda a simulação de situações nas quais as condições se aproximam bastante da realidade.

1.4. Objetivos e contribuição da dissertação

Com base nos fatos anteriormente apresentados verifica-se que:

O consumo de energia por parte dos sistemas de refrigeração é bastante elevada, representa parte essencial dos gastos de diversas empresas pelo que o ganho de eficiência por parte destes sistemas é na atualidade um desafio pertinente no seio da engenharia.

Observa-se que o principal problema e o que mais prejudica a eficiência de um sistema de refrigeração é a formação de gelo no componente evaporador. Assim com a análise de todo o processo de formação de gelo para as diversas condições de funcionamento dos sistemas e com o estudo minucioso das soluções de atenuação deste fenómeno pretende-se aumentar a eficiência energética do sistema, a sua capacidade de refrigeração e a vida útil do sistema e dos produtos conservados.

Na pesquisa literária realizada não foram encontrados trabalhos onde se abordasse detalhadamente as diversas condições de funcionamento às quais os sistemas de refrigeração estão sujeitos e a influência das diversas grandezas que ativamente contribuem para a formação de gelo. A utilização de permutadores de calor no estudo da formação de gelo também se encontra pouco explorada, os principais trabalhos foram elaborados em superfícies livres.

Definem-se assim como objetivo principal deste trabalho a investigação detalhada da formação de gelo num permutador de calor. Assim é propósito deste trabalho evidenciar o modo como a temperatura do ar, a humidade relativa do ar e o caudal volúmico escoado através do permutador contribuem para a formação de gelo na sua superfície. Adicionalmente, constitui também objetivo deste trabalho encontrar um procedimento eficaz que possa contribuir de forma decisiva para atenuação da formação de gelo sobre a superfície de um permutador de calor sem comprometer o seu desempenho.

1.5. Visão geral e organização da dissertação

A presente dissertação é composta por cinco capítulos, dos quais consta a organização a seguir descrita.

O capítulo 1 compreende a introdução do presente trabalho. Apresenta-se na sua primeira parte a atual situação energética da sociedade, a ampla utilização dos sistemas de refrigeração, a sua vasta gama de aplicações e o principal problema de eficiência destes sistemas. Define-se ainda neste capítulo o problema em estudo, esclarecendo-se adequadamente a sua relevância. Por último efetua-se a revisão bibliográfica que permite o enquadramento de todo o trabalho e o contextualiza com outros anteriormente realizados.

Inicia-se o capítulo 2 com uma pequena introdução onde se apresentam alguns conceitos relativos à refrigeração. De seguida apresentam-se os diferentes tipos de sistemas de refrigeração e descreve-se detalhadamente o sistema de compressão de vapor bem como os componentes que da sua constituição fazem parte. Segue-se a descrição dos mecanismos de formação de gelo, a caracterização do gelo e das suas diferentes fases, a caracterização da formação de gelo e a descrição das medidas de atenuação da formação de gelo. Por fim são descritos alguns métodos de descongelamento. O capítulo termina com uma pequena nota conclusiva.

O capítulo 3 compreende a descrição de todo o protótipo experimental elaborado e utilizado no âmbito do presente trabalho. Inicia-se com uma introdução geral onde se identificam as unidades que do protótipo experimental fazem parte. De seguida procede-se a uma descrição detalhada de todas as unidades envolvidas no procedimento experimental. Por último descreve-se a instrumentação realizada durante o trabalho experimental.

No capítulo 4 faz-se a descrição do procedimento experimental adotado para o presente estudo e analisam-se os resultados dos ensaios de variação de temperatura do ar, caudal volumico de ar, humidade relativa do ar bem como da interrupção estratégica do funcionamento do chiller.

No capítulo 5 são reconsiderados os objetivos do presente trabalho e faz-se uma análise detalhada de todo o trabalho desenvolvido. Por último ainda neste capítulo são fornecidas indicações de desenvolvimento para trabalho futuro.

2. Fundamentos teóricos

No presente capítulo vão ser apresentados os sistemas de refrigeração mais concretamente o sistema por compressão a vapor, os diversos mecanismos de formação de gelo, as diversas medidas e os diversos dispositivos de deteção e formação de gelo. Apesar do carácter introdutório dos assuntos mencionados, a sua natureza é muito específica e de extrema importância para o trabalho desenvolvido, pretende-se assim estabelecer uma revisão dos principais conceitos relacionados com o caso de estudo deste trabalho.

2.1. Introdução

Para o trabalho desenvolvido, a perceção do conceito de refrigeração e a compreensão dos sistemas subjacentes à mesma é essencial. Por definição a refrigeração é todo o processo de arrefecimento de substâncias sólidas ou fluidas confinadas a um espaço limitado no qual as temperaturas são inferiores às verificadas no ambiente (Dossat, 2008). Para uma substância evaporar é necessário que ocorra transferência de calor durante um determinado tempo, até se atingir a temperatura de evaporação. Este é o princípio básico da refrigeração, para o qual o fornecimento de energia sob a forma de trabalho é uma inevitabilidade.

É de salientar que a refrigeração é uma das principais aplicações da termodinâmica, pelo que a transferência de calor ocorre do meio mais frio para o meio mais quente, e nunca de forma inversa, como aliás rege a 2ª lei da termodinâmica. É assim perceptível que quanto maior a diferença de temperaturas entre os dois meios, maior a transferência de calor, e a eficiência com que esta ocorre é essencial para o adequado desempenho dos sistemas de refrigeração.

2.2. Sistemas de refrigeração

Os sistemas de refrigeração usados na atualidade são os que produzem frio continuamente e que utilizam fluidos frigoríficos em circuito fechado, subdividindo-se em sistemas de compressão de vapor, sistemas de absorção e sistemas de expansão de ar ou gás. Sendo que na maioria das aplicações de produção de frio a nível mundial o sistema por compressão a vapor é destacadamente o mais utilizado (Koelet, 1997) Preferência esta obtida devido à facilidade com que satisfaz as temperaturas padrão da indústria, à grande versatilidade, baixo custo e ótima eficiência energética quando comparado com os outros tipos de sistemas.

2.2.1. Sistema de compressão de vapor

O sistema de compressão de vapor têm múltiplas aplicações, desde os mais pequenos equipamentos doméstico aos maiores equipamentos industriais, este sistema é amplamente utilizado, pelo que será objeto de estudo ao longo deste trabalho. É de referir que independentemente da dimensão deste sistema o uso de pelo menos um compressor, movido a energia elétrica, é indispensável. Através do esquema básico de um sistema de refrigeração por compressão a vapor representado na figura 2.1 é possível ver os principais componentes do sistema, bem como os circuitos de alta e baixa pressão representados pelas cores vermelha e azul respetivamente.

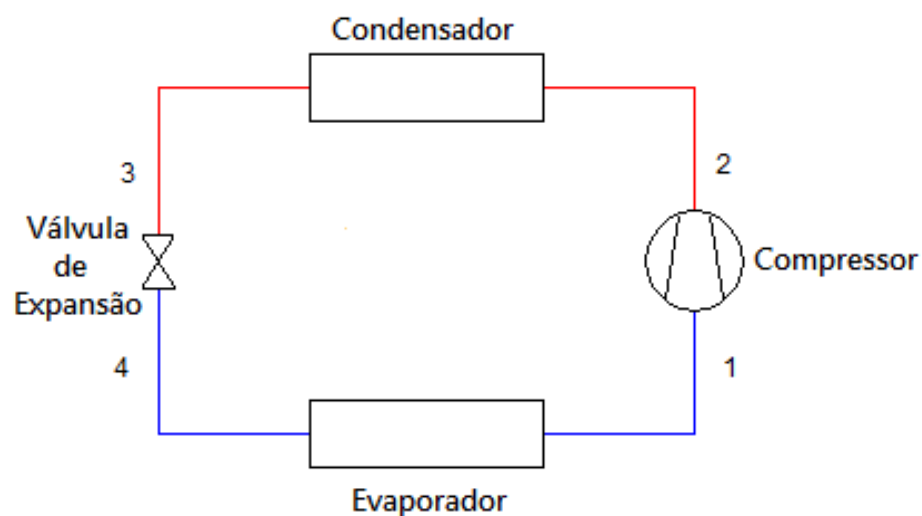


Figura 2.1 Esquema básico do sistema de compressão de vapor

No funcionamento cíclico do sistema de refrigeração de compressão de vapor, o compressor é utilizado para aumentar a pressão de vapor saturado até atingir a pressão de condensação. Depois da compressão ocorre a condensação, fase na qual o vapor sobreaquecido passa pelo condensador, transferindo o calor para o meio exterior e condensando, passando ao estado de líquido saturado. O fluido refrigerante segue depois para a válvula de expansão, onde ocorre um decréscimo de pressão até atingir a pressão de evaporação. Posteriormente e para dar por findado o ciclo, o fluido refrigerante atravessa o evaporador onde absorve o calor do meio a refrigerar e vaporiza, seguindo depois para o compressor para o recomeço de um novo ciclo (Silva, 2004).

Para uma compreensão mais pormenorizada do ciclo de compressão de vapor é importante observar o diagrama P-h do ciclo teórico de compressão de vapor representado na Figura 2.2.

Este diagrama é composto por quatro processos distintos, compressão isentrópica (processo 1-2), arrefecimento e condensação do vapor saturado a pressão constante (processo 2-3), expansão isentálpica até a pressão de evaporação (processo 3-4), e por último evaporação do fluido a pressão e temperatura constante até ao estado de vapor saturado (processo 4-1) (Silva, 2004).

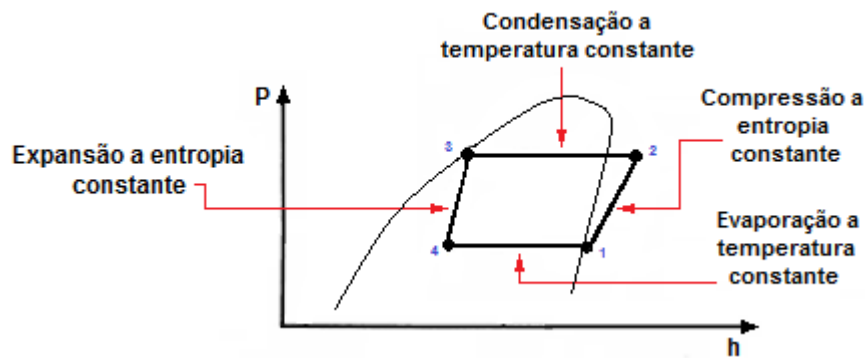


Figura 2.2 Diagrama P-h do ciclo teórico de compressão de vapor

Os principais parâmetros a considerar na caracterização do ciclo teórico de compressão de vapor são:

- \dot{Q}_{evap} – Potência frigorífica
- \dot{Q}_{cond} – Potência transferida pelo condensador
- \dot{W}_{comp} – Potência do compressor

Podendo ser o balanço de energia expresso pela equação $\dot{W}_{comp} + \dot{Q}_{evap} = \dot{Q}_{cond}$ 2.1:

$$\dot{W}_{comp} + \dot{Q}_{evap} = \dot{Q}_{cond} \quad 2.1$$

Relativamente à eficiência do ciclo teórico de compressão de vapor (ε) obtém-se através do quociente entre a potência frigorífica e a potência do compressor, como é apresentado na equação 2.2.

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{W}_{comp}} \quad 2.2$$

2.2.2. Componentes do sistema de refrigeração

As características de cada componente do sistema de refrigeração influencia diretamente a sua capacidade de refrigeração. O ponto de equilíbrio de funcionamento do sistema é dependente essencialmente dos quatro principais componentes: compressor, evaporador, condensador e válvula de expansão, pelo que o estudo das suas características funcionais é de extrema relevância.

2.2.2.1. Compressor

Num sistema de refrigeração o compressor é o componente que mecanicamente exige mais conhecimento e geralmente o que mais energia consome, influenciando diretamente o custo operacional da instalação. Como função este componente é responsável por fornecer um diferencial de pressão que garanta a evaporação do fluido frigorífero a uma temperatura inferior á temperatura de condensação e promover assim a movimentação desse fluido no circuito de refrigeração (Jabardo, et al., 2002). É de salientar que existem quatro tipos de compressores distintos, os alternativos, centrífugos, axiais e de parafuso e encontram-se representados na Figura 2.3.

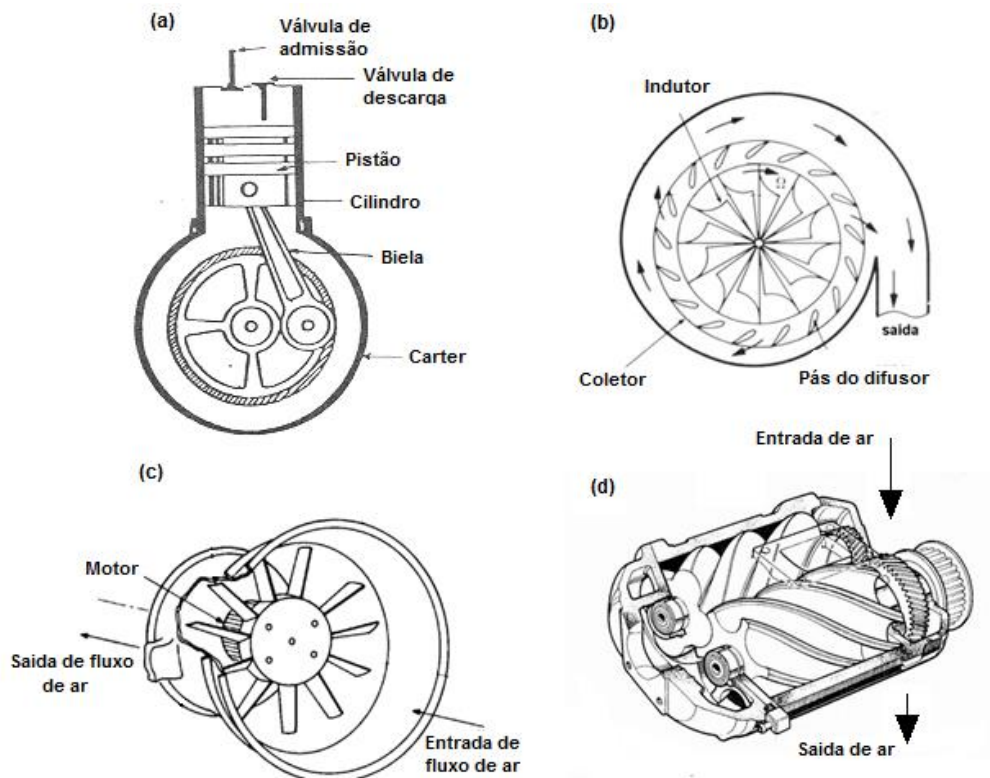


Figura 2.3 Tipos de compressores: (a) compressor alternativo; (b) compressor centrífugo; Compressor axial; (d) compressor de parafuso (Koelet, 1997).

2.2.2.2. Condensador

Este componente promove a transferência de calor entre o fluido frigorígeno e o fluido absorvedor, rejeitando todo o calor do sistema. Na indústria, os condensadores de maior utilidade são os arrefecidos a ar, os condensadores arrefecidos a água e os condensadores evaporativos. Na Figura 2.4 apresentada de seguida é possível observar estes diferentes tipos de condensadores.

Os condensadores arrefecidos a ar são amplamente utilizados em sistemas de refrigeração com potências médias baixas, ou seja entre 3,5 a 352 kW, no entanto nos últimos anos verificou-se a tendência de utilização destes condensadores em instalações de potência um pouco superior, a facilidade de instalação e o reduzido custo de manutenção contribuem para a preferência de uso deste tipo de condensador. Os condensadores arrefecidos a água trabalham com pressões de condensação bastante mais elevadas, favorecendo assim a eficiência do sistema. Todavia os condensadores evaporativos são o método preferencial para a libertação de calor do sistema, contudo as complexas características de funcionamento e a influência de diversos fatores para uma adequada eficiência do sistema limitam as aplicações deste tipo e evaporador.

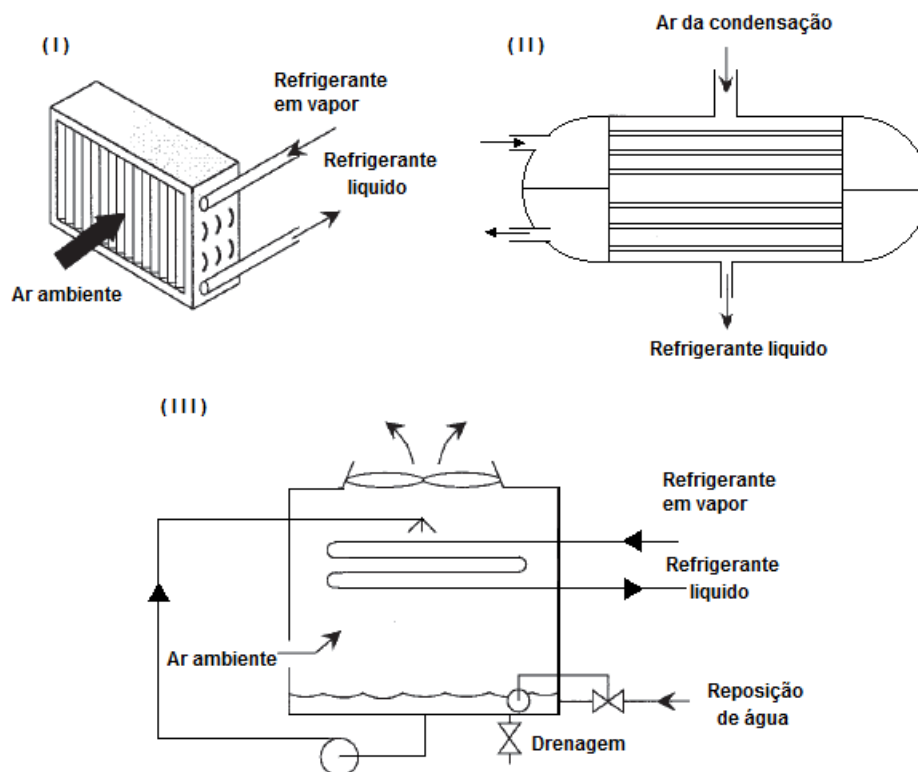


Figura 2.4 Diferentes tipos de condensadores, (I) Refrigeração a ar; (II) Refrigeração a água; (III) Evaporativo (Jabardo, et al., 2002)

Quanto ao processo de condensação do fluido refrigerante aquando a passagem pelo condensador ocorre em três fases distintas. Na primeira fase é retirada energia ao fluido na forma de calor sensível enquanto este se encontra no estado gasoso. Depois de atingida pelo fluido a temperatura de condensação inicia-se a segunda fase do processo, onde ocorre uma perda de calor latente por parte do fluido seguida por uma mudança de fase do estado gasoso para o estado líquido. Na última e terceira fase deste processo a condensação do fluido origina a perda de calor sensível diminuindo assim mais significativamente a temperatura.

2.2.2.3. Válvula de Expansão

O dispositivo de expansão têm como objetivos reduzir a pressão do fluido frigorífero no estado líquido e regular o caudal de fluido frigorífero que entra no evaporador. De acordo com as condições de aplicação existem diversos tipos de dispositivos de expansão que podem ser utilizados. Assim nas aplicações de pequena capacidade utiliza-se geralmente o dispositivo mais simples, o tubo capilar, no qual o fluido frigorífero sofre uma perda de carga resultante do movimento no interior do tubo, quanto a diferença de pressão pode ser obtida através da combinação do diâmetro interno e comprimento do tubo capilar. Quando se trata de sistemas onde a capacidade é superior a 10 kW a utilização de válvulas de expansão termostáticas é preferencial, baseando-se o seu adequado funcionamento na variação de temperatura que ocorre á saída do evaporador, a abertura e fecho das válvulas acontece por forma a permitir que a temperatura seja constante na linha de sucção do compressor, sobreaquecendo o fluido frigorífero (Jabardo, et al., 2002).

As válvulas eletrónicas devido à enorme eficiência na regulação do caudal do fluido frigorífero são os que melhor se adequam em termos funcionais para a maioria das aplicações, no entanto os elevados custos de aquisição limitam significativamente a utilização deste tipo de válvulas.

2.2.2.4. Evaporador

O componente evaporador à semelhança do componente condensador já anteriormente referenciado é um permutador de calor, tem como função primordial a transferência de calor do ambiente refrigerado para o fluido frigorífero circulante. É o local do sistema de refrigeração onde ocorre a mudança de estado do fluido frigorífero, passando do estado líquido para o estado gasoso.

Apesar da simplicidade deste componente a sua importância em qualquer sistema de refrigeração é indiscutível, sendo que qualquer projeto de refrigeração é instalado e operado com o único propósito de retirar calor de uma substancia ou local. Como esse calor tem que ser absorvido pelo evaporador, a eficiência do sistema depende da operação adequada do

mesmo. Os requisitos que devem ser considerados no projeto e seleção de evaporadores são: superfície adequada que permita uma absorção de carga necessária, sem que exista uma diferença muito grande entre o fluido frigorífero e a substância ou local a refrigerar e existência de espaço suficiente para que a circulação do refrigerante ocorra sem que a queda de pressão seja excessiva entre a entrada e a saída (Ferraz, 2008).

Os evaporadores podem ser classificados quanto ao sistema de alimentação em secos ou inundados. Nos evaporadores do tipo seco o fluido frigorífero entra no evaporador, de forma descontínua, por intermédio de uma válvula de expansão termostática, ocorrendo a sua total vaporização e sobreaquecimento resultado do escoamento no interior dos tubos como apresentado na Figura 2.5. O uso deste tipo de evaporadores acontece essencialmente em instalações de capacidades não muito elevadas.

Relativamente aos evaporadores do tipo inundado como representado na Figura 2.6, o líquido, após ser admitido por uma válvula de expansão boia, escoava através dos tubos da serpentina, removendo calor do meio a ser refrigerado. Perante o calor recebido no evaporador, uma parte do fluido frigorífero evapora, formando uma mistura de líquido e vapor encaminhada na totalidade até ao separador de líquido, onde ocorre a separação da fase líquida da fase de vapor. À posteriori o vapor saturado é aspirado pelo compressor enquanto o líquido retorna evaporador quantas vezes o sistema o exigir. Este tipo de evaporadores é utilizado essencialmente em sistemas frigoríficos que utilizam amónia como refrigerante, tem como desvantagens o elevado custo inicial e a necessidade de utilização de grandes quantidades de fluido frigorífero.

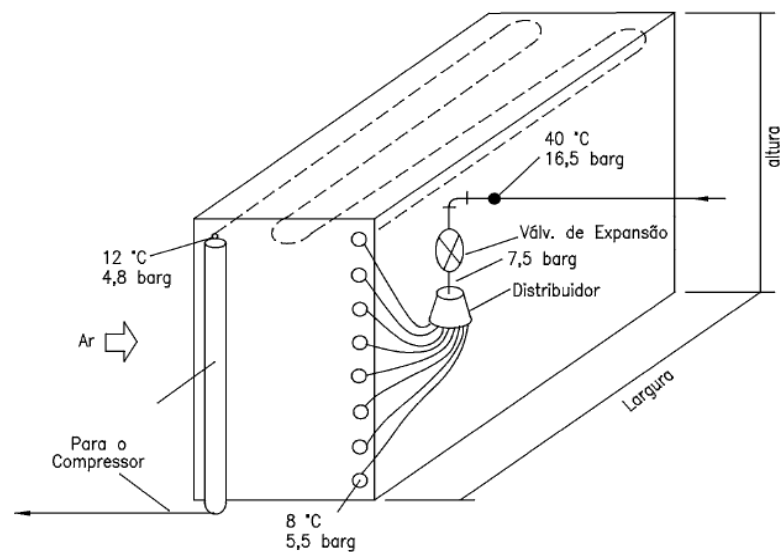


Figura 2.5 Evaporador de sistema de alimentação do tipo seco

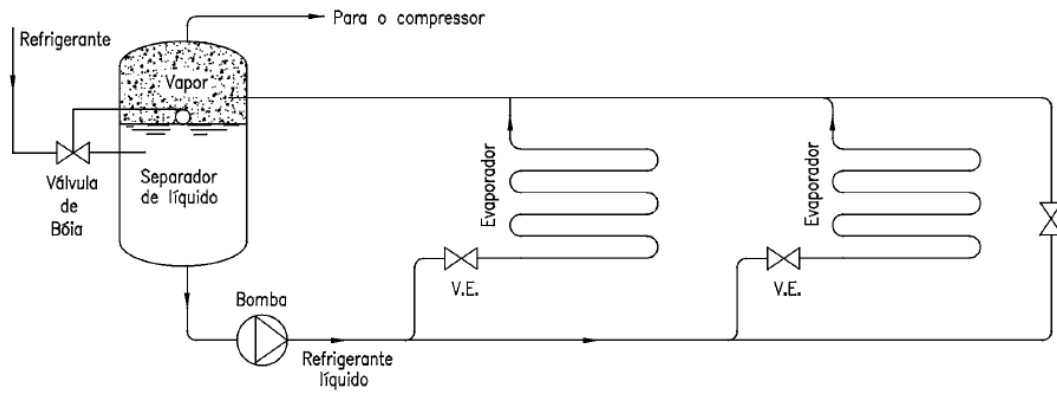


Figura 2.6 Evaporador de sistema de alimentação do tipo inundado

2.3. Mecanismos da formação de gelo

A formação e posterior acumulação de gelo é uma realidade no funcionamento de permutadores de calor, gerando um impacto prejudicial no seu desempenho térmico (Jacobi & Robinson, 2001).

O gelo para uma clara descrição da sua constituição e formação tem que ser caracterizado como uma matriz, constituída por diversas ramificações dos cristais de gelo espacialmente intercaladas por ar húmido. A alta porosidade do gelo e a sua alteração ao longo da camada de gelo dificulta a determinação da espessura exata de gelo. A caracterização da camada de gelo é ainda mais complexa devido a variação contínua durante o processo de formação e a oscilação de temperatura de interface ar-gelo com a posição e tempo. Contudo apesar da dificuldade de modelagem do processo de formação, resultante da variação das propriedades da matriz de gelo, alguns modelos de determinação da formação de gelo foram desenvolvidos por forma a prever os dados experimentais com razoável sucesso.

2.3.1. Caracterização do gelo e das suas diferentes fases

Inicialmente é importante caracterizar o gelo e a geada como termos diferenciados. O gelo é resultado da mudança do estado líquido para o estado gasoso denominada solidificação, por outro lado a geada resulta da sublimação inversa do vapor de água, que se encontra a uma pressão significativamente inferior à pressão de saturação da água na temperatura do ponto triplo. Na

Figura 2.7 representativa das fases da água é possível observar os trajetos A e B correspondentes a formação de gelo e geada respetivamente.

Estruturalmente o gelo e a geada são bastante distintos, os diferentes processos de formação provocam diferenças eloquentes nas propriedades do sólido resultante. O gelo apresenta uma estrutura homogénea bastante mais resistente que a da geada, que por sua vez apresenta uma estrutura porosa com cristais de gelo irregulares envolvidos por pequenas bolsas de ar o que lhe confere pouca resistência. As ordens de grandeza envolvidas na caracterização do gelo e da geada podem ser comparadas na Tabela 2-1 onde se encontram representados os valores de condutibilidade térmica (K) e densidade (ρ).

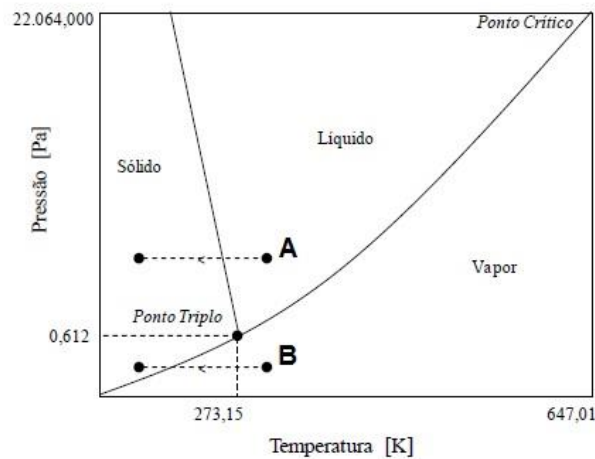


Figura 2.7 Diagrama de fases da água

Tabela 2-1 Condutibilidade térmica e densidade do gelo e da geada

Grandeza	Gelo	Geada
K [W m-1K-1]	2,1	0,2
P [kg m-3]	917	211

A complexidade das estruturas de gelo e geada exige um estudo otimizado das unidades elementares, assim verifica-se a inevitabilidade de observar alguns aspetos relacionados com as moléculas de água e suas características cristalinas. A caracterização da molécula de água é bastante simples, constituída por um átomo de oxigénio e dois átomos de hidrogénio que se repelem $104,5^\circ$ devido a cargas elétricas (Figura 2.8). Possui ainda como potencialidade única a capacidade de se agrupar de forma densa e diversificada com outras moléculas de água consequência da eficaz formação de pontes de hidrogénio.

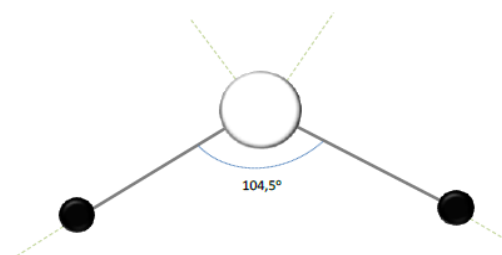


Figura 2.8 Representação da molécula de água

2.3.2. Caracterização da formação de gelo

A formação de gelo ocorre gradualmente de acordo com um processo minucioso e complexo subdividido em três estágios bastante distintos, nucleação, crescimento e saturação.

A primeira fase de formação de gelo denominada nucleação pode ser classificada como homogénea ou heterogénea de acordo com as substâncias úteis conjugadas, a acumulação de substâncias na superfície ocorre inicialmente nesta fase através da condensação até se atingirem as condições de temperatura e humidade admissíveis (Piuco, R O; Hermes, C J; Melo, C; Barbosa, J R; & Duarte, P O, 2007). Resultante dos estudos de processo elaborados conclui-se que a nucleação depende diretamente das aplicações e condições de operação do sistema pelo que é impossível uma adequada padronização da formação. O crescimento corresponde à fase intermédia da formação de gelo, estágio que propicia a ocorrência de problemas suscetíveis de prejudicar a eficiência do sistema e a sua própria integridade, a adesão de novas moléculas ocorre de forma crescente até ao momento em que a quantidade de energia necessária para sustentar o adequado crescimento supera aquela que será necessária para um novo processo de nucleação e inevitável saturação da formação de gelo. Durante a fase de saturação ocorrem sucessivas nucleações sobre a totalidade de superfície livre o que origina o aumento da camada de gelo e o incremento da sua porosidade (Piuco, R O; Hermes, C J; Melo, C; Barbosa, J R; & Duarte, P O, 2007).

No entanto apesar da caracterização da formação de gelo amplamente estudada que pode ser esquematicamente observada na Figura 2.9 para uma superfície plana, a sua elevada complexidade propicia a realização de novos estudos com intuito de observar minuciosamente a formação de gelo para as diversas superfícies e condições de funcionamento dos sistemas.

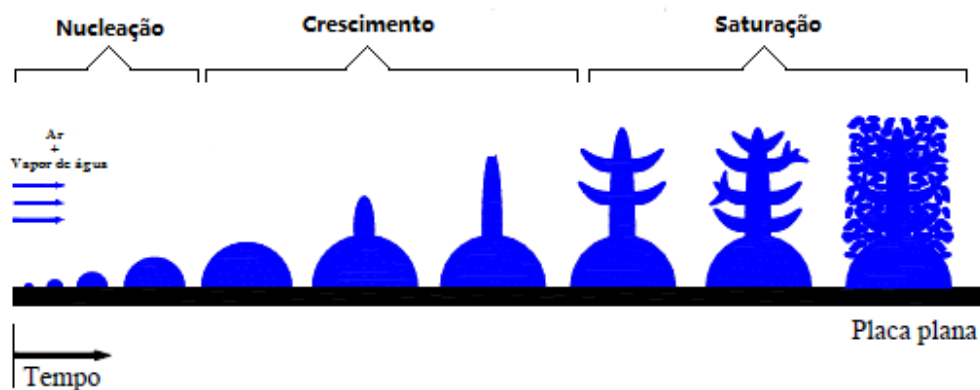


Figura 2.9 Evolução da formação de gelo ao longo do tempo sobre uma superfície plana (Tao, et al., 1993)

2.4. Medidas de atenuação da formação de gelo

Em conformidade com o tempo de funcionamento do sistema, a formação de gelo e posterior acumulação é uma realidade que conseqüentemente afeta as normais capacidade de refrigeração. A produtividade do sistema diminui e os valores de consumo de energia por parte dos componentes serão mais elevado, assim facilmente se constata que na projeção de evaporadores deverão ser consideradas medidas de atenuação da formação de gelo.

A projeção de evaporadores evoluiu significativamente atendendo às elevadas exigências de eficiência energética, assumindo que apesar da importância da detecção da acumulação de gelo a sua atenuação é bastante mais relevante. Assim medidas para minimizar a acumulação de gelo foram cuidadosamente estudadas, observando o evaporador em si mas também o propósito a que se destina e as condições de trabalho que lhe são exigidas.

2.4.1. Medidas eficientes de limpeza

A conceção dos evaporadores deve prever a limpeza eficiente de todo o componente. Como a acumulação de gelo é mais acentuada na superfície frontal, o espaçamento entre alhetas é maior neste local do que na superfície traseira como representado na Figura 2.10, permitindo assim uma limpeza adequada independentemente da taxa superficial de formação de gelo. O espaçamento adequado entre alhetas é fundamental para que o fluxo de ar ou água não seja demasiado restrito, por outro lado os tubos de refrigerante devem ser dispostos num padrão ordenado-quadrado ao invés de um padrão escalonado facilitando assim a inspeção visual.

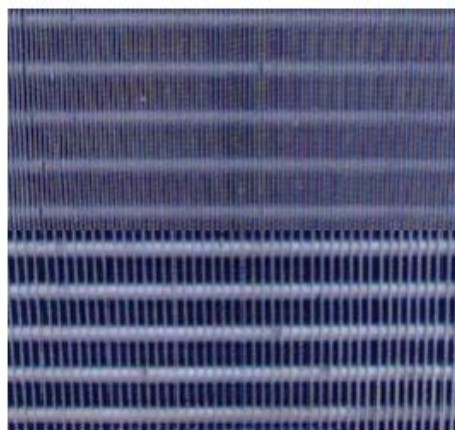


Figura 2.10 Sentido de fluxo de ar no evaporador

2.4.2. Medidas de descongelação e drenabilidade

A drenagem adequada é fundamental na atenuação de formação de gelo no evaporador, a posição deste componente assume a solução mais pertinente para uma boa drenabilidade. Incrementando uma ligeira inclinação no evaporador, na direção de descarga favorece o escoamento de água resultante da descongelação e assim propicia uma atenuação da formação de gelo. Se por outro lado a inclinação acontecer no sentido de carregamento a formação de gelo tende a ser muito mais acentuada e conseqüentemente a queda de pressão muito mais significativa. O método de tratamento da superfície com intuito de favorecer a descongelação assume uma importante consideração de projeto de evaporadores.

2.5. Métodos de descongelação

Os problemas de funcionamento do sistema de refrigeração oriundos da acumulação de gelo no evaporador são inevitáveis, qualquer evaporador tem um limite a partir do qual este fenômeno se revela prejudicial. Para restabelecer as condições de funcionamento adequadas é necessário interromper o normal funcionamento do sistema e estabelecer um modo de descongelação, que permitirá a remoção da camada de gelo acumulada no evaporador (Moerman & Fikkin, 2015). Apesar dos métodos de descongelação apresentados de seguida se mostrarem bastante diversificado, existe a ambição de otimizar a frequência e duração dos ciclos de descongelação por forma a melhorar a eficiência dos ciclos de descongelamento.

2.5.1. Descongelação com interrupção de ciclo

Neste método a circulação do fluido frigorífero é interrompida e a descongelação é auxiliada por ventilação forçada. A aplicação deste método é restrita a sistemas de refrigeração de bebidas e produtos uma vez que o ar utilizado para a descongelação é superior a 0°C. A simplicidade e economia da instalação são as principais vantagens desta ferramenta, no entanto a elevada energia utilizada durante o processo de descongelação apresenta uma enorme desvantagem (Moerman & Fikkin, 2015).

2.5.2. Descongelação por resistência elétrica

Neste mecanismo utiliza-se uma ou mais resistências elétricas aquecidas, apesar de existir a possibilidade de acoplar resistências elétricas ao evaporador quando devidamente inserido no sistema de refrigeração é prudente considerar aquando do projeto de evaporadores a inclusão de resistências devidamente localizadas garantindo assim uma melhor eficiência de descongelação.

Relativamente ao processo, este inicia-se com a interrupção de funcionamento do sistema de refrigeração e da ventilação forçada, ação esta programada por um temporizador regulador

dos ciclos de descongelação. Depois de terminado o ciclo de descongelação o sistema de refrigeração retorna o seu normal funcionamento, no entanto a ventilação forçada permanece interrompida por um curto espaço de tempo garantindo assim que os resíduos da descongelação não influenciarão os produtos e a própria superfície de refrigeração (Moerman & Fikkin, 2015).

2.5.3. Descongelação por gás quente

Este tipo de descongelação é a mais interessante do ponto de vista energético e económico, permite uma redução significativa de tempo e frequência dos ciclos de descongelação, no entanto exige um maior custo inicial e operacional.

Relativamente ao processo, equitativamente ao verificado na descongelação por resistência elétrica, o processo de descongelação inicia-se com a interrupção do funcionamento do sistema de refrigeração e de ventilação por intermédio de um temporizador regulador dos ciclos de descongelação. Posteriormente aplica-se o vapor de descarga do compressor diretamente sobre as superfícies do evaporador o que permite uma descongelação rápida quando comparada com outros métodos, as elevadas pressões de sucção atingidas durante este processo exigem a aplicação de uma válvula de pressão no final de linha de sucção com intuito de proteção do motor do compressor (Silva, 2013). Por fim da mesma forma que na descongelação por resistência elétrica inicia-se o funcionamento do sistema de refrigeração e realiza-se um compasso de espera para iniciar o sistema de ventilação salvaguardando a drenagem de água adequada (Moerman & Fikkin, 2015).

2.5.4. Descongelação por pulverização de água

Este método baseia-se na pulverização de água tratada á temperatura de 18 °C sobre a superfície do evaporador. Apesar de se verificar uma descongelação mais eficaz com temperaturas de água superiores é desaconselhável a sua utilização devido a possível deterioração dos produtos refrigerados. É ainda imprescindível que durante o processo ocorra a total drenagem de água antes do início de funcionamento do sistema de ventilação, anulando assim efeitos retroativos. A principal particularidade dos evaporadores que utilizam esta estratégia de descongelação é o diâmetro considerável das linhas de drenagem (Moerman & Fikkin, 2015).

2.6. Nota conclusiva

Abordou-se neste capítulo os sistemas de refrigeração, em particular o sistema de compressão de vapor e os componentes que deste sistema são parte integrante. Foram descritos os mecanismos de formação de gelo e especificamente caracterizado o gelo e as suas diferentes fases. Foram apresentadas as medidas de atenuação da formação de gelo adotadas em projeto de permutadores de calor. Por último foram abordados neste capítulo os métodos de descongelamento existentes em sistemas de refrigeração indústrias e domésticos.

No capítulo que se segue far-se-á a apresentação da instalação experimental que suporta o presente estudo.

3. Protótipo experimental

Neste capítulo, o protótipo experimental utilizado para a realização deste trabalho irá ser detalhadamente apresentado, a monitorização do sistema que possibilitou o estudo detalhado da formação de gelo será caracterizada e as incertezas de medição associadas serão devidamente descritas.

3.1. Introdução

O protótipo experimental utilizado é composto por uma unidade de ar condicionado com função de controlo da humidade e temperatura antes do permutador em estudo, uma unidade de tratamento de ar (UTA), que possibilita o controlo de caudal antes do permutador e um chiller como unidade de arrefecimento para arrefecer a mistura de água e glicol que circula no permutador de calor em estudo. A instrumentação de todo o protótipo experimental foi cuidadosamente analisada e implementada sendo a descrição de todos os componentes utilizados detalhadamente referida no subcapítulo 3.3.

3.2. Equipamento experimental

Os componentes e equipamentos que da instalação experimental deste estudo fazem parte encontram-se presentes no laboratório de Transmissão de Calor e Termodinâmica Aplicada da UBI e são devidamente caracterizados de seguida. A Figura 3.1 permite uma observação esquemática de todo o protótipo experimental utilizado no presente trabalho.

Esquema do Protótipo experimental

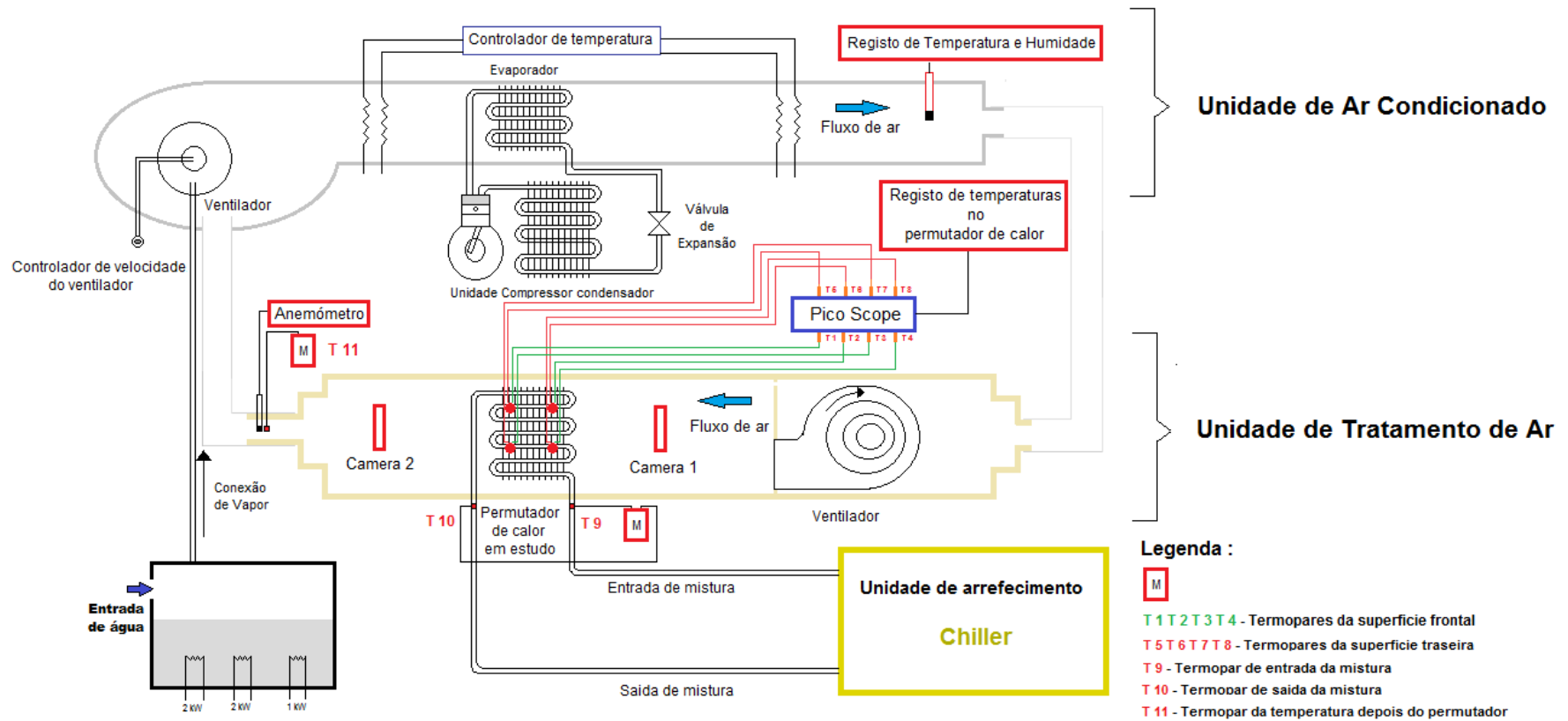


Figura 3.1 Esquema detalhado do Protótipo experimental.

3.2.1. Unidade de Ar Condicionado

As condições de humidade e temperatura antes do permutador foram asseguradas pela unidade de condicionamento de ar, perante a utilização das secções de pré-aquecimento e de arrefecimento/desumidificação. De acordo com as condições de humidade e temperatura pretendidas procedeu-se ao acionamento das potências de pré-aquecimento, com uma potência eléctrica total de 2×1 kW. Das resistências de reaquecimento, com uma potência eléctrica total de $2 \times 0,5$ kW, uma delas foi ligada em série a um controlador de temperatura Digi-Sense Temperature Controller R/S, que potenciou a regulação da temperatura de forma fiável antes do permutador em estudo.

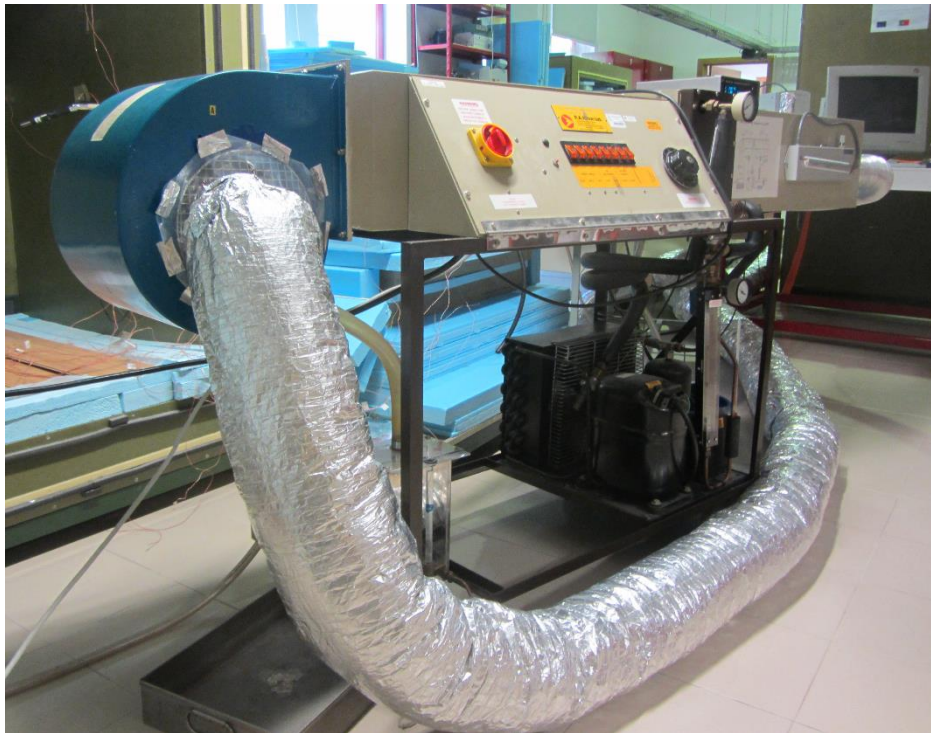


Figura 3.2 Unidade de Ar Condicionado A573

3.2.2. Unidade de Tratamento de Ar (UTA)

A Unidade de tratamento de ar utilizada corresponde a um equipamento comercial que foi preparado no laboratório de transmissão de calor de modo a permitir uma diversidade de particularidades que para este estudo não foram utilizadas. Assim, o sistema de aquecimento e humidificação foram desativados, tendo sido apenas utilizada a função de ventilação com velocidade variável bem como o permutador acoplado nesta unidade. O primeiro com o intuito de regular o caudal no interior da UTA e o segundo como o objeto de estudo deste trabalho. A caracterização pormenorizada do permutador de calor encontra-se detalhada na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 Características do permutador de calor em estudo

Características do permutador de calor	
Número de alhetas (w)	163
Número de tubos (z)	50
Diâmetro do tubo (D)	0,0139 m
Espessura de alheta (δ_a)	0,0002 m
Comprimento da alheta (k)	0,127 m
Passo das alhetas (F_a)	0,00311 m
Passo transversal dos tubos (F_t)	0,0243 m
Passo longitudinal dos tubos (F_l)	0,0224 m
Largura do evaporador (l)	0,540 m
Altura do evaporador (h_e)	0,655 m
Número de filas de tubos (N)	3



Figura 3.3 Unidade de tratamento de ar ECOAR

3.2.3. Unidade de Arrefecimento (Chiller)

A unidade de arrefecimento da mistura água e glicol, denominada Chiller, utilizada na instalação experimental corresponde ao modelo 031 da série TAE EVO da marca MTA. Na sua constituição combina os componentes de um sistema de arrefecimento por compressão a vapor, ou seja, um compressor, um condensador, uma válvula de expansão e um evaporador. A caracterização de cada componente é dada a seguir.

O compressor é do tipo hermético, tem como função primordial comprimir o fluido refrigerante através da variação do volume numa câmara de compressão. O condensador é do tipo compacto situa-se apenas de um dos lados da máquina, reduzindo assim o espaço necessário para a operação da mesma. O evaporador é do tipo tubo-alhetado, e situa-se no interior do depósito de acumulação da mistura água-glicol. Os tubos do evaporador são em cobre e as alhetas em alumínio. O fluido refrigerante flui no interior dos tubos, enquanto a mistura circula por fora a uma determinada velocidade, de forma a garantir baixas perdas de carga. Este componente encontra-se protegido contra a congelação por intermédio da função anti gelo da unidade de controlo da máquina, através do controlo da temperatura da água à saída do evaporador.

O chiller é ainda constituído por outros elementos importantes para o seu bom funcionamento como sejam: ventilador, bomba de circulação, unidade de controlo, filtro desidratador, manómetros de gás para alta e baixa pressão e válvula de expansão termostática com compensação externa.



Figura 3.4 Chiller MTA 031 TAE EVO

3.3. Instrumentação

Por forma a obter uma maior fiabilidade e precisão de estudo, foram cuidadosamente integrados no protótipo experimental diversos instrumentos de medição, garantindo assim uma uniformidade de resultados em todos os ensaios realizados. A caracterização de cada um dos aparelhos de medição bem como a sua função essencial é inevitável para o enriquecimento deste trabalho.

3.3.1. Controlador de temperatura

Para controlar a temperatura oriunda da unidade de Ar Condicionado utilizou-se um controlador de temperatura com vários modos de controlo on/off baseados no controlo sofisticado PID, denominado Digi-Sense Temperature Controller R/S este aparelho devido à sua facilidade de utilização e fiabilidade permitiu um controlo preciso da temperatura à saída da unidade de AR Condicionado, que com o auxílio do registador de temperatura e humidade descrito de seguida se verificou corresponder à temperatura à qual o permutador de calor em estudo estaria sujeito. As restantes características deste controlador encontram-se apresentadas na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 Características do Controlador de Temperatura Digi-Sense R/S

Digi-Sense Temperature Controller R/S	
Saída de Controlo 1	115/230 VCA 15 A Max
Saída de Controlo 2	230 VAC 2 A Max
Saída de Comunicação	RS-232
Temperatura mínima	0°C
Temperatura máxima	40°C
Erro (<100°C)	±0,1 % da leitura



Figura 3.5 Controlador de temperatura da unidade de AC

3.3.2. Higrómetro digital

A humidade relativa do ar antes do permutador de calor em estudo foi registada através da utilização do higrómetro HYDROLOG NT2 (ver figura 3.6). Este equipamento permite medir também a temperatura do ar e apresenta uma precisão de $\pm 0,1\%$ de leitura e $\pm 0,4$ °C para temperaturas superiores a 100 °C e $\pm 0,1\%$ de leitura e ± 1 °C para temperaturas inferiores a 100 °C, e $\pm 0,1\%$ de leitura e 0,2 %HR na medição da humidade relativa. O software SL-HW4 deste dispositivo (figura 3.7) e a sua ligação a um computador pessoal permitiu a recolha da temperatura e da humidade relativa antes do permutador em estudo minuto a minuto em todos os ensaios realizados.



Figura 3.6 Dispositivo de registo HYDROLOG NT2

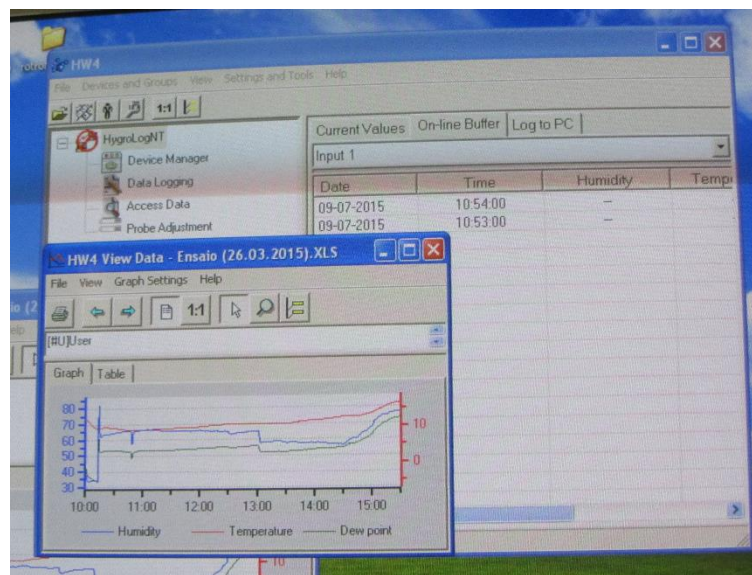


Figura 3.7 Software de aquisição de temperatura e humidade relativa SL-HW4

3.3.3. Cameras de captação de imagem

Instalaram-se estrategicamente duas cameras fotográficas com intuito de visualizar a superfície frontal (camera 1) e traseira (camera 2) do permutador em estudo durante todo o ensaio. Por forma a facilitar a aquisição de imagem adotou-se o software Astra Image Webcam Video Grabber que possibilitou a captação e posterior armazenamento computacional de fotos a cada cinco minutos de ensaio.



Figura 3.8 Posição da camera 1 no protótipo experimental



Figura 3.9 Posição da camera 2 no protótipo experimental

3.3.4. Termopares

Ao longo da instalação experimental instalaram-se onze termopares tipo T, oito dos quais no permutador de calor em estudo, quatro na superfície frontal e quatro na superfície traseira devidamente alinhados como representado na Figura 3.10. O registo e aquisição das temperaturas destes oito dispositivos foi efetuado com o auxílio do equipamento Pico TC-08 ligado a um computador pessoal. A precisão na medição da temperatura através deste equipamento foi de $\pm 0,5$ °C. Dos restantes três termopares, dois foram utilizados no registo da temperatura de entrada e saída da mistura de água e glicol a circular no permutador de calor em estudo e o terceiro aplicado no registo da temperatura depois do permutador, os dados destes três termopares ocorreu de forma manual através da utilização do equipamento FLUKE 54II que possibilita a medição da temperatura com uma precisão de ± 1 °C.

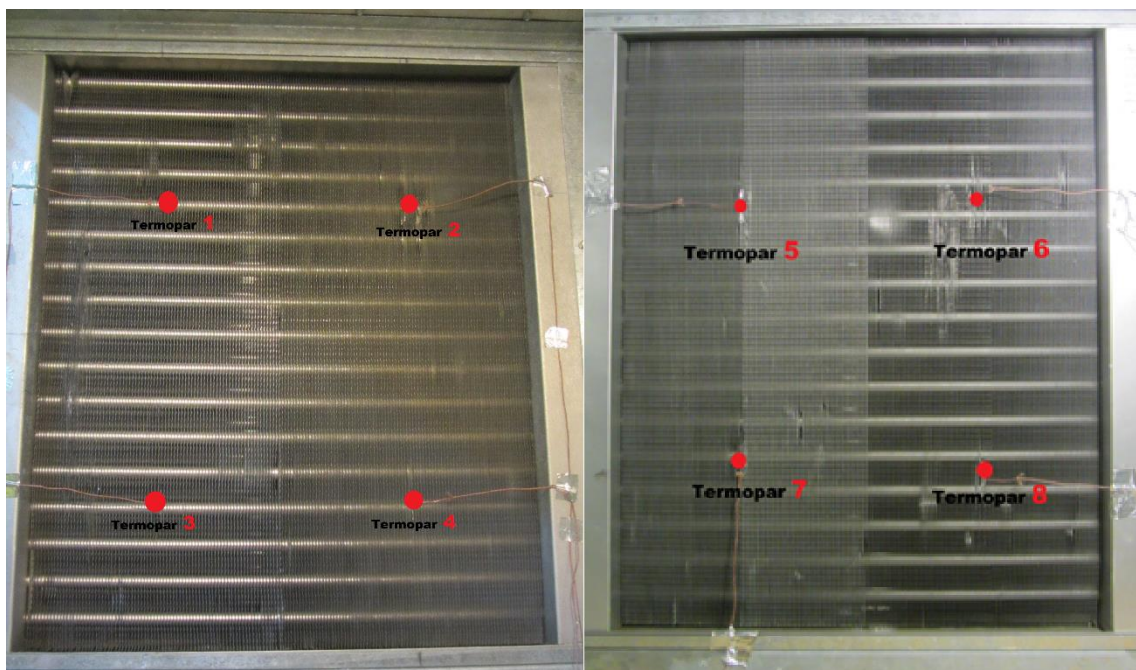


Figura 3.10 Disposição de termopares na superfície frontal e traseira do permutador

3.3.5. Anemómetro de turbina

Para a determinação do fluxo depois do permutador de calor em estudo utilizou-se o anemómetro de turbina TESTO 416, que permite a medição da velocidade do escoamento de ar com uma precisão de 0,2 m/s. Este equipamento permite introduzir a área da conduta onde ocorre a medição e desta forma avaliar o caudal volúmico de ar na instalação, facilitando a aquisição deste dado imprescindível para o estudo da formação de gelo. A figura 3.11 mostra este dispositivo sendo possível visualizar a ligação entre o suporte da turbina e o sistema de aquisição.



Figura 3.11 Anemômetro Testo 416

3.4. Nota conclusiva

No capítulo que agora termina caracterizou-se a instalação experimental que suportou os estudos do presente trabalho. Na parte inicial do capítulo procedeu-se á esquematização de toda a instalação, simultaneamente, referindo o material utilizado e a monitorização utilizada. Por fim, descreveram-se detalhadamente as três unidades que do protótipo experimental fazem parte, bem como os instrumentos de medição utilizados na recolha dos resultados experimentais.

No capítulo que se segue apresentar-se-ão os resultados experimentais obtido depois de uma cuidada análise. Para cada ensaio discutem-se detalhadamente os resultados, retirando as ilações particulares devidas.

4. Análise e discussão de resultados

Neste capítulo, são apresentados os diversos resultados experimentais obtidos de acordo com as condições de operação impostas ao sistema. A análise cuidada dos resultados permitiu identificar a influência da variação do caudal, da humidade e da temperatura do ar na formação de gelo no permutador de calor em estudo. A temperatura depois do permutador, representativa da temperatura á qual os produtos estariam sujeitos numa situação real de refrigeração foi cuidadosamente observada, salvaguardando as condições de conservação desejáveis. Adicionalmente realizaram-se dois ensaios experimentais com interrupção de funcionamento do Chiller, apresentados também neste capítulo permitiram retirar algumas ilações sobre uma possível estratégia a adotar por forma a atenuar a formação de gelo no permutador de calor.

4.1. Procedimento Experimental

Os ensaios foram realizados seguindo um procedimento operacional estruturado em diversas etapas como a seguir se descreve.

Na primeira etapa aciona-se a unidade de ar condicionado e o ventilador acoplado à unidade de tratamento de ar com o intuito de estabilizar o escoamento de ar e assim garantir as condições operacionais desejadas.

Na segunda etapa inicia-se o ensaio experimental com o acionamento da recolha de dados automática e com o início de funcionamento da unidade de arrefecimento. Procede-se ainda nesta etapa ao início da recolha manual de dados, temperatura depois do permutador e caudal volúmico a cada cinco minutos de ensaio.

Na terceira etapa procede-se à interrupção da unidade de arrefecimento aos 270 minutos de ensaio, momento determinado para o fim do ciclo de congelação de acordo com o observado em estudos preliminares.

Na quarta etapa desligam-se as duas unidades ainda em funcionamento e dá-se por concluído o ensaio experimental.

É de salientar que nos dois ensaios com interrupção da unidade de arrefecimento ocorre uma etapa intermédia onde o chiller é desligado durante três minutos.

4.2. Ensaio realizados

Na Tabela 4-1 é possível observar o conjunto de ensaios experimentais realizados, bem como os valores impostos para as grandezas caudal volúmico, humidade relativa e temperatura do ar em cada um. Os ensaios experimentais decorreram entre os meses de Abril e Junho do corrente ano.

Tabela 4-1 Mapa de ensaios experimentais realizados

Tipo de Ensaio	Ensaio	Caudal (m ³ /h)	Humidade (%HR)	Temperatura (°C)
Varição de Caudal	A	123	63	12
	B	165	63	12
	C	236	63	12
Varição de Humidade	A	128	85	7
	B	128	63	7
	C	128	42	7
Varição de Temperatura	A	128	63	11
	B	128	63	7
	C	128	63	3
Interrupção do Chiller	A	128	63	7
	B	128	63	3

4.2.1. Ensaios de variação de caudal volúmico de ar

Com intuito de observar a influência da variação do caudal de ar na formação de gelo no permutador em estudo realizaram-se três ensaios experimentais, nos quais foram fixadas as grandezas temperatura e humidade do ar e se procedeu à variação do caudal volúmico de ar para valores de 123, 165 e 236 m³/h. Através da recolha minuciosa de dados durante os ensaios realizados e posterior tratamento é possível retirar algumas ilações as quais serão apresentadas abaixo.

Inicialmente é importante observar as principais alterações que ocorrem no permutador em estudo. São assim apresentados graficamente nas figuras 4.1 e 4.2, respetivamente, a evolução da temperatura do ar depois de passar no permutador e a evolução da potência térmica ao longo do ciclo de descongelação.

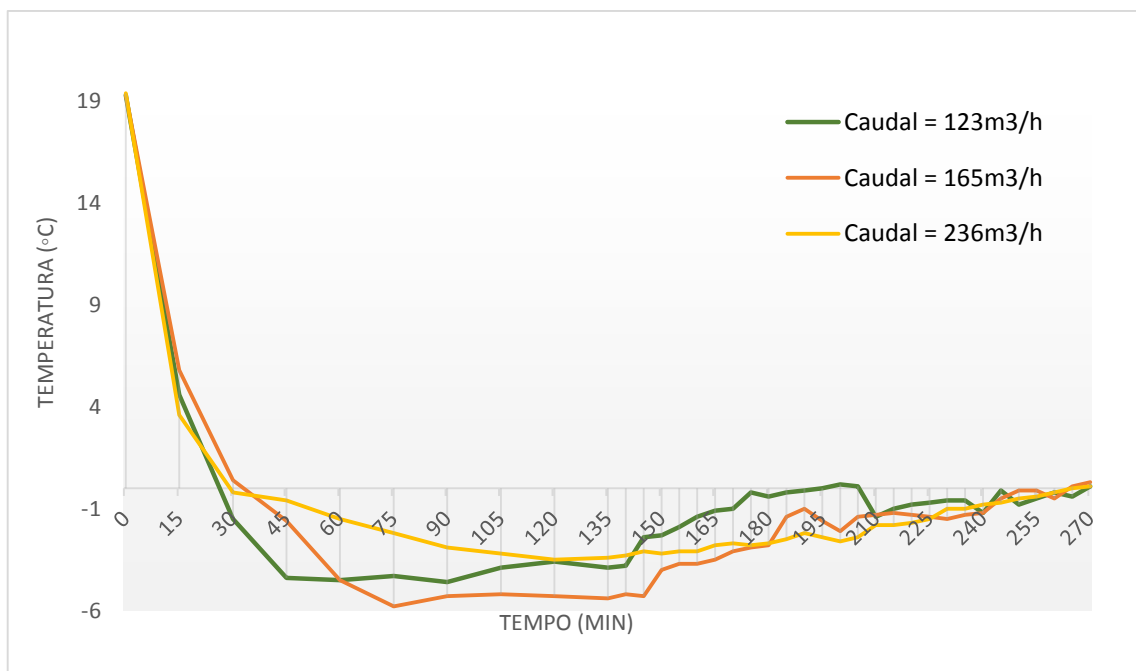


Figura 4.1 Temperatura do ar depois de atravessar o permutador ao longo do ciclo de congelação para os diferentes valores de caudal volúmico ensaiados

Deste primeiro gráfico acima apresentado observa-se que, como seria de esperar, com o aumento do caudal volúmico a temperatura do ar que atravessa o permutador aumenta. O aumento considerável de temperatura do ar nos ensaios de menor caudal volúmico indicia a formação de gelo na superfície do permutador e conseqüentemente problemas de eficiência no sistema de refrigeração.

No entanto é ainda possível observar que no final dos 270 minutos, período correspondente ao ciclo de congelação, nos três ensaios realizados a temperatura do permutador é quase positiva, pelo que se prevê que com uma extensão do tempo de ensaio se verificaria notadamente a perda de eficiência do sistema e por conseguinte se comprovava as consequências graves da formação de gelo no sistema de refrigeração e que propiciam a deterioração dos produtos.

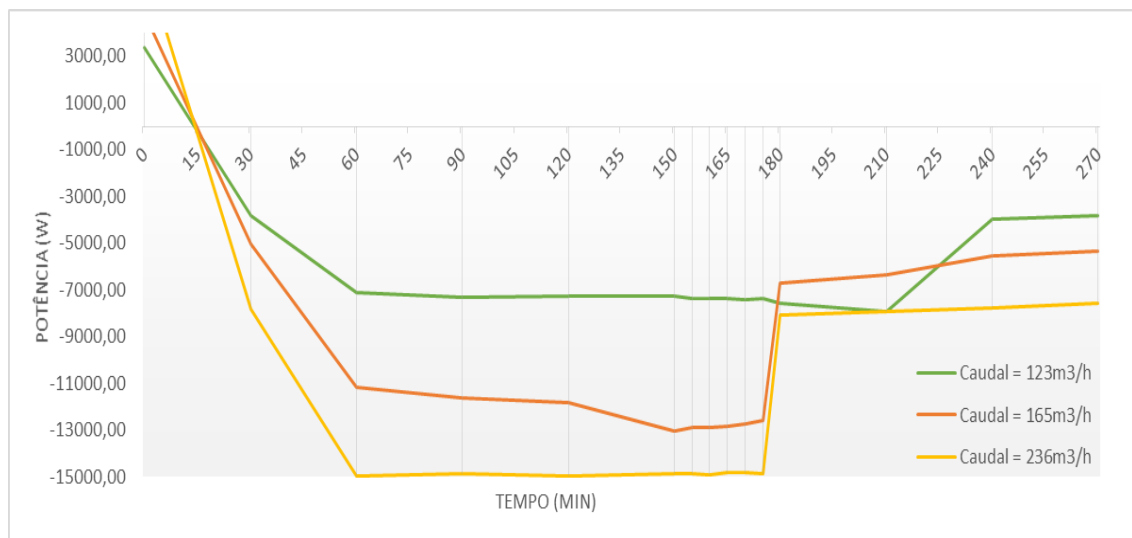


Figura 4.2 Potência térmica ao longo do ciclo de congelação durante os três ensaios de variação de caudal realizados.

Observando o gráfico correspondente à potência térmica (figura 4.2) nos três ensaios realizados, percebe-se que no ensaio de menor caudal o pouco fluxo de ar a passar no permutador de calor é insuficiente para perceber o momento em que a formação de gelo no permutador de calor se torna prejudicial para o adequado funcionamento do sistema de refrigeração em estudo.

Contudo analisando a perda de potência térmica nos outros dois ensaios realizados, apura-se que aos 175 minutos do ciclo de congelação o sistema de refrigeração em estudo é claramente afetado. Ocorrendo uma considerável perda de potência que elucida para o momento a partir do qual a formação de gelo no permutador de calor prejudica a eficiência do sistema de refrigeração detalhadamente estudado.

Assim é interessante observar visualmente o estado do permutador de calor no ponto crítico determinado e no final do ciclo de congelamento para os três ensaios realizados. Na Figura 4.3 é apresentada a superfície frontal do permutador de calor aos 175 minutos e aos 270

minutos de cada ensaio realizado. A superfície traseira para os mesmos momentos do ciclo de congelação é igualmente apresentada na Figura 4.4.

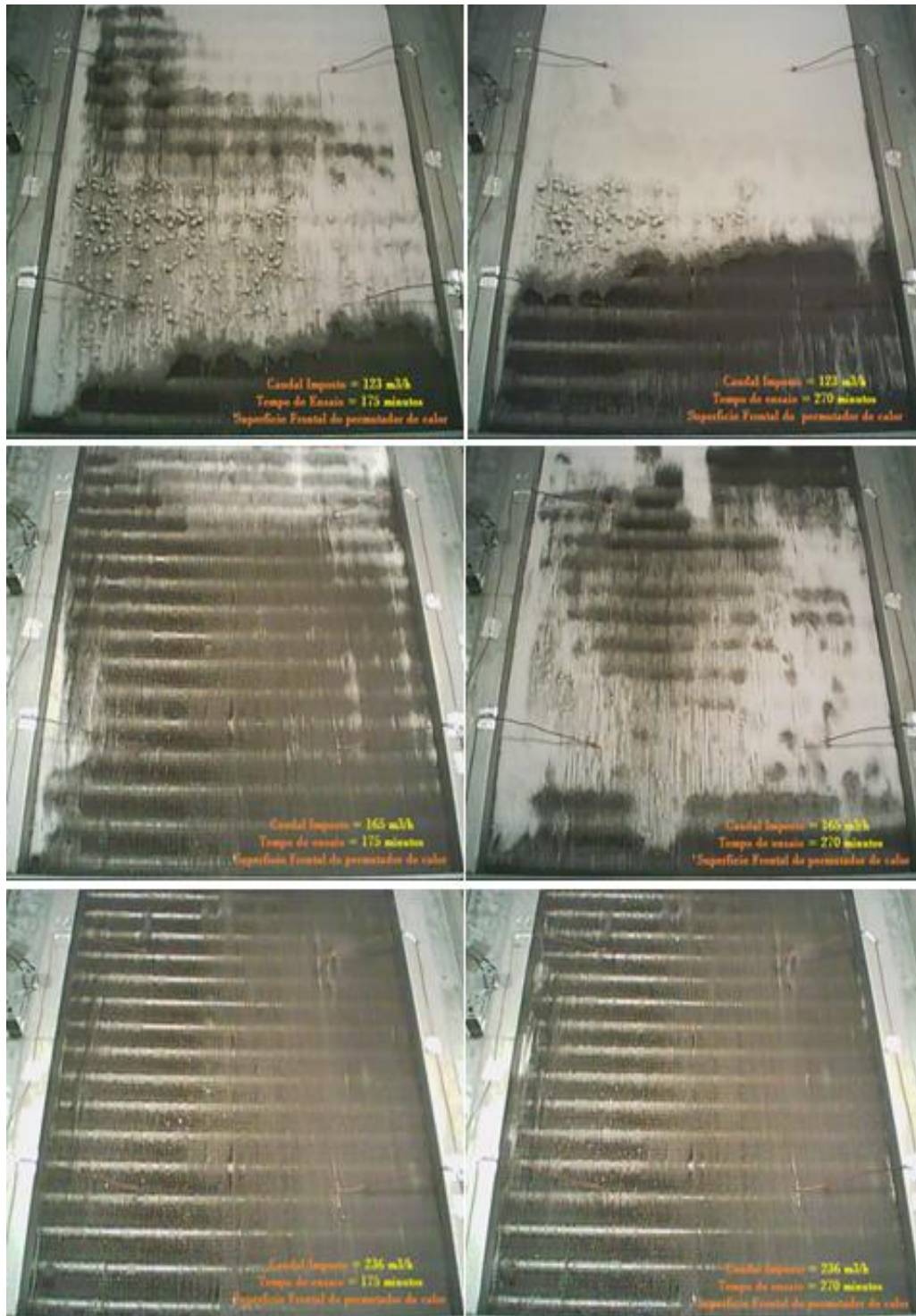


Figura 4.3 Superfície frontal do permutador de calor nos três ensaios de variação de caudal realizados aos 175 minutos e aos 270 minutos do ciclo de congelação.

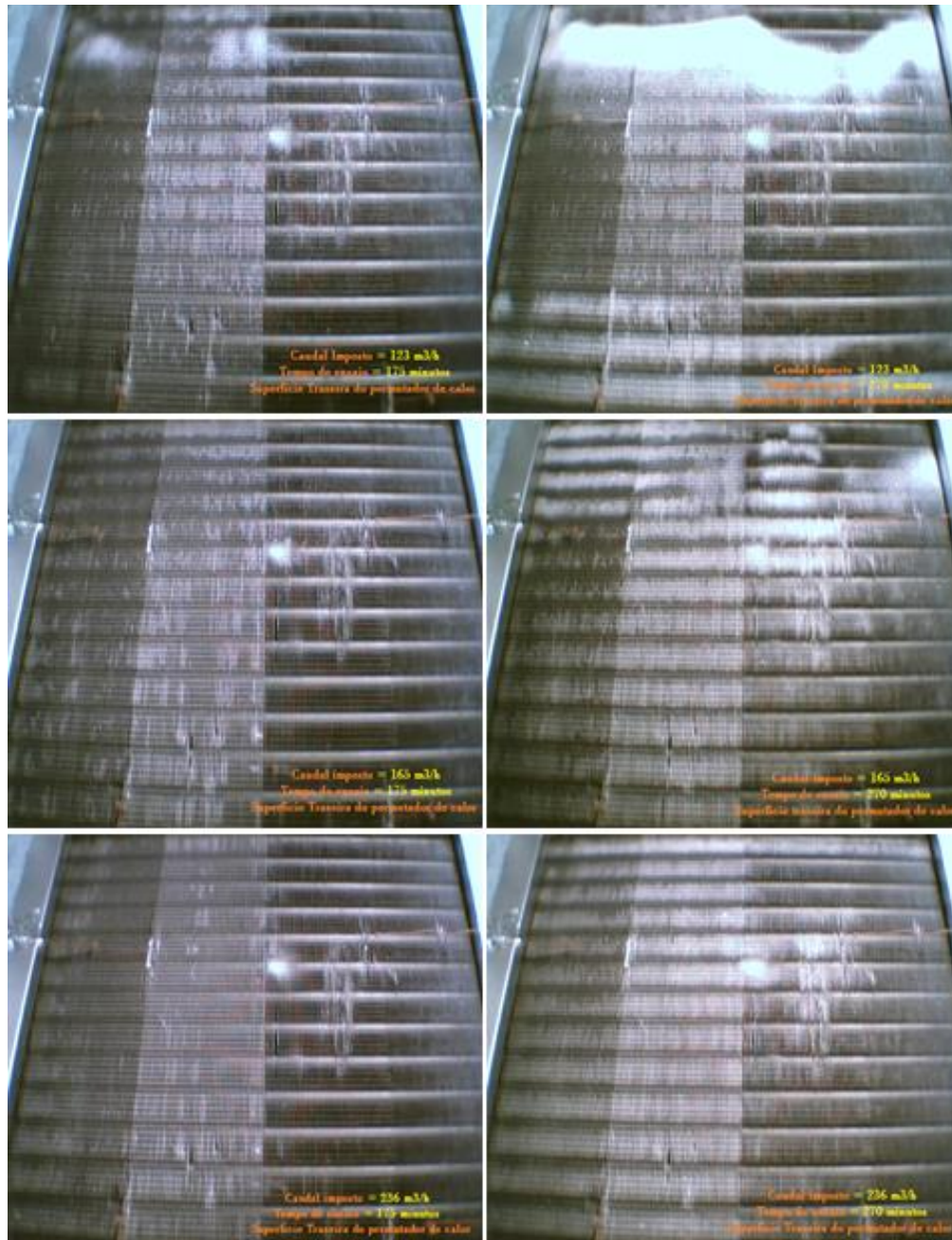


Figura 4.4 Superfície traseira do permutador de calor nos três ensaios de variação de caudal realizados aos 175 minutos e aos 270 minutos do ciclo de congelação.

Independentemente da subjetividade visual de ambas as superfícies do permutador na identificação do comportamento da formação de gelo no permutador em estudo, da apresentação das imagens dos três ensaios de variação de caudal realizados verifica-se, como já anteriormente referido, que é benéfico para o sistema de refrigeração a utilização de um caudal volúmico mais elevado. O aumento do caudal volúmico corresponde portanto a uma medida de atenuação da formação de gelo sobre a superfície de permuta.

A monitorização térmica de ambas as superfícies do permutador de calor em estudo permite ainda, a observação da temperatura superficial traseira e frontal do permutador durante todo o tempo de ensaio. Na Figura 4.5 e Figura 4.6 apresentam-se, respetivamente, as temperaturas superficiais frontais e traseiras recolhidas durante os três ensaios de variação de caudal de ar realizados, onde é possível verificar de acordo com o facto já concluído, que a temperatura cresce com a diminuição do caudal volúmico do ar.

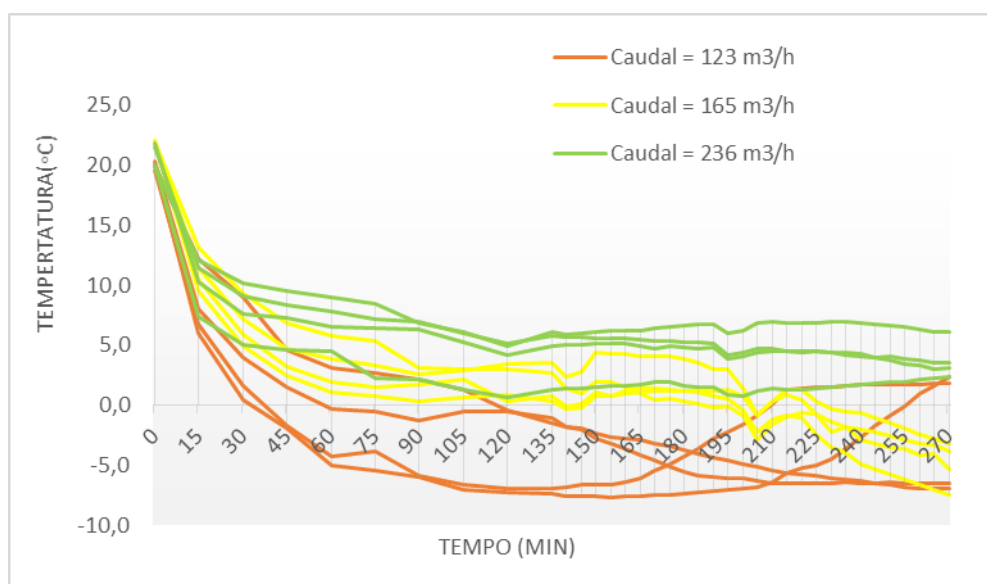


Figura 4.5 Temperatura na superfície frontal do permutador de calor durante os três ensaios de variação de caudal realizados

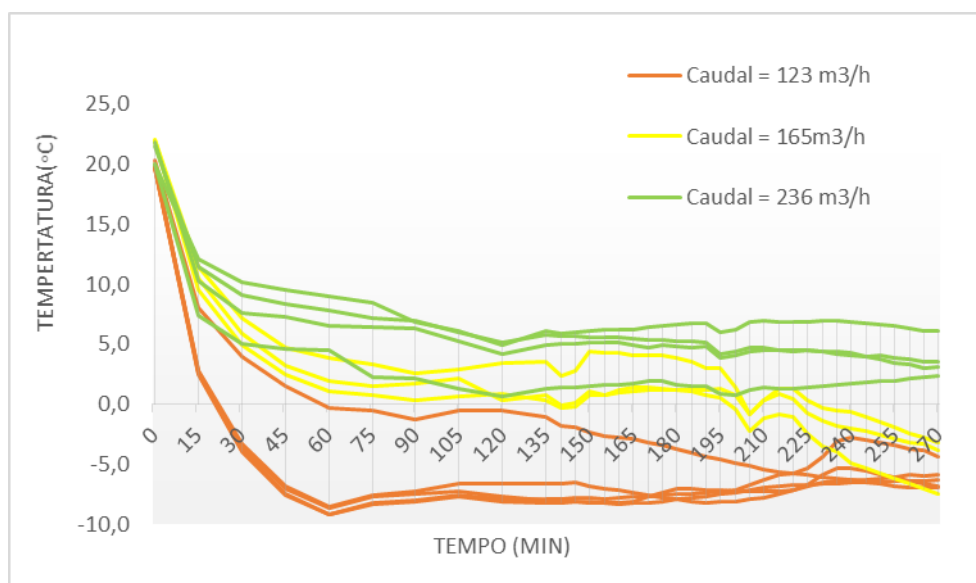


Figura 4.6 Temperatura na superfície traseira do permutador de calor durante os três ensaios de variação de caudal realizados

4.2.2. Ensaios de variação de humidade

Similarmente aos três primeiros ensaios, mas desta feita para a influência da variação da humidade relativa do ar na formação de gelo no permutador em estudo, assumiram-se três humidades relativas e adequadamente padronizadas. Assim fixou-se o valor de caudal volumico nos 128 m³/h e o valor de temperatura do ar antes do permutador nos 7°C, tendo-se efetuado de seguida três ensaios distintos para 85%, 63% e 42% de humidade relativa no ar antes do permutador.

A monitorização detalhada de todo o sistema, particularmente do permutador de calor em estudo permite analisar sensivelmente a evolução da formação de gelo e as suas intrínsecas consequências. Analisando a temperatura do ar depois do permutador e a redução da potência térmica transferida pelo permutador durante o ciclo de congelamento é possível quantificar a influência da humidade relativa do ar na formação de gelo sobre a superfície do permutador de calor.

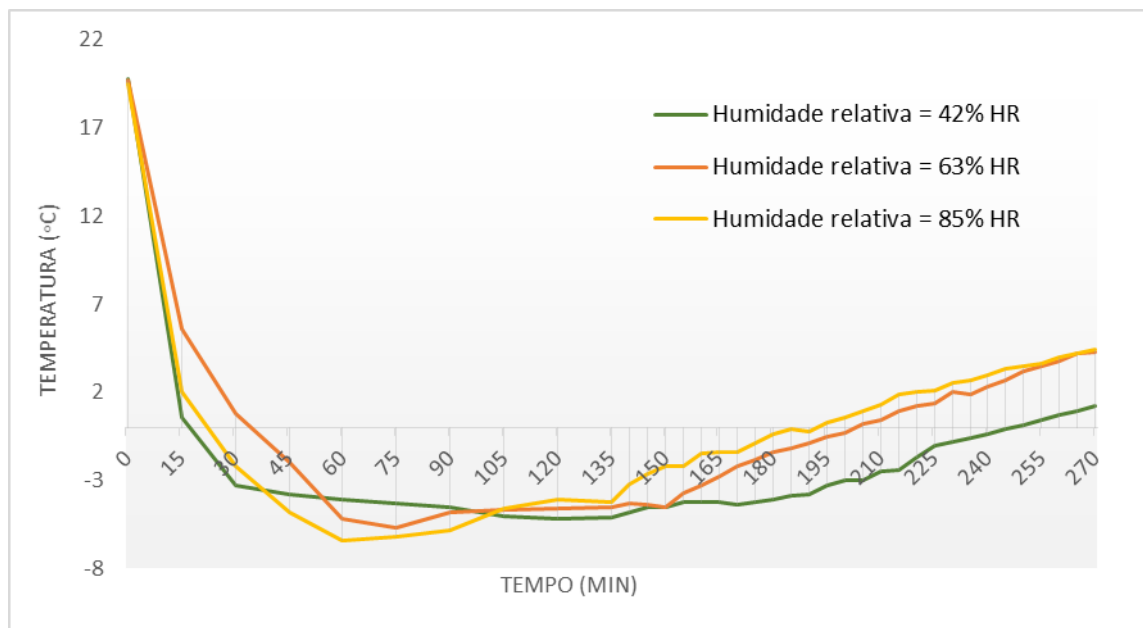


Figura 4.7 Temperatura do ar depois de atravessa o permutador ao longo do ciclo de congelamento durante os ensaios de variação de humidade relativa do ar.

Observando a Figura 4.7, correspondente à temperatura do ar depois do permutador de calor para três valores distintos da humidade relativa do ar, pode-se concluir que a existência de uma humidade relativa do ar elevada propicia a ineficiência do sistema de refrigeração.

Verifica-se através do gráfico acima apresentado (figura 4.5) que a partir dos 185 minutos no ensaio de maior humidade relativa no ar os produtos refrigerados ficariam sujeitos a

temperaturas positivas, facto que, para alguns produtos, inevitavelmente contribuiria para a sua rápida degradação. A diminuição em 50% da humidade relativa do ar, como perceptível pela curva correspondente a uma humidade relativa do ar de 42%, permite uma maior eficiência do sistema, verificando-se que a temperatura depois do permutador só atinge valores positivos decorridos 255 minutos do ciclo de congelação.

Embora um maior valor da humidade relativa permita obter durante um período curto temperaturas do ar mais baixas, antecipa a formação de gelo sobre a superfície do permutador e, conseqüentemente, contribui para a posterior degradação dos valores de temperatura do ar face a situações em que a humidade relativa é menor.

Assim, percebe-se que a humidade relativa do ar propicia a formação de gelo no permutador em estudo, realidade que através da análise da potência térmica transferida pelo permutador de calor e das imagens da suas superfícies frontal e traseira será adequadamente explorada.

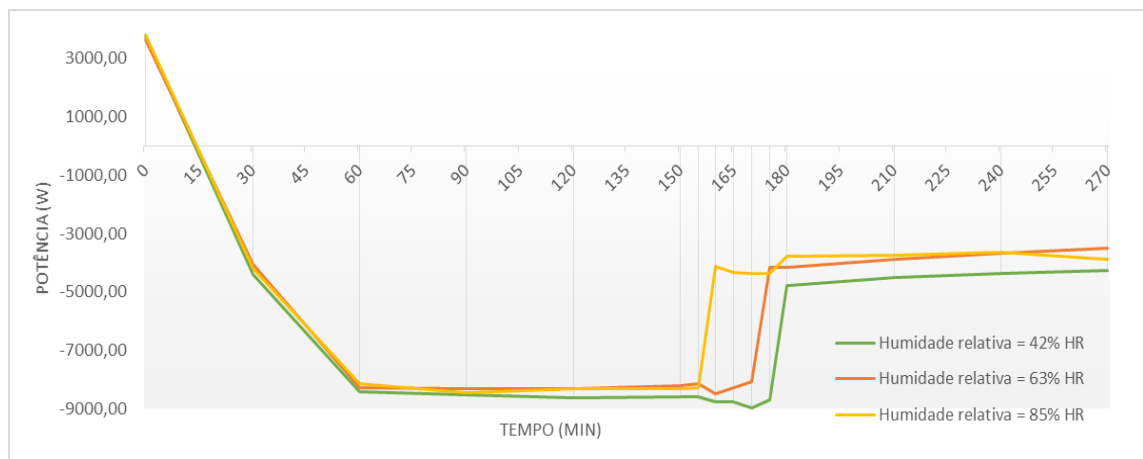


Figura 4.8 Potência térmica transferida ao longo do ciclo de congelação durante os três ensaios de variação de humidade relativa realizados.

Constata-se através da observação da Figura 4.8 que a redução da potência térmica transferida no permutador de calor em estudo é mais significativa no ensaio de 85% de humidade relativa do ar, facto que evidencia uma maior formação de gelo neste ensaio.

É ainda perceptível no gráfico apresentado o momento a partir do qual para cada um dos ensaios a formação de gelo no permutador de calor em estudo prejudica a eficiência do sistema de refrigeração. Assim observa-se que para o ensaio de 85% de humidade relativa do ar a formação de gelo no permutador de calor apresenta-se prejudicial para o sistema de refrigeração aos 160 minutos, para o ensaio de 63 % de humidade relativa do ar aos 170 minutos e para o ensaio de 42% de humidade relativa do ar aos 180 minutos. Será agora de

todo pertinente observar visualmente as condições das superfícies frontal e traseira do permutador de calor em estudo para, pelo menos, um dos momentos críticos determinados e para o final de cada um dos três ensaios de variação de umidade relativa do ar realizados.



Figura 4.9 Superfície Frontal e Traseira do permutador de calor nos três ensaios de variação de umidade realizados aos 160 minutos do ciclo de congelamento.

Da visualização das imagens captadas no primeiro momento crítico, resultante do ensaio de 85% de umidade relativa do ar e correspondente aos 160 minutos do ciclo de congelamento é possível concluir que a formação de gelo no permutador em estudo é mais significativa no

ensaio em que a humidade relativa do ar é mais elevada. Assim pode-se concluir que a existência de uma maior percentagem de humidade relativa no ar propicia a formação de gelo no permutador de calor em estudo.

A análise das imagens captadas no final de cada ensaio de variação de humidade relativa do ar apresentadas de seguida permitem uma melhor perceção da influência desta grandeza na formação de gelo no permutador.

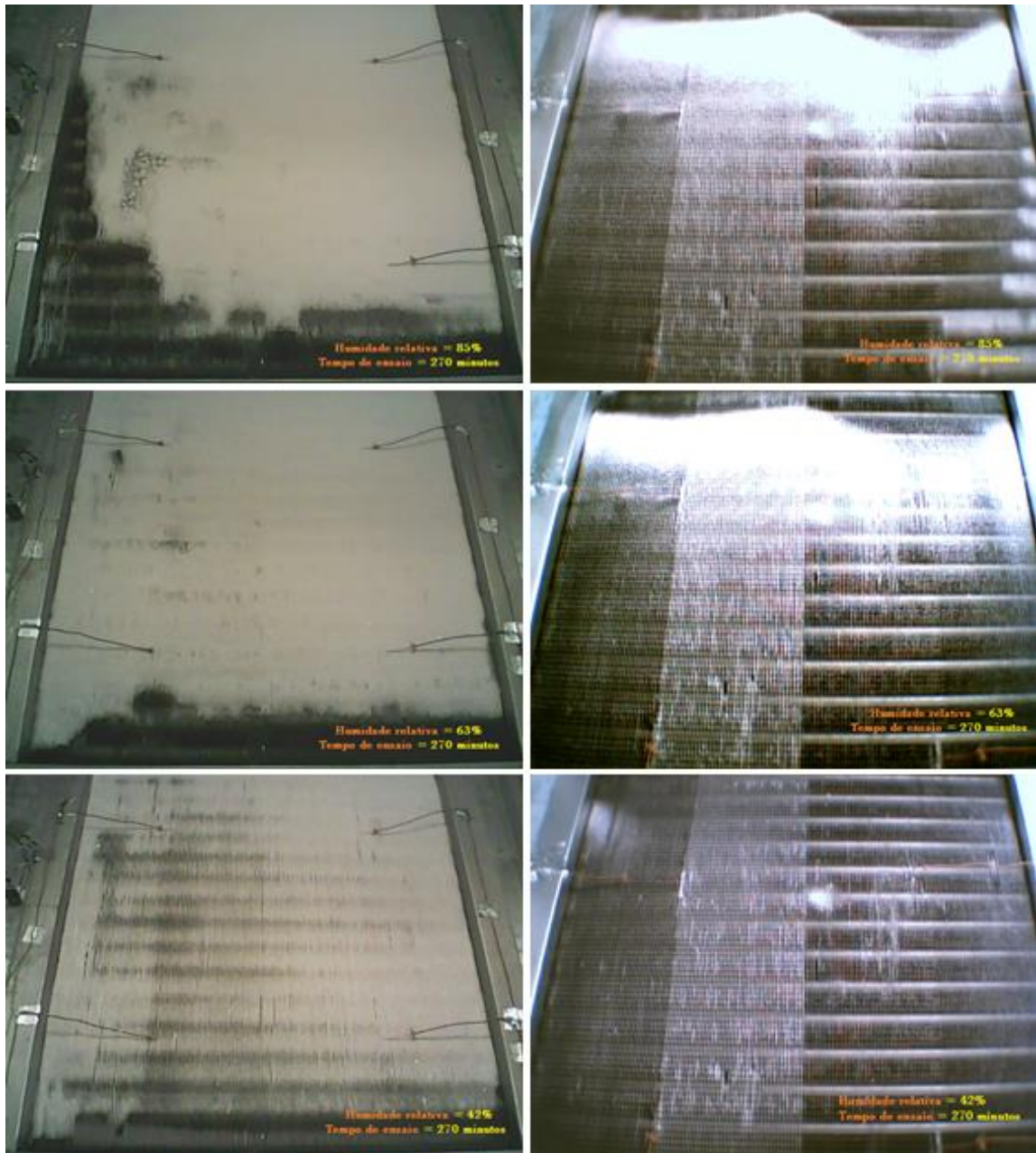


Figura 4.10 Superfície Frontal e Traseira do permutador de calor nos três ensaios de variação de humidade realizados no final do ciclo de congelamento.

A aquisição da temperatura das superfícies frontal e traseira do permutador de calor, graficamente representada na Figura 4.11 e Figura 4.12 permite observar que como já anteriormente referido, a temperatura diminui com a subida da humidade relativa do ar, o que indicia um maior formação de gelo no ensaio de 85% de humidade relativa imposta.

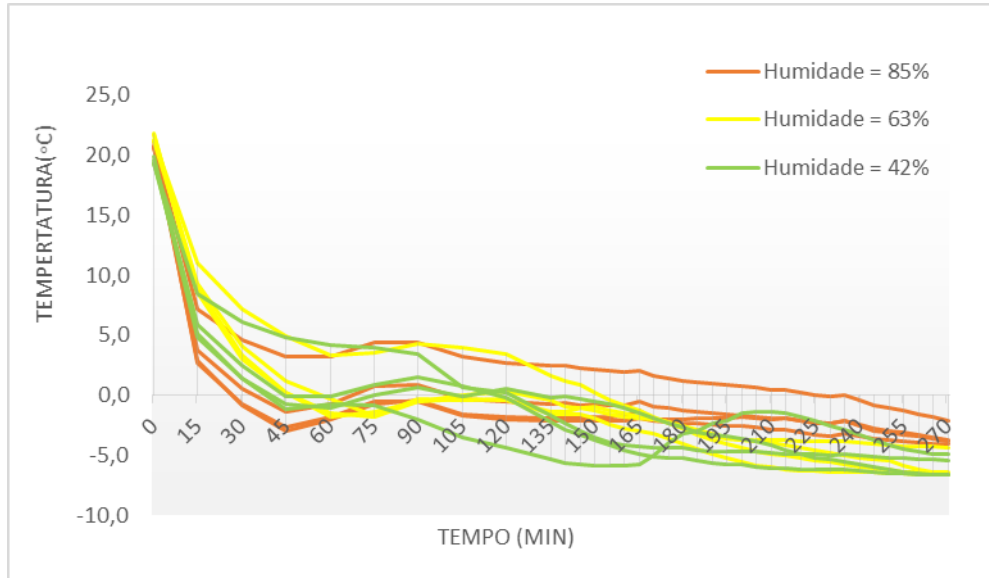


Figura 4.11 Temperatura na superfície frontal do permutador de calor durante os três ensaios de variação de humidade realizados

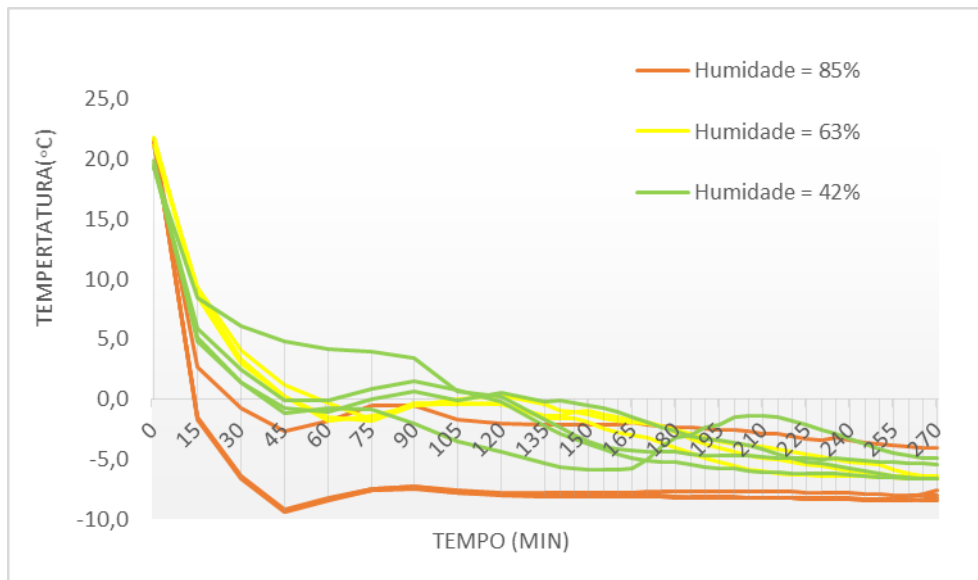


Figura 4.12 Temperatura na superfície traseira do permutador de calor durante os três ensaios de variação de humidade realizados

4.2.3. Ensaios de variação de temperatura

Posteriormente ao estudo da influencia da variação do caudal volúmico e da humidade relativa do ar na formação de gelo no permutador de calor em estudo, é de todo pertinente estudar a influência da temperatura do ar no processo de formação de gelo que em tanto influencia o desempenho do sistema de refrigeração.

Realizaram-se assim três ensaios experimentais distintos onde o caudal volúmico foi fixado nos 128 m³/h e a humidade relativa nos 63%. Os valores de temperatura do ar utilizados experimentalmente foram 11°C, 7°C e 3°C. A cuidada análise de todos os resultados permitirá determinar a influência desta grandeza na formação de gelo sobre a superfície do permutador de calor em estudo.

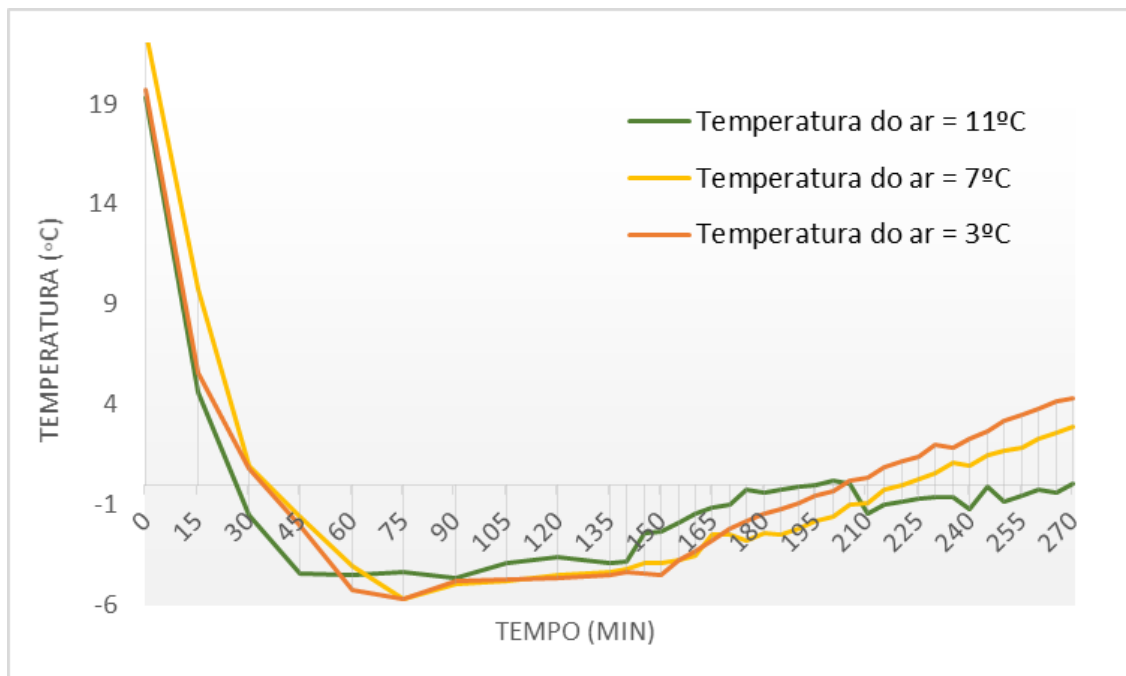


Figura 4.13 Temperatura do ar depois de atravessar o permutador ao longo do ciclo de congelação durante os três ensaios de variação de temperatura realizados.

Da análise do gráfico da temperatura depois do permutador de calor ao longo do ciclo de congelação, verifica-se que no ensaio com temperatura do ar mais baixa o valor da temperatura do ar depois de atravessar o permutador após os 150 minutos do ciclo de congelação é consideravelmente afetada, atingindo valores positivos a partir dos 205 minutos o que poderia propiciar a deterioração prematura dos produtos refrigerados.

Observando as curvas da evolução da temperatura do ar nos restantes ensaios percebe-se que o ensaio de temperatura intermédia, 7 °C, ocorre de forma similar ao anteriormente explicitado, atingindo valores de temperatura superiores a partir dos 215 minutos. Por outro

lado o ensaio de temperatura superior, 11 °C, permite que os valores de temperatura depois do permutador sejam negativos durante o ciclo de congelação.

Conclui-se assim que a formação de gelo no permutador de calor em estudo é mais significativa para temperaturas do ar inferiores, no entanto a representação gráfica da potência térmica absorvida pelo permutador durante o ciclo de congelação representada na Figura 4.14 esclarecerá mais sucintamente o fenómeno de formação de gelo no permutador de calor em estudo.

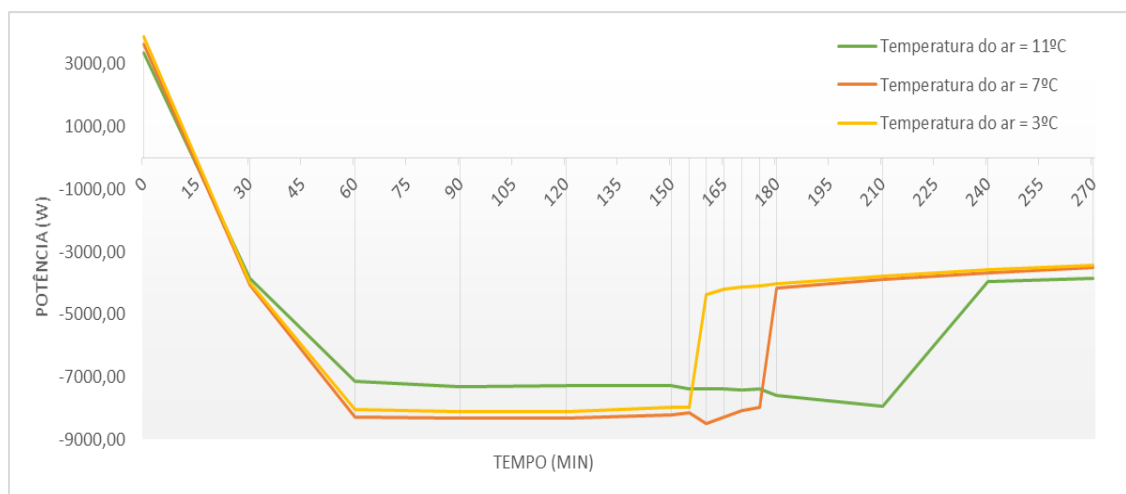


Figura 4.14 Potência térmica ao longo do ciclo de congelação durante os três ensaios de variação de temperatura realizados.

Constata-se da observação minuciosa do gráfico da potência térmica transferida pelo permutador ao longo do ciclo de congelação que, no ensaio de temperatura inferior a redução de potência térmica ocorre aos 160 minutos, no ensaio de temperatura intermédia aos 175 minutos e no ensaio de temperatura superior aos 210 minutos. Assim confirma-se que a formação de gelo na superfície do permutador de calor é mais significativa no ensaio de temperatura do ar inferior.

Através das imagens da superfície frontal e traseira do permutador de calor em estudo captadas no final de cada ensaio e apresentadas na Figura 4.15 é possível observar o ensaio onde a formação de gelo é mais significativa.

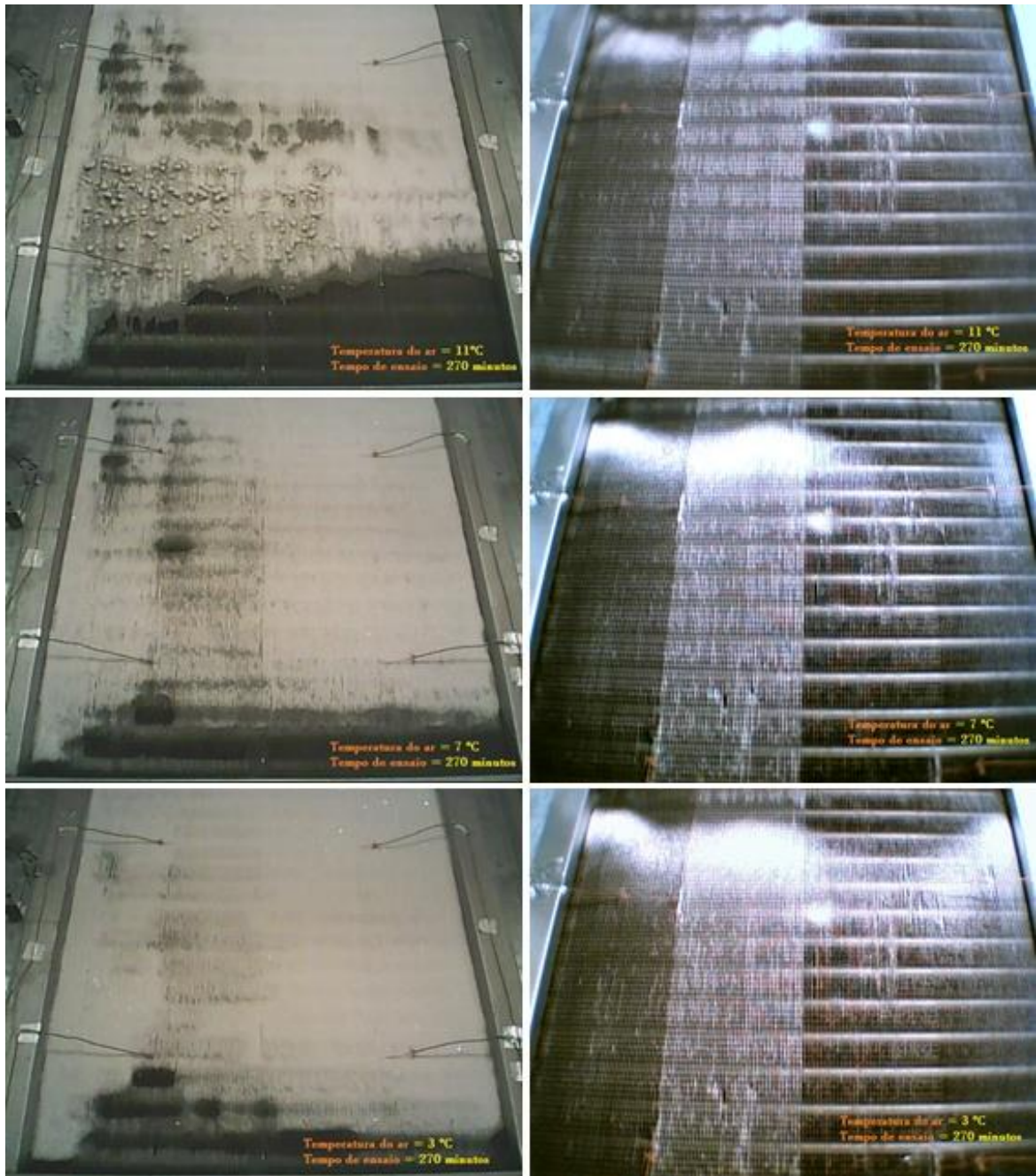


Figura 4.15 Superfície Frontal e Traseira do permutador de calor nos três ensaios de variação de temperatura realizados no final do ciclo de congelamento.

Observando a Figura 4.15 percebe-se que a formação de gelo é mais significativa no ensaio de temperatura do ar inferior. Assim e depois de analisados todos os dados recolhidos pode-se afirmar que a formação de gelo no permutador de calor em estudo aumenta com a diminuição da temperatura do ar.

As temperaturas de ambas as superfícies do permutador, estrategicamente recolhidas em cada ensaio, apesar de não esclarecerem exatamente como ocorre a formação de gelo no componente em estudo, permitem uma verificação do já anteriormente concluído. Assim perante a Figura 4.16 e Figura 4.17 observa-se que as temperaturas são mais baixas na superfície de permuta aquando a realização do ensaio de menor temperatura.

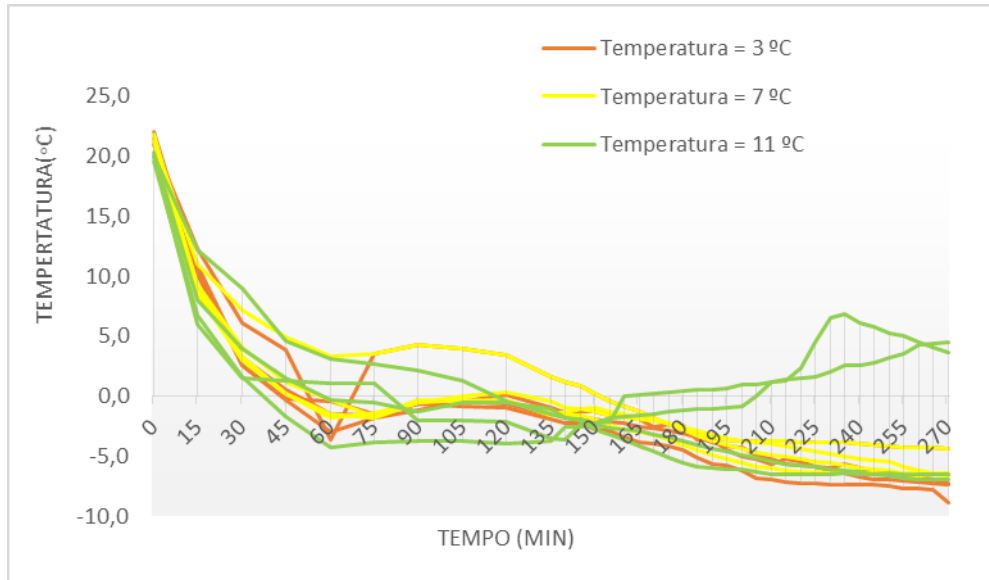


Figura 4.16 Temperatura na superfície frontal do permutador de calor durante os três ensaios de variação de temperatura realizados

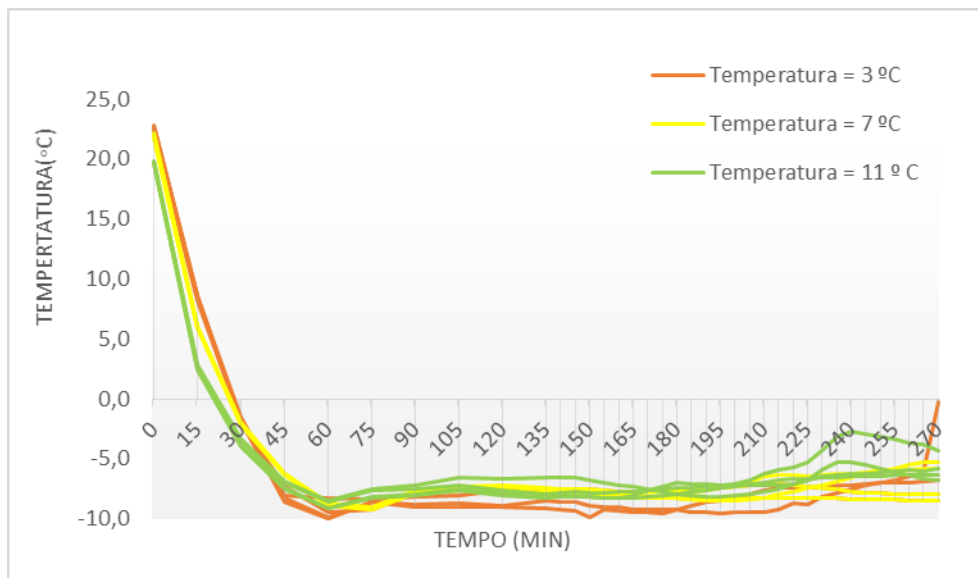


Figura 4.17 Temperatura na superfície frontal do permutador de calor durante os três ensaios de variação de humidade realizados

4.2.4. Ensaios com interrupção do Chiller

Da análise dos ensaios de variação do caudal volúmico, da humidade relativa e da temperatura do ar verificou-se a existência de um momento crucial identificado através da redução da potência térmica transferida pelo permutador de calor. Depois de uma adequada observação percebeu-se que a redução da potência térmica era causada pela formação de gelo precoce no permutador de calor. Assim no decorrer do presente estudo considerou-se de todo pertinente realizar dois ensaios adicionais onde se procede-se à interrupção estratégica do funcionamento do Chiller no momento crucial identificado, durante três minutos, por forma a atenuar a formação de gelo no permutador de calor até ao final do ciclo de congelação.

Da observação cuidadosa dos ensaios já realizados identificaram-se dois deles onde a redução de potência térmica transferida pelo permutador se demonstrava mais significativa. Desta forma realizou-se um primeiro ensaio semelhante ao ensaio B do estudo da variação de humidade relativa do ar, onde a humidade relativa do ar foi fixada nos 63%, o caudal volúmico nos 128 m³/h e a temperatura nos 7 °C. Realizou-se também um segundo ensaio análogo ao ensaio C do estudo da variação de temperatura do ar, onde a humidade relativa do ar foi fixada nos 63%, o caudal volúmico nos 128 m³/h e a temperatura nos 3 °C. No entanto neste novo ensaio procedeu-se a uma interrupção do funcionamento da unidade de arrefecimento, Chiller, aos 180 minutos do ciclo de congelação para o primeiro ensaio e aos 160 minutos para o segundo ensaio, de acordo com a informação obtida previamente a partir da evolução da potência térmica transferida no permutador de calor em cada um destes ensaios.

A Tabela 4-2 apresentada abaixo permite observar os ensaios realizados por forma a estudar a influência da interrupção da unidade de arrefecimento na formação de gelo no permutador de calor em estudo.

Tabela 4-2 Mapa de ensaios de interrupção do funcionamento do Chiller

Tipo de Ensaio	Interrupção do Chiller (minutos)	Caudal (m ³ /h)	Humidade (%HR)	Temperatura (°C)
<i>Sem interrupção do Chiller</i>	-	128	63	7
	-	128	63	3
<i>Com Interrupção do Chiller</i>	180	128	63	7
	160	128	63	3

4.2.4.1. Ensaio 1

A monitorização do permutador de calor em estudo permite comparar minuciosamente os dois ensaios realizados, com e sem interrupção da unidade de arrefecimento, através da análise da temperatura do ar depois de atravessar o permutador, da potência térmica transferida pelo permutador e das imagens captadas da superfície frontal e traseira do permutador de calor durante todo o ensaio. Assim através do tratamento dos dados resultantes de ambos os ensaios procedeu-se a uma rigorosa análise.

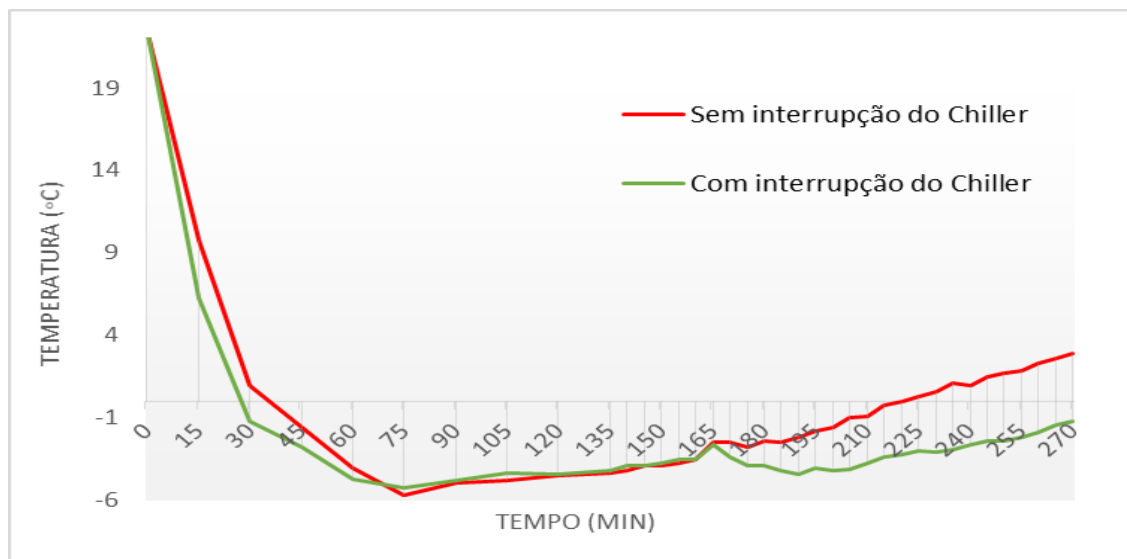


Figura 4.18 Temperatura do ar depois do permutador ao longo do ciclo de congelação nos ensaios com e sem interrupção de funcionamento da unidade de arrefecimento.

Na Figura 4.18 é possível visualizar a temperatura do ar depois de atravessar o permutador de calor em estudo durante os dois ensaios realizados, com e sem interrupção da unidade de arrefecimento. Após uma atenta observação gráfica constata-se que até aos 180 minutos a temperatura do ar depois de atravessar o permutador é semelhante em ambos os ensaios. No entanto, após este momento no ensaio onde não existiu interrupção do chiller a temperatura cresce gradualmente atingindo valores positivos, facto que indicia formação de gelo na superfície do permutador de calor, enquanto no ensaio com interrupção do chiller a temperatura mantém-se constante não atingindo valores positivos.

Perspetiva-se assim que a paragem de três minutos efetuada no ensaio com interrupção do Chiller no momento crítico determinado é benéfica para o sistema. A observação da evolução da potência térmica transferida pelo permutador de calor em estudo durante os dois ensaios realizados apresentada na Figura 4.19 irá clarificar esta situação.

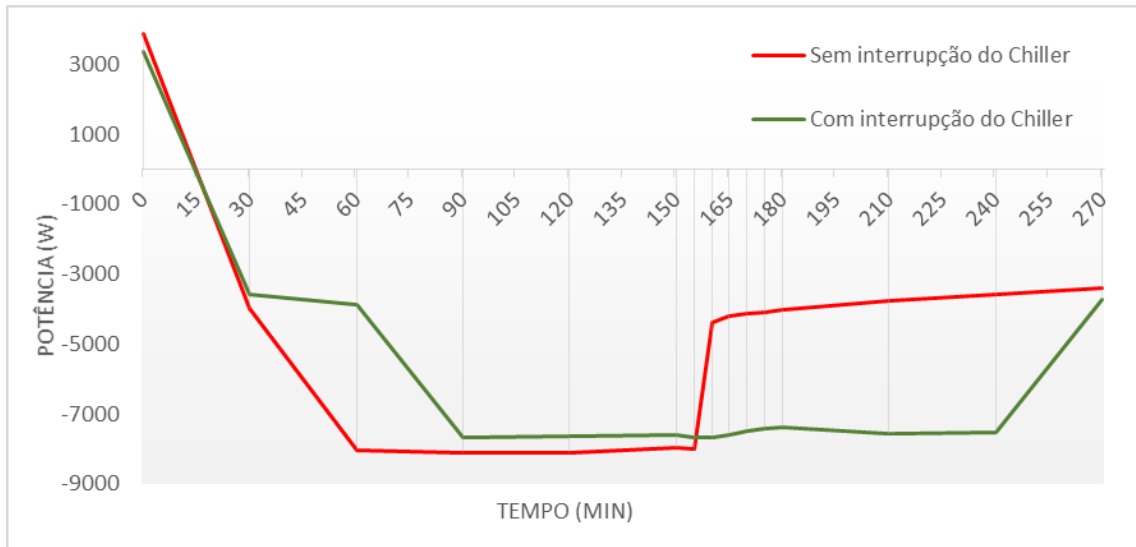


Figura 4.19 Potência térmica transferida pelo permutador de calor ao longo do ciclo de congelação nos ensaios com e sem interrupção de funcionamento da unidade de arrefecimento.

Analisando a Figura 4.19 percebe-se que a redução de potência térmica no permutador de calor é mais significativa no ensaio onde não ocorre interrupção do Chiller, facto que indicia uma formação de gelo mais significativa na superfície do permutador de calor.

Conclui-se assim que a interrupção de três minutos do funcionamento da unidade de arrefecimento no momento crítico determinado é benéfica para o sistema, aumentando consideravelmente a sua eficiência devido essencialmente à atenuação da formação de gelo no permutador de calor. Apesar da subjetividade da observação visual de ambas as superfícies do permutador de calor, apresenta-se na Figura 4.20 e na Figura 4.21 imagens do momento de interrupção da unidade de arrefecimento e do final de cada um dos ensaios.

Da observação visual da superfície frontal e traseira do permutador de calor apresentada abaixo, verifica-se que no ensaio sem interrupção do chiller a formação de gelo é mais significativa. Constatando-se mais uma vez que a paragem do chiller é benéfica na atenuação da formação de gelo no permutador de calor em estudo.

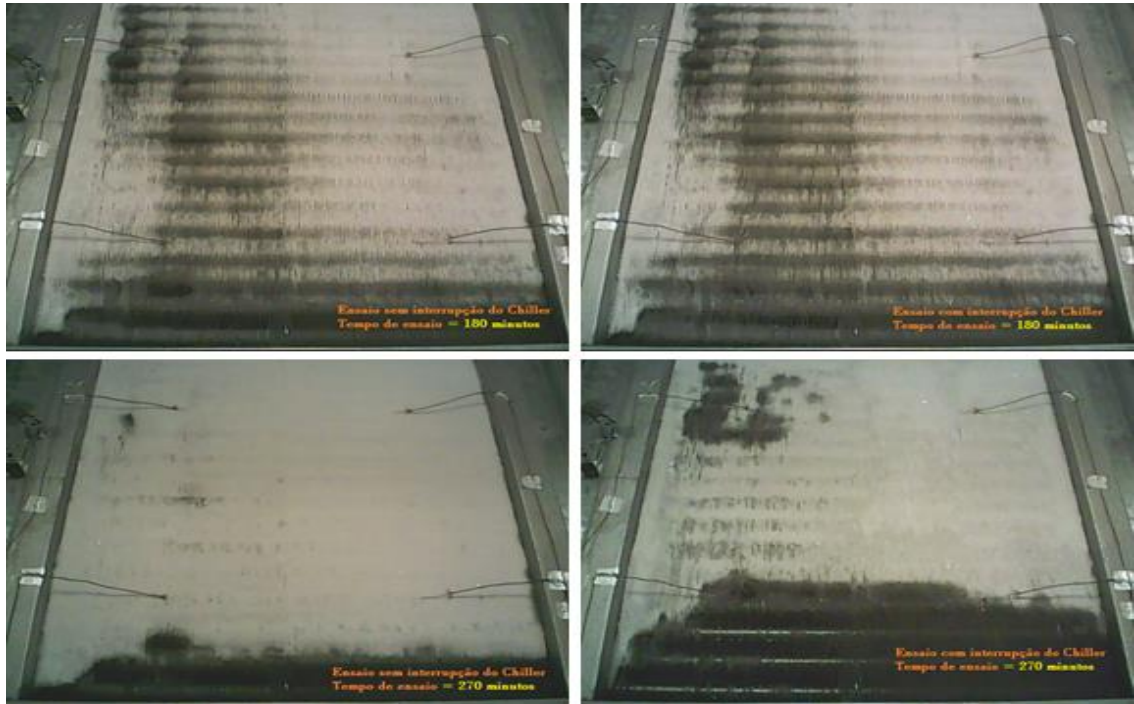


Figura 4.20 Superfície frontal do permutador de calor nos dois ensaios realizados no momento de interrupção da unidade de arrefecimento, 180 minutos, e no final de cada ensaio, aos 270 minutos.

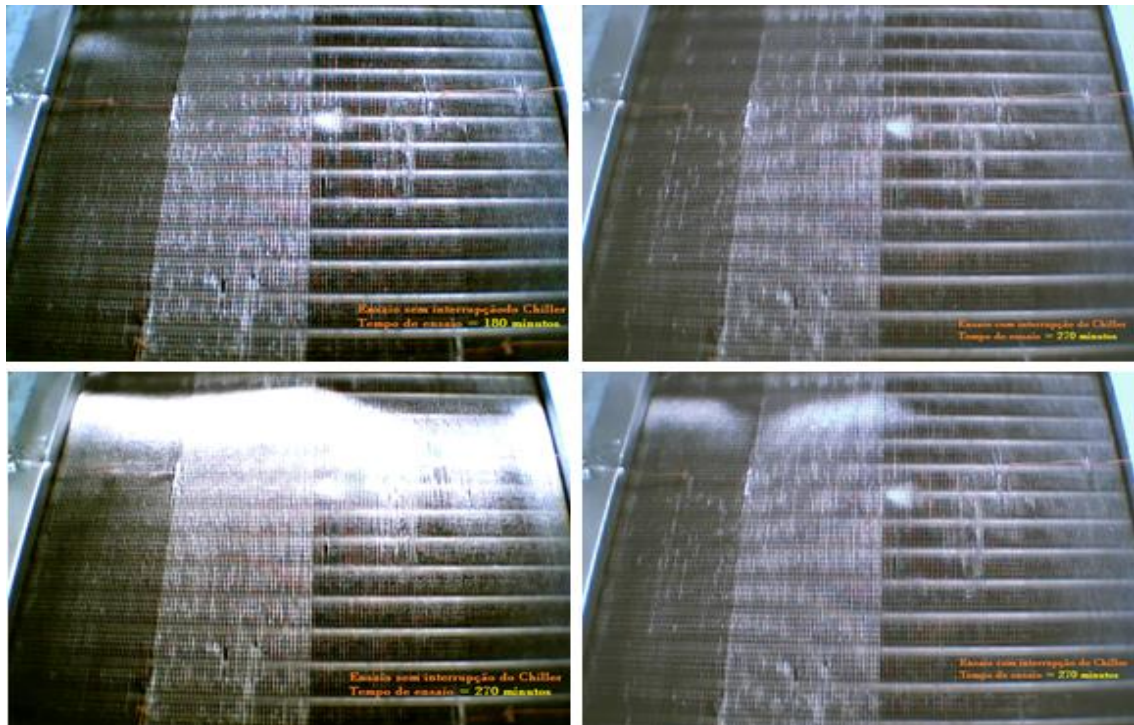


Figura 4.21 Superfície traseira do permutador de calor nos dois ensaios realizados no momento de interrupção da unidade de arrefecimento, 180 minutos, e no final de cada ensaio, aos 270 minutos.

4.2.4.2. Ensaio 2

A realização deste segundo ensaio verificou-se imprescindível de forma a validar as conclusões resultantes do primeiro ensaio. A formação de gelo mais significativa e o momento crítico antecipado resultantes da descida de temperatura do ar imposta permitem ilações mais assertivas da análise dos resultados obtidos.

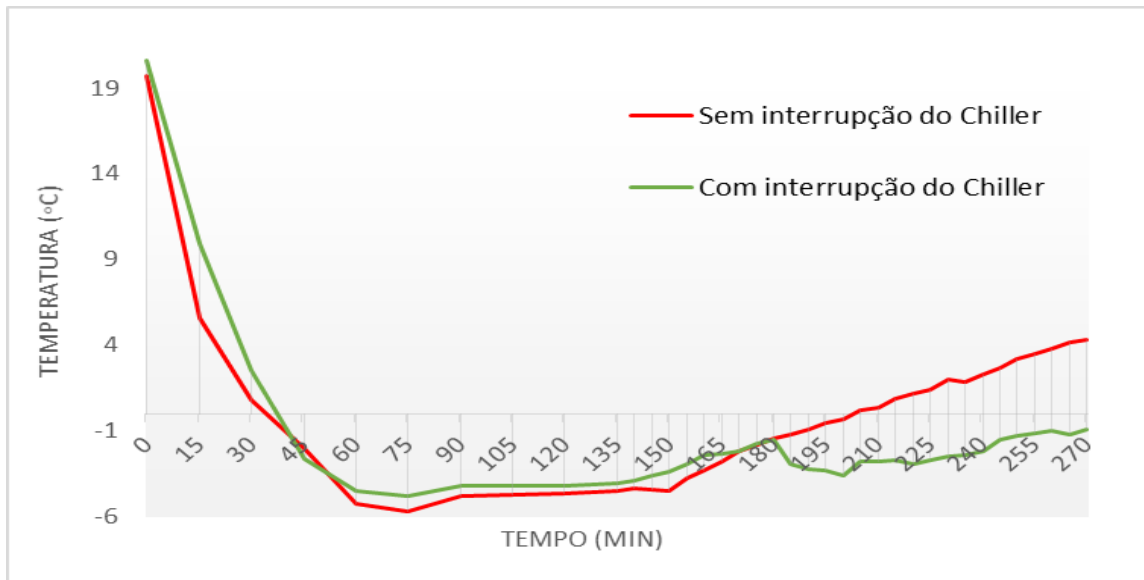


Figura 4.22 Temperatura depois do permutador ao longo do ciclo de congelação nos ensaios com e sem interrupção de funcionamento da unidade de arrefecimento

Da observação da Figura 4.22 retém-se que analogamente ao verificado no primeiro ensaio, até ao momento crítico determinado, 160 minutos do ciclo de congelamento para este ensaio, a temperatura do ar depois de atravessar o permutador de calor no ensaio sem interrupção do Chiller cresce significativamente, acontecimento que ilustra a ocorrência mais apreciável de formação de gelo no permutador de calor neste ensaio.

Da análise da Figura 4.23 apresentada abaixo é perceptível que a redução da potência térmica transferida pelo permutador de calor depois do momento crítico determinado é mais relevante no ensaio onde não há interrupção do Chiller, realçando-se mais uma vez que a formação de gelo no permutador de calor em estudo é mais significativa neste ensaio.

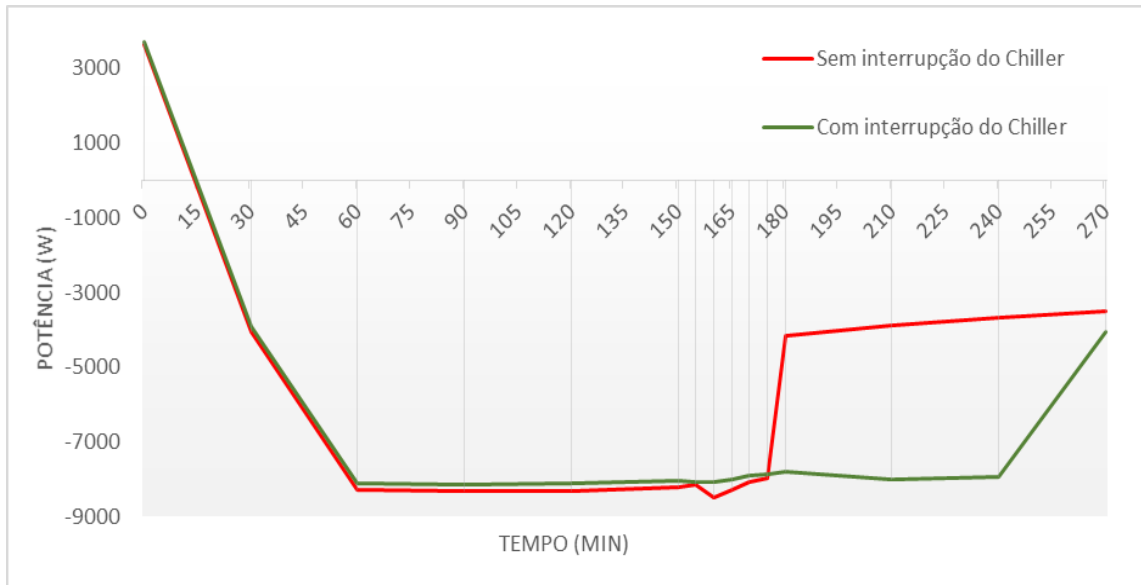


Figura 4.23 Potência no permutador de calor ao longo do ciclo de congelação nos ensaios com e sem interrupção de funcionamento da unidade de arrefecimento.

Conclui-se assim da análise dos dois conjuntos de ensaios realizados, que a interrupção do funcionamento da unidade de arrefecimento, Chiller, em momentos estratégicos do ciclo de congelação atenua a formação de gelo no permutador de calor. Para o sistema em estudo este facto mostra-se bastante benéfico, aumentando consideravelmente a eficiência do sistema e garantindo a segurança dos produtos resultantes da refrigeração.

4.3. Nota conclusiva

Neste capítulo foram apresentados, analisados e discutidos os resultados dos ensaios experimentais realizados com as diferentes condições operacionais impostas. Concluiu-se da análise de todos os ensaios experimentais realizados, que a formação de gelo na superfície do permutador de calor em estudo acrescia com o aumento da humidade relativa do ar, com a diminuição do caudal volúmico do ar e com a diminuição da temperatura do ar. Verificou-se adicionalmente que um dos métodos viáveis para a atenuação da formação de gelo na superfície do permutador de calor é a interrupção da unidade de arrefecimento em momentos cruciais do ciclo de congelação.

5. Conclusão

A formação de gelo nas superfícies de evaporadores constitui uma realidade resultante da operação a temperaturas inferiores à temperatura de congelação da água, as consequências térmicas e energéticas para o sistema são assim bastante relevantes. Desta forma, o estudo detalhado da influência da variação da humidade relativa do ar, da temperatura do ar e do caudal volúmico de ar constitui um importante avanço por forma a colmatar a ineficiência dos sistemas de refrigeração e consequentemente minimizar os riscos de segurança alimentar.

Neste último capítulo efetua-se uma revisão de todo o trabalho desenvolvido e sugerem-se alguns temas para trabalhos futuros.

5.1. Recapitulação

O presente trabalho ostenta como contribuição o desenvolvimento e monitorização de um protótipo experimental projetado para controlar a temperatura do ar, a humidade do ar e o seu caudal volúmico de forma a quantificar a influência de cada uma destas grandezas na formação de gelo no permutador de calor em estudo.

O trabalho realizado foi desenvolvido em diferentes fases, inicialmente projetou-se o protótipo experimental e procedeu-se a sua adequada monitorização. De seguida realizaram-se diferentes ensaios com o intuito de observar o comportamento de todo o sistema e assim obter uma minuciosa familiarização com as diferentes unidades que o constituem.

Posteriormente foram planificados e realizados os ensaios de variação de humidade do ar, de temperatura do ar, de caudal volúmico e de interrupção do funcionamento do chiller. Paralelamente foram recolhidos todos os dados relevantes para o estudo detalhado da formação de gelo no permutador de calor.

Da análise detalhada da influência de cada uma das grandezas na formação de gelo no permutador de calor em estudo concluiu-se que o aumento da humidade relativa do ar, a diminuição da temperatura do ar e a diminuição do caudal volúmico contribuem ativamente para o aumento da formação de gelo.

Adicionalmente verificou-se com a realização de dois ensaios experimentais com ciclo de descongelação que a interrupção de funcionamento da unidade de arrefecimento em momentos estratégicos se mostra benéfica para o sistema, garantindo uma atenuação da formação de gelo no permutador de calor em estudo.

5.2. Sugestão para trabalho futuro

O presente trabalho desenvolvido, o conhecimento dele resultante e os meios físicos disponibilizados constituem uma forte motivação para o desenvolvimento de trabalhos futuros. Assim no âmbito deste estudo sugerem-se os seguintes trabalhos:

- Validação numérica do processo de formação de gelo no permutador de calor em estudo.
- Estudo de eficiência dos métodos de descongelação existentes.
- Estudo de medidas de atenuação da formação de gelo inovadoras.
- Verificação detalhada da formação de gelo em permutadores de calor distintos.

Referências bibliográfica

Aljuwayhel , N. F., 2006. *Numerical and experimental study of the influence of frost formation and defrosting on the performance of industrial evaporator coils*. USA, s.n.

Amini, M., Yaghoubi, M. & Pishavar, A. R., 2014. Experimental study of frost formation on a fin-and-tube heat exchanger by natural convection. *International Journal of refrigeration*, Volume 46, pp. 37-49.

Carl, P., 2005. ENERGY EFFICIENCY IN REFRIGERATION SYSTEMS. *Fundamental*, pp. 25-27.

Cui, J., Li, W. Z., Liu, Y. & Jiang, Z. Y., 2001. A new time and space dependent model for predicting frost formation. *Applied Thermal Engineering*, Volume 31, pp. 447-457.

Dossat, J. & Roy, 2004. *Princípios da Refrigeração*. Brasil: Eli Behar.

Ferraz, F., 2008. *Sebenta de refrigeração*. Bahia: CEBET-BA.

Getu, H. M. & Bansal, P. K., 2010. New Frost property correlations for a Flat-Finned-Tube Heat Exchanger. Volume 50.

Ismail, H., Ahmed , H., Ali & Ibrahim, H., 2007. Effects of Condensate and Initial Formation of Thin Frost Layer on Evaporator Coil Performance of Room Air-Conditioners. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, Volume 1, pp. 60-77.

Jabardo, W. F., Stoecker & Saiz, J. M., 2002. *Refrigeração Industrial*. São Paulo-Brasil: Edgard Blucher LTDA.

Jacobi, C. M. & Robinson, A. M., 2001. *A Study of Frost Formation on a Plain-fin*, West Green Street: ACRC Air Conditioning and Refrigeration Center.

Koelet, P. C., 1997. *FRIO INDUSTRIAL FUNDAMENTOS: DISEÑO Y APLICACIONES*. s.l.:Antonio Madrid Vicente.

Liu, Z., Wang, H., Meng, S. & Zhang, X., 2006. An experimental study on minimizing frost deposition on a cold surface under natural convection conditions by use of a novel anti-frosting paint. Part I. Anti-frosting performance and comparison with the uncoated metallic surface. *International Journal of Refrigeration*.

Miller, N. R., Avelles, E. A. & Newell, T. A., 2003. Detection of Evaporator Frost. *Air Conditioning and Refrigeration Center*.

Moerman, F. & Fikkin, K., 2015. Effect of hygienic design and operational parameters on frosting and defrosting of evaporators, Ch.18, in P.D Gaspar, P.D Silva (Eds.). Em: *Handbook of Research on Advances and Applications in Refrigeration Systems and Technologies*, IGI Global, May, 2015.907 pages. ISBN: 978-1-466-68398-3: DOI: 10.4018/978-1-4666-8398-3.

Piucco, R. O., 2008. *Análise teórico-experimental da formação de gelo em refrigeradores domésticos*. Brasil, s.n.

Piucco, R O; Hermes, C J; Melo, C; Barbosa, J R; & Duarte, P O, 2007. *FORMAÇÃO DE GEADA EM SUPERFÍCIES PLANAS HORIZONTAIS EM CONDIÇÕES TÍPICAS DE GABINETES DE REFRIGERADORES FROST-FREE*. Cusco, s.n.

Seker, D., Karatas, H. & Egrican, N., 2004. Frost formation on fin-and-tube heat exchangers.Part I—Modeling of frost formation on fin-and-tube heat exchangers. *International Journal of Refrigeration*, Volume 27, pp. 367-374.

Silva, A., 2013. www.engenhariaarquitectura.com.br. [Online] Available at: <http://www.engenhariaarquitectura.com.br/noticias/688/degelo-por-gas-quente.aspx> [Acedido em 21 07 2015].

Silva, J. C., 2004. *Refrigeração Comercial/Climatização Industrial*. Brasil: Humus.

Tao, Y., Besant, R. W. & Rezkallah, K. S., 1993. A mathematical Model for predicting the densification and growth of frost on a flat plate. *International Journal*, Volume 36, pp. 353-363.

Tassou, S. A. & Datta, D., 1999. Influence of supermarket environmental parameters on the frosting and defrosting of vertical multideck display cabinets. *ASHRAE*, Volume 1, pp. 491-496.