



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Desenvolvimento e teste experimental de sensor resistivo de monitorização da formação de gelo em sistemas de refrigeração

Diogo João Morais Caetano

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

Orientador: Prof. Doutor Pedro Dinis Gaspar
Departamento de Engenharia Electromecânica
Universidade da Beira Interior
Covilhã, Portugal

Covilhã e UBI, outubro de 2017

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais e irmãos. Eles foram, sem dúvida, os alicerces de todas as conquistas alcançadas até ao dia de hoje. As suas palavras sábias e o apoio incondicional são os elementos-chave para a obtenção de mais um marco na minha vida.

Ao meu orientador, Professor Doutor Pedro Dinis Gaspar, um sincero agradecimento por todo o tempo investido, por todos os ensinamentos transmitidos e o pelo apoio concedido no desenvolvimento do presente trabalho.

Também gostaria de agradecer aos Professores que contribuíram para a minha formação, em especial aos Professores do Departamento de Engenharia Eletromecânica pelos conhecimentos transmitidos ao longo desta jornada.

Gostaria de deixar uma palavra de apreço ao Ricardo, por toda a ajuda e tempo dispensados no desenvolvimento das atividades experimentais.

De igual forma, agradecer aos meus amigos pela preocupação, pelo apoio e pela presença nos momentos bons e maus da vida. Um especial agradecimento aos meus amigos Pedro, João e Tiago por terem sido os companheiros deste último desafio.

Por fim, e não menos importante, um agradecimento à minha namorada Jessica por tudo.

Resumo

Os sistemas de refrigeração são utilizados no cotidiano, em processos que requerem temperaturas mais baixas do que as disponíveis no ambiente. Para obter essas temperaturas, as serpentinas dos evaporadores atuam, em determinadas situações, com temperaturas inferiores ao ponto de congelação da água. Por consequência, forma-se uma camada de gelo na superfície que é prejudicial ao desempenho térmico do dispositivo.

Para eliminar ou mitigar os efeitos da camada de gelo, são aplicados diversos métodos de descongelação. No entanto, o método de detecção da formação de camada de gelo não é consensual.

No presente trabalho, foi realizado um estudo experimental de um sensor resistivo com o propósito de detetar a formação de gelo. O desempenho do sensor é analisado em função das condições de temperatura e humidade relativa do ar ambiente, da temperatura do fluido refrigerante e do seu posicionamento no evaporador. O princípio do sensor testado assenta na medição da resistência do meio presente entre dois eléctrodos. Também foi concebido o suporte para os eléctrodos que compõem o sensor, para incorporar na estrutura do evaporador.

Os resultados dos ensaios experimentais permitiram analisar a propagação da camada de gelo na superfície do evaporador e aferir a existência de gelo na superfície do evaporador. Na perspetiva da exatidão da medição, conclui-se que o grau de concordância dos resultados é satisfatório no que toca a detecção de água e elevado na detecção da camada de gelo depositada na superfície do evaporador.

Palavras-chave

Formação de gelo

Sensor resistivo

Permutador de calor

Evaporador

Diferença de potencial

Sistemas de refrigeração

Segurança alimentar

Eficiência energética

Abstract

The refrigeration systems are used nowadays to perform processes that require lower temperatures than those available in the environment. To obtain those temperatures, the evaporator coils act, in certain situations, with temperatures lower than the water freezing point. Therefore, a frost layer appears on the evaporator's surface that reduces the thermal performance of the device.

In order to eliminate or mitigate the effects of the frost layer, different defrosting methods can be applied. However, the method for the detection of the frost layer formation is not consensual.

In the present dissertation, an experimental study of a resistive sensor to detect frost formation is developed. The sensor performance is analysed in function of the temperature and relative humidity of air, the temperature of the refrigerant and the relative position of sensor on the evaporator's surface. The function of the tested sensor lays on the measurement of the medium resistance between two electrodes. In addition, a support for the electrodes was created to be incorporated in the evaporator's structure.

The results of the experimental study allowed to analyse the propagation of the frost layer and gauge the existence of ice on the evaporator's surface. From the perspective of the measurement accuracy, it is concluded that the degree of agreement of the results is satisfactory for water detection and high for the detection of the frost layer on the surface of the evaporator.

Keywords

Frost formation

Resistive sensor

Heat exchanger

Evaporator

Differential power

Refrigeration systems

Food safety

Energy efficiency

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Nomenclatura	xv
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	2
1.1.1. Vertente energética	2
1.1.2. Vertente da qualidade alimentar	4
1.2. O problema em estudo e a sua relevância	6
1.3. Objetivos e contribuição da dissertação.....	8
1.4. Visão geral e organização da dissertação.....	8
2. Estado da arte	11
2.1. Introdução.....	11
2.2. Processo físico de Formação de gelo	11
2.3. Trabalhos experimentais.....	14
2.4. Trabalhos de simulação computacional.....	16
2.5. Métodos de deteção de gelo.....	17
2.5.1. Métodos de deteção de gelo	18
2.5.2. Sensores de deteção patenteados.....	23
2.6. Nota conclusiva.....	29
3. Materiais e Métodos	31
3.1. Introdução.....	31
3.2. Permutadores de calor	31
3.3. Desenhos técnicos.....	33
3.3.1. Protótipo do sensor	35

3.4. Instalação experimental	35
3.4.1. Instrumentação utilizada	39
3.5. Nota conclusiva	39
4. Análise e Discussão de Resultados	41
4.1. Introdução	41
4.2. Testes experimentais.....	41
4.2.1. Discussão de resultados.....	43
4.3. Nota conclusiva	68
5. Conclusões	71
5.1. Conclusões	71
5.2. Sugestões de trabalhos futuros	72
Referências Bibliográficas	75
Anexo A - Desenhos técnicos	79

Lista de Figuras

- Figura 1. Períodos de formação de gelo. Legenda: (a) período de crescimento do cristal ou nucleação; (b) período de crescimento da camada de gelo e (c) período de crescimento total da camada de gelo. Imagem adaptada de Amer & Wang (2017).
..... 13
- Figura 2. Representação esquemática da barreira formada pelo tubo e pela alheta e que separa os fluidos presentes nos sistemas de refrigeração (Tso *et al.*, 2006). 13
- Figura 3. Variação do teor de humidade ao longo do ano, quer no interior quer no exterior do estabelecimento. 14
- Figura 4. Esquema sumário dos métodos de descongelação (Amer & Wang, 2017) 18
- Figura 5. Resultados obtidos e a respetiva diferenciação entre as fases inicial, de resposta e estável. Legenda: (a) gráfico da altura da camada de gelo em função do tempo e (b) gráfico da tensão de saída em função do tempo para os 4 sensores testados (Xiao *et al.*, 2009). 21
- Figura 6. Montagem proposta por Peek (1978), com recurso a dois sensores fotoelétricos.
..... 24
- Figura 7. Princípio geral do sensor desenvolvido por Kamiyama & Miyamoto (1979) .. 25
- Figura 8. Esquema da montagem desenvolvida por Behr (1980) e que engloba o fotorreceptor e a fonte de energia eletromagnética. 25
- Figura 9. Uma das soluções incorporadas na patente, com base em dois elementos sensíveis à temperatura (Nojiri, 2000). 27
- Figura 10. Configuração do dispositivo desenvolvido por French *et al.* (2002) e o respetivo acoplamento à alheta do evaporador. 28
- Figura 11. Esquema do circuito de aquisição de dados (Graça, 2014). 28
- Figura 12. Vários tipos de alhetas utilizadas em evaporadores. Legenda: (a) ondulada (Wang *et al.*, 1999); (b) em ondulada *Herringbone* (Wang *et al.*, 1999); (c) plana (Kong *et al.*, 2016). 32

Figura 13. Alinhamentos de tubos. Legenda: (a) <i>Staggered</i> e (b) <i>In-line</i>	33
Figura 14. Adaptação da peça utilizada para reforçar a fixação entre alhetas, através de um sistema de mola.	34
Figura 15. Ilustração do sensor.	35
Figura 16. Unidade de ar condicionado utilizada nos ensaios laboratoriais (Dias, 2017).	36
Figura 17. Controlador de temperatura utilizado nos ensaios laboratoriais (Dias, 2017).	37
Figura 18. Fonte de tensão utilizada para controlo da humidade relativa do ar durante os ensaios experimentais (Dias, 2017).	37
Figura 19. Banco de evaporadores (Dias, 2017).	38
Figura 20. Instrumentação utilizada nos ensaios laboratoriais (Dias, 2017).	39
Figura 21. Localização dos sensores nas superfícies de entrada e saída e representação da entrada e saída do fluido refrigerante.	42
Figura 22. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de entrada do evaporador para o ensaio 1.	44
Figura 23. Superfície frontal do evaporador no momento em que o sensor 2 deteta a formação de gelo.	45
Figura 24. Superfície frontal do evaporador no momento em que o sensor 1 deteta a formação de gelo.	45
Figura 25. Camada de gelo formada ao longo dos 480 minutos de ensaio laboratorial.	46
Figura 26. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de saída do evaporador para o ensaio 1.	47
Figura 27. Camada de gelo formada na superfície de saída do evaporador.	48
Figura 28. Temperatura do ar à saída do evaporador ao longo do ensaio 1.	48
Figura 29. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de entrada do evaporador para o ensaio 2.	49
Figura 30. Superfície frontal do evaporador no momento em que o sensor 2 deteta formação de gelo.	50

Figura 31. Superfície frontal do evaporador no momento em que o sensor 1 deteta a formação de gelo.	50
Figura 32. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de saída do evaporador para o ensaio 2.	51
Figura 33. Superfície posterior do evaporador no momento em que o sensor 6 deteta formação de gelo.	52
Figura 34. Temperatura do ar à saída do evaporador ao longo do ensaio 2.	53
Figura 35. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de entrada do evaporador para o ensaio 3.	54
Figura 36. Superfície frontal do evaporador em $t = 168$ min.	54
Figura 37. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de saída do evaporador para o ensaio 3.	55
Figura 38. Camada de gelo formada nos 252 minutos de ensaio laboratorial.	56
Figura 39. Temperatura do ar à saída do evaporador ao longo do ensaio 3.	56
Figura 40. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de entrada do evaporador para o ensaio 4.	57
Figura 41. Camada de gelo formada ao minuto 168.	58
Figura 42. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de saída do evaporador para o ensaio 4.	59
Figura 43. Camada de gelo formada em $t = 54$ min.	59
Figura 44. Temperatura do ar à saída do evaporador ao longo do ensaio 4.	60
Figura 45. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de entrada do evaporador para o ensaio 5.	61
Figura 46. Camada de gelo formada em $t = 168$ min.	62
Figura 47. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de saída do evaporador para o ensaio 5.	62
Figura 48. Camada de gelo formada nos 216 minutos de ensaio laboratorial.	63
Figura 49. Temperatura do ar à saída do evaporador ao longo do ensaio 5.	64

Figura 50. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de entrada do evaporador para o ensaio 6.	65
Figura 51. Camada de gelo formada durante o ensaio laboratorial.	66
Figura 52. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de saída do evaporador para o ensaio 6.....	66
Figura 53. Camada de gelo formada nos 228 minutos de ensaio laboratorial.	67
Figura 54. Temperatura do ar à saída do evaporador ao longo do ensaio 6.....	68

Lista de Tabelas

Tabela 1. Tecnologias dos sistemas de refrigeração destinadas à economia de energia (NSW, 2011).	4
Tabela 2. Casos de estudo realizados. (Byun <i>et al.</i> , 2006).....	20
Tabela 3. Resumo dos sensores de detecção patenteados, bem como os seus inventores e aplicantes.	23
Tabela 4. Condutibilidade elétrica dos diferentes materiais presentes.....	29
Tabela 5. Resumo do passo de alheta utilizados em evaporadores.	34
Tabela 6. Características técnicas dos permutadores de calor constituintes do banco de evaporadores. (Dias, 2017)	38
Tabela 7. Condições utilizadas nos ensaios laboratoriais.....	43

Nomenclatura

Geral:

A	Área (secção), [m ²]
E	Diferença de potencial, [V];
F_p	Passo de alheta, [mm];
L	Comprimento, [mm]
t	Tempo, [min ou s];
T	Temperatura, [°C];
V	Velocidade, [m·s ⁻¹].

Índices inferiores:

ar	Ar;
$refrig$	Refrigerante.

Simbologia grega:

ϕ	Humidade relativa, [%];
δ	Espessura da alheta, [mm];
Δ	Variação;
B	Densidade de área, [m ² ·m ⁻³].

Acrónimos:

HVAC&R	Heating, ventilation and air-conditioning & refrigeration;
NSW	Government of New South Wales;
ASHP	Air-source heat pump;
UBI	Universidade da Beira Interior;
FabLab	Laboratório de Fabricação;
CAD	Computer-aided design.

1. Introdução

Atualmente, o consumo energético é um tema premente, uma vez que o atual estado não é sustentável nem eficiente e as consequências desencadeiam o aquecimento global do nosso planeta. A escassez de petróleo e a pouca eficiência dos equipamentos vieram agudizar o problema. No primeiro caso, é vital recorrer a fontes de energia renováveis e inesgotáveis, diminuindo, assim, as emissões de gases com efeito de estufa para a atmosfera. Do mesmo modo, é importante aumentar a eficiência dos sistemas e, por consequência, reduzir as necessidades de consumo. Assim, a principal motivação do presente trabalho reside na otimização da eficiência dos sistemas de refrigeração.

Os sistemas de aquecimento, ventilação, ar condicionado & refrigeração (HVAC&R - *Heating, Ventilation and Air Conditioning & Refrigeration*) são cada vez mais utilizados no quotidiano, muitas vezes sem se dar conta deles. No entanto, desempenham um papel extraordinariamente importante quer no conforto térmico propiciado, quer em funções dirigidas à conservação de alimentos. A refrigeração apresenta-se como uma área de estudo da engenharia, que tem prosperado nos últimos anos em virtude das exigências do dia-a-dia.

Os sistemas de refrigeração utilizam na sua constituição vários componentes, tais como: compressores, válvulas, condensadores, fluidos refrigerantes e evaporadores. Neste último componente, quando as temperaturas requisitadas são próximas à temperatura de congelação da água, ocorre formação de gelo que afeta substancialmente a eficiência do processo (Aljuwayhel *et al.*, 2008; Özkan & Özil, 2006; Cheikh & Jacobi, 2014). Inicialmente, a deposição de gelo pode ser benéfica, uma vez que reduz a resistência de contacto e a fina camada de gelo funciona como uma alheta, aumentando temporariamente o coeficiente de transferência de calor (Padki *et al.*, 1989). À medida que vai aumentando de espessura, a camada de gelo funciona como um isolante térmico, reduzindo as trocas entre o ar e as paredes do evaporador e provocando um bloqueio à passagem de ar. Então, a formação de gelo é prejudicial aos sistemas de refrigeração, resultando em perdas na eficiência. Portanto, é relevante mitigar ou minimizar a formação de gelo nestes sistemas.

Para tal, são utilizados diversos métodos de controlo, regulação e comando da descongelação da serpentina dos evaporadores, porém a maioria deles são controlados por temporizador (Amer & Wang, 2017). Por outras palavras, é definido um período de tempo de funcionamento, ao fim do qual se segue um outro período mais reduzido no qual se efetua a descongelação. Esta solução possibilita a introdução quer de descongelações desnecessárias, quer de descongelações incompletas, com consequentemente aumento do consumo energético e degradação do desempenho térmico.

Como referido anteriormente, os sistemas de refrigeração são usados em processos de conservação de alimentos. Uma das vantagens da conservação por refrigeração é preservar a aparência e a qualidade dos produtos, bem como inibir a proliferação microbiana. No entanto, as variações de temperatura provocadas pela formação de gelo nas paredes do evaporador desencadeiam condições para que exista um crescimento de microorganismos nocivos, que por sua vez afetam a aparência do produto e representam uma ameaça à saúde dos consumidores (Dudeja *et al.*, 2016).

Em suma, a segurança e qualidade alimentar e desempenho dos sistemas de refrigeração são duas temáticas indissociáveis, uma vez que os problemas associados aos sistemas de refrigeração desencadeiam ganhos térmicos e que, por consequência, reduzem a qualidade dos produtos alimentares. Assim, é importante estudar dispositivos capazes de melhorar a eficiência dos processos de refrigeração, tornando-os mais robustos.

1.1. Enquadramento

A formação de gelo nos evaporadores desenrola um papel importante quer no consumo energético quer na segurança e qualidade alimentar. De seguida são expostas as diferentes vertentes na qual se desenvolve esta relação.

1.1.1. Vertente energética

Segundo dados do relatório de *Office of Environment and Heritage* (NSW, 2011), instalações industriais de refrigeração podem melhorar a sua eficiência até 40%, a partir da aplicação de tecnologias que se encontram expostas na Tabela 1. Em cada uma das tecnologias propostas no relatório, são referidos os princípios motrizes adjacentes a

cada tecnologia, bem como os equipamentos requeridos, os benefícios para a instalação, a poupança exequível e período de retorno esperado. Na maioria dos casos, o retorno financeiro é atingido num período de tempo inferior a 3 anos.

A primeira tecnologia está associada ao controlo da pressão da instalação, uma vez que as pressões do compressor são dependentes das condições ambiente. A segunda tecnologia proposta no relatório relaciona-se com o controlo dos compressores. Há um número elevado de instalações de refrigeração industriais que possuem vários compressores e o seu controlo é realizado sem uma otimização da sua eficiência. Assim, propõe-se a implementação de um software para otimização de processos por controlo remoto. Esta é a forma mais eficaz de maximizar os benefícios da aplicação de lógica avançada como aqueles que foram referenciados anteriormente. Posteriormente, é proposto o reaproveitamento do calor retirado do ambiente a refrigerar, uma vez que existem determinadas instalações industriais que necessitam simultaneamente aquecimento e de refrigeração. O primeiro pode ser maioritariamente usado em instalações de água quente. De seguida, aborda-se a temática de formação de gelo e a gestão da descongelação. O processo de descongelação induz calor no espaço refrigerado, aumentando consequentemente a carga de trabalho do compressor por aumento da carga térmica e consequente aumento do consumo de energia. Outra técnica proposta resume-se ao controlo da temperatura de armazenamento, uma vez que existem produtos que possibilitam pequenas oscilações da temperatura de refrigeração. Durante a noite, a temperatura pode ser mais reduzida porque existem menos perdas térmicas derivadas da abertura de portas e do custo da energia elétrica é, também, mais baixo (no caso de tarifa bi- ou tri-horária). Durante o dia, as temperaturas utilizadas são ligeiramente maiores. Também o funcionamento do ventilador deve ser otimizado para proporcionar uma diminuição no consumo energético. Por norma, os ventiladores utilizados na indústria não possuem controlo de velocidade, pelo que ou operam na sua velocidade nominal ou se encontram desligados. Assim, estes elementos apresentam-se como uma fonte de calor contínua no interior do sistema de refrigeração. O sub-arrefecimento do refrigerante, quando em estado líquido, poderá também melhorar a eficiência da instalação, uma vez que há uma melhoria do processo termodinâmico da instalação de refrigeração.

Tabela 1. Tecnologias dos sistemas de refrigeração destinadas à economia de energia (NSW, 2011).

Tecnologias	Instalação parcialmente otimizada		Instalação não otimizada	
	Poupança	Consumo	Poupança	Consumo
Controlo da pressão da instalação	3%	97%	12%	88%
Controlo automático do estágio do compressor e da capacidade	5%	95%	15%	85%
Otimização da instalação de refrigeração por controlo remoto	5%	95%	8%	92%
Recuperação de calor	0%	100%	2%	98%
Gestão da descongelação	2%	98%	3%	97%
Temperatura ambiente variável	0%	100%	2%	98%
Velocidade do ventilador variável	0%	100%	2%	98%
Sub-arrefecimento do condensado	2%	98%	4%	96%
Revisão do projeto da instalação	2%	98%	10%	90%
Manutenção da condição da instalação	0%	100%	2%	98%
Energia total consumida na instalação de refrigeração	82.4%		54.3	
Poupança potencial energética total	17.6%		45.7%	

Outra possibilidade para diminuição do consumo energético passa pela revisão da instalação do sistema de refrigeração, uma vez que poderão existir várias imperfeições na montagem dos constituintes do sistema. Por último, um plano de manutenção assertivo e contínuo aperfeiçoamento para sistemas de refrigeração. Para os sistemas que utilizam amónia como refrigerante, este plano deve incorporar otimização do fornecimento de óleo lubrificante ao compressor e a purgação de ar e água do fluido refrigerante.

1.1.2. Vertente da qualidade alimentar

A deterioração dos alimentos é normalmente provocada por razões microbiológicas, bioquímicas, físicas, mecânicas e externas. A atividade microbiológica é considerada a razão mais importante no que diz respeito ao desperdício alimentar, uma vez que resulta na degradação da qualidade e da segurança alimentar. As atividades bioquímicas causam deteriorações enzimáticas e não-enzimáticas, enquanto que os processos físicos são caracterizados por mudanças físicas como desidratação e encolhimento, cristalização ou

lesões provocadas pelo frio e pelo congelamento. As razões mecânicas são compostas pelas contusões devido ao mau manuseamento e as pressões entre alimentos. Também outros fatores externos como infestação/contaminação por animais, pestes, roedores ou os seus excrementos contribuem para a deterioração (Dauthy, 1995).

Conforme indicado por Dudeja *et al.* (2016), as mudanças microbiológicas em alimentos frescos, processados ou aprovionados são causadas por bactérias e fungos. As bactérias podem ser classificadas de acordo com o intervalo de temperaturas ótimo: os psicrófilos são microrganismos que crescem a baixas temperaturas (entre -20°C e +10°C), enquanto que os mesófilos crescem à temperatura ambiente (entre 10°C e 40°C) e os termófilos a temperaturas elevadas (entre 41°C e 122°C).

Segundo dados da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2011), um terço dos alimentos produzidos, isto é, cerca de 1.3 mil milhões de toneladas, são desperdiçados globalmente, desde a sua produção até ao seu consumo. É de primordial importância garantir uma diminuição do desperdício quer nos países desenvolvidos, quer nos países em desenvolvimento. Muito desperdício de alimentos colhidos e armazenados pode ser reduzido a partir do uso correto de métodos conservação e, em particular, de refrigeração. Várias técnicas de conservação foram desenvolvidas e aplicadas ao longo dos tempos, tais como:

- Conservação por calor, que inclui processos por autoclavagem e de acidificação;
- Conservação por frio, que inclui processos de refrigeração e de congelação;
- Conservação por redução de mistura, que inclui processos de secagem e de redução de atividade de água;
- Outros tipo de conservação, como a irradiação e esterilização, que derivado à sua complexidade e custos elevados não são, ainda hoje, muito utilizados.

Por definição, os processos de refrigeração envolvem temperaturas ligeiramente superiores à temperatura de solidificação da água e, deste modo, retardam o crescimento de microrganismos e, em casos muitos específicos, podem perecer. Ainda assim, certos microrganismos são capazes de crescer lentamente e qualquer variação de temperatura facilitará o seu crescimento, diminuindo a qualidade dos produtos e, por

consequência, a sua validade. Esta variação de temperatura pode ainda fornecer condições ideais para o crescimento de microrganismos capazes de transmitir doenças.

O processo de congelamento pressupõe que os alimentos fiquem sujeitos a temperaturas inferiores a 0°C, o que provoca a morte à maioria das bactérias. Assim, a congelação constitui um método de conservação mais seguro do que a refrigeração. Porém, assim que os produtos são descongelados, devem ser prontamente consumidos. Outra desvantagem da congelação em relação à refrigeração prende-se com a aparência dos produtos, uma vez que os consumidores consideram os produtos congelados como menos frescos e mais processados (Stonehouse & Evans, 2015).

Mais recentemente, uma nova metodologia foi proposta e é denominada por *supercooling* (Stonehouse & Evans, 2015). Este processo visa o decréscimo da temperatura até ao ponto de congelamento sem que se dê a mudança de fase, isto é, existe um decréscimo da temperatura gradual sem que ocorra a formação de cristais de gelo. O seu uso na indústria alimentar é recente, mas tem sido utilizado para melhorar a validade de alguns tipos de alimentos, incluindo carne, peixe e vegetais.

1.2. O problema em estudo e a sua relevância

Com o aumento da utilização de sistemas de refrigeração no quotidiano, é de extrema importância melhorar a sua eficiência energética, de forma a baixar o consumo e garantir, de forma mais eficaz, a conservação de produtos alimentares. Com certeza, existirão outros fatores que necessitam de ser estudados e que interferem grandemente com estes sistemas. No entanto, este trabalho dará ênfase à formação de gelo nos evaporadores e às suas consequências.

O evaporador é o componente responsável pelas trocas térmicas entre os dois fluidos que compõem estes sistemas, o ar e o fluido refrigerante, e tem como principal objetivo a transferência de calor do ambiente a ser refrigerado para o exterior. Por definição, a transferência de calor dá-se da zona/corpo de maior temperatura para a zona/corpo cuja temperatura é mais reduzida de forma natural. Porém, para obtermos uma transferência de calor no sentido inverso, é necessário fornecer trabalho ao sistema. Por outro lado, o ar é uma mistura de gases, que inclui determinada percentagem de vapor de água. Quando as temperaturas de funcionamento são inferiores à temperatura de ponto de orvalho, dá-se a condensação de gotículas de água nas superfícies do

evaporador. Desta forma, dá-se início à formação de gelo. Este é um processo complexo, uma vez que ocorre, em simultâneo, transmissão de calor e massa (Tudor *et al.*, 2005).

A formação e o crescimento da camada de gelo nas superfícies do evaporador têm consequências para o sistema de refrigeração. Primeiro, a presença de uma camada de gelo reduz a capacidade do ventilador em fazer circular o ar, resultando na redução da capacidade de refrigeração do sistema à medida que o gelo se vai acumulando. Por outro lado, a presença de uma camada que possui uma condutividade baixa representa uma resistência térmica adicional entre o ar e o fluido refrigerante e que vai crescendo ao longo do tempo. Esta camada com baixa condutividade reduz o desempenho do evaporador (Aljuwayhel *et al.*, 2008).

A formação de gelo resulta numa perda de eficiência do sistema, que provoca um aumento do consumo elétrico e um aumento na temperatura. Dessa forma, é necessário recorrer a sistemas de descongelação, de modo a desbloquear a passagem de ar e aumentar as trocas térmicas. Porém, em muitos equipamentos industriais, estes sistemas são acionados recorrendo a temporizadores. Todavia, muitas outras estratégias de controlo são referenciadas na literatura, como por exemplo: sensor de potência do ventilador, sensor de fibra ótica, inteligência artificial, redes neurais, deteção da instabilidade do refrigerante e diferença de pressão. Depois de ativado o sistema de descongelação, existirá como consequência direta o aumento de temperatura (Amer & Wang, 2017).

Com recurso a uma estratégia de controlo da formação e monitorização eficiente de gelo, poder-se-á ajustar tanto o número de ciclos de descongelação, bem como otimizar ao máximo a sua duração. Normalmente, os métodos de descongelação são ativados quando cerca de 45% da superfície está obstruída pela camada de gelo, de maneira a obter maior eficiência (Amer & Wang, 2017), todavia, todo o processo poderá ser melhorado com outra estratégia e metodologia do funcionamento do sistema de descongelação.

De forma sucinta, os fatores evidenciados ao longo da subsecção culimam num aumento da eficiência, diminuindo as necessidades energéticas; aumentar a poupança financeira, a competitividade e, ainda, apresentar melhores produtos.

1.3. Objetivos e contribuição da dissertação

O principal objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de um sensor resistivo de monitorização da formação de gelo na superfície de evaporadores de sistemas de refrigeração e recorre a um método direto de deteção, cujo propósito é avaliar a resistividade mensurada entre os elétrodos do sensor. Desta forma, poder-se-á otimizar o método de descongelação e, por consequência, aumentar a eficiência do sistema, reduzir os gastos energéticos e melhorar a qualidade dos produtos que se pretendam preservar no interior de câmaras ou equipamentos de refrigeração. Para que se atinja o objetivo primordial da dissertação, é necessário percorrer as seguintes etapas:

- estado de arte acerca da caracterização e avaliação da formação de gelo em evaporadores;
- desenvolvimento do dispositivo de monitorização de gelo, no que diz respeito ao desenho técnico do sensor;
- análise experimental do desempenho do sensor em condições de formação de gelo, tendo em conta a instrumentação e respetiva calibração.

1.4. Visão geral e organização da dissertação

A estrutura da dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos, de forma a tornar mais clara a compreensão dos temas expostos.

O primeiro capítulo proporciona uma vista geral sobre o tema abordado no trabalho e o respetivo enquadramento nas questões da eficiência energética e segurança alimentar. Por fim, são apresentados os objetivos propostos.

O capítulo seguinte inicia-se com uma breve explicação sobre o fenómeno físico subjacente à formação de gelo em permutadores de calor. Posteriormente, expõe um conjunto de trabalhos de índole experimental, de simulação e de métodos de deteção de gelo patenteados.

No terceiro capítulo, são apresentadas algumas noções teóricas relacionadas com os permutadores de calor. De seguida, são apresentados dois desenhos de conjunto

idealizados para suportar os elétrodos no interior de evaporadores. O capítulo termina com a descrição da instalação experimental e a respetiva instrumentação utilizada.

O quarto capítulo descreve, em primeiro lugar, os ensaios laboratoriais realizados e a distribuição dos sensores nas superfícies de entrada e saída do evaporador. De seguida, são apresentados e discutidos os resultados obtidos com a realização dos ensaios.

O último capítulo apresenta as conclusões globais do trabalho realizado e as sugestões de trabalhos futuros.

2. Estado da arte

2.1. Introdução

A formação de gelo é uma temática bastante abordada pela comunidade científica, embora não seja um problema recente. Durante as últimas décadas, várias investigações têm sido desenvolvidas nesse âmbito, visando diferentes áreas e diferentes elementos dos sistemas de refrigeração. Na presente secção, serão apresentados diversos trabalhos, focando especialmente o processo físico de formação de gelo, os trabalhos experimentais, assim como de simulação computacional e os métodos de monitorização da formação de gelo. Nesta última subsecção, importa diferenciar os métodos de monitorização desenvolvidos e descritos na literatura e os métodos de monitorização patenteados.

2.2. Processo físico de Formação de gelo

O processo de formação de gelo envolve transferência de calor e massa, pelo que se torna particularmente importante entender o fenómeno físico subjacente.

Quando ar húmido passa sobre uma superfície que se encontra a uma temperatura abaixo da temperatura de congelamento da água, inicia-se a formação de gelo na superfície (Cheikh & Jacobi, 2014).

De facto, a temperatura da superfície irá desempenhar um papel fundamental, uma vez que:

- Se a temperatura da superfície for superior à temperatura de ponto de orvalho, apenas se dá transferência de calor sensível;
- Se a temperatura da superfície for inferior à temperatura de ponto de orvalho e superior a 0°C , a condensação do vapor de água pode ocorrer;
- No caso de a superfície possuir uma temperatura inferior a 0°C , o vapor condensado pode congelar;

- Por outro lado, se a temperatura da superfície e a temperatura de ponto de orvalho forem inferiores a 0 °C, a sublimação do vapor pode advir (Hermes *et al.*, 2009).

Também a humidade relativa do ar desempenha um papel fundamental na formação de gelo. Quando a humidade relativa do ar possui um valor inferior a 40%, a taxa de crescimento de gelo é mais lenta. No entanto, quando a humidade relativa do ar possui um valor mais elevado, conjugado com uma diferença de temperatura considerável entre a superfície e o ar circundante, resulta no aumento da taxa de crescimento (Amer & Wang, 2017).

Em termos de períodos de formação de gelo, Hayashi *et al.* (1997) indica a existência de três períodos distintos, a saber: (1) período de crescimento do cristal ou nucleação da camada; (2) período de crescimento da camada de gelo e o (3) período de crescimento total da camada de gelo. Na primeira etapa, existe o crescimento de uma camada fina de gelo na superfície. Por outras palavras, há um crescimento unidimensional da camada de gelo. No intervalo seguinte, os cristais de gelo formados desenvolvem-se na direção perpendicular à superfície, sem que exista a formação duma camada homogénea de gelo. No último período indicado, os cristais formados anteriormente ramificam e o seu crescimento gradual provoca a sobreposição de vários ramos. Desta forma, a camada fica mais uniforme até se tornar plana. Na Figura 1, estão representados os períodos de formação de gelo descritos anteriormente.

A formação de gelo envolve transferência de calor e massa simultaneamente, impulsionada pela diferença de temperatura e de fração molar entre a camada de gelo e o ar envolvente. O fluxo total de calor pode ser dividido em duas componentes: sensível e latente. O fluxo de calor latente está relacionado com o fluxo de massa de vapor de água que se deposita na camada de gelo, sendo que uma parte desse fluxo de massa de vapor de água contribui para o crescimento da camada, isto é, contribui para o aumento da espessura, e o restante aumenta a densidade da camada de gelo (Cheikh & Jacobi, 2014).

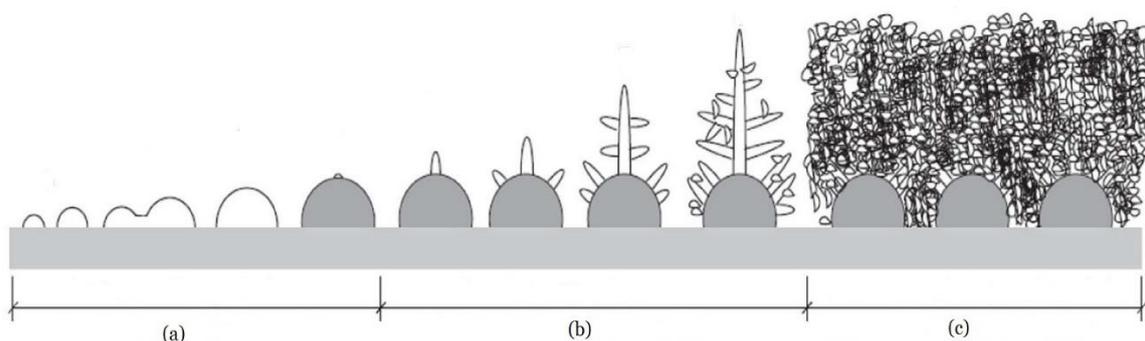


Figura 1. Períodos de formação de gelo. Legenda: (a) período de crescimento do cristal ou nucleação; (b) período de crescimento da camada de gelo e (c) período de crescimento total da camada de gelo. Imagem adaptada de Amer & Wang (2017).

Os permutadores de calor são dispositivos que permitem trocas de calor entre dois fluidos a temperaturas distintas, mas sem mistura entre ambos. Ou seja, existe uma barreira física entre os dois fluidos envolvidos no processo, como pode ser observado no esquema da Figura 2. Em termos de mecanismos de transmissão de calor, dá-se transferência de calor por condução e convecção. Entre o fluido circundante e a barreira e entre a barreira e o fluido refrigerante, o calor é transferido por convecção e ao longo da barreira é transferido por condução. O termo barreira é aqui utilizado para descrever o conjunto de tubos e alhetas que constituem os permutadores do tipo tubo e alhetas (*fin-and-tube*) e que impedem, em primeira instância, a mistura dos fluidos. As alhetas desempenham, também, a função de aumentar a área efetiva de transmissão de calor. Qualquer efeito da radiação é normalmente incluído no coeficiente convectivo da transferência de calor (Cengel, 1998).

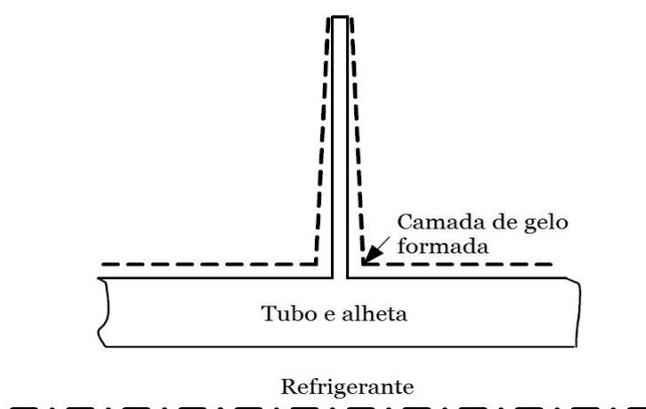


Figura 2. Representação esquemática da barreira formada pelo tubo e pela alheta e que separa os fluidos presentes nos sistemas de refrigeração (Tso *et al.*, 2006).

2.3. Trabalhos experimentais

Os trabalhos experimentais têm como principal objetivo determinar os parâmetros que aumentam a taxa de deposição de gelo na superfície de evaporadores.

Tassou *et al.* (2000) desenvolveram um trabalho extenso, no qual realizaram medições em laboratório e num supermercado, avaliando a influência de vários parâmetros. Em primeiro lugar, avaliou-se a variação da temperatura dos produtos durante 24 horas com quatro ciclos de descongelação. No pior caso, verificou-se que a temperatura dos produtos atingiu 12°C, que é uma temperatura distante daquela para a qual o expositor foi projetado para manter (5°C). A medição da temperatura dos produtos seria um bom indicador da formação de gelo, mas há um número inerente de dificuldades, que incluem: uniformidade da temperatura dos produtos devido à irregularidade na distribuição de ar e aos ganhos térmicos do expositor; diferentes produtos possuem diferentes propriedades que, em conjunto com a massa do produto e/ou da embalagem, pode influenciar a variação da temperatura do mesmo. Posteriormente, averiguaram-se o efeito dos parâmetros do estabelecimento na taxa de formação de gelo. Verificou-se que a temperatura e a humidade relativa do ar no interior se mantinham constantes ao longo do ano. No entanto, para uma temperatura do ar e uma atividade de compras constante, a humidade do ar é o parâmetro que mais influencia a taxa de formação de gelo. Através da Figura 3, é possível observar que o teor de humidade ao longo de ano é semelhante no exterior e no interior do estabelecimento. Os resultados dos testes indicam que um expositor de produtos laticínios requer até 50% menos processos de descongelação no inverno do que aqueles praticados durante o verão.

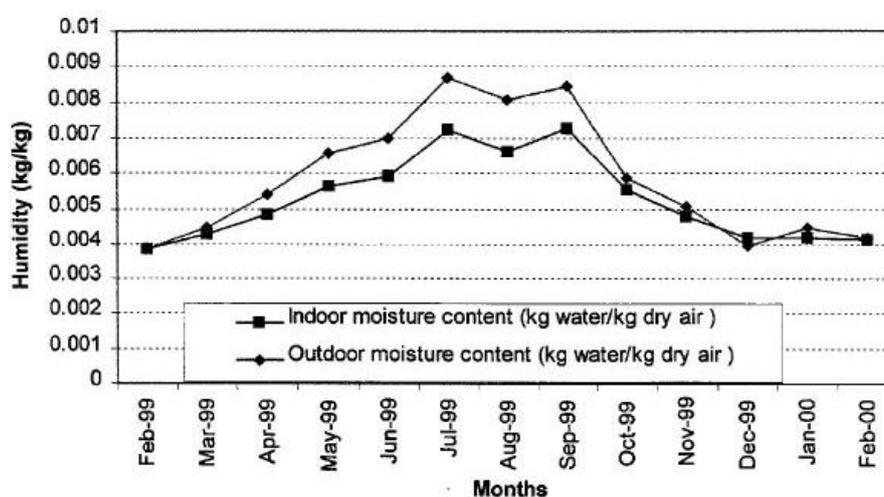


Figura 3. Variação do teor de humidade ao longo do ano, quer no interior quer no exterior do estabelecimento.

De seguida, procederam-se a testes laboratoriais para determinar a influência da temperatura e da humidade relativa do ar na taxa de deposição de gelo. Para o efeito, realizou-se um conjunto de testes com diferentes valores de temperatura e humidade relativa do ar e observou-se a quantidade de condensado recolhido. O aumento de temperatura e humidade relativa do ar desencadeia um acréscimo na quantidade de condensado. Portanto, a monitorização destes dois parâmetros deve ser tida em conta na conceção do sistema de controlo da descongelação.

Por último, verificou-se a influência da variação dos parâmetros de operação sob condições de gelo. Observou-se, em primeira instância, a influência da velocidade do ar para uma temperatura e humidade constantes. Concluíram que a taxa de deposição de gelo é mais lenta para valores reduzidos de humidade relativa do ar e a serpentina pode operar por um período de tempo mais longo.

Seker *et al.* (2003b) desenvolveram um trabalho experimental com objetivo de validar o método desenvolvido em Seker *et al.* (2003a). O trabalho experimental teve como principal foco determinar a condutividade total e a queda de pressão e proceder à comparação com os resultados obtidos pela aplicação do modelo matemático. Os resultados obtidos pelos dois trabalhos realizados são consistentes, embora exista alguma disparidade nos resultados obtidos na queda de pressão.

Özkan & Özil (2006) analisaram os parâmetros que afetam a formação de gelo e a sua estrutura. Procederam à medição da velocidade do ar e os efeitos que este parâmetro tem na taxa de formação de gelo. A taxa de evaporação da água também foi registada. Para realizar este estudo, recorreu-se a um frigorífico *no frost*.

Yan *et al.* (2005) avaliaram o desempenho de permutadores de calor do tipo *fin-and-tube* sob condições de gelo e o efeito do fluxo de ar, da humidade relativa do ar, da temperatura do refrigerante e o tipo de alheta na característica termo-hidráulica dos permutadores, i.e., na taxa de transferência de calor, no coeficiente total de transferência de calor e na queda de pressão do ar.

Xia *et al.* (2006) avaliaram o desempenho termo-hidráulico no lado do ar sob condição inicial de formação de gelo e para o subsequente processo de congelamento posterior ao processo de descongelação. No total, foram considerados 5 evaporadores com alhetas com diferentes geometrias e foram avaliados os seguintes parâmetros: coeficiente total de transferência de calor, queda de pressão, fator de atrito, fator de *Colburn* no período

inicial de formação de gelo. No período de descongelamento e no subsequente período de congelamento é estabelecida uma comparação para explorar os efeitos da geometria.

Aljuwayhel *et al.* (2008) desenvolveram um trabalho experimental para avaliar o efeito da temperatura, da humidade e caudal volúmico de ar. As medições efetuadas foram utilizadas como base para desenvolver um modelo matemático válido para evaporadores industriais que operem sob condições de gelo. As principais conclusões obtidas relacionam-se com: (a) a acumulação de gelo na superfície do evaporador causa um aumento da resistência à passagem de ar, i.e., queda de pressão; (b) a diminuição da passagem de ar proporciona um aumento da temperatura do ar e (c) o decréscimo da capacidade de arrefecimento.

2.4. Trabalhos de simulação computacional

Os trabalhos relacionados com a simulação computacional possuem extrema importância, uma vez que o processo de formação de gelo é complexo, devido à transferência simultânea de calor e massa. Contudo, o desenvolvimento destes modelos matemáticos e a sua credibilidade ficam bastante dependentes do desenvolvimento de trabalhos experimentais que corroborem os resultados obtidos pelo modelo matemático. Dessa forma, não existe uma clara separação entre a presente subsecção e a subsecção anterior do trabalho. Os trabalhos de modelação podem ser divididos em modelos teóricos e modelos empíricos (Na & Webb, 2004).

Devido à complexidade do processo, a maioria dos trabalhos desenvolvidos e apresentados recorrem a hipóteses que simplificam o entendimento e o desenvolvimento dos modelos.

Seker *et al.* (2003a) desenvolveram um modelo baseado em linguagem *fortran*. O principal objetivo do modelo é estudar o efeito da temperatura, da humidade relativa e do fluxo de ar, e da temperatura da superfície na espessura da camada de gelo, na queda de pressão do ar e no coeficiente total de transferência de calor.

Na & Webb (2004) propõem um modelo teórico, cujo principal objetivo é calcular a taxa de transferência de massa entre o fluxo de ar e a camada de gelo, uma vez que este parâmetro afeta diretamente a taxa de crescimento de gelo. Os dados experimentais e os dados obtidos pelo modelo são concordantes num intervalo até 15%.

Tso *et al.* (2006) desenvolveram um modelo geral distribuído, onde consideram a variação da espessura da camada de gelo ao longo da alheta devido à distribuição não uniforme da temperatura. Assim, o modelo é mais verosímil. Os resultados fornecidos pelo modelo são compatíveis com os resultados obtidos com o trabalho experimental.

Huang *et al.* (2008) apresentam um estudo numérico direcionado para o efeito da espessura da camada de gelo no desempenho da transferência de calor de permutadores de calor com 4 tubos. Os principais objetivos do trabalho são: examinar a influência da rugosidade da superfície e estudar o efeito das características do ventilador. Em consequência, são analisados ventiladores radiais e centrífugos.

Hermes *et al.* (2009) apresentaram um modelo teórico assente em pressupostos experimentais, uma vez que os estudos experimentais realizados assumem-se como uma base física para o desenvolvimento do modelo. O modelo desenvolvido adota que a camada de gelo é um meio poroso. Os resultados do modelo para a espessura da camada de gelo possuem um erro de $\pm 10\%$ quando comparados com os resultados obtidos do trabalho experimental.

Kandula (2011) descreve um modelo teórico unidimensional para prever o crescimento da cama de gelo e a sua densificação para escoamentos no regime laminar. Os resultados são depois comparados com um conjunto de dados experimentais obtidos por outros autores, uma vez que as geometrias testadas experimentalmente são iguais à geometria considerada para o desenvolvimento do modelo proposto.

2.5. Métodos de deteção de gelo

Como referido anteriormente, a formação de gelo na superfície de evaporadores é especialmente nefasta para os processos de refrigeração. Então, é importante mitigar ou minimizar a formação de gelo nestes sistemas, de forma a melhorar a eficiência dos mesmos. Em consequência, vários métodos de descongelação são aplicados. Para atingir uma eficiência mais elevada, os métodos devem ser acionados quando a camada de gelo cobre 45% da superfície (Amer & Wang, 2017). Os métodos de descongelação podem ser divididos em dois conjuntos, os métodos diretos e os métodos passivos, tal como mostra o esquema da Figura 4.

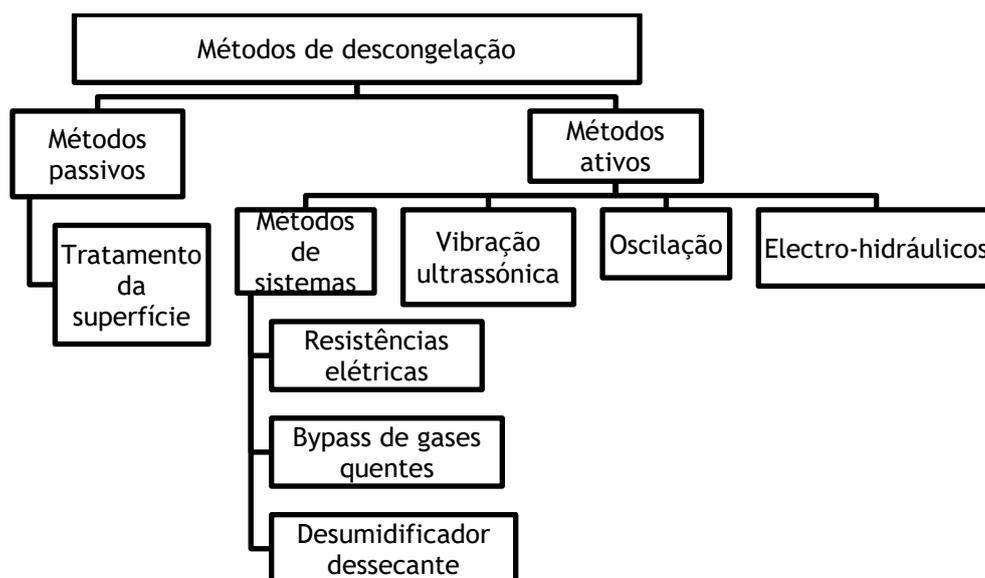


Figura 4. Esquema sumário dos métodos de descongelamento (Amer & Wang, 2017)

Os métodos de descongelamento passivos envolvem tratamentos da superfície, onde ocorrem mudanças na forma, geometria, estrutura ou através de revestimento. Ou seja, os métodos passivos têm como principal objetivo reduzir ou atrasar a formação de gelo sem consumo de energia adicional. Por outro lado, os métodos ativos requerem o fornecimento de alguma energia (Amer & Wang, 2017).

Para que os métodos de descongelamento sejam corretos e eficazmente acionados, é necessário recorrer a métodos de detecção. Existe um número considerável de sensores para detectar a formação de gelo, quer descritos na literatura, quer patenteados. Nas subsecções subsequentes, descrevem-se alguns sensores em cada uma das vertentes.

2.5.1. Métodos de detecção de gelo

Buick *et al.* (1978) propõem um sensor de monitorização baseado na medição da capacitância do meio presente entre as alhetas do evaporador. Isto é, a partir do valor da constante dielétrica, é possível detectar a formação de gelo, uma vez que esta constante altera o seu valor na presença de diferentes elementos.

O sensor é constituído por três placas, sendo que duas delas ficam juntas à superfície do evaporador e a placa interior é isolada eletricamente das placas externas e, assim, isolada termicamente do evaporador. Contudo, existiram alguns problemas relacionados

com o isolamento, uma vez que este era permeável à entrada de água. Esta estratégia de controlo é prática devido à simplicidade no controlo do processo de descongelação, porque pode ser implementado em dispositivos eletrónicos (Amer & Wang, 2017). Contudo, os seus resultados não são fidedignos devido aos efeitos da infiltração de água no isolamento. A longo termo, o sensor requeria um processo de descongelação contínuo. Assim, o sensor foi imerso em verniz e os resultados obtidos melhoraram consideravelmente.

Paralelamente, foi testado um sensor de deteção baseado numa sonda térmica com resistência de platina. Contudo, este sensor é mais efetivo na compreensão dos efeitos da formação de gelo do que na deteção da formação de gelo. O sensor baseia-se na diferença de temperatura entre a superfície do permutador de calor e o ar. Pelos ensaios realizados, alguns problemas relacionados com ruído elétrico foram detetados.

Byun *et al.* (2006) descrevem outro sensor baseado na tecnologia fotoelétrica, com o principal objetivo de detetar o início da formação de gelo e avaliar a iniciação do processo de descongelação mais eficiente. Os resultados obtidos com a aplicação deste sensor são posteriormente comparados com os resultados obtidos com o sistema de descongelação controlado por tempo.

O sensor tem uma constituição semelhante à descrita anteriormente e também se baseia na radiação infravermelha, uma vez que estes são mais estáveis a perturbações do que radiação visível e ultravioleta. A queda de tensão do sensor é de 0,2 V quando se inicia o processo de formação de gelo e de 4,8 V quando a passagem de ar é completamente bloqueada pela camada de gelo.

São estudados seis casos distintos, conforme descrito na Tabela 2, uma vez que é necessário determinar o momento para iniciar o processo de descongelação. São utilizados 9 sensores nas serpentinas exteriores da bomba de calor.

O intervalo de funcionamento do sensor está compreendido entre 0,2 V e 4,8 V. No entanto, pelos vários ensaios realizados, uma queda de tensão de 4,0 V entre o emissor e o recetor corresponde a uma condição de bloqueio, pelo que este valor funciona com um valor limiar para iniciar o ciclo de descongelação.

Tabela 2. Casos de estudo realizados. (Byun *et al.*, 2006)

Casos	Condição
Caso 1	Ciclo de descongelação inicia quando o valor detetado por um sensor é maior que 4 V.
Caso 2	Ciclo de descongelação inicia quando o valor detetado por dois sensores é maior que 4 V.
Caso 3	Ciclo de descongelação inicia quando o valor detetado por três sensores é maior que 4 V.
Caso 4	Ciclo de descongelação inicia quando o valor detetado por quatro sensores é maior que 4 V.
Caso 5	Ciclo de descongelação inicia quando o valor detetado por cinco sensores é maior que 4 V.
Caso 6	Ciclo de descongelação inicia quando o valor detetado por seis sensores é maior que 4 V.
Controlo por tempo	Depois de um processo de aquecimento de 60 min, segue-se um período de 8 minutos do processo de descongelação.

Concluiu-se que os valores do coeficiente de desempenho (*Coefficient of Performance* - COP) não decresciam quando três sensores detetavam a formação de gelo. Quando o quarto foto-acoplador detetava gelo, o valor do COP decrescia 6,0%. O mesmo sucedia para o quinto e sexto acoplador com um decréscimo de 6,5% e 7,5%, respetivamente. Também o período de aquecimento seria maior, com um aumento de 7,0 a 9,0%, e o período de descongelação seria encurtado entre 1,5 a 6 minutos do que os períodos verificados pelo controlo de tempo.

De uma forma geral, o caso 4 apresenta a melhor eficiência, uma vez que necessita de um número menor de ciclos de descongelação e apresenta a maior capacidade total de aquecimento. A capacidade total de aquecimento seria 5,5% maior do que aquela verificada para o controlo por tempo.

Lawrence & Evans (2008) apresentam um algoritmo capaz de prever a necessidade de descongelação a partir da instabilidade do fluxo de fluido refrigerante. O algoritmo permite diminuir o número de descongelações sem que exista um aumento excessivo da temperatura dos alimentos armazenados em prateleiras de expositores.

As condições de instabilidade iniciam-se devido à resistência térmica entre o evaporador e o ar, como resultado da camada de gelo formada. Esta instabilidade ocorre devido à incapacidade de a válvula de expansão controlar o fluxo de fluido refrigerante de forma adequada. À medida que a espessura da camada aumenta, a quantidade de calor que

pode ser retirada diminuí e, como consequência, o número de vezes que a válvula de expansão pode abrir sem que o fluido refrigerante flua para o evaporador diminui. Ou seja, com a presença de gelo na superfície do evaporador, a válvula de expansão é incapaz de controlar o fluxo de refrigerante que atravessa o evaporador de forma estável. O algoritmo é testado sob duas condições diferentes de humidade e temperatura do ar, num total de 7 ensaios.

A aplicação deste algoritmo permitiria o aumento do período requerido para o processo de descongelação e, ainda, economizar 45 a 60% de energia no decorrer do processo.

Xiao *et al.* (2009) descrevem um sensor que se baseia na tecnologia fotoelétrica. Os sensores fotoelétricos possuem um emissor e um recetor de infravermelhos. Quando o emissor é alimentado, raios infravermelhos são enviados para o recetor e, então, irá absorver a energia luminosa e converter essa energia em corrente elétrica. No caso de não existir nenhum bloqueio entre o emissor e o recetor, a queda de tensão irá estabilizar e possuir um valor de 0,2 V. Se existir um bloqueio, a queda de tensão irá subir drasticamente. O sensor foi testado com o principal objetivo de relacionar a tensão elétrica com a altura da camada de gelo. A partir da análise dos gráficos, foram distinguidas três fases: fase inicial, fase de resposta e fase estável, como se pode ver na Figura 5.

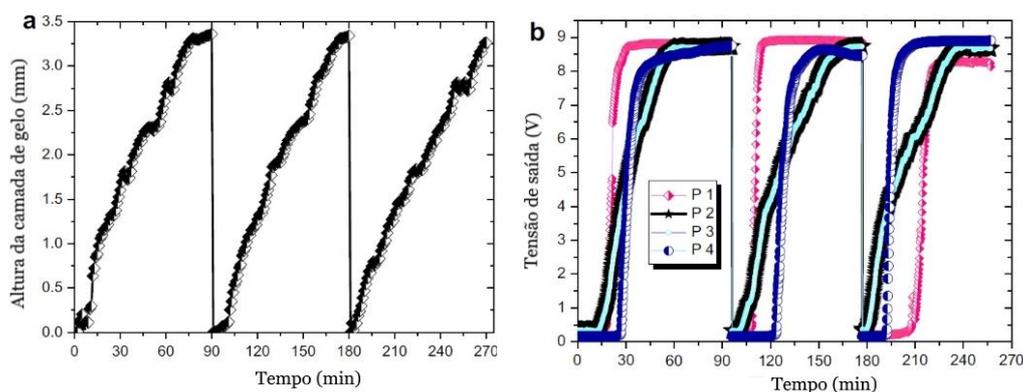


Figura 5. Resultados obtidos e a respetiva diferenciação entre as fases inicial, de resposta e estável. Legenda: (a) gráfico da altura da camada de gelo em função do tempo e (b) gráfico da tensão de saída em função do tempo para os 4 sensores testados (Xiao *et al.*, 2009).

Nas fases inicial e estável, a tensão de saída aumenta de 0,2 V para 9,0 V. Esta propriedade confere ao sensor uma característica semelhante ao controlo *on-off*, visto que o valor 0,2 V corresponde ao início do processo de formação de gelo e 9,0 V corresponde à necessidade de descongelação. Na fase de resposta, a tensão de saída é linear com o crescimento da camada de gelo. Esta característica permite estabelecer uma relação entre a tensão de saída e o crescimento da camada de gelo. Este facto permite desenvolver uma estratégia eficaz para medir a altura de gelo. No entanto, algumas ocorrências são notadas na fase de resposta, principalmente no início e no fim da etapa. Então, foi necessário estudar os efeitos da corrente elétrica de entrada do sensor, a iluminação, a temperatura da superfície e do ar ambiente, a localização do sensor e a altura máxima da camada de gelo.

Conclui-se que uma corrente elétrica com um valor mais elevado tende a estabilizar a tensão de saída do sensor, bem como a eliminação do problema associado às temperaturas. Por outro lado, a localização do sensor e a iluminação são dois fatores a ter em conta. Fica, também, comprovado que o sensor é capaz de detetar diferentes alturas de camada de gelo.

Zhu *et al.* (2015) desenvolveram uma estratégia de controlo, denominada estratégia T-H-T, para bombas de calor (ASHP - *Air-Source Heat Pump*) baseada em três parâmetros do processo: temperatura ambiente, humidade e período de aquecimento. Estabeleceram, ainda, uma comparação com o método tradicionalmente aplicado e que se baseia apenas na temperatura ambiente e no tempo, denominado método T-T.

Para controlar de forma eficaz os parâmetros do processo, são utilizados sensores de temperatura e de humidade na instalação de testes, com uma área total de 185 m². A duração total do ensaio foi de 2 anos, sendo que o método T-T foi testado entre 2012 e 2013 e o método T-H-T entre 2013 e 2014. Várias condições de temperatura e humidade relativa foram consideradas. As principais conclusões são as seguintes:

- O método T-H-T pode decidir de forma correta o início do processo de descongelação sob diferentes condições de gelo. Com este método, a descongelação inicia-se quando: 90% da superfície do evaporador coberta com a camada de gelo; diferença de temperatura entre a sucção e a descarga do compressor aumentar cerca de 20%; e a capacidade de aquecimento diminuir aproximadamente 30%;

- O método T-H-T pode evitar problemas de descongelação sob condições nas quais não existe gelo na superfície, tal como acontece com o método T-T;
- O método proposto é estável, então pode decidir iniciar o processo de descongelação sob quaisquer condições ambiente;
- Por último, o método descrito é adequado para controlar o processo de descongelação e possui um desempenho mais competitivo do que o método tradicional.

2.5.2. Sensores de deteção patenteados

Depois de apresentados alguns exemplos de métodos de deteção descritos na literatura, é importante complementar ainda mais esta secção, descrevendo também alguns dos sensores já aplicados na indústria. A Tabela 3 apresenta de forma sucinta todos os sensores que vão ser alvo de descrição nesta subsecção, bem como os inventores e os aplicantes. Existe um número bastante elevado de sensores patenteados e utilizados nos mais variados equipamentos.

Tabela 3. Resumo dos sensores de deteção patenteados, bem como os seus inventores e aplicantes.

Ano	Princípio de medição	Inventores	Aplicante
1978	Fotoeletricidade	S. C. Peek	GTE Sylvania Incorporated
1979	Piezoelasticidade	N.T. Kamiyama H. K. Miyamoto	Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.
1980	Fotoeletricidade	J. L. Behr	Emerson Electric Co
1981	Temperatura	J. R. Jaeschke	Eaton Corporation
1999	Impedância	G. W. Codner D. A. Pruzan R. L. Rauchhorst A. D. Reich D. B. Sweet	The B. F. Goodrich Company
2000	Temperatura	T. Nojiri	Ishizuka Electronics Corporation
2002	Resistência térmica total	P. D. French J. R. Butz B. D. Veatch M. W. O'Connor	P. D. French; J. R. Butz; B. D. Veatch e M. W. O'Connor

Peek (1978) concebeu um dispositivo de monitorização baseado em sensores fotoelétricos, constituído por um emissor e um recetor: é gerado um pulso infravermelho que é refletido pela camada de gelo e é recolhido no recetor, que produz um sinal analógico com a informação recolhida. De seguida, esse sinal analógico é aplicado a um comparador que ativa o processo de descongelação quando atinge um determinado nível de gelo na superfície e desativa o processo quando se atinge um valor mais baixo. A Figura 6 demonstra um exemplo da montagem proposta.

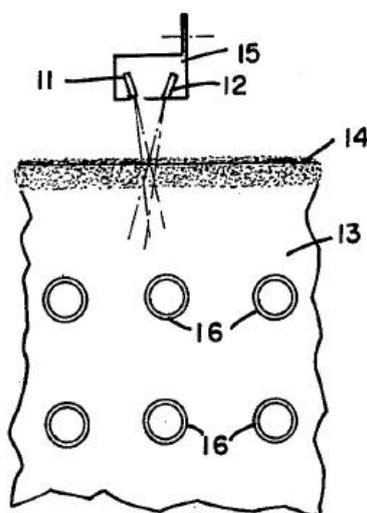


Figura 6. Montagem proposta por Peek (1978), com recurso a dois sensores fotoelétricos.

Kamiyama & Miyamoto (1979) desenvolveram um sensor para detetar o início da formação de gelo em frigoríficos e congeladores. O sensor é capaz de detetar a presença de gelo em função da mudança nas características do elemento piezoelétrico, nomeadamente a sua impedância. Este é composto pelo elemento piezoelétrico firmado num diafragma de metal. O diafragma possui três funções importantes para o funcionamento do sensor: ser oscilado pelo elemento piezoelétrico; funcionar com uma placa de deteção onde se dá a formação de gelo e alimentar o sensor. Então, o diafragma deve ser construído num material duro e que possua capacidade de conduzir eletricidade e calor. Na Figura 7, observa-se o sensor piezoelétrico descrito. São propostos vários esquemas para incorporar os princípios básicos do sensor.

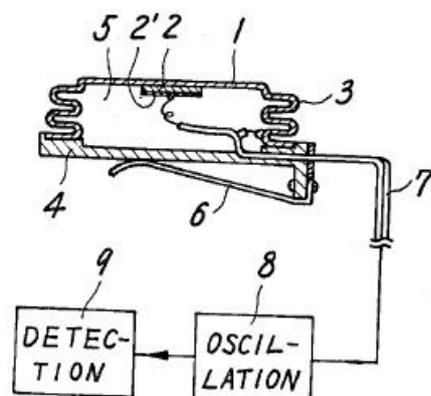


Figura 7. Princípio geral do sensor desenvolvido por Kamiyama & Miyamoto (1979) .

Behr (1980) projetou um dispositivo para monitorização de gelo composto essencialmente por um suporte adaptado para montagem direta na estrutura do evaporador e por um fotorrecetor e uma fonte de energia eletromagnética. É no suporte desenvolvido que se dá o crescimento da camada de gelo. O fotorrecetor e a fonte de energia são montados em lados opostos do suporte, mantendo-se em linha de vista um com o outro. Enquanto não existir uma camada de gelo considerável que obstrua a linha traçada entre o ambos os elementos, o método de descongelação mantém-se desativo. A estrutura possibilita a alteração da distância entre o fotorrecetor e a fonte de energia eletromagnética e a espessura de gelo permitida pode também ser variada. Um esquema da estrutura desenvolvida pode ser observado na Figura 8.

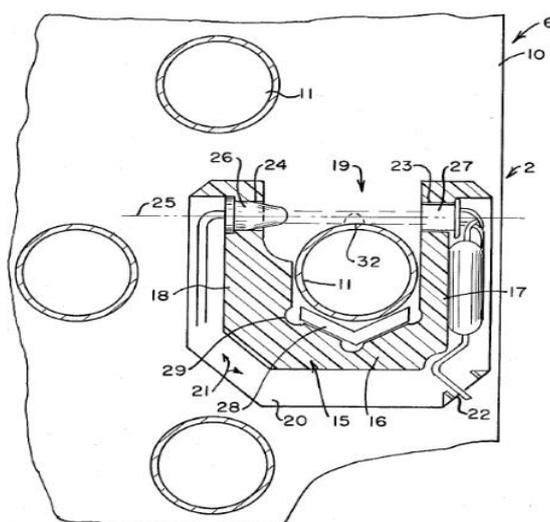


Figura 8. Esquema da montagem desenvolvida por Behr (1980) e que engloba o fotorrecetor e a fonte de energia eletromagnética.

Jaeschke (1981) propõe um sensor baseado na aplicação de um termistor, que funciona em paralelo com um temporizador e apresenta-se com uma adição ao circuito de controlo. O termistor é mantido à mesma temperatura que a serpentina do permutador de calor. Quando o controlo do ciclo de descongelação é ativado, corrente elétrica passa pelo termistor, resultando num incremento da sua temperatura. Em consequência deste aumento de temperatura, o gelo acumulado na sua estrutura derrete. Se a quantidade de gelo adjacente à estrutura do termistor derreter no intervalo de tempo determinado pelo temporizador, o circuito de descongelação não será ativado.

Codner *et al.* (1999) desenvolveram um sensor para monitorização baseando-se na medição da impedância. Este é um sensor muito semelhante ao que se pretende desenvolver no presente trabalho. O principal objetivo do sensor proposto por medir a impedância do meio presente entre dois elétrodos. Portanto, ele é composto por dois elétrodos dispostos na superfície do evaporador, com um arranjo paralelo às alhetas do evaporador. As suas principais características são a simplicidade de construção, fidedigno, de custo reduzido. Este sensor é capaz de distinguir o estado líquido e o estado sólido da água, enquanto que os sensores capacitivos não distinguem os dois estados.

Nojiri (2000) criou um sensor baseado em sondas de temperatura, cuja estrutura é composta essencialmente por dois elementos sensíveis à temperatura, com o propósito de monitorizar as temperaturas da camada de gelo e do ar circundante e uma estrutura na qual se dá o crescimento da camada de gelo. Deste modo, o método de monitorização deste sensor baseia-se na diferença de temperaturas entre os dois ambientes, i.e., da camada de gelo formada na estrutura e do ar circundante. A Figura 9 representa uma das várias configurações descritas pelo autor. O dispositivo garante excelente durabilidade em termos de resistência à água e à humidade, uma vez que possui isolamento e, também, um bom desempenho preciso na deteção da camada de gelo.

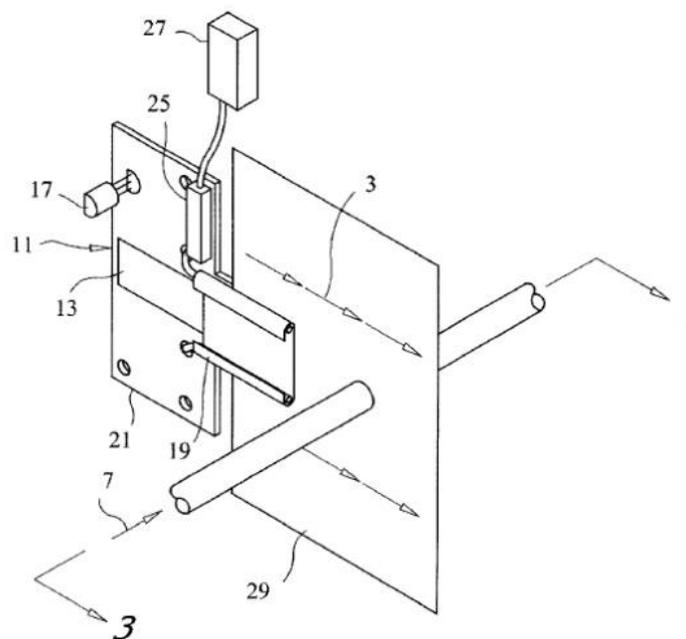


Figura 10. Configuração do dispositivo desenvolvido por French *et al.* (2002) e o respetivo acoplamento à alheta do evaporador.

Graça (2014) desenvolveu um sensor resistivo, que se baseia na medição da condutibilidade elétrica do meio presente entre dois elétrodos, que são eletricamente carregados. Assim, mediante a variação da condutibilidade elétrica do meio, existirão diferentes quedas de tensão, pelo que é possível avaliar a formação de gelo em evaporadores. As principais características do sensor desenvolvido prendem-se com a simplicidade e o reduzido custo associado à sua construção. Na Figura 11, encontra-se esquematizado o circuito elétrico utilizado, sendo constituído por duas resistências de 100 k Ω , um transístor e uma fonte de alimentação. Os dois elétrodos são colocados no evaporador de forma a monitorizar a camada de gelo e o seu crescimento.

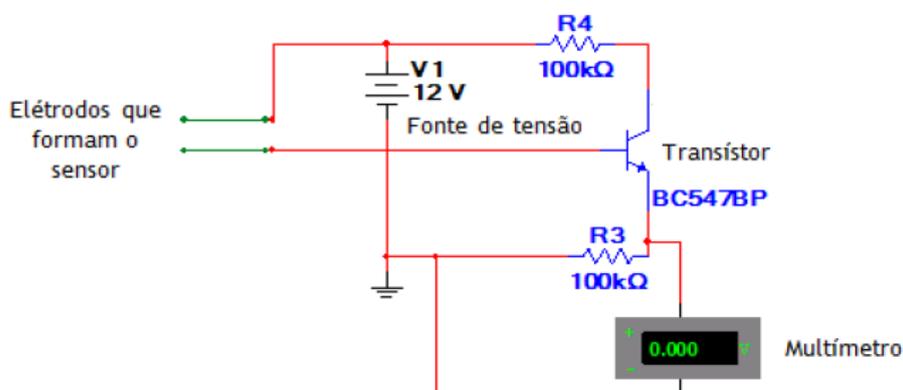


Figura 11. Esquema do circuito de aquisição de dados (Graça, 2014).

A potencialidade do sensor desenvolvido baseia-se na diferença de condutibilidade elétrica dos diferentes materiais em causa, como é possível verificar na Tabela 4.

Tabela 4. Condutibilidade elétrica dos diferentes materiais presentes.

Material	Condutibilidade térmica (S/m)
Ar	3×10^{-5} a 8×10^{-5} (20°C)
Água Potável	5×10^{-4} a 5×10^{-2} (20°C)
Gelo	1×10^{-6} a 1×10^{-10} (-10°C)

2.6. Nota conclusiva

Atualmente existem diversos trabalhos de índole experimental e de modelação matemática, bem como um elevado número de dispositivos de monitorização da formação de gelo descritos e aplicados industrialmente. Contudo, os dispositivos de monitorização de gelo não possuem uma utilização consensual, devido a alguns fatores com a complexidade, o custo ou a sua eficiência na deteção de gelo.

3. Materiais e Métodos

3.1. Introdução

A presente secção do trabalho tem como principal objetivo apresentar alguns conceitos importantes e recursos necessários para a realização do trabalho experimental. A primeira subsecção abrange noções teóricas relacionadas com o evaporador. De seguida, é apresentada a descrição dos desenhos de peças idealizadas para suportar os elétrodos no interior dos evaporadores. Na seguinte subsecção, engloba-se a exposição da instalação experimental e a instrumentação utilizada.

3.2. Permutadores de calor

Como referido na subsecção 2.2., os permutadores de calor possuem duas grandes funções: em primeiro lugar, efetuarem trocas térmicas entre os dois fluidos envolvidos no processo e, por outro lado, impossibilitar que esses dois fluidos estejam em contacto direto. Os permutadores de calor possuem uma variedade de aplicações ampla, tais como: produção de energia; indústria de processamento, alimentar e química; eletrónica; recuperação de calor industrial; indústria de transformação e aplicações de ar condicionado e refrigeração, entre outras (Cengel, 1998).

Estes dispositivos podem ser classificados segundo alguns critérios, a saber:

1. Geometria de construção: tubos, lâminas e superfícies estendidas;
2. Mecanismo de transmissão de calor: fase única ou bifásico;
3. Arranjo de fluxos: paralelo, em contra-corrente e cruzado (Kakac *et al.*, 2012).

Assim, existem diversos tipos de permutadores de calor, de entre os quais interessa salientar os evaporadores tubo e alhetas (*fin-and-tube*), uma vez que se trata do equipamento utilizado nos testes laboratoriais.

Os evaporadores *fin-and-tube* são considerados permutadores de calor compactos, uma vez que são concebidos para possuírem uma área de transmissão de calor por unidade de volume maior, i.e., concebidos para alcançar uma maior taxa de transferência de calor entre os dois fluidos. À razão entre a área da superfície de transmissão de calor e o volume do evaporador denomina-se densidade de área, β . Quando o valor da razão é superior a $B > 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$, o permutador de calor é considerado compacto (Cengel, 1998).

A colocação de alhetas nos evaporadores *fin-and-tube* tem, assim, como principal objetivo aumentar a área de transmissão de calor e, por consequência, aumentar o respetivo valor da densidade de área. A este respeito, existem também diferenças na geometria das alhetas que são comumente utilizadas na construção dos mesmos (Cengel, 1998). A Figura 12 apresenta alguns tipos de alhetas empregues para esse efeito.

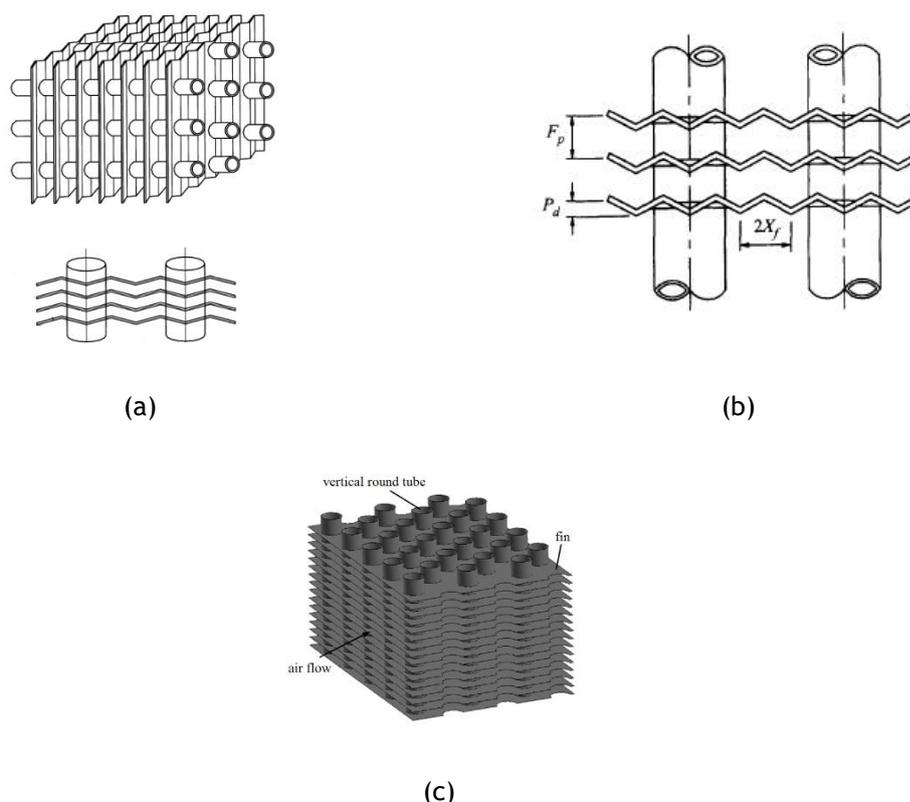


Figura 12. Vários tipos de alhetas utilizadas em evaporadores. Legenda: (a) ondulada (Wang *et al.*, 1999); (b) ondulada *Herringbone* (Wang *et al.*, 1999); (c) plana (Kong *et al.*, 2016).

Estes são permutadores de calor com um fluxo cruzado, uma vez que o fluido ao qual se pretende retirar calor circula no sentido perpendicular ao do fluido refrigerante. Adicionalmente, as alhetas forçam o ar a circular por um determinado espaço, prevenindo que o ar circule numa direção transversa e, neste caso, o fluxo cruzado é considerado não-misturado. No caso contrário, o fluxo cruzado é considerado misturado, uma vez que o fluido pode circular no sentido transversal.

Por outro lado, o alinhamento dos tubos também é alvo de configuração, podendo este assumir uma configuração *in-line* ou *staggered*. A principal diferença entre as duas configurações é observada na Figura 13.

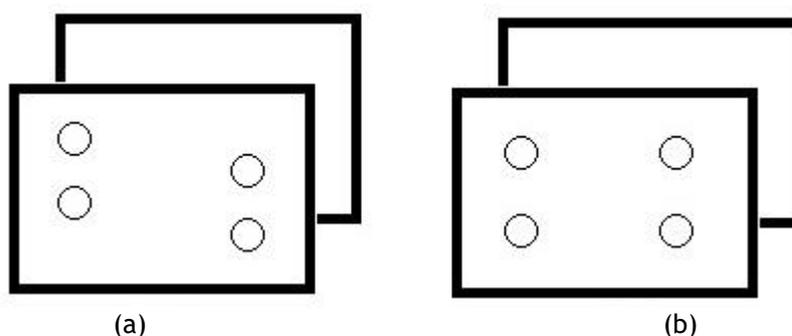


Figura 13. Alinhamentos de tubos. Legenda: (a) *Staggered* e (b) *In-line*.

3.3. Desenhos técnicos

Nesta subsecção, é apresentado o desenho da peça utilizada para suportar os eletrodos em evaporadores.

O problema mais evidente durante a idealização das peças foi a reduzida distância entre alhetas, i.e., o espaçamento entre alhetas dos evaporadores possui um valor reduzido, ao que acresce a geometria das mesmas. Desta forma, é necessário fazer um levantamento de espaçamento entre alhetas utilizados em evaporadores. Na Tabela 5 é apresentada uma compilação dos trabalhos científicos mais relevantes de análise do desempenho de evaporadores face às condições de operação.

Tabela 5. Resumo do passo de alheta utilizados em evaporadores.

Referência	Passo de alheta, F_p [mm]	Espessura da alheta, δ [mm]	Geometria da alheta
Wang <i>et al.</i> (1999)	1,59 - 3,58	0,12	Ondulada <i>Herringbone</i>
Wang <i>et al.</i> (1999)	1,21 - 3,14	0,115 - 0,12	Ondulada
Wang <i>et al.</i> (2002)	1,21 - 6,45	0,11 - 0,25	Ondulada
Seker <i>et al.</i> (2003)	10	-	-
Wongwises <i>et al.</i> (2005)	1,41 - 2,54	0,115 - 0,250	Ondulada <i>Herringbone</i>
Jabardo <i>et al.</i> (2006)	1,81 - 2,54	0,135	Ondulada
Jabardo <i>et al.</i> (2006)	1,81 - 2,54	0,135	Persiana
Wang <i>et al.</i> (2011)	1,64 - 3,75	-	Ondulada <i>Herringbone</i>

Assim, pode-se concluir que os passos de alheta mais frequentes em evaporadores disponíveis no mercado se encontram compreendidos no intervalo de 1 mm até aos 7 mm.

No caso de passos de alheta $F_p < 3$ mm, os elétrodos devem ser colocados na estrutura do evaporador, com o devido isolamento elétrico.

No caso de passos de alheta $F_p > 3$ mm, a peça utilizada nos ensaios pode ser adaptada: a largura da peça requerida será correspondente ao passo de alheta do evaporador em causa. Se for necessário um reforço, pode ser aplicado um sistema de mola ao sistema, tal como é demonstrado na Figura 14.

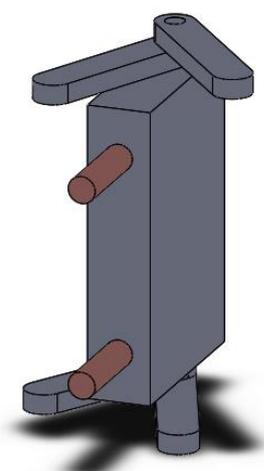


Figura 14. Adaptação da peça utilizada para reforçar a fixação entre alhetas, através de um sistema de mola.

3.3.1. Protótipo do sensor

O sensor é constituído por 2 eléctrodos de cobre comercial com $A = 1,5 \text{ mm}^2$ de secção e com um comprimento total de $L = 150 \text{ mm}$. Estes eléctrodos foram acoplados numa peça produzida na impressora 3D *Stratasys uPrint SE* do FabLab da UBI. Para os ensaios experimentais foram desenvolvidos 8 sensores.

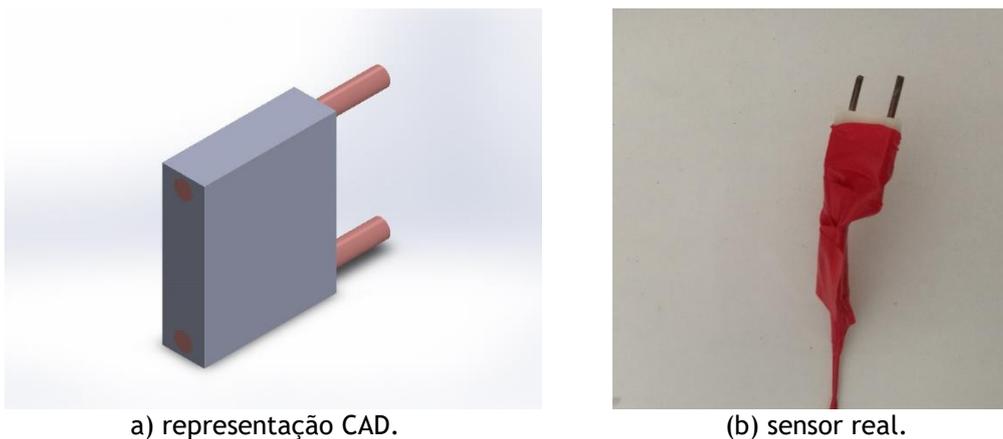


Figura 15. Ilustração do sensor.

O desenho técnico da peça impressa encontra-se no Anexo A do presente trabalho.

3.4. Instalação experimental

Nesta subsecção do trabalho, descreve-se a instalação experimental utilizada, bem como a respetiva instrumentação. A instalação experimental utilizada foi desenvolvida por Dias (2017), encontrando-se nesta referência uma descrição detalhada da instalação.

Os sensores são aplicados num banco de evaporadores utilizado para fazer o estudo de condições de operação que reduzem a formação de gelo em unidades frigoríficas, cujo objetivo é realizar uma condensação do vapor de água presente no ar, antes deste ser refrigerado (Dias, 2017).

A instalação experimental é constituída por:

- um equipamento de ar condicionado;
- um banco de evaporadores;
- um *chiller*.

O ar condicionado possui na sua estrutura um ventilador, duas resistências de aquecimento de ar, duas resistências de pré-aquecimento de ar, um compressor e uma caldeira com 3 resistências (Dias, 2017). Na Figura 16, encontra-se exposta a unidade de ar condicionado utilizada nos ensaios laboratoriais.



Figura 16. Unidade de ar condicionado utilizada nos ensaios laboratoriais (Dias, 2017).

Uma das resistências de pré-aquecimento de ar está ligada a um controlador de temperatura. Este controlador possui um termopar tipo T, inserido no interior da unidade de ar condicionado. Quando a temperatura do ar é menor do que temperatura estipulada pelo controlador de temperatura, a resistência de pré-aquecimento é ativada (Dias, 2017). O controlador de temperatura é apresentado na Figura 17.



Figura 17. Controlador de temperatura utilizado nos ensaios laboratoriais (Dias, 2017).

Em termos de humidade relativa do ar, a sua regulação é feita através de uma fonte de tensão variável. Quando a humidade relativa do ar é inferior ao valor estipulado para o respetivo ensaio laboratorial, é feito a regulação através da tensão elétrica que, por conseguinte, vai ativar uma das resistências da caldeira (Dias, 2017). A fonte de tensão utilizada é exposta na Figura 18.



Figura 18. Fonte de tensão utilizada para controlo da humidade relativa do ar durante os ensaios experimentais (Dias, 2017).

O banco de evaporadores é composto por 3 permutadores de calor, cujas características são referidas na Tabela 6.

Tabela 6. Características técnicas dos permutadores de calor constituintes do banco de evaporadores. (Dias, 2017)

Parâmetro	Valor
Altura do permutador [mm]	205
Largura do permutador [mm]	216,8
Comprimento do permutador [mm]	110
Diâmetro dos tubos [mm]	9,53 (3/8 in)
Fileiras de tubos	16
Número de alhetas	44
Alturas das alhetas [mm]	200
Comprimento das alhetas [mm]	65
Área de uma alheta [mm ²]	13×10 ³
Espessura das alhetas [mm]	-0,2
Passo das alhetas [m]	0,00362
Área de troca de calor [mm ²]	572×10 ³ (44×13×10 ⁵)
Parâmetro FPC	2,75
Secção de passagem de ar [mm ²]	32×10 ³ (160×200)

Os três permutadores de calor encontram-se montados em série e são apresentados na Figura 19.

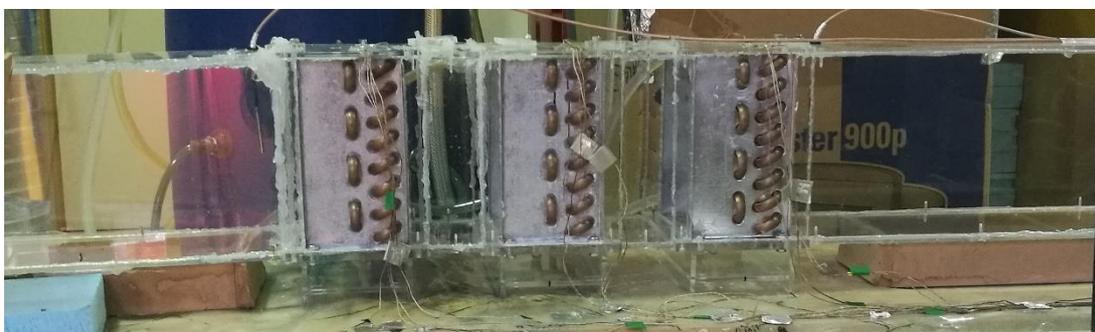


Figura 19. Banco de evaporadores (Dias, 2017).

O *chiller* utilizado tem como principal função providenciar o fluido refrigerante à temperatura imposta no ensaio laboratorial. O fluido refrigerante utilizado é água glicolada, cuja temperatura de solidificação é de $T_{\text{refrig}} = -25^{\circ}\text{C}$. A mistura é composta por 60% de água e 40% de glicol.

3.4.1. Instrumentação utilizada

Para efetuar as várias medições e proceder às calibrações necessárias, é preciso munir a instalação experimental de determinados instrumentos de medição.

Deste modo, os dispositivos utilizados nos ensaios laboratoriais são:

- Um *data logger* de temperatura para gravar e monitorizar as temperaturas do ar à entrada e à saída do evaporador e das temperaturas do refrigerante à entrada e à saída do evaporador. As temperaturas são medidas através de quatro termopares tipo T localizados para o objetivo pretendido;
- Um higrómetro digital com duas sondas higrométricas de miniatura;
- Um anemómetro de fio quente (Dias, 2017).

Os dispositivos de instrumentação são apresentados na Figura 20.



(a) Higrómetro digital.



(b) Anemómetro de fio quente.



(c) *Data logger*.

Figura 20. Instrumentação utilizada nos ensaios laboratoriais (Dias, 2017).

Adicionalmente, foi utilizado um multímetro digital para proceder às medições das diferenças de potencial dos sensores.

3.5. Nota conclusiva

Os aspetos teóricos relacionados com os evaporadores e a descrição da instalação experimental são extremamente importantes para a análise da formação de gelo e dos resultados obtidos. As peças introduzidas têm como principal objetivo facilitar a colocação dos sensores no interior do evaporador.

4. Análise e Discussão de Resultados

4.1. Introdução

Nesta secção do trabalho, são descritos os ensaios experimentais desenvolvidos no âmbito da dissertação, os resultados obtidos e as respetivas conclusões.

4.2. Testes experimentais

Todos os ensaios laboratoriais são antecedidos de alguns procedimentos para que pudessem ser obtidas as condições ideais de funcionamento:

1. Entrada em funcionamento do *chiller*, para que seja atingida a temperatura do refrigerante requerida;
2. Circulação de ar quente, a fim das alhetas e dos sensores alojados nas alhetas secarem;
3. Monitorização da humidade relativa do ar para que se possa determinar o momento de desligar as resistências elétricas;
4. Medição de todas as quedas de tensão dos sensores, para avaliar a presença de humidade aos terminais dos elétrodos;
5. Início do ensaio, assim que atingidas as condições de entrada do ar, em termos de temperatura e humidade relativa, e a temperatura do refrigerante.

Depois de iniciado o ensaio, procede-se ao registo das quedas de tensão dos sensores localizados nas superfícies de entrada e saída do evaporador e ao registo fotográfico. Posteriormente, são monitorizados os valores da temperatura e da

humidade relativa do ar e a velocidade do ventilador. Estas medições e monitorização dos valores são realizadas a intervalos de 6 minutos.

Os oito sensores são distribuídos pelas superfícies de entrada e saída do evaporador. Note-se que a área das superfícies frontal e posterior é dividida em quatro e os sensores são colocados nos respetivos centros geométricos. A Figura 21 ilustra a distribuição dos sensores na região da entrada (S1, S2, S3 e S4) e saída do evaporador (S5, S6, S7 e S8).

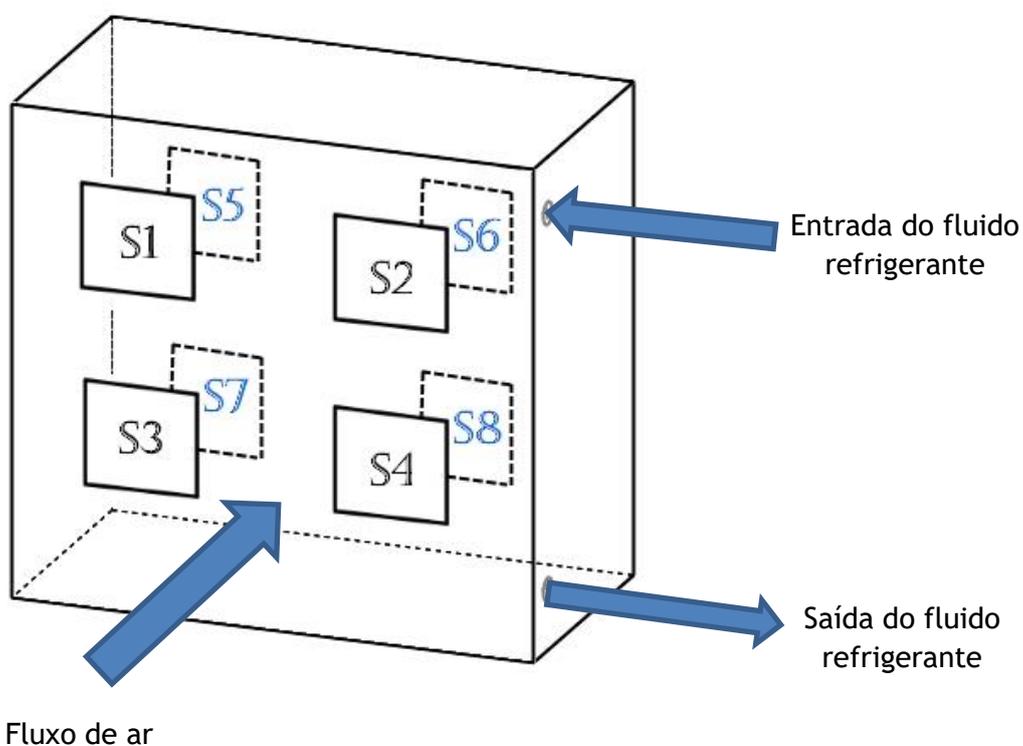


Figura 21. Localização dos sensores nas superfícies de entrada e saída e representação da entrada e saída do fluido refrigerante.

No total, foram realizados 6 ensaios laboratoriais cujas condições são descritas na Tabela 7. A velocidade do ventilador mantém-se constante ao longo dos ensaios, com um valor de $V = 3,5$ m/s.

Tabela 7. Condições utilizadas nos ensaios laboratoriais.

Número do ensaio	Temperatura do ar, T_{ar} [°C]	Humidade relativa do ar, ϕ_{ar} [%]	Temperatura do refrigerante, T_{refrig} [°C]
1	21	70	-12
2	23	50	-8
3	23	50	-10
4	21	50	-8
5	21	60	-8
6	21	50	-10

Mylona *et al.* (2017) efetuaram um trabalho sobre o consumo de energia em supermercados operacionais, tendo em conta as variações de temperatura e humidade relativa do ar ao longo do ano no interior da instalação. As variações de temperatura do ar registadas encontram-se entre $17^{\circ}\text{C} \leq T_{ar} \leq 23,5^{\circ}\text{C}$, enquanto que a humidade relativa do ar se situa entre $40\% \leq \phi_{ar} \leq 65\%$. Os ensaios realizados tiveram como base estes intervalos.

4.2.1. Discussão de resultados

A análise de resultados é realizada em relação aos gráficos das diferenças de potencial medidas nos sensores localizados nas superfícies de entrada e saída do evaporador, respetivamente. Também as fotografias recolhidas durante os ensaios são utilizadas para comprovar a existência de gelo junto dos sensores.

Os valores de diferença de potencial para o ar estão no intervalo compreendido entre $9\text{ mV} \leq E \leq 32\text{ mV}$. A água possui valores de diferença de potencial entre $6\text{ V} \leq E \leq 7\text{ V}$. A presença de gelo impõe uma diferença de potencial na ordem do registado para o ar.

4.2.1.1. Ensaio N° 1 ($T_{ar} = 21^{\circ}\text{C}$; $\phi_{ar} = 70\%$; $T_{refrig} = -12^{\circ}\text{C}$)

Pela análise do gráfico exposto na Figura 22, o sensor 2 (S2) possui um período de condensação de $\Delta t = 54\text{ min}$ e é, de facto, o primeiro dos sensores localizados nesta superfície a detetar a presença de gelo nos elétrodos. Esta condição deve-se à sua proximidade à entrada do fluido refrigerante. Simultaneamente, o sensor 4 (S4) deteta a presença de água aos seus terminais.

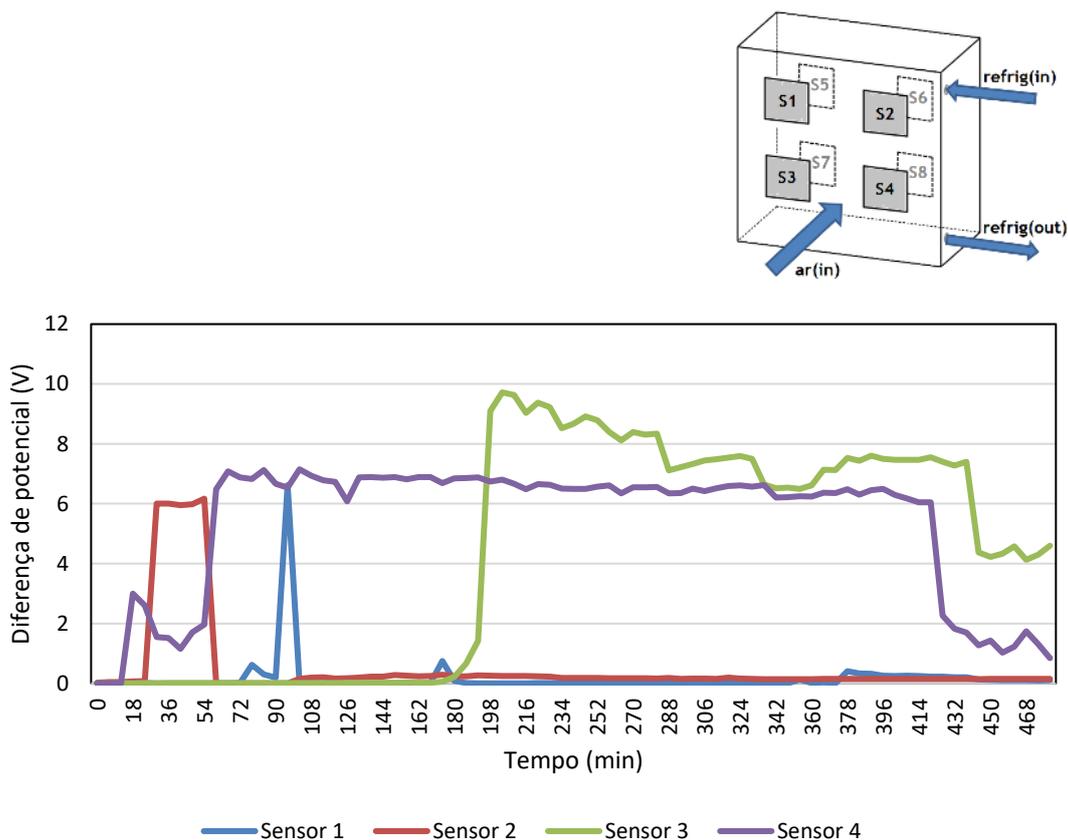


Figura 22. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de entrada do evaporador para o ensaio 1.

A Figura 23 representa o momento em que o sensor 2 deteta gelo nos terminais. A camada de gelo ainda não é visível do exterior, mas é possível verificar o início da formação da camada de gelo na parte superior do evaporador (localizada na zona identificada na figura).

O sensor 1 (S1), que se encontra no lado oposto da superfície frontal do evaporador, possui um período de condensação mais longo do aquele registado para o sensor 2. Desta forma, é possível afirmar que a formação de gelo se dá na direção do sensor 1, partindo do sensor 2.

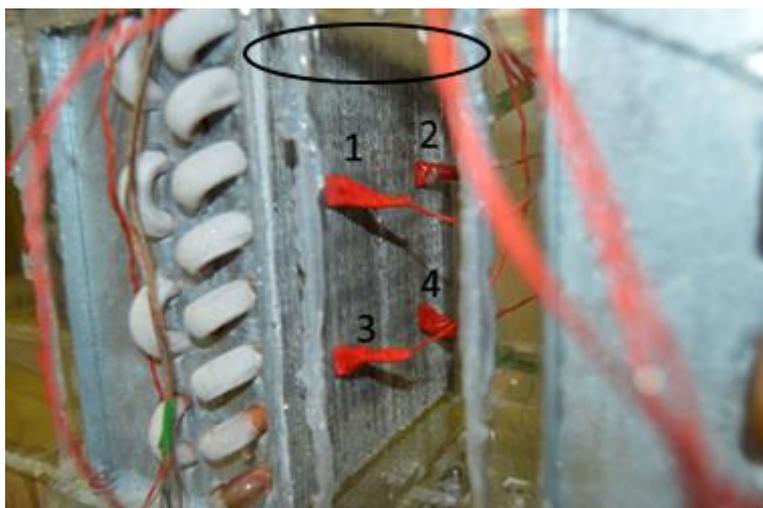


Figura 23. Superfície frontal do evaporador no momento em que o sensor 2 deteta a formação de gelo.

A partir de $t = 108$ min de ensaio experimental, o sensor 1 deteta gelo, como se verifica pela Figura 24. O gelo formado na região dos sensores 1 e 2 é denso, pelo que o valor da diferença de potencial obtida se aproxima do valor da diferença de potencial quando o meio entre os elétrodos é o ar.

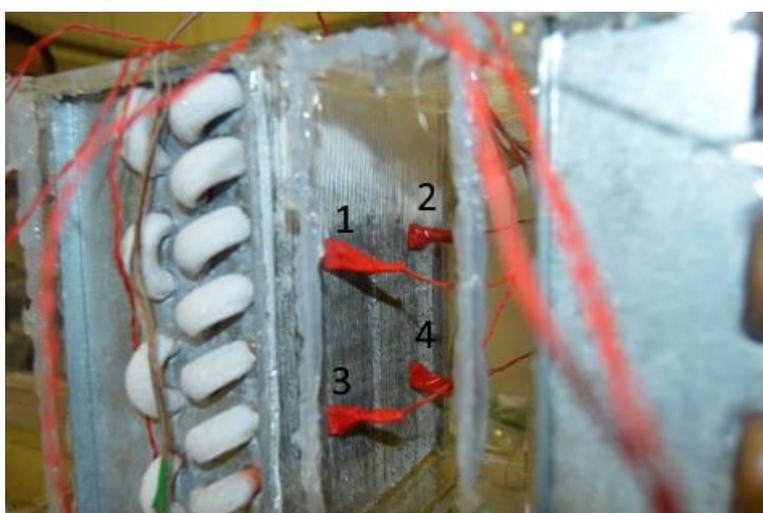


Figura 24. Superfície frontal do evaporador no momento em que o sensor 1 deteta a formação de gelo.

O sensor 3 (S3) e o sensor 4 (S4) encontram-se na zona inferior do evaporador, que coincide com a zona de saída do fluido refrigerante. Assim, a temperatura do fluido

refrigerante é mais elevada, pelo que se torna mais difícil atingir a temperatura de ponto de orvalho. No caso do sensor 3, a temperatura de ponto de orvalho só é atingida em $t = 180$ min de ensaio.

A formação de gelo ocorre praticamente no final do ensaio laboratorial. A camada de gelo é pouco considerável, uma vez que existe uma clara diminuição da área de passagem de ar na zona superior do evaporador devido à formação de gelo e, por consequência, a parte inferior de evaporador fica sujeita a passagem de um maior volume de ar, quente, o que inibe a mudança de fase líquida para sólido.

A Figura 25 mostra a camada de gelo formada ao longo do ensaio laboratorial e que ocupa grande parte da superfície. A zona onde esta formação de gelo é mais significativa encontra-se identificada na Figura 25.

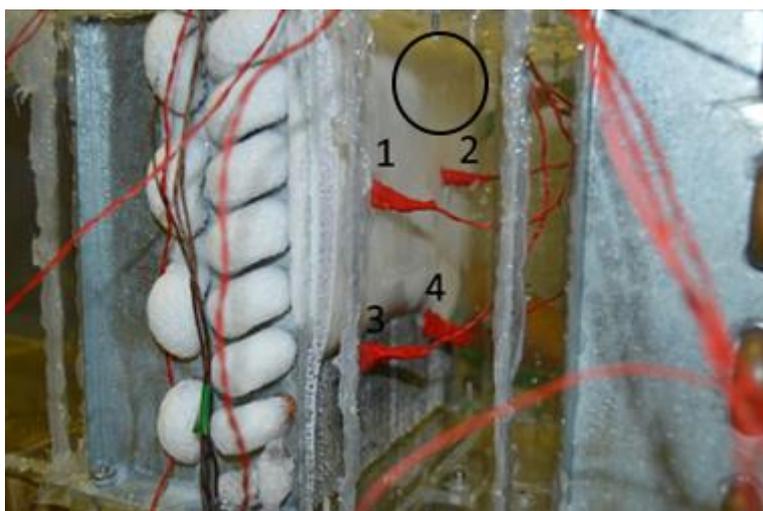


Figura 25. Camada de gelo formada ao longo dos 480 minutos de ensaio laboratorial.

Na Figura 26, observa-se o gráfico da diferença de potencial em função do tempo para os 4 sensores localizados na superfície de saída do evaporador.

O sensor 6 deteta a presença de água aos seus terminais em $t = 6$ min do ensaio experimental. Em $t = 96$ min, o sensor deteta a formação de gelo aos seus terminais, no entanto a diferença de potencial vai diminuindo ao longo deste período.

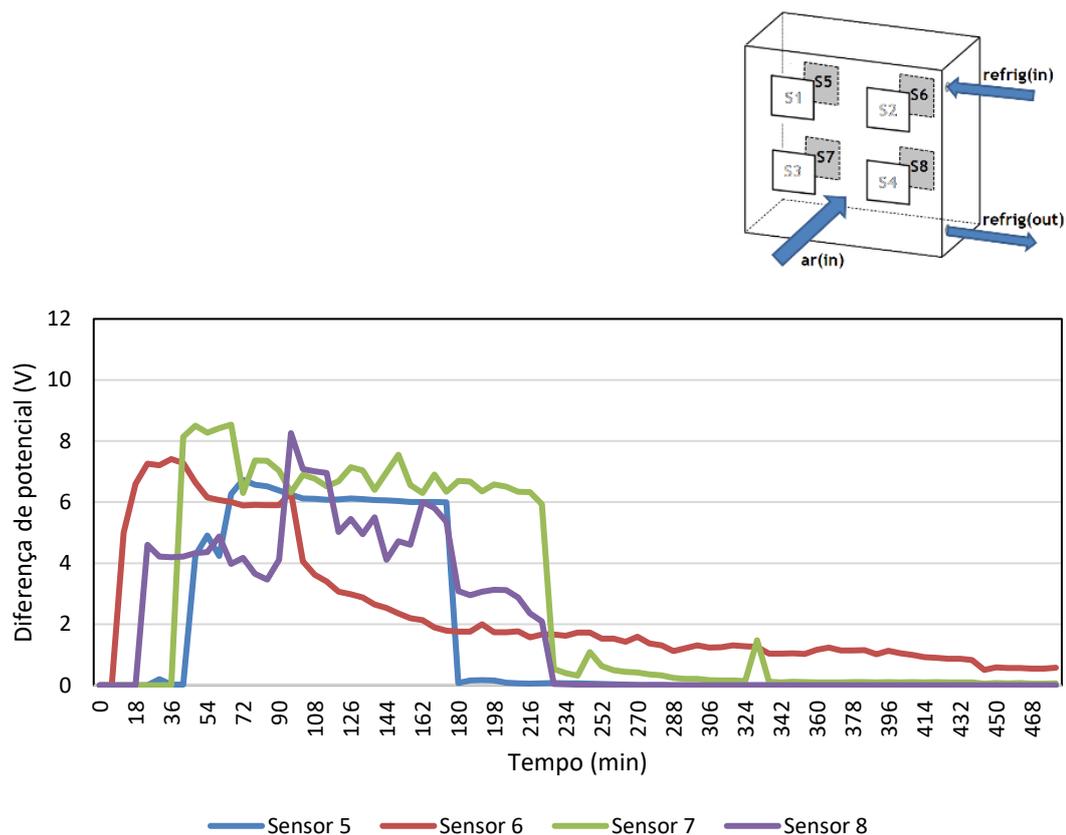


Figura 26. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de saída do evaporador para o ensaio 1.

O sensor 8 (S8) deteta a presença de água em $t = 18$ min e mantém-se molhado durante $\Delta t = 210$ min. O sensor 7 (S7) e sensor 5 (S5) detetam água praticamente ao mesmo tempo.

Os valores da diferença de potencial registados por estes sensores podem ser afetados pelas características da camada de gelo, i.e., o gelo formado nesta superfície possui uma densidade menor do que a densidade observada na superfície de entrada do evaporador, como se pode observa na Figura 27.

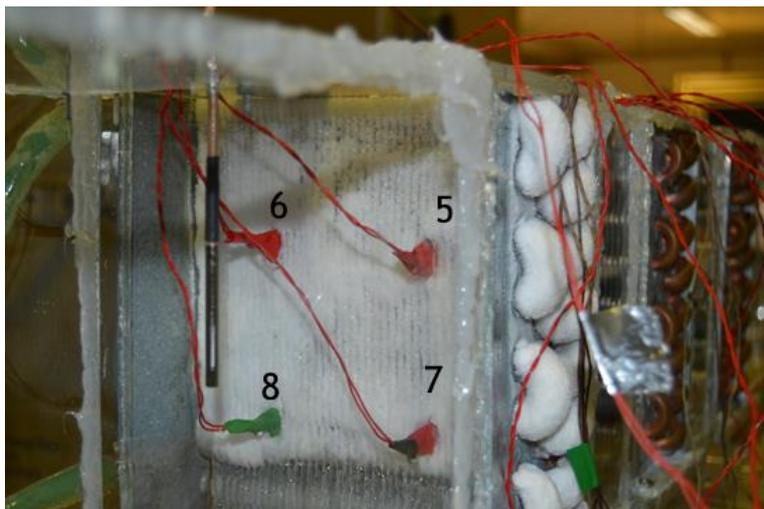


Figura 27. Camada de gelo formada na superfície de saída do evaporador.

O parâmetro de processo definido para determinar o momento de interrupção do ensaio é a velocidade. No entanto, devido à redução da área de passagem de ar e à incapacidade de mudança de fase da água, não existe bloqueio total da superfície do evaporador e, por consequência, o ventilador consegue impor a velocidade estipulada para os ensaios. Nos ensaios seguintes, considera-se a temperatura de ar à saída para determinar o momento de interrupção do ensaio e, quando a temperatura atinge o valor de $T_{ar} = 12^{\circ}\text{C}$, o ensaio é terminado. A Figura 28 mostra a variação da temperatura do ar à saída do evaporador para o Ensaio nº 1. Salienta-se que a medição da temperatura do ar à saída é realizada em intervalos de 30 seg.

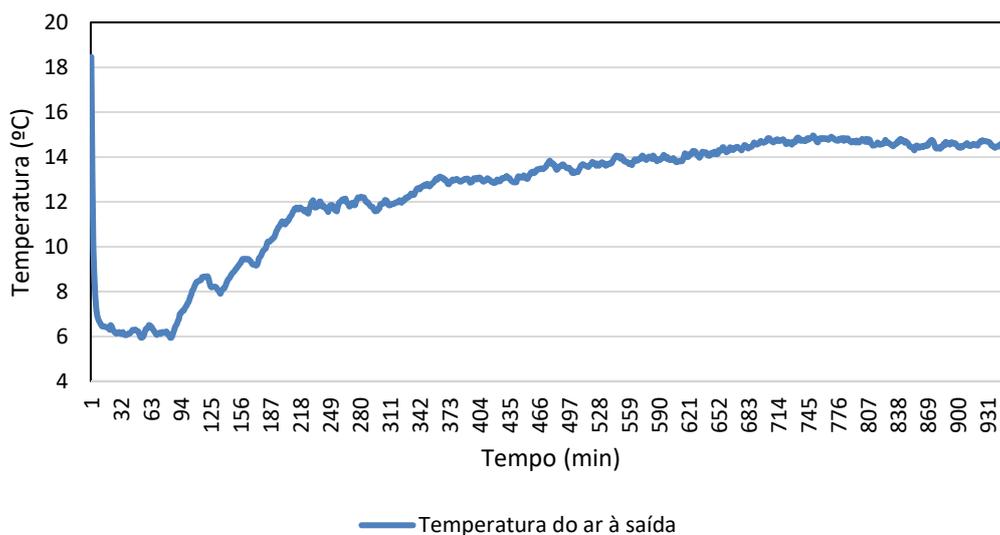


Figura 28. Temperatura do ar à saída do evaporador ao longo do ensaio 1.

A temperatura do ar à saída do evaporador baixa de forma abrupta no período $\Delta t < 2$ min, e de seguida mantém-se constante e com um valor de $T_{ar} = 6^{\circ}\text{C}$ em $2 < \Delta t < 43$ min. Devido à perda de eficiência do evaporador, o valor da temperatura do ar à saída do evaporador começa a aumentar gradualmente até ao fim do ensaio laboratorial. O primeiro aumento de temperatura dá-se em $t = 23$ min, depois do sensor 2 detetar formação de gelo aos seus terminais. Relativamente à deteção de gelo no sensor 1, dá-se momentos depois de a temperatura do ar à saída atingir o valor de $T_{ar} = 8^{\circ}\text{C}$. Com o decorrer do ensaio e devido ao bloqueio da passagem de ar, assiste-se ao aumento da temperatura.

4.2.1.2. Ensaio N° 2 ($T_{ar} = 23^{\circ}\text{C}$; $\phi_{ar} = 50\%$; $T_{refrig} = -8^{\circ}\text{C}$)

Conforme indicado pelos resultados expostos na Figura 29, os sensores 3 e 4 são os primeiros sensores localizados nesta superfície a detetar a presença de vapor de água condensado aos seus terminais. O sensor 4 deteta a água em $t = 24$ min e o sensor 3 à passagem da primeira hora de ensaio ($t = 60$ min). Porém, estes mantêm-se molhados até ao fim do ensaio.

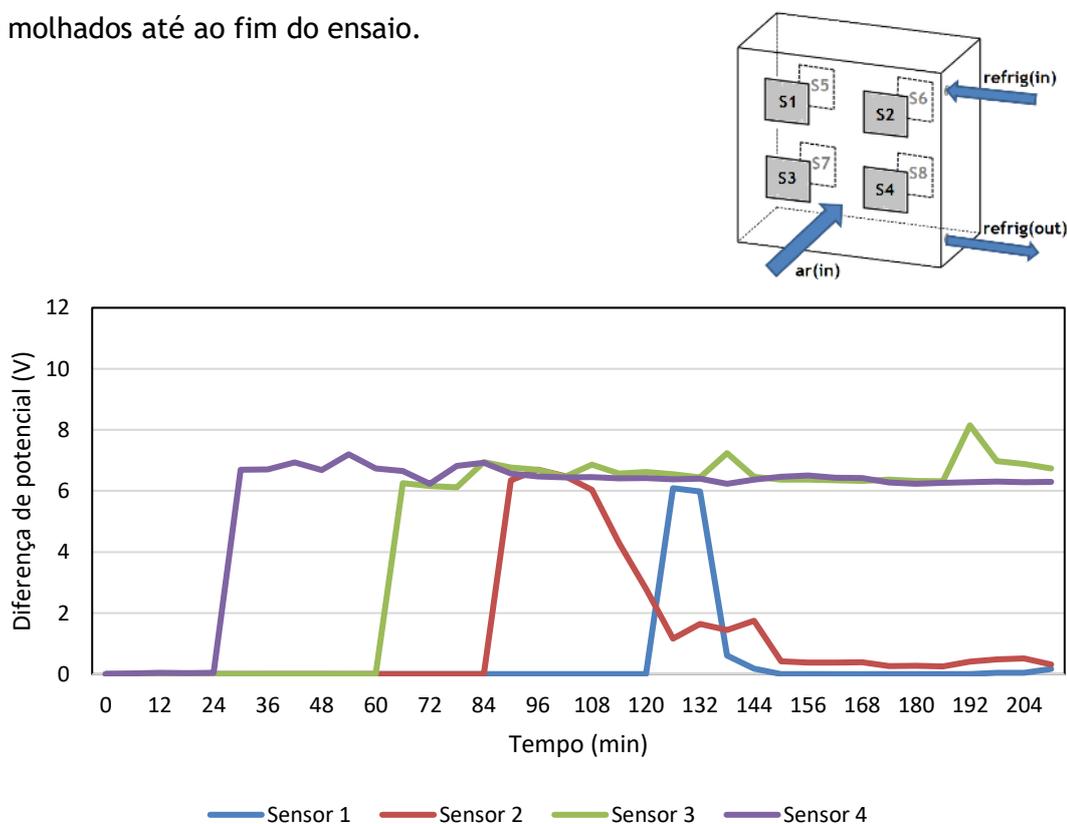


Figura 29. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de entrada do evaporador para o ensaio 2.

O sensores 1 e 2, embora possuam um período de condensação maior do que aquele verificado para os sensores 3 e 4, são os primeiros a detetar a formação de gelo. A Figura 30 representa o momento de deteção de gelo no sensor 2. Mais uma vez, a camada de gelo não é visível do exterior na zona do sensor 2, contudo já é visível na parte superior deste.

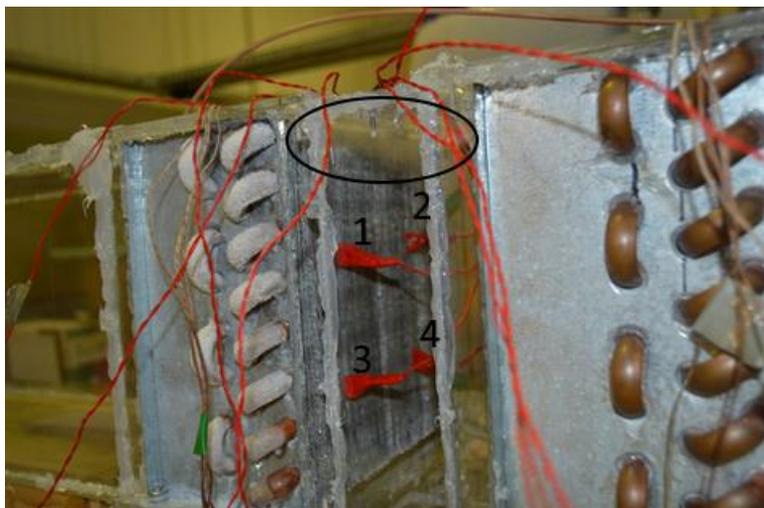


Figura 30. Superfície frontal do evaporador no momento em que o sensor 2 deteta formação de gelo.

No momento em que o sensor 1 deteta a presença de gelo nos elétrodos do respetivo sensor, a camada de gelo formada na superfície frontal do evaporador é considerável, tal como se pode observar na Figura 31. Os restantes sensores colocados na parte inferior do evaporador não registam formação de gelo no decurso deste ensaio.

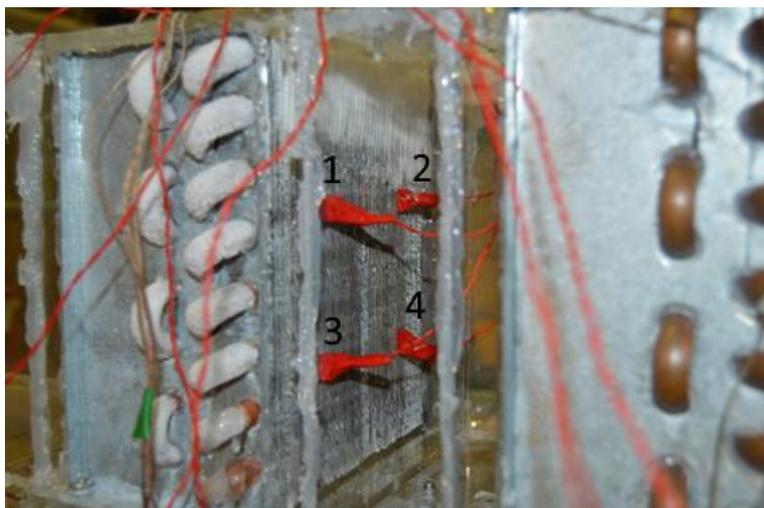


Figura 31. Superfície frontal do evaporador no momento em que o sensor 1 deteta a formação de gelo.

Existe uma clara diferença entre a camada de gelo formada neste ensaio comparativamente com a camada de gelo formada no ensaio 1, uma vez existe uma alteração das condições do ar à entrada e também na duração do ensaio.

Em termos da superfície de saída, conclui-se que o sensor 5 possui um comportamento semelhante ao registado no sensor 6 do ensaio 1. Depois de detetar a presença de vapor de água condensado nos elétrodos, a queda de tensão decresce gradualmente ao longo do tempo. Esta situação é verificada pelo gráfico exposto na Figura 32.

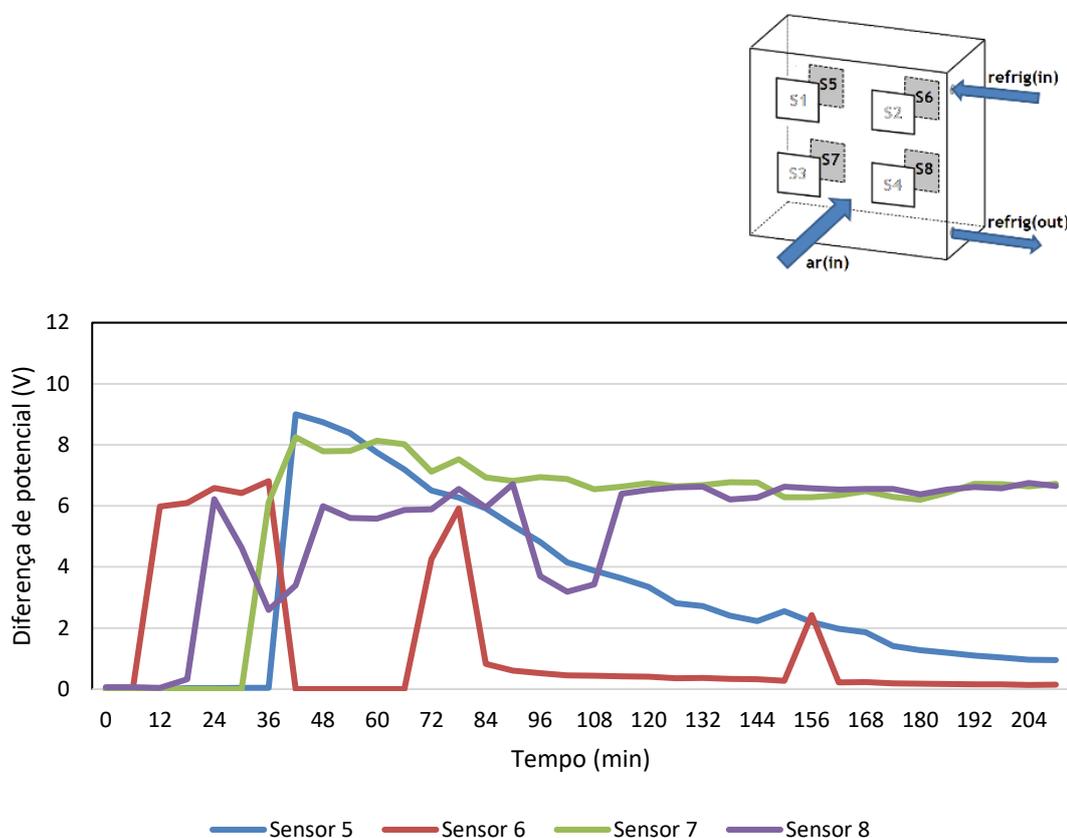


Figura 32. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de saída do evaporador para o ensaio 2.

Em relação aos outros sensores, a deteção de condensado é realizada em $t = 6$, 30 e 12 min, respetivamente. Note-se que existem algumas flutuações nas diferenças de potencial registadas para os sensores 6 (S6) e 8 (S8).

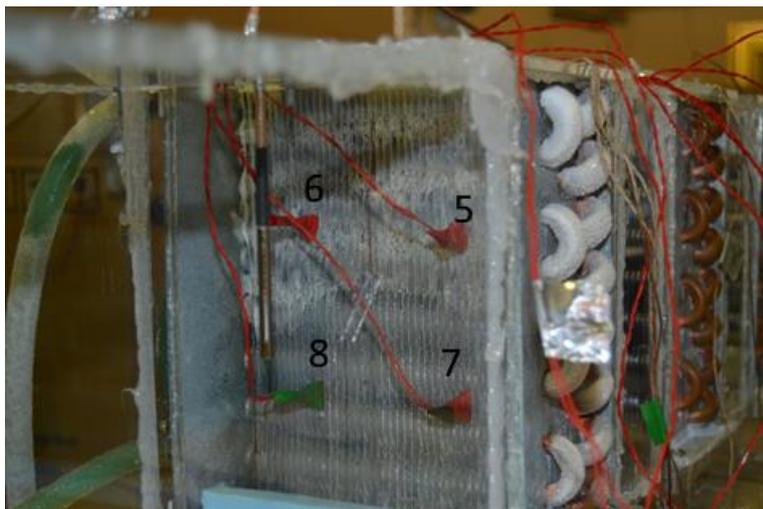


Figura 33. Superfície posterior do evaporador no momento em que o sensor 6 deteta formação de gelo.

Na Figura 33, é possível observar o momento em que o sensor 6 deteta a presença de gelo aos seus terminais. Por consequência, as flutuações observadas no gráfico são resultado da alteração do meio presente nos elétrodos dos sensores referidos, i.e., para que a detecção de condensado seja eficaz, é necessário que existam gotículas de água entre os elétrodos do sensor.

Verifica-se novamente que a camada de gelo formada nesta superfície é menos densa do que aquela registada na superfície frontal.

A Figura 34 ilustra a variação da temperatura do ar à saída do evaporador. O valor da temperatura decresce rapidamente enquanto $\Delta t < 5$ min e mantém-se com um valor próximo de $T_{ar} = 6^{\circ}\text{C}$ até $t = 70$ min. Novamente, devido à perda de eficiência do evaporador, a temperatura do ar aumenta gradualmente até ao fim do ensaio. Com o propósito de observar o comportamento do sensor 1, o ensaio foi prolongado.

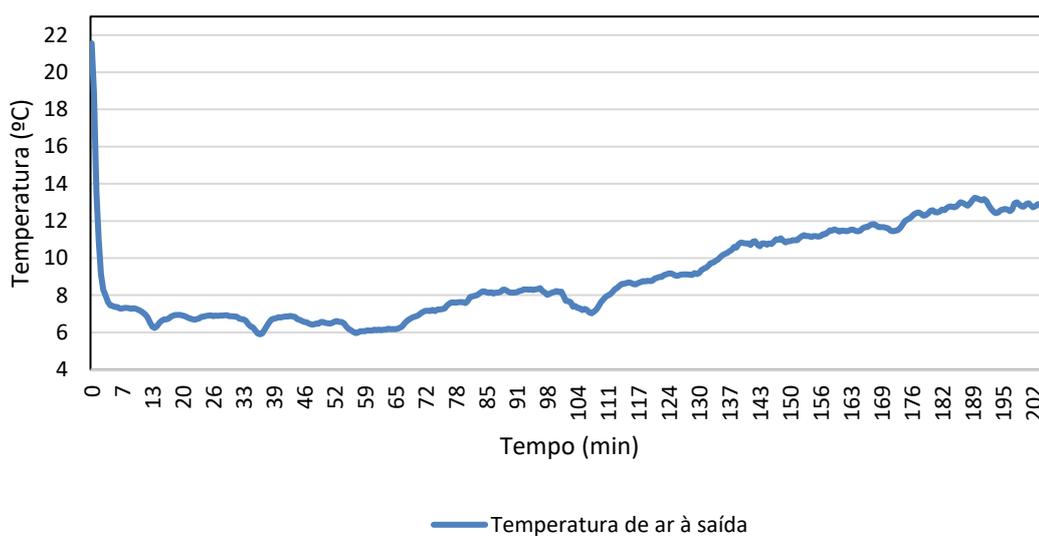


Figura 34. Temperatura do ar à saída do evaporador ao longo do ensaio 2.

Em $t = 108$ min, momento em que o sensor 2 deteta gelo, assiste-se a um aumento progressivo da temperatura do ar à saída. Quando existe gelo na região do sensor 1, a temperatura do ar à saída possui um valor de $T_{ar} = 9^{\circ}\text{C}$.

4.2.1.3. Ensaio N° 3 ($T_{ar} = 23^{\circ}\text{C}$; $\phi_{ar} = 50\%$; $T_{refrig} = -10^{\circ}\text{C}$)

Pela análise do gráfico exposto na Figura 35, a deteção de condensado acontece em simultâneo para os sensores 1, 3 e 4. O sensor 3 permanece seco durante cerca $\Delta t = 42$ min, seguindo-se um período $\Delta t = 90$ min no qual algumas gotículas de água se vão alojando nos elétrodos do sensor. Depois, em $t = 132$ min, o sensor identifica a presença de água, embora esta não solidifique até ao fim do ensaio.

Mais uma vez, o sensor 2 é o primeiro a detetar a presença de gelo nos seus terminais, seguido do sensor 1. Neste caso, em $t = 132$ min, sensor 2 deteta a presença de gelo na zona onde se encontra localizado e o sensor 1 em $t = 168$ min. Em $t = 132$ min, a camada de gelo ainda não é visível na superfície frontal. No entanto, em $t = 168$ min, esta é já bastante considerável, como se pode observar na Figura 36.

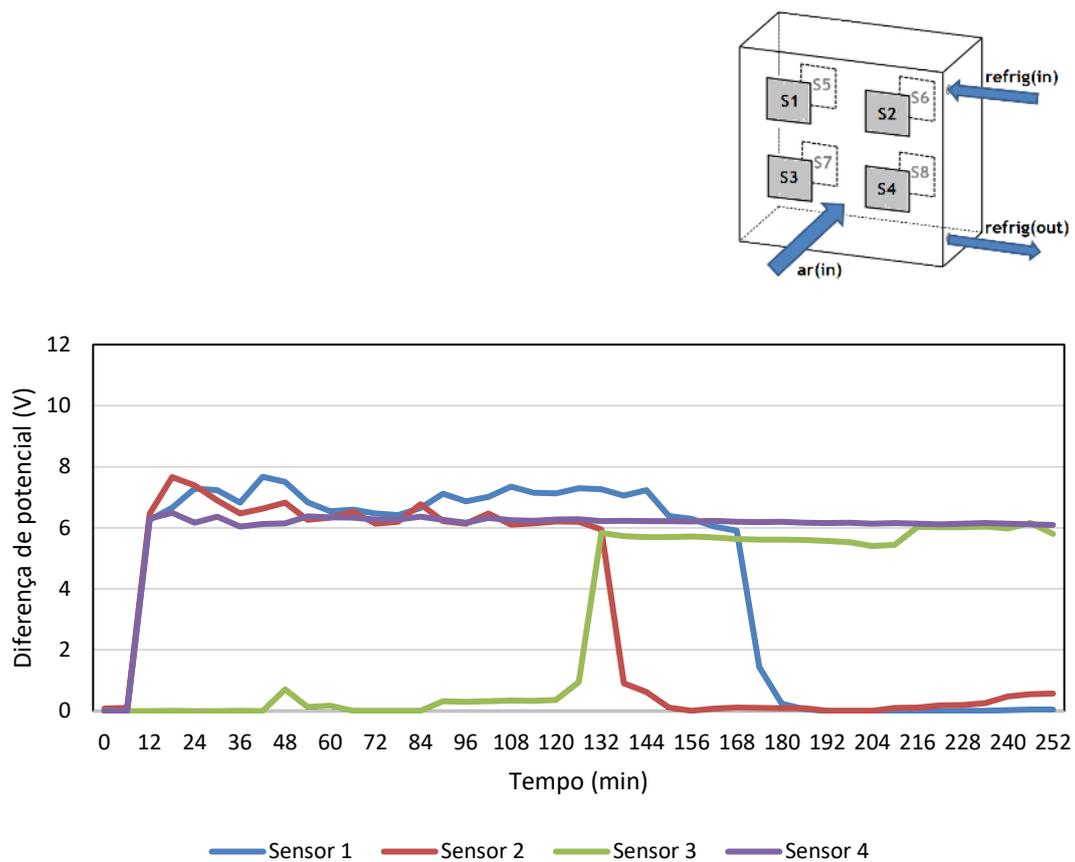


Figura 35. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de entrada do evaporador para o ensaio 3.

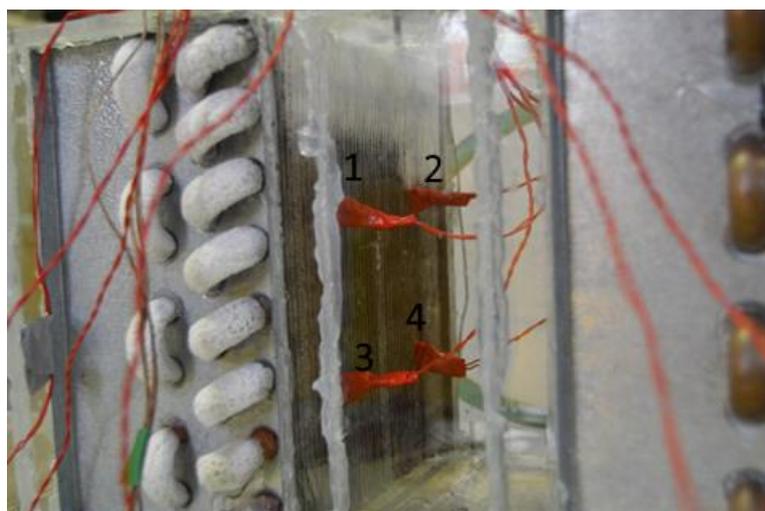


Figura 36. Superfície frontal do evaporador em $t = 168$ min.

Em relação à superfície de saída, é importante salientar o facto do sensor 8 possuir humidade remanescente do ensaio anterior, que não foi eliminada com a circulação de ar quente. O gráfico correspondente à diferença de potencial dos sensores colocados na superfície de saída está demonstrado na Figura 37.

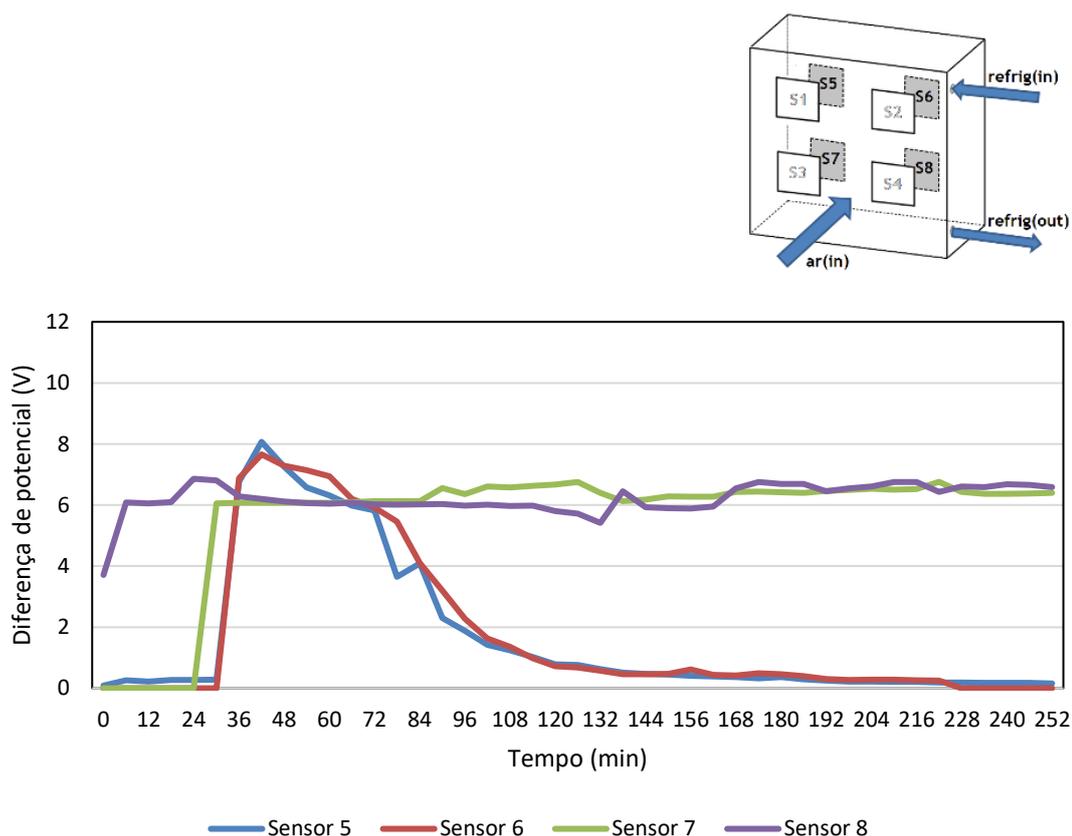


Figura 37. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de saída do evaporador para o ensaio 3.

Os restantes sensores detetam água nos seus terminais durante os primeiros 30 minutos do ensaio ($\Delta t < 30$ min). A zona onde se encontram localizados os sensores 7 e 8 não há formação de gelo. Na zona dos sensores 5 e 6 existe formação de gelo, no entanto a sua estrutura pouco densa não permite a condução de eletricidade. A Figura 38 mostra a camada de gelo formada na superfície de saída do evaporador.

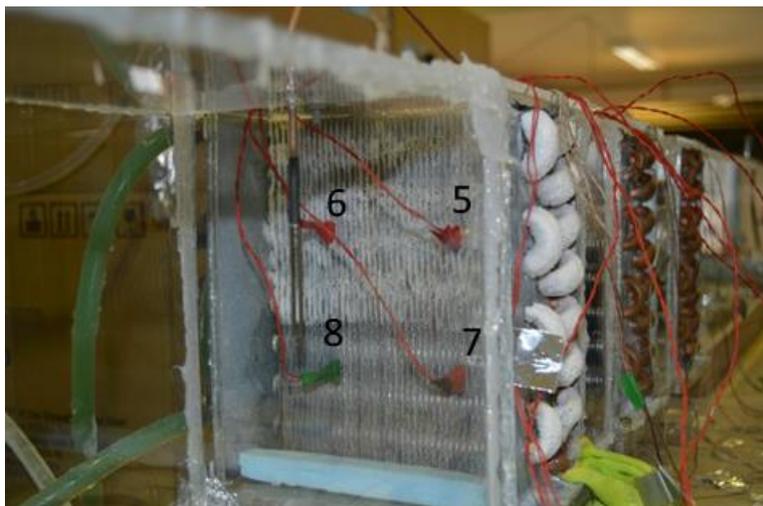


Figura 38. Camada de gelo formada nos 252 minutos de ensaio laboratorial.

A Figura 39 apresenta a variação da temperatura do ar à saída do evaporador. Devido à diferença de temperatura entre o fluido refrigerante e o ar, existe um decréscimo rápido da temperatura do ar à saída do evaporador até $t = 5$ min. Em $t = 93$ min, a temperatura mantém-se relativamente constante. No entanto, a partir de $t = 93$ min, a temperatura do ar aumenta paulatinamente até ser atingido o valor estipulado.

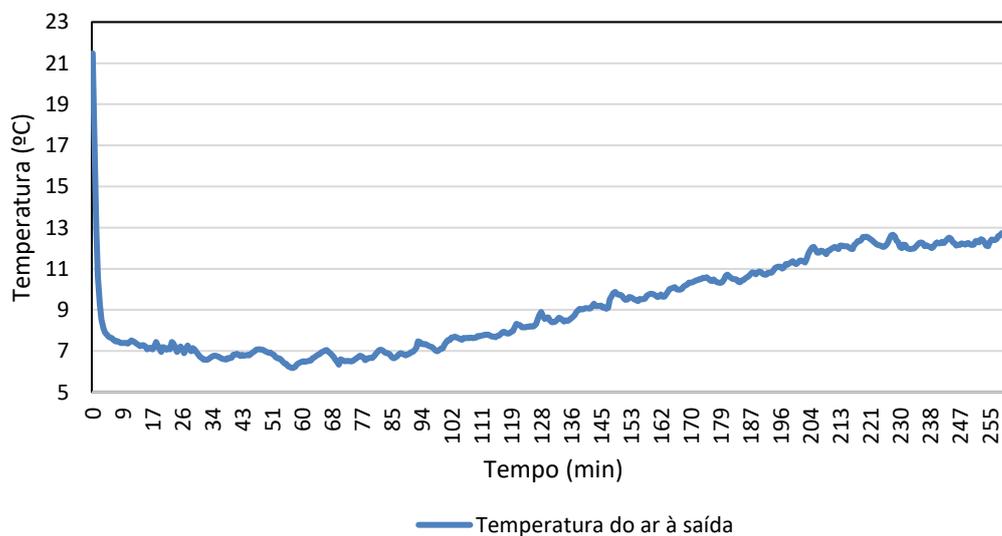


Figura 39. Temperatura do ar à saída do evaporador ao longo do ensaio 3.

Devido às condições de funcionamento, o aumento de temperatura do ar à saída inicia-se em $t = 34$ min antes da detecção de gelo no sensor 2. Quando o sensor 1 deteta gelo, em $t = 168$ min, a temperatura do ar possui já um valor próximo de $T_{ar} = 10^{\circ}\text{C}$, devido à camada de gelo formada.

4.2.1.4. Ensaio N° 4 ($T_{ar} = 21^{\circ}\text{C}$; $\phi_{ar} = 50\%$; $T_{refrig} = -8^{\circ}\text{C}$)

Em $t = 12$ min, o sensor 4 deteta água conforme exposto pela variação da diferença de potencial presente na Figura 40. No restante período do ensaio, a diferença de potencial medida entre os dois eléctrodos mantém-se constante. O sensor 3 possui um comportamento semelhante, uma vez que nesta zona do evaporador também não há formação de gelo durante o todo ensaio experimental.

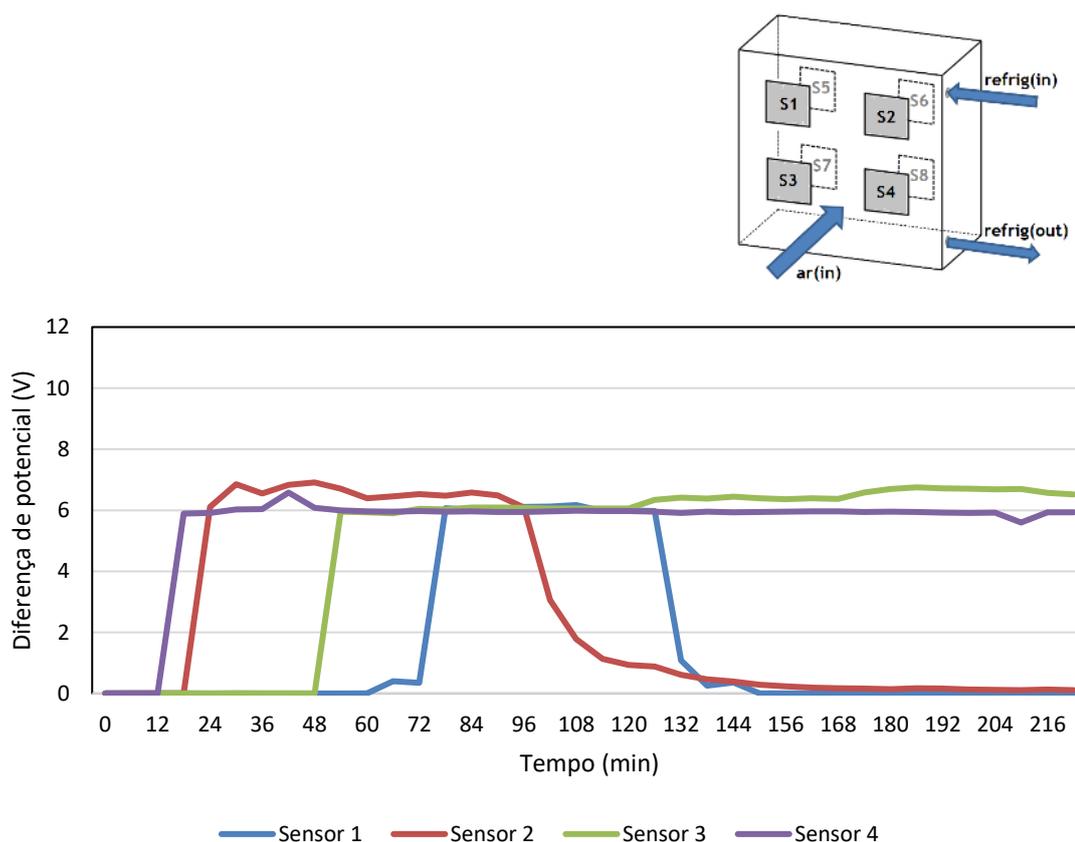


Figura 40. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de entrada do evaporador para o ensaio 4.

O sensor 2, devido à sua proximidade com a entrada do fluido refrigerante, possui um período de condensação de $\Delta t = 96$ min. Devido à temperatura do tubo e das alhetas nesta zona, a água condensada acaba por congelar. No entanto, essa camada de gelo não é visível à superfície.

O sensor 1 mantém-se seco durante $\Delta t = 60$ min de ensaio. Durante um período de $\Delta t = 66$ min existem gotículas de água nos seus terminais. Em $t = 126$ min, surge gelo nesta região. A Figura 41 retrata as condições do evaporador em $t = 126$ min do ensaio laboratorial.

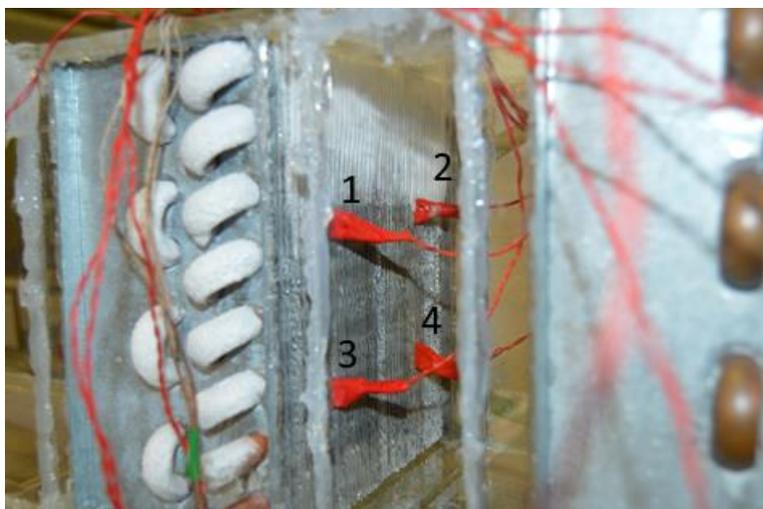


Figura 41. Camada de gelo formada ao minuto 168.

Em termos da superfície de saída do evaporador, foi obtido o gráfico da Figura 42. Neste ensaio, existe um problema no que toca as medições realizadas para o sensor 6, uma vez que a sua diferença de potencial se mantém constante e com um valor residual.

Em relação aos restantes sensores, a água no seu estado líquido no sensor 7 e sensor 8 é detetada em $t = 102$ min e $t = 30$ min, respetivamente. Nos locais onde estes se encontram não existe a formação de gelo.

O sensor 5 possui um período de condensação de $\Delta t = 54$ min. Depois disso, a água presente nesta zona solidifica e vai aumentando gradualmente a sua densidade, pelo que existe uma queda gradual na diferença de potencial.

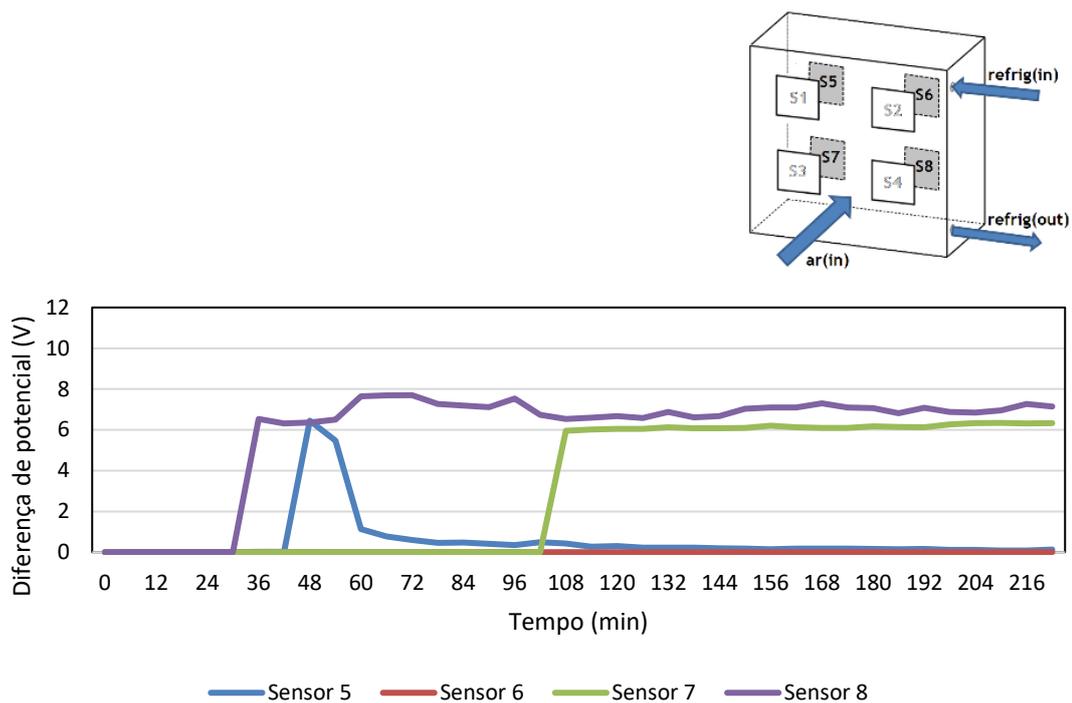


Figura 42. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de saída do evaporador para o ensaio 4.

A Figura 43 mostra a camada de gelo presente na superfície de saída em $t = 54$ min.

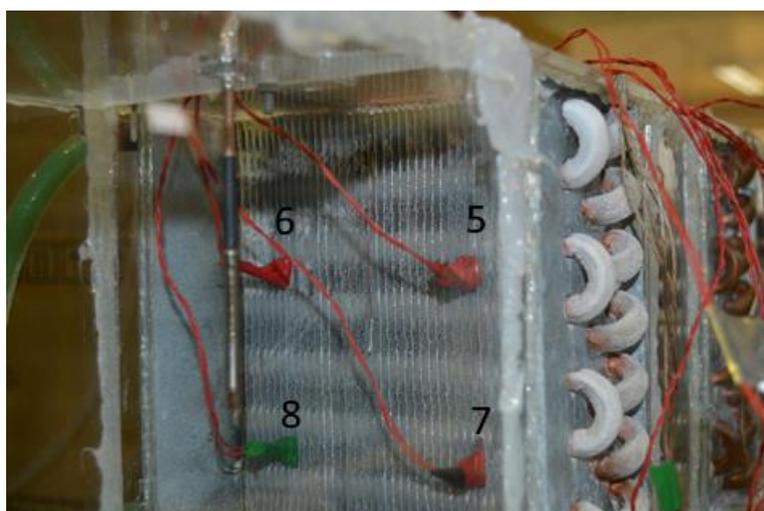


Figura 43. Camada de gelo formada em $t = 54$ min.

A Figura 44 apresenta a variação da temperatura do ar à saída do evaporador. Devido à diferença de temperatura entre o fluido refrigerante e o ar, existe um decréscimo rápido da temperatura do ar à saída do evaporador até $t = 4$ min. Em $4 < t < 58$ min, a temperatura diminui lentamente até atingir $T_{ar} = 5^{\circ}\text{C}$. No entanto, a partir de $t = 58$ min, a temperatura do ar aumenta progressivamente até ser atingido o valor estipulado.

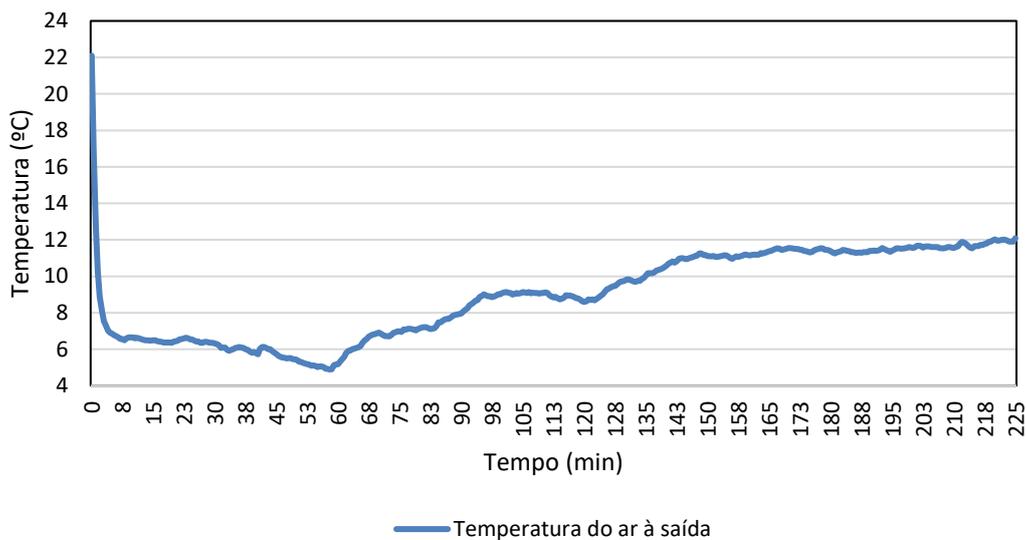


Figura 44. Temperatura do ar à saída do evaporador ao longo do ensaio 4.

Em $t = 96$ min, o sensor 2 deteta gelo aos seus terminais. No entanto, o aumento de temperatura inicia-se em $t = 58$ min, pelo que já existe algum deterioramento do desempenho térmico do evaporador. O sensor 1 deteta gelo na região em $t = 126$ min, a temperatura do ar regista um valor de $T_{ar} = 9^{\circ}\text{C}$.

4.2.1.5. Ensaio N° 5 ($T_{ar} = 21^{\circ}\text{C}$; $\phi_{ar} = 60\%$; $T_{refrig} = -8^{\circ}\text{C}$)

O sensor 2 possui um período de condensação de $\Delta t = 144$ min. Depois, devido à temperatura do fluido refrigerante, existe uma mudança de fase e o sensor deteta gelo, face os valores da variação da diferença de potencial expostos na Figura 45.

O sensor 1 e sensor 4 detetam água em $t = 12$ min. No entanto, na região do sensor 4 não há formação de gelo, pelo que a diferença de potencial se mantém constante no decurso do ensaio. O sensor 1 regista a formação de gelo em $t = 168$ min.

O registo de diferença de potencial registado para o sensor 3 possui um pico. Como salientado, para que a deteção de água seja feita de forma eficaz, é necessário que gotículas de água se alojem entre os eléctrodos dos sensores. Portanto, este pico é devido à presença de gotículas de água que acabam por deixar os eléctrodos por gravidade e devido à velocidade do ar, imposta pelo ventilador.

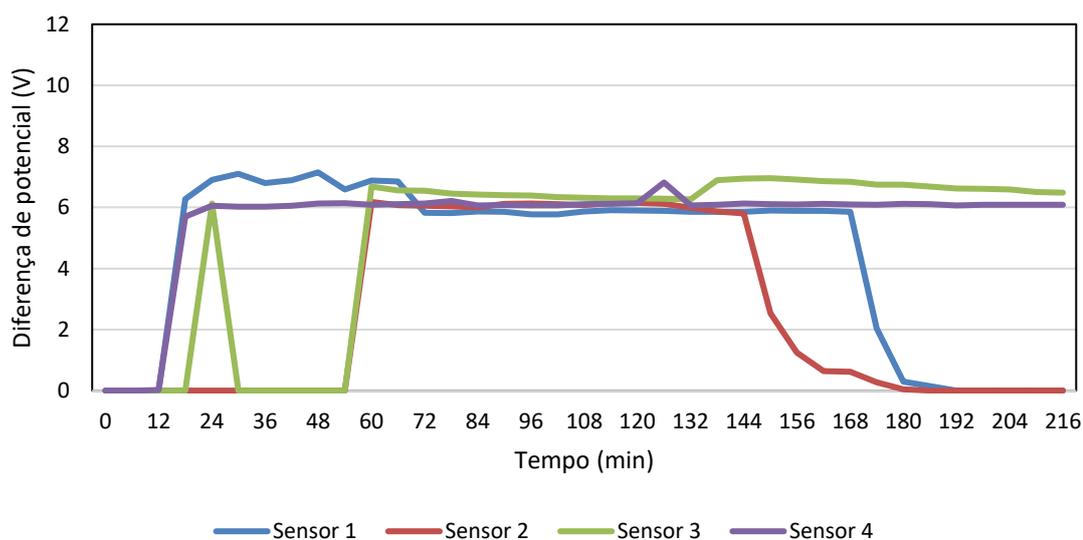
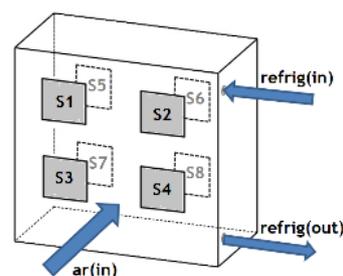


Figura 45. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de entrada do evaporador para o ensaio 5.

A Figura 46 mostra a camada de gelo formada em $t = 168$ min.

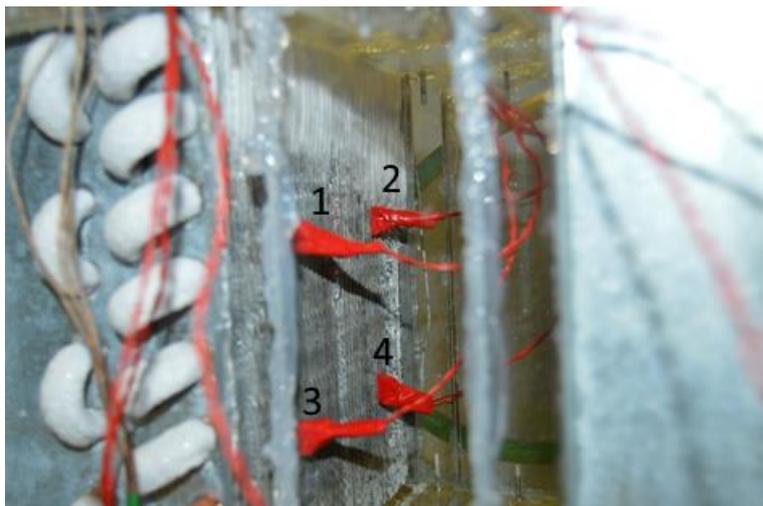


Figura 46. Camada de gelo formada em $t = 168$ min.

Em termos de superfície de saída, o gráfico exposto na Figura 47 mostra as diferenças de potencial registadas pelos sensores.

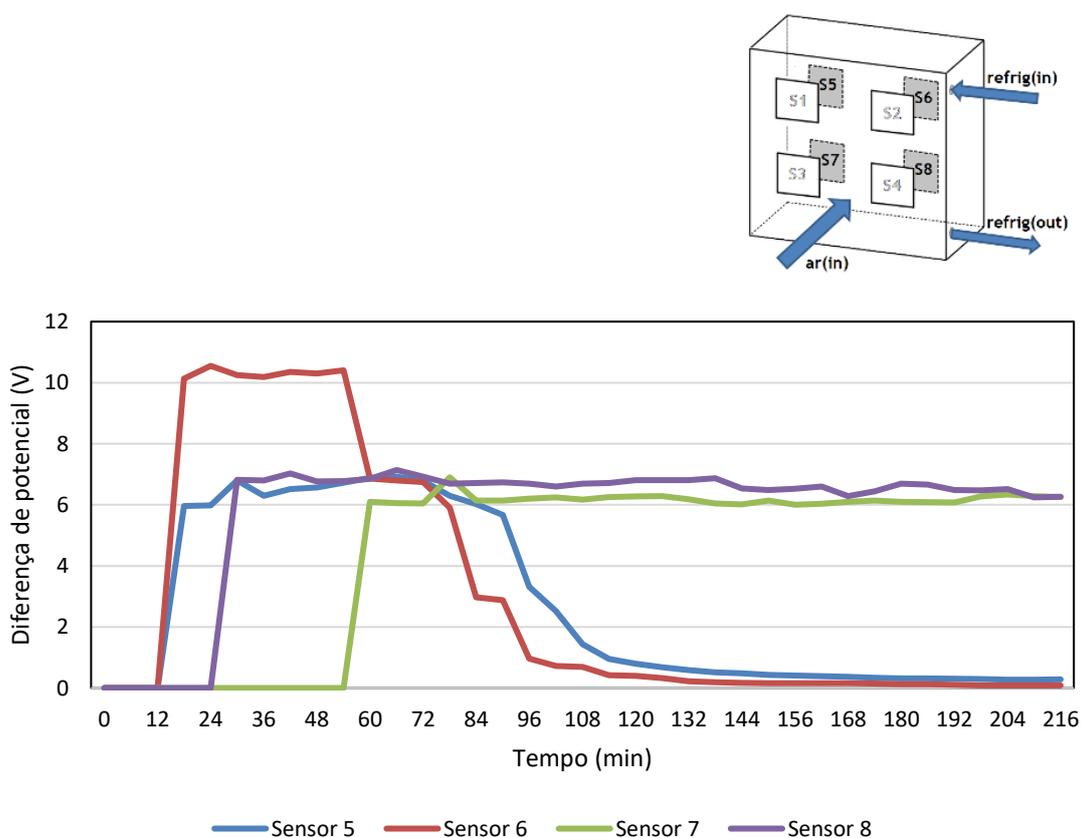


Figura 47. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de saída do evaporador para o ensaio 5.

O sensor 5 e sensor 6 detetam a presença de vapor de água condensado em $t = 12$ min. No entanto, durante $\Delta t = 36$ min, o sensor 6 possui valores de diferença de potencial resultantes de uma má ligação na *Breadboard*. O sensor 5 continua molhado até $t = 90$ min, momento no qual o vapor de água condensado solidifica, devido à temperatura do tubo e das alhetas. O vapor de água condensado na zona do sensor 6 solidifica em $t = 78$ min.

Durante este ensaio, não há formação de gelo nas regiões do sensor 7 e do sensor 8. A Figura 48 retrata a camada de gelo formada na superfície de saída durante o ensaio.

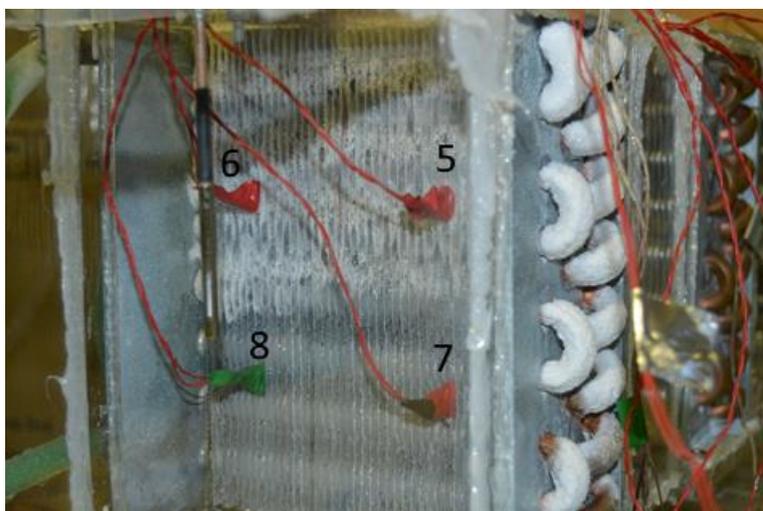


Figura 48. Camada de gelo formada nos 216 minutos de ensaio laboratorial.

A Figura 49 mostra a variação da temperatura do ar à saída do evaporador. Devido à diferença de temperatura entre o fluido refrigerante e o ar, existe um decréscimo rápido da temperatura do ar à saída do evaporador até $t = 4$ min. Em $t = 7$ min, existe um aumento da temperatura, seguido de um decréscimo até $t = 69$ min. A partir desse momento, a temperatura do ar à saída aumenta até ser atingido o valor estipulado, devido à perda de eficiência.

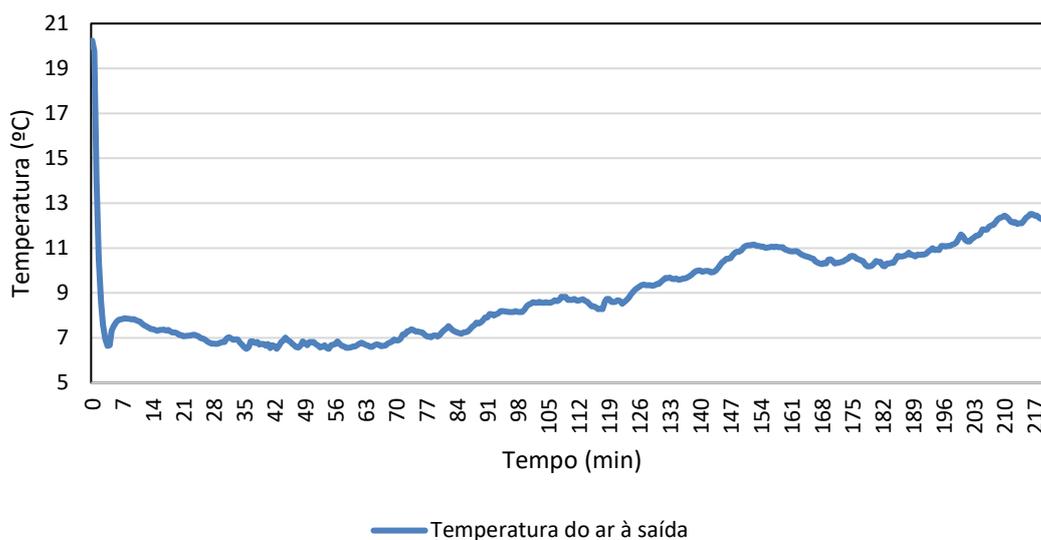


Figura 49. Temperatura do ar à saída do evaporador ao longo do ensaio 5.

Em $t = 144$ min, o sensor 2 deteta gelo aos seus terminais e o aumento de temperatura inicia-se em $t = 69$ min. Então, existe já uma camada de gelo formada na superfície do evaporador que é prejudicial ao processo. Em $144 < \Delta t < 168$ min, a temperatura do ar à saída do evaporador mantém-se na ordem dos $T_{ar} = 10^{\circ}\text{C}$. O instante $t = 168$ min corresponde ao momento em que o sensor 1 deteta gelo.

4.2.1.6. Ensaio N° 6 ($T_{ar} = 21^{\circ}\text{C}$; $\phi_{ar} = 50\%$; $T_{refrig} = -10^{\circ}\text{C}$)

Pela análise dos resultados da variação da diferença de potencial expostos na Figura 50, o sensor 1 mantém-se seco durante $\Delta t = 18$ min. Devido às temperaturas da região onde se encontra, o vapor de água condensa e o sensor 1 deteta água até $t < 72$ min.

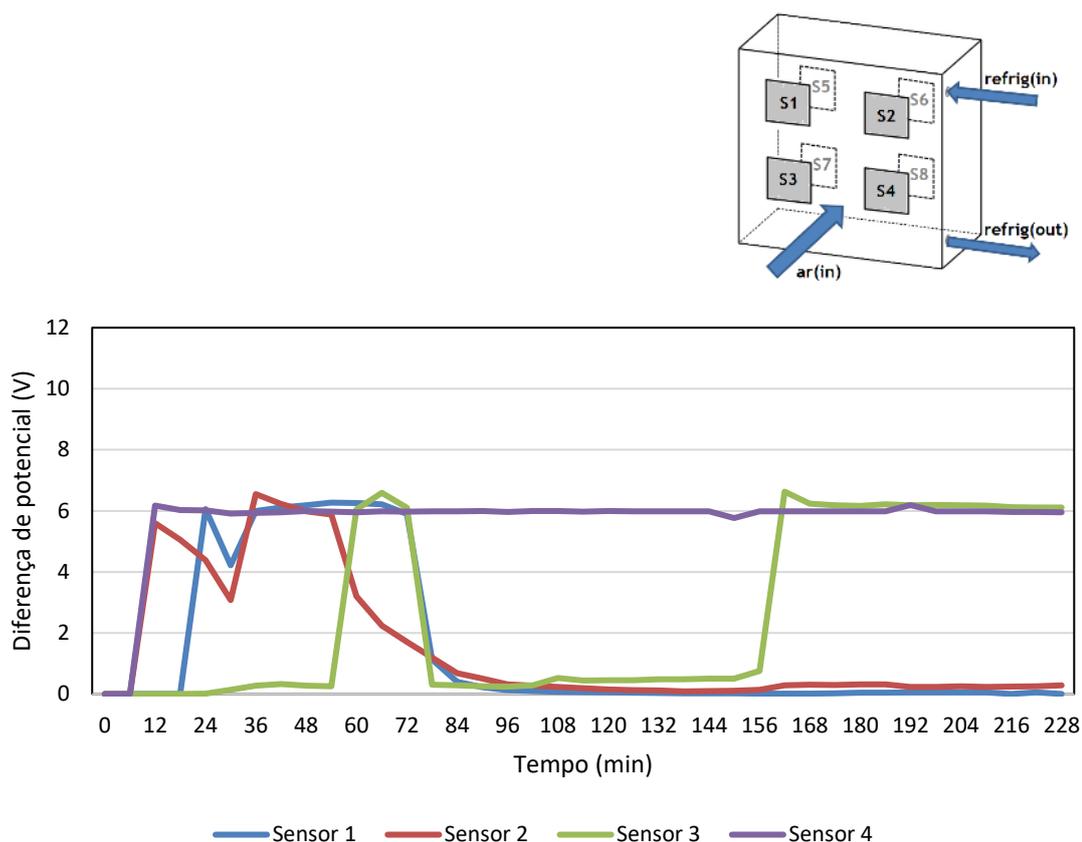


Figura 50. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de entrada do evaporador para o ensaio 6.

O sensor 2 deteta água em $t = 6$ min e a presença de gelo em $t = 54$ min. O sensor 4, localizado a baixo do sensor 2, deteta água aos seus terminais também em $t = 6$ min. No entanto, na região do sensor 4 não existe formação de gelo e, então, a diferença de potencial permanece constante até ao fim do ensaio laboratorial.

Em relação ao sensor 3, existe a aglomeração de água nos eléctrodos do sensor para $54 \leq t \leq 58$ min. No entanto, essa aglomeração é desfeita e os eléctrodos do sensor permanecem húmidos até ao $t = 156$ min. Nesse momento, o valor da diferença de potencial sobe até $E = 6$ V e mantém-se constante até ao fim do ensaio, uma vez que não há formação de gelo. A Figura 51 mostra a camada de gelo formada na superfície de entrada do evaporador no final do ensaio.

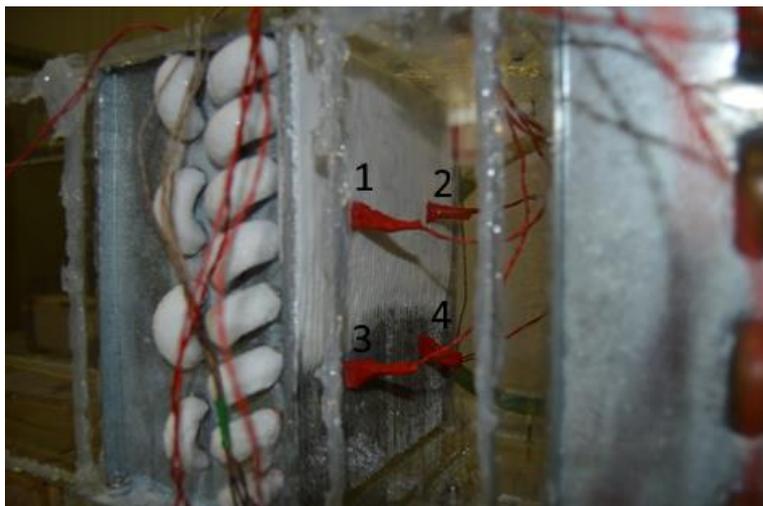


Figura 51. Camada de gelo formada durante o ensaio laboratorial.

Em relação à superfície de saída, é obtido o gráfico da Figura 52. Para o sensor 5, as condições impostas culminam com uma mudança súbita de fase da água. Desta forma, não é possível fazer a distinção entre as 3 fases distintas.

Em relação aos restantes sensores, permanecem secos durante um período de tempo relativamente curto. O sensor 6 e o sensor 8 detetam vapor de água condensado em $t = 18$ min, e o sensor 7 em $t = 30$ min.

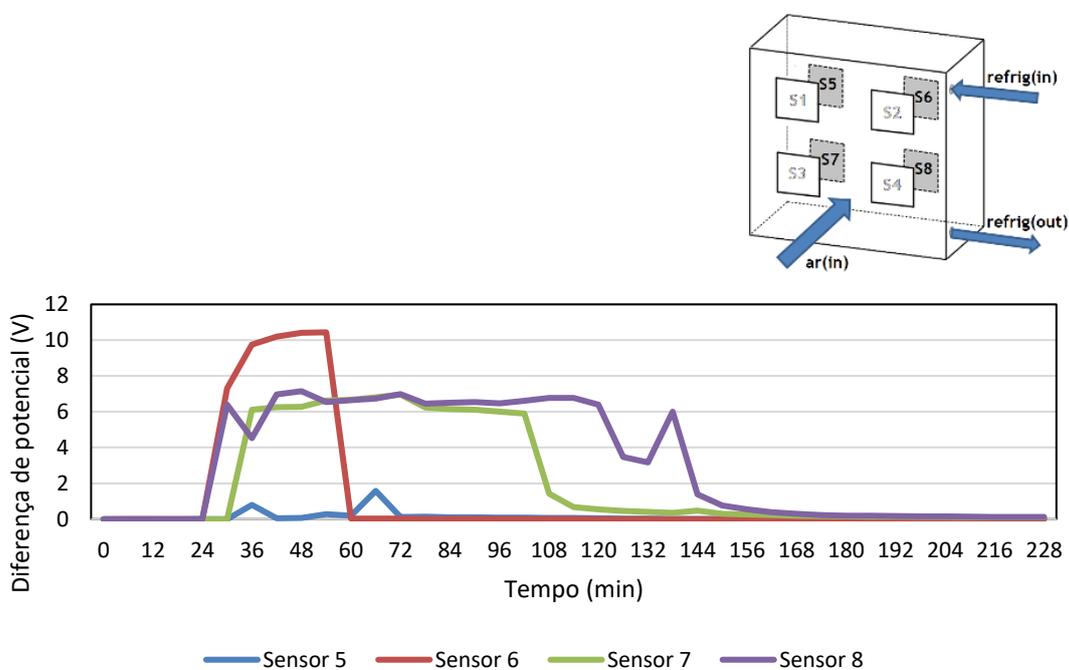


Figura 52. Gráfico da diferença de potencial medida aos terminais dos sensores localizados na superfície de saída do evaporador para o ensaio 6.

Como se pode observar na Figura 53, existe formação de gelo na região do sensor 7 e do sensor 8.

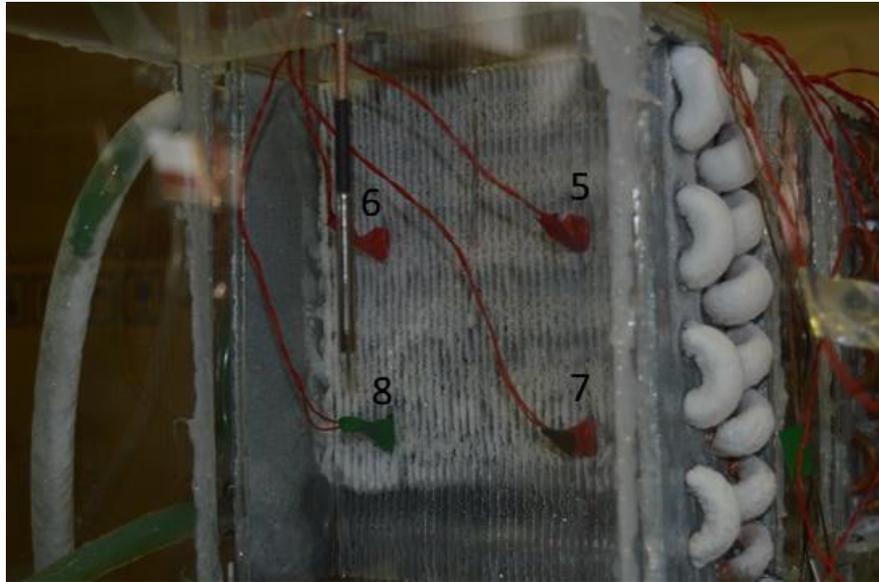


Figura 53. Camada de gelo formada nos 228 minutos de ensaio laboratorial.

O gráfico da Figura 54 representa a variação da temperatura do ar à saída do evaporador. Num primeiro momento, existe um decréscimo rápido da temperatura do ar à saída do evaporador até $t = 5$ min, devido à diferença de temperatura entre o fluido refrigerante e o ar. Até $t = 70$ min, a temperatura do ar à saída mantém-se inferior a $T_{ar} < 7^{\circ}\text{C}$. Nesse momento e durante um $\Delta t = 27$ min, existe um ligeiro aumento da temperatura. Seguidamente, até $t = 107$ min, existe um decréscimo da temperatura. No entanto, de uma forma célere, a temperatura do ar à saída do evaporador atinge $T_{ar} = 12^{\circ}\text{C}$.

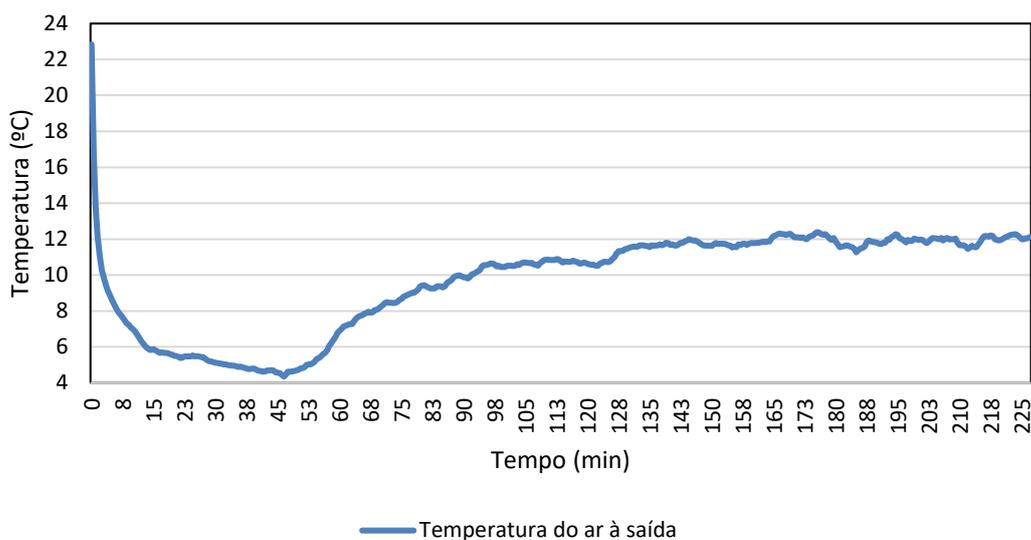


Figura 54. Temperatura do ar à saída do evaporador ao longo do ensaio 6

O momento de detecção de gelo no sensor 2 corresponde ao momento de aumento da temperatura e pode-se concluir que essa subida de temperatura é consequência do gelo formado na superfície e, mais especificamente, na região do sensor 2. Em $t = 72$ min, o sensor 1 deteta gelo na respectiva região. No entanto, verifica-se um aumento de $T_{ar} = 3^{\circ}\text{C}$ na temperatura nesse intervalo.

4.3. Nota conclusiva

Este capítulo tem como primordial objetivo a apresentação dos ensaios laboratoriais realizados no âmbito da dissertação e os resultados obtidos. Com os resultados obtidos em cada uma das superfícies, conclui-se que os sensores localizados na superfície frontal conseguem distinguir as três fases de forma mais precisa do que aquela verificada na superfície posterior do evaporador. A camada de gelo formada na superfície posterior do evaporador tende a ser menos densa.

Os sensores colocados na parte inferior do evaporador detetam água com maior facilidade, uma vez que a água condensada na parte superior tende a precipitar e aglomerar-se nos elétrodos desses sensores.

Relativamente à superfície de entrada, conclui-se que a camada de gelo se forma de cima para baixo, uma vez que também este é o sentido do fluxo do fluido

refrigerante. Adicionalmente, pode concluir-se que a formação de gelo é mais célere na região onde se localiza o sensor 2. Isto deve-se à proximidade com a entrada do fluido refrigerante e, por consequência com as temperaturas impostas nos tubos e nas alhetas. Posteriormente, surge gelo na região sensor 1 e depois na região do sensor 4. A região do sensor 3 é a última área afetada pela formação de gelo, em consequência das temperaturas e da redução de área de passagem de ar.

O ensaio 3 possui um sensor húmido na superfície posterior do evaporador, aquando do início do ensaio. No entanto, o seu comportamento não demonstra alterações significativas. Portanto, o desempenho dos sensores resistivos em ciclos de congelação/descongelação pode ser positivo.

Quando a camada de gelo surge nos elétrodos dos sensores, verifica-se que a diferença de potencial medida é semelhante à diferença de potencial medida na presença de ar.

Este conjunto de ensaios demonstra a exatidão nos resultados da deteção de gelo em serpentinas de evaporadores de sistemas de refrigeração e/ou congelação, com a utilização de sensores resistivos de baixo custo e de fácil construção. Estas características promovem a integração de mais do que um sensor, o que por sua vez possibilita uma análise espacial da evolução da formação de gelo, e com isso, o desenvolvimento de métodos, procedimentos e ações para mitigar a formação de gelo na superfície do evaporador, com o intuito de promover a troca térmica e com isso assegurar o desempenho térmico do equipamento e a sua eficiência energética.

5. Conclusões

5.1. Conclusões

Os permutadores de calor utilizados em processos de refrigeração operam, normalmente, com temperaturas inferiores à temperatura de congelação da água e, em primeiro lugar, o vapor de água presente no ar, condensa. Posteriormente, o vapor condensado acumulado nas superfícies congela, formando uma camada de gelo que reduz a eficiência do permutador de calor. Assim, é extremamente importante desenvolver ferramentas capazes de eliminar ou mitigar os efeitos nefastos da formação de gelo.

Atualmente, os sistemas de refrigeração existentes funcionam com recurso a sistemas de descongelação ativados por temporizadores, o que culmina em descongelações desnecessárias ou descongelações incompletas. No entanto, não existe um método de deteção para a formação de gelo consensual.

O sensor resistivo testado experimentalmente surge como uma alternativa válida, tendo como principais pressupostos o baixo custo, fiabilidade e simplicidade.

Foram realizados seis ensaios laboratoriais para compreender melhor o comportamento dos sensores colocados em vários pontos do evaporador. Os resultados obtidos são interessantes. No entanto, a deteção de água é comprometida por fatores externos, como a gravidade e a velocidade do ar. Para melhorar este aspeto, é importante testar espaçamentos menores de elétrodos. Os sensores são efetivos na determinação do momento da formação de gelo nos elétrodos. Assim, é possível avaliar de que forma se desenvolve camada de gelo ao longo da superfície de entrada do evaporador.

Devido à sua proximidade com a entrada do fluido refrigerante, o sensor 2 é o primeiro a identificar a presença de gelo. Isto deve-se às temperaturas dos tubos e das alhetas naquela zona. O sensor 1, que se encontra no lado oposto da superfície frontal, deteta gelo posteriormente. De seguida, são os sensores localizados na

parte inferior do evaporador a detetar gelo: primeiramente, o sensor 4 e depois o sensor 3. Conclui-se que a formação de gelo se dá no sentido descendente.

Os resultados obtidos com a aplicação do sensor resistivo desenvolvido em serpentinas de evaporadores de sistemas de refrigeração e/ou congelação demonstram exatidão na deteção de gelo. A incorporação de vários sensores na estrutura do evaporador possibilita uma análise espacial da evolução da formação de gelo, e, por conseguinte, desenvolver métodos, procedimentos e ações que permitam mitigar a formação de gelo na superfície de evaporadores, com o propósito de promover as trocas térmicas e melhorar o desempenho térmico do equipamento.

5.2. Sugestões de trabalhos futuros

Depois de efetuados os testes e de desenvolvida uma peça capaz de suportar os eléctrodos no evaporador, existem alguns outros estudos a desenvolver para que o desempenho deste dispositivo seja melhorado, como por exemplo:

- Estudar o efeito de vários espaçamentos entre eléctrodos, de forma a melhorar a deteção de água na superfície de evaporadores;
- Avaliar o efeito que diferentes tipos de alhetas provocam no comportamento do sensor em causa;
- Avaliar a possibilidade de tornar este sensor num dispositivo *wireless*, recorrendo a elementos de vibração;
- Estudar a possibilidade de diminuir, ou eliminar, a alimentação do sensor, fazendo uso de sistemas de captação de energia residual (*energy harvesting*);
- Desenvolver uma estratégia de controlo adequada, partindo da deteção da formação de gelo com o sensor resistivo, para a obtenção de um desempenho melhorado do sistema de refrigeração ou de congelação, sem que existam descongelações incompletas ou descongelações desnecessárias;

- Analisar a poupança adquirida com a aplicação deste método de deteção, comparativamente ao método de ativação por temporizador, aplicando o mesmo método de descongelação.

Referências Bibliográficas

Aljuwayhel, N.F., Reindl, D.T., Klein, S.A., & Nellis, G.F. (2008). Experimental investigation of the performance of industrial evaporator coils operating under frosting conditions, *International Journal of Refrigeration*, 31(1), pp. 98-106.

Amer, M., Wang, C.C. (2017). Review of defrosting methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, pp. 53-74.

Behr, J.L. (1980). Frost detector. United States Patent US4232528.

Buick, T.R., McMullan, J.T., Morgan, R., Murray, R.B. (1978). Ice detection in heat pumps and coolers, *Energy Research*, 2, pp. 85-98.

Byun, J-S., Jeon, C-D., Jung, J-H., Lee, J. (2006). The application of photo-coupler for frost detecting in an air-source heat pump, *International Journal of Refrigeration*, 29, pp. 191-198.

Cengel, Y.A. (1998). Heat Transfer - A practical approach, McGraw-Hill.

Cheikh, A.E., Jacobi, A. (2014). A mathematical model for frost growth and densification on flat surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 77, pp. 604-611.

Codner, G.W., Pruzan, D.A., Rauckhorst, R.L., Reich, A.D., Sweet, D.B. (1999). Impedance type ice detector. United States Patent US5955887.

Dauthy, M.E. (1995). *Fruit and vegetable processing*. FAO Agricultural Services Bulletin, n.º 119, M-17, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.

Dias, R. (2017). Estudo experimental das condições de operação que conduzem à redução da formação de gelo na superfície de unidades frigoríficas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletromecânica, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.

Dudeja, P., Gupta, R.K., & Minhas, A.S. (2016). *Food safety in the 21st century-public health perspective*. Academic Press.

FAO (2011). *Global food losses and food waste - Extent, causes and prevention*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.

French, P.D., Butz, J.R., Veatch, B.D., O'Connor, M.W. (2002). Frost sensor for use in defrost controls for refrigeration. United States Patent US6467282.

Graça, M. W. C. (2014). Dispositivo de monitorização da formação de gelo na superfície de evaporadores de sistemas de refrigeração. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletromecânica, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.

Hayashi, Y., Aoki, A., Adachi, S., Hori, K. (1977). Study of frost properties correlating with frost formation types, *Journal of Heat Transfer*, 99, pp. 239-245.

Hermes, C.J.L., Piucco, R.O., Barbosa Jr., J.R., Melo, C. (2009). A study of frost growth and densification on flat surfaces, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, pp. 371-379.

Huang, J-M., Hsieh, W-C., Ke, X-J., Wang, C-C. (2008). The effects of frost thickness on the heat transfer of finned tube heat exchanger subject to the combined influence of fan types, *Applied Thermal Engineering*, 28, pp. 728-737.

Jabardo, J.M.S., Filho, J.R.B.Z., Salamanca, A. (2006). Experimental study of the air side performance of louver and wave fin-and-tube coils, *Experimental study and Fluid science*, 30, pp. 621-631.

Jaeschke, J.R. (1981). Frost sensor employing self-heating thermistor as sensor element. United States Patent US4305259.

Kakac, S., Liu, H., Pramuanjaroenkij, A. (2012). Heat exchangers: selection, rating, and thermal design. CRC press.

Kamiyama, T. & Myamoto, K. (1979). Frost detector. United States Patent US4176524.

Kandula, M. (2011). Frost growth and densification in laminar flow over flat surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, pp. 3719-3731.

Kong, Y. Q., Yang, L. J., Du, X. Z., & Yang, Y. P. (2016). Impacts of geometric structures on thermo-flow performances of plate fin-tube bundles. *International Journal of Thermal Sciences*, 107, 161-178.

Lawrence, J.M.W., Evans, J.A. (2007). Refrigerant flow instability as a means to predict the need for defrosting the evaporator in a retail display cabinet, *International Journal of Refrigeration*, 31, pp. 107-112.

Na, B., Webb, R.L. (2004). New model for frost growth rate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, pp. 925-936.

Nojiri, T. (2000). Frost formation detector. United States Patent US6092925.

Office of Environment and Heritage (2011). Energy Saver - Technology Report. NSW Government, Sidney.

Özkan, D.B., Özil, E. (2006). Experimental study on the effect of frost parameters on domestic refrigerator finned tube evaporator coils, *Applied Thermal Engineering*, 26, pp. 2490-2493.

- Padki, M.M., Sherif, S.A., Nelson, R.M. (1989). A simple method for modelling the frost formation phenomenon in diferente geometries, *ASHRAE Transactions*, 95, pp. 1127-1137
- Peek, S.C. (1978). Frost detector. United States Patent US4109481.
- Kakac, S., Liu, H., & Pramuanjaroenkij, A. (2012) Heat Exchanger Selection Rating and Thermal Design. 3rd Edition, CRC Press, Boca Raton.
- Seker, D., Karatas, H., Egrican, N. (2003). Frost formation on fin-and-tube heat exchangers. Part I - Modeling of frost formation on fin-and-tube heat exchangers, *International Journal of Refrigeration*, 27, pp. 367-374.
- Seker, D., Karatas, H., Egrican, N. (2003). Frost formation on fin-and-tube heat exchangers. Part II - Experimental investigation of frost formation on fin-and-tube heat exchangers, *International Journal of Refrigeration*, 27, pp. 375-377.
- Stonehouse, G.G., & Evans, J.A. (2015). The use of supercooling for fresh foods: A review, *Journal of Food Engineering*, 148, pp. 74-79.
- Tassou, S.A., Datta, D., Marriott, D. (2000). Frost formation and defrost control parameters for open multideck refrigerated food display cabinets, *Journal of Power and Energy*, 215, pp. 215-222.
- Tso, C.P., Cheng, Lai, A.C.K. (2006). An improved model for predicting performance of finned tube heat exchanger under frost condition, with frost thickness variation along fin, *Applied Thermal Engineering*, 26, pp. 111-120.
- Tudor, V., Ohadi, M., Salehi, M.A., & Lawler, J.V. (2005). Advances in control of frost on evaporator coils with an applied electric field. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(21-22), pp. 4428-4434.
- Wang, C.-C., Du, Y.-J., Chang, Y.-J., Tao, W.-H. (1999). Airside performance of herringbone fin-and-tube heat exchanger in wet conditions, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 77, pp. 1225-1230.
- Wang, C.-C., Hwang, Y.-M., Lin, Y.-T. (2002). Empirical correlations for heat transfer and flow friction characteristics of herringbone wavy fin-and-tube heat exchangers, *International Journal of Refrigeration*, 25, pp. 673-680.
- Wang, C.-C., Jang, J.-Y., Chiou, N.-F. (1999). A heat transfer and friction correlation for wavy fin-and-tube heat exchanger, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, pp. 1919-1924.
- Wang, C.-C., Liaw, J.-S., Yang, B.-C. (2011). Airside performance of herringbone wavy fin-and-tube heat exchangers - data with larger diameter tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, pp. 1024-1029.
- Wongwises, S., Chokeman, Y. (2005). Effect of the fin pitch and number of tube rows on the air side performance of herringbone wavy fin and tube heat exchanger, *Energy Conversion and Management*, 46, pp. 2216-2231.

Xia, Y., Zhong, Y., Hrnjak, P.S., Jacobi, A. M. (2006). Frost, defrost, and refrost and its impact on the air-side thermal-hydraulic performance of louvered-fin, flat-tube heat exchangers, *International Journal of Refrigeration*, 29(7), pp. 1066-1079.

Xiao, J., Wang, W., Zhao, Y.H., Zhang, F.R. (2009). An analysis of the feasibility and characteristics of photoelectric technique applied in defrost-control, *International Journal of Refrigeration*, 32, pp. 1350-1357.

Yan, W-M., Li, H-Y., Tsay, Y-L. (2005). Thermofluid characteristics of frosted finned-tube heat exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, pp. 3073-3080.

Zhu, J., Sun, Y., Wang, W., Ge, Y., Li, L., Liu, J. (2015). A novel Temperature-Humidity-Time defrosting control method based on a frosting map for air-source heat pumps, *International Journal of Refrigeration*, 54, pp. 45-54.

Anexo A - Desenhos técnicos

Desenhos técnicos do protótipo do sensor utilizado nos ensaios laboratoriais.