



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Dispositivo de monitorização da formação de gelo na superfície de evaporadores de sistemas de refrigeração

Marcos Wilson Correia da Graça

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

Orientador: Prof. Doutor Pedro Dinis Gaspar
Coorientador: Prof. Doutor Pedro Dinho da Silva

Covilhã, outubro de 2014

Dedicatória

Aos meus pais e avós, por tudo.

Agradecimentos

A presente dissertação careceu da dedicação e apoio de várias pessoas. Sem elas o trajeto até aqui efetuado teria sido, com certeza, bem mais sinuoso e complicado.

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais e avós a educação e valores que me deram ao longo de toda a minha vida. Quero ainda agradecer a dedicação, compreensão e o apoio, tanto financeiro como afetivo, que me foi prestado.

Agradeço aos meus amigos e namorada que sempre me ouviram e apoiaram. A sua força, paciência, companheirismo e presença em todos os momentos da minha vida foram determinantes para ultrapassar os diversos obstáculos encontrados ao longo do meu percurso pessoal e acadêmico nesta etapa da minha vida.

Ao meu orientador Professor Doutor Pedro Dinis Gaspar e ao meu coorientador Professor Doutor Pedro Dinho da Silva um sincero agradecimento por todo o tempo e ajuda disponibilizada, ensinamentos transmitidos e apoio prestado em todas as fases que constituíram a dissertação.

Por fim, agradeço a todos os professores que contribuíram de forma positiva para a formação que hoje possuo. Um especial agradecimento para os professores do DEM que, pelos conhecimentos transmitidos e nível de dificuldade exigido, hoje permitem que eu possua uma formação reconhecida no mercado de trabalho.

Resumo

Para que se obtenham temperaturas inferiores às disponíveis no meio ambiente, quer seja para fins de conservação de alimentos ou para obtenção de conforto térmico, as serpentinas do evaporador, geralmente, operam a temperaturas inferiores às do ponto de congelação da água. O gelo formado na superfície das mesmas é prejudicial tanto a nível energético como térmico do sistema. Desta forma, a sua remoção é crucial para restabelecer as condições de funcionamento desejadas.

Os dispositivos utilizados atualmente na indústria da refrigeração para monitorizar a formação de gelo à superfície dos evaporadores possuem resultados que permanecem ainda aquém do desejado, pelo que estes continuam a ser um objeto de estudo com enorme potencial de exploração.

Na presente dissertação foi estudada a viabilidade de utilização de um dispositivo simples e de baixo custo para a monitorização da formação de gelo na superfície dos evaporadores. Tendo em conta os requisitos a que este está desde logo sujeito, optou-se pela utilização de um sensor resistivo. O conceito do dispositivo testado baseia-se na variação que a formação de gelo impõe à resistência mensurada entre eléctrodos. Uma vez que se verificam efetivamente diferentes resistividades elétricas entre os materiais em estudo, seguiram-se os estudos experimentais de forma a apurar se o dispositivo e respetivos circuitos eletrónicos possuem sensibilidade suficiente para atingir o objetivo proposto.

Verificada a sensibilidade do dispositivo em condições mais favoráveis, seguiu-se a calibração da distância entre eléctrodos em condições reais. Reunidas as condições necessárias, procedeu-se à realização do estudo experimental e correspondente análise. Através de minuciosa análise de resultados, o circuito eletrónico capaz de automatizar todo o processo foi dimensionado e projetado numa placa de circuito impresso.

Os resultados obtidos permitiram concluir que, tanto a configuração do circuito utilizado como o conceito associado ao dispositivo em utilização possuem potencial para serem utilizados como dispositivos de monitorização da formação de gelo. No entanto, existem alguns ajustes a efetuar até que este possa atingir um patamar de aplicação generalizada.

Palavras-chave

Gelo, sensor resistivo, sistemas de refrigeração, evaporador, segurança alimentar e eficiência energética.

Abstract

In order to obtain temperatures lower than those available in the environment, whether for purposes of preserving food or for obtaining thermal comfort, the evaporator coils typically operate at temperatures below the water freezing point. The ice formed on the surface thereof is detrimental to both thermal and energy level of the system. Thereby, its removal is critical to restore the desired operating conditions.

Currently the devices used in the refrigeration industry to monitor the ice formation on the surface of the evaporators have results that are still below the desirable, so these remain an object of study with great potential exploration.

In the present work, the feasibility of using a simple and low cost device for monitoring the ice formation on the evaporator surface was studied. Taking knowledge of the requirements to which it is immediately subject, it was decided to use a resistive sensor. The device concept under examination is based on the influence that ice formation has in the resistance variation measured between the electrodes. Since it was effectively verified the different electrical resistivity between the materials under study, they were followed by experimental studies in order to determinate whether the respective dispositive and electronic circuits have enough sensitivity to achieve the proposed objective.

Once checked the device sensitivity in more favorable conditions, then it was followed by the calibration of the distance between electrodes in real conditions. Fulfilled the necessary conditions, we proceeded to carry out the experimental study and corresponding analysis. Through detailed analysis of results, the electronic circuit capable of automating the entire process was scaled and designed in a printed circuit board.

The results allow to conclude that both the circuit configuration used as the concept associated with the device in use, have potential to be used as icing monitoring devices. However, it needs some adjustments to make until being able to reach a generalized application level.

Keywords

Ice, resistive sensor, cooling systems, evaporator, food safety and energy efficiency.

Índice

Dedicatória	i
Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tabelas	viii
Nomenclatura	ix
Capítulo 1	1
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	2
1.1.1. Vertente energética	2
1.1.2. Vertente da segurança alimentar	4
1.2 O problema em estudo e a sua relevância	6
1.3 Objetivos da dissertação	9
1.4 Visão geral e organização da dissertação	10
Capítulo 2.....	11
2. Sistema de refrigeração.....	11
2.1 Introdução	11
2.2 Tipos de sistemas de refrigeração aplicados à conservação de alimentos por frio .	12
2.2.1 Refrigeração	12
2.2.2 Congelação	13
2.3 Refrigeração por compressão de vapor	14
2.3.1 Fluido refrigerante.....	15
2.3.2 Componentes	16
2.4 Processo e condições para a formação de gelo	20
2.5 Nota conclusiva	21
Capítulo 3	23
3. Estado da arte	23
3.1 Introdução	23
3.2 Métodos de deteção de gelo	23
3.3 Dispositivos de monitorização da formação de gelo por métodos diretos.....	24
3.4 Dispositivos de monitorização da formação de gelo por métodos indiretos	26
3.5 Nota conclusiva	28
Capítulo 4.....	29
4. Protótipo experimental	29

4.1	Introdução	29
4.2	Princípio de funcionamento do sensor	30
4.3	Instalação experimental	32
4.4	Nota conclusiva	32
Capítulo 5	.....	33
5. Estudos experimentais	.....	33
5.1	Introdução	33
5.2	<i>Software</i> de simulação - Multisim 11.0	36
5.3	Validação do princípio de funcionamento para o circuito utilizado	37
5.4	Estudo de calibração do espaçamento entre elétrodos.....	40
5.5	Nota conclusiva	41
Capítulo 6	.....	43
6. Análise e discussão de resultados	.....	43
6.1	Estudo experimental com velocidade do ar de 2 m/s.....	43
6.2	Estudo experimental com velocidade do ar de 4 m/s.....	47
6.3	Placa de circuito impresso (PCB)	51
6.4	Nota conclusiva	54
Capítulo 7	.....	55
7. Conclusões	.....	55
7.1	Análise do desempenho.....	55
7.2	Sugestões de trabalhos futuros.....	56
Bibliografia	.....	59
Anexo A - Temperaturas características de alguns microrganismos patogénicos [7].	..	62

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Consumo Mundial de energia final por combustível de 1971 a 2011 [4].	2
Figura 1.2 - Produção Mundial de eletricidade por combustível de 1971 a 2011 (TWh) [4].	3
Figura 1.3 - Esquema simplificado do problema em estudo.	8
Figura 2.1 - Esquema representativo de um sistema de refrigeração.	11
Figura 2.2 - Esquema representativo de um ciclo frigorífico de um sistema por compressão de vapor.	14
Figura 2.3 - Exemplo de um evaporador de tubo alhetado.	17
Figura 3.1 - Esquema da montagem experimental.	24
Figura 3.2 - Configuração de elétrodos utilizada.	24
Figura 3.3 - Esquema ilustrativo do princípio de funcionamento.	25
Figura 5.1 - Elétrodos que formam o sensor.	33
Figura 5.2 - Unidade de tratamento de ar	34
Figura 5.3 - Evaporador da unidade de tratamento de ar.	35
Figura 5.4 - Interface do <i>software</i> Multisim [34].	36
Figura 5.5 - Esquema do circuito de aquisição de dados	38
Figura 5.6 - Montagem experimental	38
Figura 5.7 - Estudo com ar entre os elétrodos.	39
Figura 5.8 - Estudo com água entre os elétrodos	39
Figura 5.9 - Estudo com gelo entre os elétrodos	40
Figura 5.10 - Gráfico de resultados referente ao estudo de calibração do sensor	41
Figura 6.1 - Variação da temperatura em diferentes locais e ao longo do estudo para velocidade do ar a 2 m/s.	43
Figura 6.2 - Variação da humidade relativa do ar em diferentes locais e ao longo do estudo para velocidade do ar a 2 m/s.	44
Figura 6.3 - Gráfico da variação dos parâmetros indicadores da formação de gelo para o estudo a 2 m/s	45
Figura 6.4 - Evolução da formação de gelo ao longo do estudo efetuado para velocidades do ar de 2 m/s.	46
Figura 6.5 - Variação da temperatura em diferentes locais e ao longo do estudo para velocidade do ar a 4 m/s.	47
Figura 6.6 - Variação da humidade relativa do ar em diferentes locais e ao longo do estudo para velocidade do ar a 4 m/s.	48
Figura 6.7 - Variação dos parâmetros indicadores da formação de gelo para o estudo para velocidade do ar a 4 m/s.	48
Figura 6.8 - Evolução da formação de gelo ao longo do estudo efetuado para velocidades do ar de 4 m/s.	50
Figura 6.9 - Esquema e respetivas ligações de um comparador de tensão.	51
Figura 6.10 - Circuito final dimensionado	53
Figura 6.11 - Imagem 2D das ligações do PCB	53
Figura 6.12 - Imagem 2D das ligações do PCB	53

Lista de Tabelas

Tabela 1.1. Tempos máximos acumulados de exposição de alimentos em função da temperatura dos produtos [7].	5
Tabela 4.1- Importância dos diversos fatores por área.....	29
Tabela 4.2 - Condutibilidade elétrica dos diferentes materiais em estudo [32].	31
Tabela 5.1 - Características da UTA.....	34
Tabela 5.2 - Características do evaporador da UTA	35

Nomenclatura

Geral:

A	Área da secção, [m ²];
d	Distância, [cm];
F_a	Passo da alheta, [m];
F_l	Passo longitudinal dos tubos, [m];
F_t	Passo transversal dos tubos, [m];
h	Entalpia específica, [kJ/kg];
h_e	Altura do evaporador, [m];
l	Intensidade de corrente, [A];
k	Comprimento da alheta, [m];
K	Coefficiente de transmissão térmica, [W/(m ² .°C)];
l	Comprimento característico, [m];
\dot{m}	Caudal mássico, [kg/s];
N	Número de filas de tubos;
Q	Caudal volumétrico, [m ³ /h];
\dot{Q}_F	Potência de refrigeração, [W];
\dot{Q}_Q	Potência de aquecimento, [W];
R	Resistência elétrica, [Ω];
s	Superfície do evaporador, [m ²];
t	Tempo, [min];
T_o	Temperatura de evaporação, [°C];
T_{aq}	Temperatura da água quente, [°C];
T_{as}	Temperatura do ar à saída do evaporador, [°C];
T_{ae}	Temperatura do ar à entrada do evaporador, [°C];
T_{bh}	Temperatura de bolbo húmido, [°C];
T_{bs}	Temperatura de bolbo seco, [°C];
T_F	Temperatura na fonte fria, [°C];
T_Q	Temperatura na fonte quente, [°C];
T_{In}	Média logarítmica de temperatura, [°C];
U	Diferença de potencial, [V];
V_{CC}	Tensão de alimentação positiva, [V];
V_{EE}	Tensão de alimentação negativa, [V];
V_{Ref}	Tensão de referência, [V];
\dot{W}	Potência mecânica de compressão, [W];
w	Número de alhetas;
z	Número de tubos.

Simbologia grega:

Δ	Varição;
δ_a	Espessura da alheta, [m];
ρ	Resistividade elétrica, [m/S];
σ	Condutibilidade elétrica, [S/m].

Acrónimos:

AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado;
COP	Coefficient of Performance;
DEM	Departamento de Engenharia Eletromecânica;
IEA	International Energy Agency;
LED	Light Emitting Diode;
PCB	Printed Circuit Board;
UBI	Universidade da Beira Interior;
UTA	Unidade de Tratamento de Ar.

Capítulo 1

Introdução

O panorama energético atual, onde não existe um consumo racional e sustentável de energia, tem culminado em consequências nefastas para o nosso planeta. Uma das principais consequências de tal utilização ineficiente de energia, é o aquecimento global que tanto tem afetado o nosso planeta. Tais razões levam a que existam maiores preocupações relativamente à utilização de energia, tornando-se imperativo inverter esta tendência e atingir a sustentabilidade energética. Desta forma, deve-se apostar nas energias renováveis de modo a diminuir as necessidades energéticas a partir de recursos fósseis. Por outro lado, deve-se ainda aumentar a eficiência dos equipamentos de modo a reduzir as necessidades energéticas. Sendo esta última, parte da motivação do presente trabalho.

Os sistemas de refrigeração são hoje em dia um recurso indispensável. A refrigeração é uma área da engenharia de grande importância que vem sendo aperfeiçoada há séculos devido às elevadas necessidades que advêm do estilo de vida e da constante evolução da sociedade. Os sistemas de refrigeração possuem diversas aplicações, sendo duas das de maior número relacionadas com a climatização e com a conservação de alimentos.

Para que se obtenham temperaturas inferiores às disponíveis no meio ambiente, as serpentinas do evaporador operam, geralmente, a temperaturas abaixo das do ponto de congelação da água o que provoca a formação de gelo na superfície das mesmas. Esta, até determinada espessura, é benéfica para o sistema [1]. No entanto, rapidamente atinge valores indesejados, o que origina uma redução da eficiência térmica e elétrica do sistema. Como tal, torna-se fulcral a remoção do gelo formado na superfície dos evaporadores.

Atualmente muitos dos sistemas de descongelação são controlados através de um temporizador que regula o número de ciclos de descongelação diários e respetiva duração [2]. Para além destes, existem ainda no mercado sistemas que monitorizam a formação de gelo através da temperatura do ar na conduta. Estes são métodos indiretos da deteção de gelo. Porém, e por não considerarem as diversas variáveis que afetam a formação do mesmo, resultam na grande maioria dos casos, num excesso de ciclos de descongelação [3].

A conservação de alimentos utilizando o frio baseia-se na inibição total ou parcial da proliferação microbiana, das reações químicas e da atividade enzimática. Tendo em conta o contexto e as temperaturas praticadas nas câmaras de conservação de alimentos, quanto menor for a temperatura, mais lentas serão as reações químicas, a atividade enzimática e

proliferação microbiana. A conservação de alimentos por frio resulta portanto numa diminuição da degradação dos mesmos e, conseqüentemente, num aumento da sua vida útil.

Uma vez que todo e qualquer sistema de descongelamento resulta em ganhos térmicos para o interior da zona onde o evaporador se encontra, para além do desempenho do sistema de refrigeração ser afetado, também a segurança alimentar poderá ser posta em causa.

O elevado número de equipamentos do género, o consumo afeto aos mesmos e o potencial de poupança de energia associado, fazem dos sensores de monitorização da formação de gelo aplicados a sistemas de refrigeração excelentes objetos de estudo.

1.1 Enquadramento

1.1.1. Vertente energética

Segundo dados da IEA (*International Energy Agency*) [4], e tal como se pode verificar pela Figura 1.1, o consumo de energia final tem aumentado ao longo dos anos.

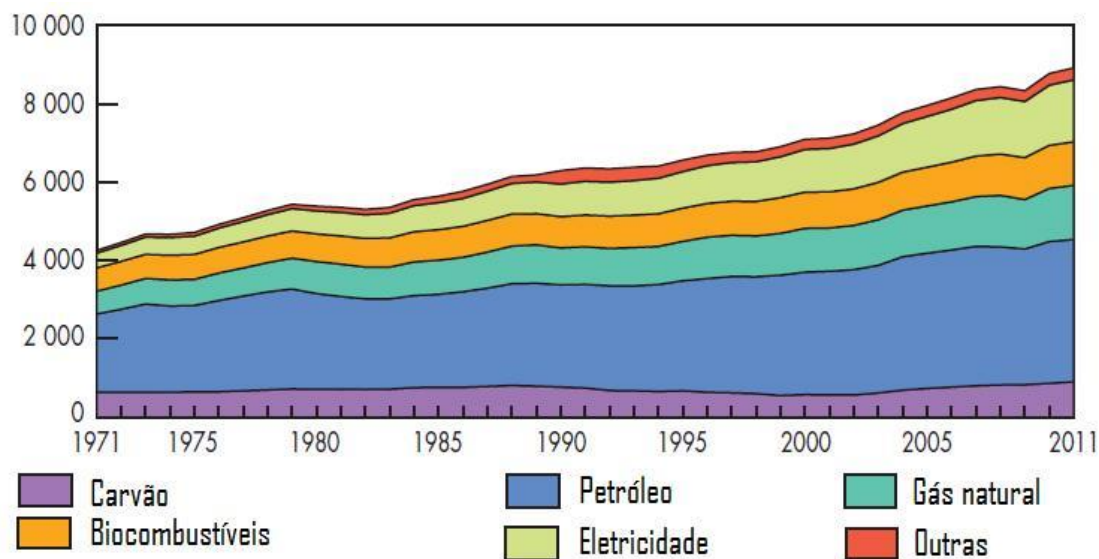


Figura 1.1 - Consumo Mundial de energia final por combustível de 1971 a 2011 [4].

Entre outros, um dos responsáveis por este crescimento é o aumento do consumo de eletricidade. No ano de 1973 a eletricidade correspondia a 9,4% da energia consumida, sendo

esta “fatia” responsável por 439,356 Mtep¹. No ano de 2011 a eletricidade correspondia já a 17,7% da energia consumida, sendo neste caso a “fatia” correspondente a 1578,486 Mtep [4].

Esta tendência, tal como poderá ser verificado pela observação da Figura 1.2, tem sido suportada na sua grande maioria por combustíveis fósseis tais como o carvão, o gás natural e o petróleo.

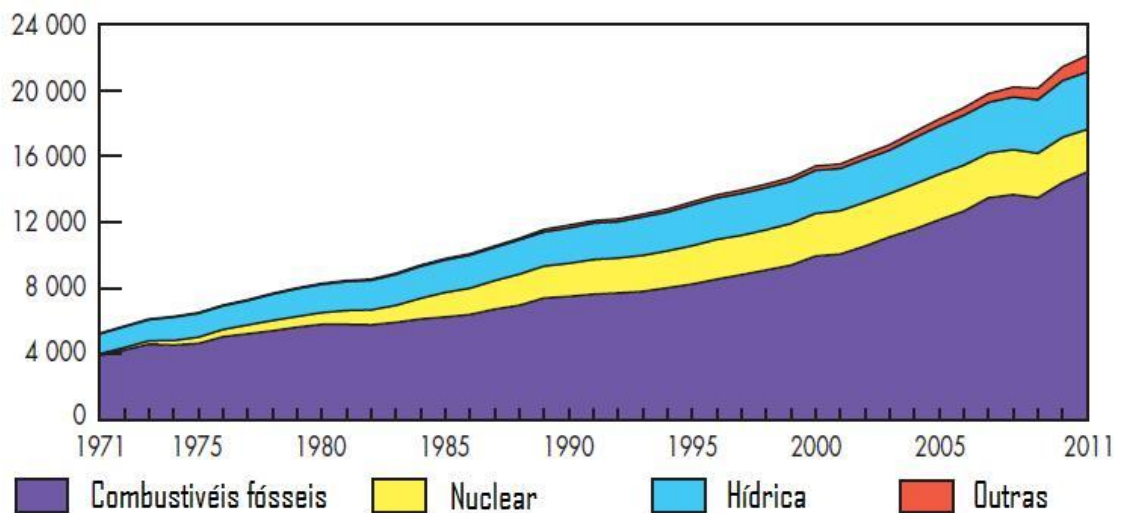


Figura 1.2 - Produção Mundial de eletricidade por combustível de 1971 a 2011 (TWh) [4].

Apesar da diminuição do consumo de combustíveis fósseis para produção de eletricidade em termos percentuais, tem-se verificado em termos absolutos um aumento na sua procura/dependência. Em 1973 o consumo de combustíveis fósseis destinado à produção de energia elétrica correspondia a 75,1%, ao passo que em 2011 correspondia a 68%. No entanto, devido ao aumento do consumo de eletricidade ao longo dos anos, o consumo de combustíveis fósseis para produção de eletricidade tem aumentado. Em 1973 os combustíveis fósseis para produção de energia corresponderam a 4592,365 TWh, por outro lado, em 2011 estes já representavam 15045,68 TWh.

Os combustíveis fósseis, para além de não renováveis, contribuem para as “agressões” ao planeta e à natureza em si a que temos assistido atualmente e que não representam uma utilização de energia racional e sustentável. Impera portanto a necessidade de se utilizar a

¹ 1 Mtep (Megatonelada equivalente de petróleo) = 41870 MJ (Megajoule)

energia de forma sustentável, ou seja, utilizar os recursos presentes na natureza de forma racional sem colocar em causa a existência dos mesmos no futuro.

Para que se atinja um desenvolvimento da sociedade de forma sustentada, de tal modo que a evolução dos países não ponha em causa a estabilidade do clima e ecossistemas, têm vindo a ser efetuados diversos acordos tais como, o tratado de Lisboa e o tratado de Quioto, que contemplam variadas metas a atingir. O foco principal dos acordos anteriormente referidos é, essencialmente, o aumento da eficiência energética, redução da emissão dos gases poluentes e uma aposta nas energias renováveis [5]. Sendo que os dois grandes pilares da sustentabilidade energética assentam exatamente na eficiência energética e nas energias renováveis [6].

Em suma, de modo a diminuir a necessidade de utilização de combustíveis fósseis, para além de se apostar noutras formas de energia tais como as energias renováveis, qualquer política energética deve estimular ainda a eficiência energética e o combate ao desperdício. De referir ainda que, por definição, a eficiência energética consiste na relação entre a quantidade de energia empregue numa atividade e aquela disponibilizada para a sua realização.

1.1.2. Vertente da segurança alimentar

Existem microrganismos em quantidades toleráveis presentes nos alimentos aquando do seu consumo, ou seja, em função do tipo de alimento e do microrganismo presente, a sua ingestão com determinada carga microbiológica não afeta nem a qualidade do produto nem a saúde do consumidor. Para qualquer que seja o microrganismo, existe uma temperatura ótima para o seu crescimento e reprodução [ver anexo A] [7].

Um equipamento de refrigeração, como seja uma câmara de refrigeração, encontra-se sujeito a ganhos térmicos que representam flutuações de temperatura do ar e conseqüentemente dos produtos alimentares dispostos no seu interior. Estes ganhos térmicos poderão ocorrer de diversas formas tais como pela abertura de portas, através de isolamento insuficiente ou deficiente e através do sistema de descongelação.

O facto da temperatura do ar atingir valores acima dos desejados no interior da câmara, conduz a que se criem condições propícias à proliferação microbiana, aumento das reações químicas e da atividade enzimática. Estes, tal como anteriormente referido, representam situações não desejáveis dado que aumentam a deterioração dos alimentos.

De seguida serão apresentados na Tabela 1, os tempos máximos acumulados de exposição de alimentos, tendo em conta a temperatura do produto e as condições potenciais de risco.

Tabela 1.1. Tempos máximos acumulados de exposição de alimentos em função da temperatura dos produtos [7].

Condições potenciais de risco	Temperatura do produto (°C)	Tempo máximo acumulado
Crescimento e formação de toxinas de <i>Bacillus cereus</i>	4 - 6	5 dias
	7 - 10	17 horas
	11 - 21	6 horas
	Acima de 21	3 horas
Crescimento de <i>Campylobacter jejuni</i>	30 - 34	48 horas
	Acima de 34	12 horas
Germinação, crescimento e formação de toxinas pelo <i>Clostridium botulinum</i> . Tipo A e proteolítico B e F	10 - 21	11 horas
	Acima de 21	2 horas
Germinação, crescimento e formação de toxinas pelo <i>Clostridium botulinum</i> . Tipo E e não-proteolítico B e F	3,3 - 5	7 dias
	6 - 10	> 2 dias
	11 - 21	11 horas
	Acima de 21	6 horas
Crescimento de <i>Clostridium perfringens</i>	10 - 12	21 dias
	13 - 14	1 dia
	15 - 21	6 horas
	Acima de 21	2 horas
Crescimento de esporos patogênicos de <i>Escherichia coli</i>	7 - 10	14 dias
	11 - 21	6 horas
	Acima de 21	3 horas
Crescimento de <i>Listeria monocytogenes</i>	-0,4 - 5	7 dias
	6 - 10	2 dias
	11 - 21	12 horas
	Acima de 21	3 horas
Crescimento de espécies de <i>Salmonella</i>	5,2 - 10	14 dias
	11 - 21	6 horas
	Acima de 21	3 horas
Crescimento de espécies de <i>Shigella</i>	6,1 - 10	14 dias
	11 - 21	12 horas
	Acima de 21	3 horas
Crescimento e formação de toxinas por <i>Staphylococcus aureus</i>	7 - 10	14 dias
	11 - 21	12 horas
	Acima de 21	3 horas
Crescimento de <i>Vibrio cholerae</i>	10	21 dias
	11 - 21	6 horas
	Acima de 21	2 horas
Crescimento de <i>Vibrio parahaemolyticus</i>	5 - 10	21 dias
	11 - 21	6 horas
	Acima de 21	2 horas
Crescimento de <i>Vibrio vulnificus</i>	8 - 10	21 dias
	11 - 21	6 horas
	Acima de 21	2 horas
Crescimento de <i>Yersenia enterocolitica</i>	-1,3 - 10	1 dia
	11 - 21	6 horas
	Acima de 21	2,5 horas

A Tabela 1 permite apurar que a prática de temperaturas desajustadas culminam em consequências para a qualidade do produto. Por outro lado, embora de forma menos agressiva, ajuda ainda a entender os potenciais riscos associados às flutuações de

temperatura. Através de uma observação cuidada da Tabela 1 é possível verificar que por vezes apenas 1°C ou 2°C acima da temperatura praticada pode reduzir de forma drástica o período de qualidade do produto em causa. Um caso curioso é o crescimento de *Clostridium perfringens* que, entre os 10°C e os 12°C, possui um tempo máximo acumulado de 21 dias e, para temperaturas entre os 13°C e os 14°C, de apenas 1 dia.

Desta forma deve-se evitar ao máximo que a temperatura, ainda que por momentos, atinja valores acima dos ideais para a conservação da qualidade do produto. Para tal o sistema de refrigeração deverá ser capaz de remover as fontes de calor existentes e registar o mínimo de vezes, e pelo mais curto espaço de tempo, temperaturas acima das desejadas para a situação em causa.

1.2 O problema em estudo e a sua relevância

Devido às crescentes necessidades e exigências dos atuais consumidores provocadas pela evolução e desenvolvimento da sociedade, tem existido uma procura crescente de sistemas de refrigeração. Uma parte significativa destes destina-se ao conforto térmico (sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado - AVAC) e à conservação de alimentos [8]. Os sistemas de refrigeração destinados à conservação de alimentos podem ser divididos, consoante o fim a que se destinam, em sistemas de refrigeração e de congelação [9].

Existem diversos fatores que afetam o desempenho dos sistemas anteriormente referidos, bem como, as suas funcionalidades. No presente trabalho será abordado com maior afinco, as consequências afetas à formação de gelo na superfície dos evaporadores.

O evaporador é o componente do sistema de refrigeração responsável por retirar calor do meio a ser refrigerado, sendo que a formação de gelo dá-se, na grande maioria dos casos, na sua superfície por ser nesta que se verificam as temperaturas mais baixas. Em casos mais extremos, a formação de gelo pode ainda dar-se nas paredes da câmara de refrigeração.

O gelo possui uma estrutura porosa composta por cristais de gelo e poros de ar, pelo que este possui uma baixa condutividade térmica. Por estas mesmas razões esta camada resulta numa resistência significativa à transferência de calor do ar com a superfície do evaporador, atuando portanto como isolante [10]. Para além das desvantagens anteriores, a formação de gelo provoca ainda um bloqueio à passagem do ar. As consequências da formação de gelo na superfície do evaporador para o sistema são a redução da eficiência energética, diminuição da sua capacidade de refrigeração e aumento do consumo de energia.

De forma sucinta, e relativamente apenas ao sistema, conclui-se que a formação de gelo afeta tanto o desempenho térmico como energético de um evaporador. É portanto necessário proceder à descongelação do gelo formado de modo a restabelecer as condições “ideais” de funcionamento. Em muitos dos equipamentos comerciais, o processo de descongelação é

monitorizado através de um temporizador que, periodicamente e por períodos pré-definidos, descongela o evaporador. Regra geral, o método anteriormente referido possui um período entre ciclos de descongelação e um período de descongelação desadequado, pois é fortemente dependente das condições do ar ambiente, das cargas térmicas da envolvente e da quantidade de produtos armazenados [3].

De salientar que, todo e qualquer sistema de descongelação resulta num aumento da temperatura interior da câmara. Desta forma, um período de descongelação desajustado culmina numa redução ainda mais acentuada da eficiência do sistema que, consoante a aplicação, poderá ainda prejudicar a qualidade e segurança alimentar dos produtos presentes.

O esquema apresentado na Figura 1.3 apresenta de forma sucinta o problema em estudo e as consequências de utilização de um dispositivo de monitorização ineficiente.

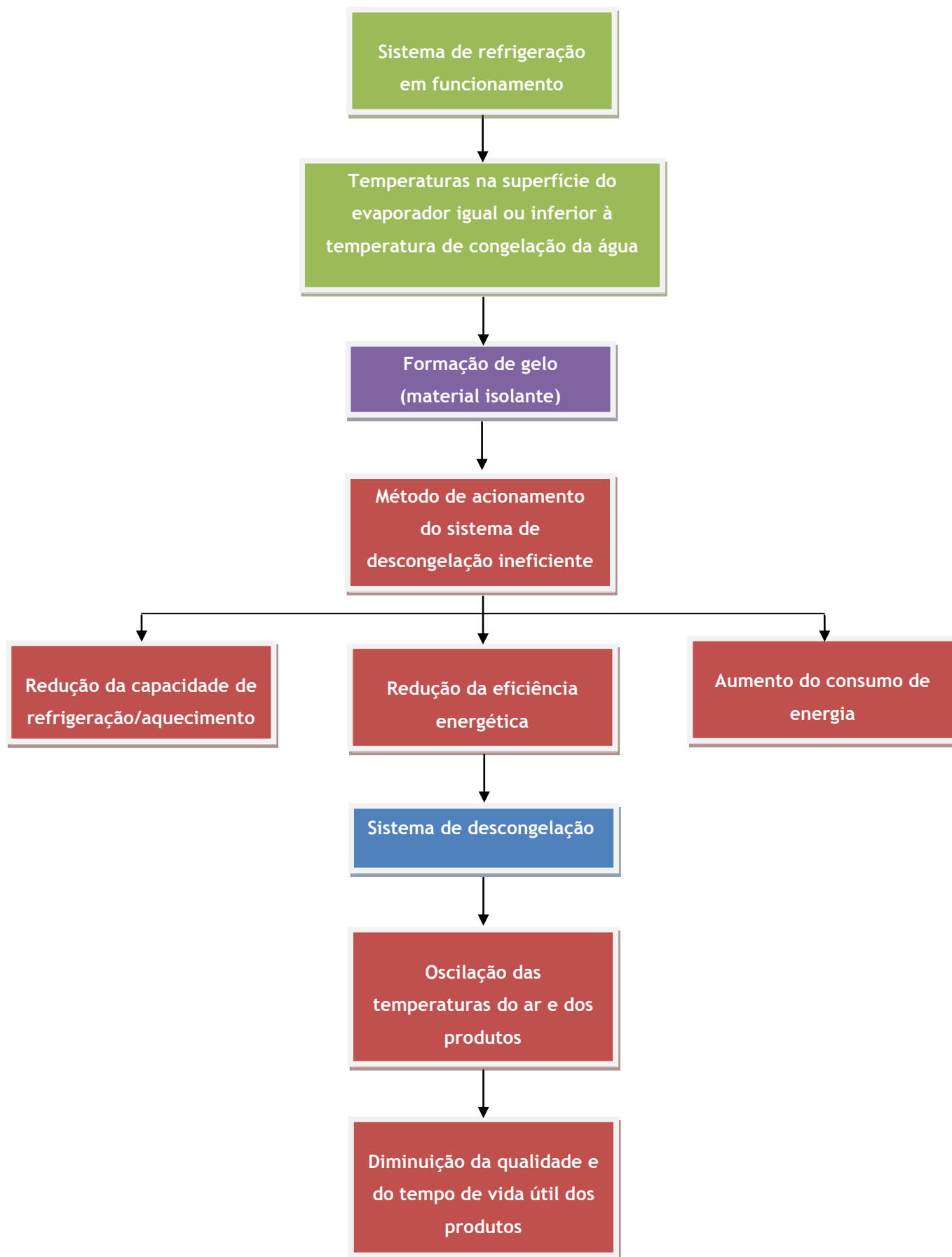


Figura 1.3 - Esquema simplificado do problema em estudo.

Como esquematizado na Figura 1.3, um sistema de refrigeração que se baseie num método ineficiente está sujeito a ganhos térmicos excessivos que culminam numa utilização de energia de forma não sustentável.

Através da implementação de um dispositivo de monitorização da formação de gelo na superfície de evaporadores de sistemas de refrigeração fiável, barato e eficiente, é possível ajustar o número de ciclos de descongelação bem como a sua duração ao estritamente necessário. Desta forma será possível alcançar o aumento da eficiência do sistema, aumento da sua capacidade de refrigeração, aumento da qualidade e do tempo útil dos produtos armazenados no seu interior, bem como, uma poupança de energia afeta ao sistema em si. A longo prazo, verifica-se ainda um aumento da vida útil do sistema.

Esta diminuição no consumo implementada nos sistemas existentes resulta numa diminuição significativa das necessidades energéticas globais e, conseqüentemente, num passo a caminho da sustentabilidade energética. Para além das vantagens óbvias anteriormente referidas, a poupança financeira afeta à redução do consumo de energia elétrica promove ainda a competitividade da empresa.

1.3 Objetivos da dissertação

O presente trabalho visa avaliar o potencial de um sensor resistivo para a monitorização da formação de gelo na superfície de evaporadores de sistemas de refrigeração. Este é um método direto de deteção de gelo onde se pretende detetar a sua formação através da variação que esta impõe na resistividade mensurada entre os eléctrodos que formam o sensor. Pretende-se deste modo aumentar a eficiência energética afeta ao sistema, a sua capacidade de refrigeração e a vida útil do sistema e dos produtos alimentares conservados no interior das câmaras.

Em teoria, o conceito do sensor em causa possui potencial para ser um método eficaz na deteção da formação de gelo na superfície de um evaporador. Estudos efetuados utilizando o conceito em causa demonstram que este pode ser um método utilizado até para distinguir entre o tipo de gelo formado devido às diferentes propriedades elétricas que diferentes tipos de gelo apresentam [11]. Os passos a seguir para atingir o objetivo são:

- Definir o método de medição e correspondente circuito eletrónico a utilizar
- Validar o conceito da deteção de gelo a partir do sensor escolhido
- Calibrar o sistema de medição
- Verificar se o método escolhido possui potencialidades para ser utilizado como sensor de monitorização da formação de gelo na superfície dos evaporadores tendo por base o seu custo, fiabilidade e sensibilidade.
- Desenvolver a placa de circuito impresso (*Printed Circuit Board* - PCB).

1.4 Visão geral e organização da dissertação

A presente dissertação possui, de modo a permitir que quem a deseje consultar o faça com a maior clareza e organização possível, uma estrutura dividida em 7 capítulos.

O primeiro destes abarca uma breve introdução ao estudo efetuado e ao enquadramento em que este se insere. É posteriormente abordado o problema em estudo bem como a sua relevância e contribuição, sendo por fim apresentados os objetivos propostos.

O capítulo seguinte abrange o princípio de funcionamento dos sistemas de refrigeração, bem como os diferentes tipos de aplicações destinados à conservação de alimentos por frio em que se dividem. Posteriormente, e ainda no mesmo capítulo, tanto o sistema de refrigeração por ciclo de compressão de vapor como os respetivos componentes são abordados e caracterizados. Por fim, mas não com menos relevância, surge o processo e condições necessárias para que se verifique a formação de gelo nos equipamentos em estudo.

No terceiro capítulo são apresentados alguns dos trabalhos efetuados relativamente à monitorização da formação de gelo em diversas áreas.

O capítulo 4 contempla o protótipo experimental. Neste capítulo é abordado o princípio de funcionamento do dispositivo testado e de toda a instalação experimental utilizada. No subcapítulo referente à instalação experimental é apresentado um esquema para ajudar à compreensão de toda a explicação que a acompanha.

O quinto capítulo relata os estudos experimentais efetuados. De início é feita uma breve introdução ao mesmo onde se expõe alguns cuidados a ter aquando da experiência e onde são abordados alguns dos equipamentos utilizados para a realização do estudo em causa. De seguida é apresentado um subcapítulo onde o princípio de funcionamento do dispositivo é validado. É ainda apresentado o estudo realizado com o objetivo de calibrar a distância entre os elétrodos de modo a obter resultados de maior sensibilidade.

No sexto capítulo são apresentados os resultados obtidos acompanhados de uma breve análise crítica relativamente aos mesmos. Os estudos apresentados compreendem o estudo efetuado para velocidades do ar de 2 m/s e de 4 m/s. Por último é apresentado o circuito dimensionado para que todo o processo da monitorização da formação de gelo e acionamento do sistema de descongelação funcionem de forma automatizada.

No último capítulo realiza-se a conclusão do estudo aqui apresentado tendo por base os requisitos pré-definidos, a área a que se destina e os resultados auferidos. São anunciadas por fim as propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Sistema de refrigeração

2.1 Introdução

A refrigeração é uma das principais aplicações da termodinâmica. Esta consiste no arrefecimento de corpos sólidos ou fluidos para temperaturas inferiores às que estão disponíveis no ambiente [12]. A transferência de calor de uma zona cuja temperatura é inferior para uma zona onde a temperatura é superior é um processo de transferência de energia que ocorre de forma natural, por outras palavras, sem que exista necessidade de fornecimento de trabalho. No entanto, o mesmo não ocorre para o processo inverso. Para se transferir energia de uma zona onde a temperatura é inferior para uma zona onde a temperatura é superior, é necessário o fornecimento de energia sob a forma de trabalho.

De forma bastante simplificada, num sistema de refrigeração tal como esquematizado na Figura 2.1, o calor é transferido da fonte fria, à temperatura T_F , para o sistema de refrigeração. A taxa de calor a que a transferência previamente referida ocorre denomina-se potência de refrigeração (\dot{Q}_F). Com o fornecimento de potência mecânica sob a forma de trabalho (\dot{W}), a energia absorvida é transferida para a fonte quente, à temperatura T_Q . A taxa de calor à qual a temperatura se transfere do sistema de refrigeração para a fonte quente é designada de potência de aquecimento (\dot{Q}_Q). O processo anteriormente referido funciona de forma cíclica e assenta na 1ª lei da termodinâmica.

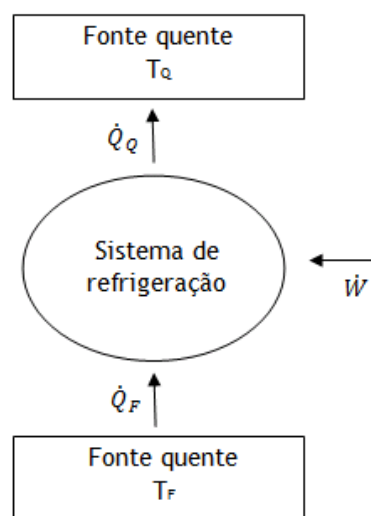


Figura 2.1 - Esquema representativo de um sistema de refrigeração.

2.2 Tipos de sistemas de refrigeração aplicados à conservação de alimentos por frio

Tal como referido anteriormente, duas das principais aplicações dos sistemas de refrigeração são a conservação de alimentos e o conforto térmico. Os dois tipos de conservação de alimentos por frio mais utilizados são, a refrigeração e a congelação, sendo que cada uma se adequa ao tipo de alimento e tempo de conservação desejável.

2.2.1 Refrigeração

Na refrigeração, diferentes produtos alimentares podem apresentar diferentes temperaturas ideais de armazenamento pelo que, idealmente, devem existir várias câmaras de conservação por frio a funcionar a diferentes temperaturas. Para situações em que exista mais que uma câmara deve ser efetuada uma diferenciação de produtos tendo em conta a temperatura ideal de armazenamento de cada produto [13].

No entanto, existem situações para as quais não se justifica a utilização de várias câmaras, tal como em ambiente doméstico onde, regra geral, existe apenas um frigorífico para todos os tipos de alimentos consumidos. Em casos como este é aconselhável que a temperatura varie apenas entre 1° e 4°C [9].

Na conservação de alimentos por refrigeração, apesar dos processos associados à alteração da qualidade dos produtos não serem totalmente inibidos, o retardamento atingido é significativo. No entanto, este tipo de conservação de alimentos está associado a tempos de conservação relativamente curtos, na ordem dos dias. Obviando que os tempos de conservação associados a este método dependem fortemente do tipo de produto.

Existem alguns parâmetros a ter em conta aquando da utilização deste tipo de conservação de alimentos, são eles:

- Temperatura de refrigeração
- Humidade relativa do ar interior
- Velocidade de circulação do ar
- Composição da atmosfera circundante
- Fontes de radiação

De seguida os parâmetros anteriormente referidos serão descritos de forma mais pormenorizada.

Para a grande maioria dos alimentos quanto menor for a temperatura melhor será o seu efeito, no entanto, os custos monetários associados também serão superiores. Desta forma, a

temperatura selecionada pelo utilizador deverá ter em conta qual o período de conservação desejado e qual o tipo de alimento a conservar. Deve-se ainda ter em conta a existência de produtos no interior da câmara que possam ser afetados por temperaturas do ar demasiado baixas [14].

Relativamente à humidade relativa do ar, caso esta seja demasiado reduzida, o alimento tende a perder água com maior facilidade. Por outro lado, uma humidade relativa do ar interior com valores demasiado elevados é uma situação propícia à proliferação microbiana [14].

A ventilação ajuda a manter uma temperatura e humidade relativa do ar uniforme na zona refrigerada, bem como, a eliminar eventuais odores. Para além das razões anteriormente referidas, a velocidade do ar no interior da câmara tem ainda influência na secagem dos produtos, sendo que, quanto maior a velocidade do ar no interior, maior será também a libertação de água por parte dos produtos [14].

A composição da atmosfera no ar interior da câmara é outro dos fatores que influenciam o resultado do processo de refrigeração. Existem alimentos que continuam a “respirar” sob refrigeração tais como legumes e frutas, o que resulta num consumo de oxigénio e na libertação de dióxido de carbono. Esta condição leva ao controlo da composição da atmosfera em locais de armazenamento. Este controlo é feito maioritariamente pela introdução/eliminação de alguns gases em quantidades não prejudiciais, sendo que na grande maioria dos casos os gases em causa são o azoto e o dióxido carbono [14].

Por fim considera-se como parâmetro a ter em conta, a utilização de fontes de radiação. Estas são benéficas uma vez que permitem que se pratiquem valores de temperatura e humidade relativa do ar superiores ao normal. Estas são já bastante utilizadas para a conservação de produtos perecíveis, dos quais se destacam a carne e o queijo [14].

2.2.2 Congelação

O princípio de conservação por congelação baseia-se no mesmo da refrigeração. No entanto, para este caso o alimento degrada-se de forma substancialmente mais lenta. Isto acontece porque, reunidas as condições necessárias para a ocorrência da congelação, a água presente nos alimentos congela deixando desta forma de estar disponível para o desenvolvimento dos microrganismos. Porém, alguns destes ainda conseguem desenvolver-se a -10°C , o que representa uma situação perigosa para o consumidor. Em contrapartida, sabe-se que a temperaturas iguais ou inferiores a -18°C o crescimento microbiano é completamente inibido [13]. Relativamente aos outros processos passíveis de deteriorar a qualidade do produto, ou seja, reações químicas e atividade enzimática, quanto mais baixas forem as temperaturas praticadas menores serão as suas ações. No entanto, e ao contrário da proliferação

microbiana, as reações químicas e a atividade enzimática nunca chegam a ser completamente inibidas atendendo às gamas de temperaturas atualmente praticadas [14].

A velocidade a que se congelam os produtos é outro parâmetro que influencia o sucesso desta operação. Os produtos podem ser congelados rapidamente, o que é denominado de congelação rápida, ou lentamente, denominado de congelação lenta. A congelação rápida apresenta diversas vantagens face à congelação lenta. Nesta última os cristais formados são de menor dimensão e, conseqüentemente, a destruição mecânica das células do alimento é menor. Para além deste facto, também a solidificação do alimento é mais rápida o que reduz o tempo disponível para os solutos se difundirem e para o gelo se desagregar. Outras vantagens associadas a este tipo de congelação são a inibição do crescimento microbiano e o retardamento da atividade enzimática de forma mais rápida [14].

2.3 Refrigeração por compressão de vapor

Existem diversos tipos de sistemas de refrigeração. De entre estes, por ser o mais utilizado, destaca-se a refrigeração por ciclo de compressão de vapor. A aplicação deste tipo de sistemas vai desde os pequenos equipamentos domésticos aos grandes equipamentos industriais. Todo e qualquer sistema de refrigeração por compressão de vapor é caracterizado pela presença de pelo menos um compressor.

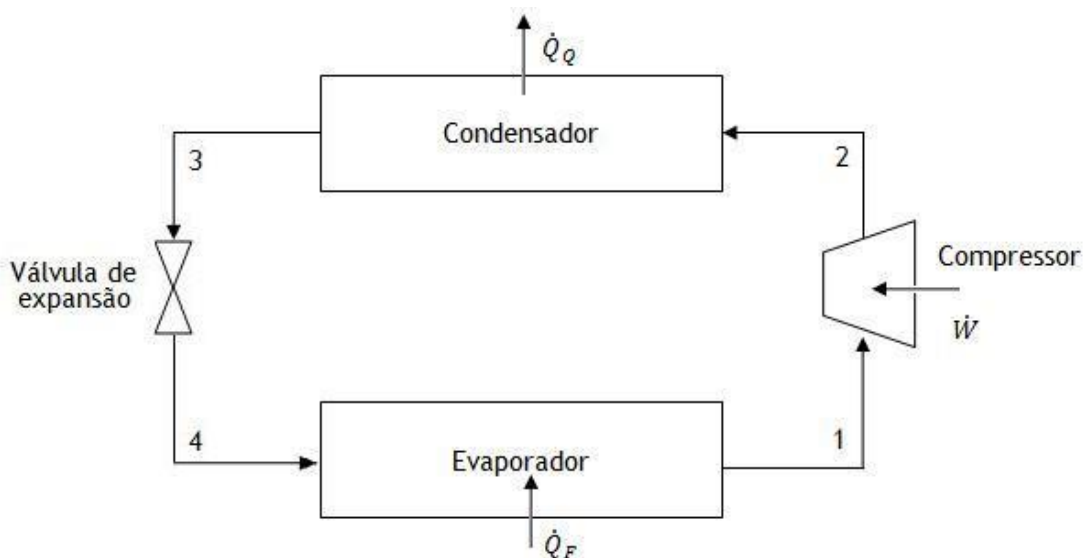


Figura 2.2 - Esquema representativo de um ciclo frigorífico de um sistema por compressão de vapor.

O balanço de energia para o sistema de refrigeração em causa pode ser expresso pela Equação [2.1]:

$$\dot{W} + \dot{Q}_F = \dot{Q}_Q \quad [2.1]$$

Onde:

- \dot{W} - Potência mecânica de compressão [W];
- \dot{Q}_F - Potência de refrigeração [W];
- \dot{Q}_Q - Potência de aquecimento [W].

Em contrapartida, a eficiência de um ciclo frigorífico é calculada através do coeficiente de eficiência que provem do Inglês (COP - *Coefficient of Performance*). A partir da Figura 2.2, ou até mesmo da Equação 2.1, é possível definir o COP do ciclo de refrigeração por compressão de vapor conforme indicado pela Equação 2.2.

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{W}} \quad [2.2]$$

Onde:

- COP - *Coefficient of Performance* (Coeficiente de desempenho);
- \dot{Q}_F - Potência de refrigeração [W];
- \dot{W} - Potência mecânica de compressão [W].

2.3.1 Fluido refrigerante

Num ciclo de refrigeração, o fluido refrigerante é responsável por transportar a energia da fonte “fria” para a fonte “quente”. Este deverá ser capaz de absorver uma grande quantidade de energia proveniente da fonte “fria” mesmo a baixas temperaturas, sendo que, a energia absorvida deverá ser suficiente para que ocorra evaporação do fluido de trabalho. É portanto deveras importante que o fluido de trabalho possua uma temperatura de ebulição baixa. O processo de evaporação associado, tal como qualquer outro, exige energia. A energia em causa deverá ser retirada da zona exterior ao evaporador onde o fluido se encontra, ou seja, do meio a ser arrefecido.

A energia ficará então armazenada no fluido de trabalho até que o processo físico inverso ocorra, ou seja, a condensação. Neste, a energia é dissipada e o fluido refrigerante passa do estado gasoso ao estado líquido.

A escolha de um fluido refrigerante para um sistema de frio depende de alguns fatores, sendo que, não existe nenhum fluido refrigerante que reúna propriedades tais que façam dele o melhor fluido refrigerante em qualquer que seja a aplicação [15]. Desta forma, o fluido refrigerante ideal para determinada instalação não significa que este seja o ideal para uma

outra com diferentes características e propósito. Apesar disto, existem algumas propriedades desejáveis dos fluidos refrigerantes.

2.3.2 Componentes

Os componentes das instalações frigoríficas condicionam os custos de implementação e de funcionamento da instalação. Tal como poderá ser observado na Figura 2.2, num ciclo de refrigeração por compressão de vapor existem quatro componentes fundamentais, são eles: compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador. De salientar que cada um destes é fundamental para o bom funcionamento de um sistema desta natureza.

Evaporador

O evaporador é o componente responsável por absorver calor do meio a ser arrefecido. Durante o processo anteriormente referido, o fluido de trabalho recebe energia sob a forma de calor sensível e aumenta a sua temperatura. Posteriormente, absorve energia sob a forma de calor latente e sofre uma mudança de estado, sendo que, passa do estado líquido para o estado gasoso. Quando o fluido refrigerante, já no estado gasoso, absorve energia na forma de calor sensível e aumenta a sua temperatura, trata-se de um sobreaquecimento do mesmo.

A absorção de energia na forma de calor por parte do fluido de trabalho nas zonas a serem refrigeradas só é possível devido às suas características, das quais pode ser destacada, de entre outras, a sua temperatura de ebulição. Uma vez que a energia em causa é absorvida pelo fluido de trabalho no evaporador pode-se concluir que a eficiência de qualquer sistema depende muito do correto funcionamento deste componente, não menosprezando de todo a importância dos outros três componentes.

De modo a obter uma maior eficiência do evaporador e, conseqüentemente, de todo o sistema de refrigeração existem alguns cuidados a ter aquando do projeto/seleção do evaporador. Este deverá possuir uma área de superfície capaz de absorver a carga necessária sem que se registre um gradiente térmico excessivo entre o fluido refrigerante e a zona a ser refrigerada. De modo a aumentar a área de absorção, atualmente muitos evaporadores possuem alhetas [16]. O evaporador deve ainda apresentar um comprimento de tubagem suficiente para que o fluido refrigerante no estado gasoso se separe do que ainda se encontra no estado líquido, no entanto, sem que se registre uma queda de pressão excessiva da saída relativamente à entrada [17].

De acordo com o tipo de construção, os evaporadores mais usuais são divididos em três tipos:

- Tubo liso;
- Placas;
- Tubo alhetado.

Os evaporadores de tubo liso e de placas têm por base a permuta de calor segundo uma convecção natural. Neste caso, a permuta de calor é efetuada entre o ar que circula no interior da câmara de forma natural e a superfície do evaporador. Por outro lado, nos evaporadores de tubo alhetado pode ser utilizado um ventilador. Os evaporadores de tubo alhetado são os mais utilizados atualmente e é também o tipo de evaporador presente na instalação testada, deste modo, será efetuada uma breve explicação sobre os mesmos.

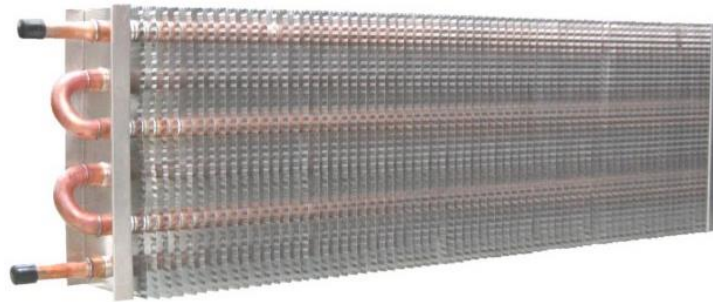


Figura 2.3 - Exemplo de um evaporador de tubo alhetado.

Nestes evaporadores, os tubos que transportam o fluido refrigerante atravessam placas paralelas perfuradas. Estas devem estar ligadas aos tubos de modo a operarem como superfícies secundárias, ou seja, de modo a funcionarem como prolongamento das mesmas (aumento da área de contato e conseqüentemente da transferência de calor). De referir que as placas anteriormente referidas podem ser rugosas de modo a aumentar ainda mais a área de transferência de calor. Desta forma é possível diminuir o tamanho dos evaporadores para a mesma potência de arrefecimento, face aos outros tipos de evaporadores. O tamanho e o espaçamento entre alhetas varia consoante a aplicação, sendo que, o passo entre alhetas é definido pelo tamanho do tubo, velocidade do ar e a temperatura de operação.

De acordo com o tipo de alimentação do líquido, os evaporadores podem ser divididos em dois tipos:

- Inundados;
- Secos.

Evaporador do tipo inundado

O evaporador do tipo inundado caracteriza-se por possuir um separador de líquido compensador situado a uma altura superior à da serpentina do evaporador. A altura deste, face ao evaporador, garante que o evaporador fique “inundado” com o fluido refrigerante. Desta forma o fluido refrigerante no estado líquido encontra-se em contacto com uma maior superfície de transferência de calor o que resulta num elevado coeficiente global de transferência de calor.

A alimentação de um evaporador deste tipo poderá servir-se da força gravítica ou recorrendo a uma bomba. Face aos evaporadores do tipo seco, as desvantagens deste são o seu custo inicial mais elevado e a maior quantidade de fluido refrigerante necessário.

Evaporador do tipo seco

Por outro lado, nos evaporadores do tipo seco todo o fluido refrigerante que entra no estado líquido, sai no estado gasoso.

Nos evaporadores do tipo seco o fluido refrigerante entra de forma intermitente através da utilização de uma válvula de expansão. Ao percorrer os tubos, o fluido refrigerante absorve energia na forma de calor e evapora. Desta forma, existirá no evaporador fluido refrigerante no estado líquido e no estado gasoso. Este tipo de evaporador é bastante utilizado em instalações de baixa potência, como por exemplo, frigoríficos domésticos. A grande desvantagem deste tipo de evaporadores face aos do tipo inundado prende-se com o coeficiente global de transferência de calor que é bastante reduzido. A explicação para o sucedido resulta de uma menor superfície de contacto entre a superfície dos tubos e o fluido refrigerante no estado líquido.

Por fim, relativamente ao evaporador, são apresentadas algumas equações pelas quais o componente se rege. A potência de refrigeração pode ser definida pela Equação 2.3 [18]:

$$\dot{Q}_F = K \times s \times \Delta T_{ln} \quad [2.3]$$

Onde:

- \dot{Q}_F - Potência de refrigeração [W];
- K - Coeficiente de transmissão térmica [W/(m². °C)];
- s - Superfície do evaporador [m²];
- ΔT_{ln} - Diferença média logarítmica de temperatura [°C].

Sendo que [18]:

$$\Delta T_{ln} = \frac{T_{ae} - T_{as}}{\ln \left(\frac{T_{ae} - T_o}{T_{as} - T_o} \right)} \quad [2.4]$$

Onde:

- T_{as} - Temperatura do ar à saída do evaporador [°C];

- T_{ae} - Temperatura do ar à entrada do evaporador [$^{\circ}\text{C}$];
- T_o - Temperatura de evaporação [$^{\circ}\text{C}$].

Da observação da Figura 2.2 pode-se ainda concluir que a análise energética do evaporador é efetuada de acordo com as seguintes equações [8]:

$$\dot{m}h_4 + \dot{Q}_F = \dot{m}h_1 \quad [2.5]$$

$$\dot{Q}_F = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad [2.6]$$

Onde:

- \dot{Q}_F - Potência de refrigeração [W];
- \dot{m} - Caudal mássico [kg/s];
- h - Entalpia específica [kJ/kg].

Compressor

O compressor num ciclo de refrigeração possui duas funções de extrema importância. A primeira consiste em manter a temperatura e pressão do fluido refrigerante no evaporador nos valores desejados. Para tal o compressor deve ser capaz de bombear o fluido refrigerante do evaporador para o compressor. Numa segunda instância o compressor tem como função aumentar a pressão e temperatura do fluido refrigerante. As alterações registadas no compressor permitem ainda que o fluido circule no sistema com maior facilidade [8].

Condensador

O condensador permite que o fluido refrigerante dissipe energia na forma de calor para um fluido que constitui o meio externo.

O processo de condensação a que o fluido refrigerante está sujeito aquando da sua passagem pelo condensador dá-se em 3 fases distintas. A primeira delas consiste em retirar energia ao fluido na forma de calor sensível enquanto este se encontra no estado gasoso. Este processo termina quando o fluido refrigerante atinge a temperatura de condensação. Quando o fluido de trabalho atinge a temperatura de condensação dá-se início à 2ª fase de transferência de calor. Nesta, o fluido refrigerante perde energia sob a forma de calor latente e muda de fase, ou seja, passa do estado gasoso para o estado líquido. Este processo é denominado condensação. Estando o fluido condensado, este perde mais algum calor na forma de calor sensível diminuindo portanto a sua temperatura. Esta corresponde à 3ª fase de transferência de calor [18].

Os fluidos externos mais comuns utilizados para arrefecer o condensador são a água e o ar. No entanto, existe ainda um tipo de condensador que aproveita o calor latente da água ao ser pulverizada água no exterior dos tubos [19]. O condensador anteriormente referido é denominado condensador evaporativo.

Válvula de expansão

A válvula de expansão é utilizada para reduzir a pressão do fluido de trabalho à saída do condensador (alta pressão), para a pressão de funcionamento do fluido de trabalho no evaporador (baixa pressão). Este componente é ainda responsável pelo controlo do caudal do fluido de trabalho condensado que entra no evaporador.

Por este ser um sistema fechado, é de extrema importância que a válvula de expansão e o compressor funcionem de forma equilibrada. Caso tal não aconteça durante um intervalo de tempo excessivo o sistema será afetado. Para situações em que o desequilíbrio destes componentes resulta num sobreaquecimento excessivo do fluido de trabalho no evaporador, a capacidade e eficiência do evaporador e, conseqüentemente, de todo o sistema diminuirão. Para situações em que a temperatura do fluido refrigerante no evaporador é demasiado baixa existe a possibilidade de admissão deste no estado líquido pelo compressor. Esta situação apresenta um risco elevado para o normal funcionamento de todo o sistema.

2.4 Processo e condições para a formação de gelo

Existem dois grandes tipos de sistemas de refrigeração comerciais destinados à conservação de alimentos, os abertos e os fechados. No entanto, para qualquer que seja o sistema existirá permuta de ar, quer seja de forma intermitente (fechados) quer seja de forma contínua (abertos). A permuta de ar ocorre devido às diferentes massas específicas do fluido (ar), fruto das diferentes temperaturas a que estes se encontram. O ar que entra, quer seja de forma intermitente ou de forma contínua, está a uma temperatura mais elevada do que aquela que se regista no interior do espaço refrigerado, o que implica ganhos térmicos para o sistema.

O ar em condições normais é composto, entre outros, por água no estado gasoso que, ao entrar em contacto com a superfície do evaporador poderá condensar. Para tal, a temperatura à superfície do evaporador terá que ser igual ou inferior à temperatura de ponto de orvalho. Verificadas tais condições, a energia na forma de calor que o evaporador "retira" ao meio, é suficiente para que a água no estado gasoso passe ao estado líquido. Desta forma, a água deposita-se na superfície do evaporador e posteriormente, caso a superfície atinja valores de temperatura iguais ou inferiores à temperatura de congelação, ocorre a solidificação da mesma [20]. Desta feita, e verificadas as condições anteriormente referidas, a absorção de calor nesta fase será suficiente para que a água passe do estado líquido ao estado sólido (gelo). Poderá ainda ocorrer a sublimação, ou seja, o ar húmido entra em contacto com a superfície do evaporador e, caso este se encontre a temperaturas iguais ou

inferiores à temperatura de congelação, ocorre a sublimação e a água previamente no estado gasoso passa ao estado sólido sem passar pelo estado líquido.

A formação de gelo é um processo de transição complexo no qual tanto a transferência de calor como a transferência de massa ocorrem em simultâneo [21]. A sua formação, bem como os seus padrões de crescimento dependem da humidade e temperatura na superfície do evaporador, assim como da temperatura, fluxo, pureza e humidade relativa do ar [20].

2.5 Nota conclusiva

Os sistemas de refrigeração são considerados, por diversos especialistas, como uma das maiores descobertas da engenharia. Este tipo de sistemas promoveu, de diversas formas, um incremento na qualidade de vida do Homem. Dos diversos sistemas de refrigeração existentes, a refrigeração por ciclo de compressão de vapor apresenta-se como a mais utilizada. Esta ostenta como principais componentes o compressor, a válvula de expansão, o condensador e o evaporador sendo que, todos eles se revelam fulcrais para o normal funcionamento do sistema.

Capítulo 3

Estado da arte

3.1 Introdução

A problemática da detecção de gelo não é um problema recente, no entanto, é bastante atual. Ao longo dos anos esta área tem sido alvo de investigações nas mais variadas áreas e para diferentes aplicações.

3.2 Métodos de detecção de gelo

Existem diversos métodos de detecção de gelo. Estes podem ser classificados como diretos ou indiretos [22]. Os métodos de detecção direta consistem na detecção da variação de parâmetros provocada pela formação de gelo. Exemplos destes são a análise da variação de parâmetros tais como [23]:

- Massa;
- Impedância;
- Indutância;
- Capacitância;
- Condutividade térmica;
- Condutividade elétrica;
- Entre outros.

Os métodos de detecção indireta baseiam-se nas variáveis que causam ou que se correlacionam com a formação de gelo [24]. Os parâmetros a ter em conta nestes métodos são [23]:

- Temperatura de ponto de orvalho;
- Temperatura do ar;
- Humidade relativa do ar;
- Entre outros.

3.3 Dispositivos de monitorização da formação de gelo por métodos diretos

Cyril & Boby [25] estudaram a viabilidade de utilização de um sensor capacitivo para a deteção de gelo na estrada. Apesar de existir uma inspeção humana, nos Estados Unidos da América de 1995 a 2005, foram contabilizados cerca de 200.000 acidentes devido à presença de gelo nas estradas. Isto deve-se a falhas de inspeção, dado que por vezes o solo parece apenas molhado e, todavia, possui uma pequena camada de gelo transparente. O sensor proposto é capaz de detetar gelo sem que exista contacto direto com o mesmo e de forma automatizada. O seu princípio de funcionamento baseia-se no facto de que o gelo possui uma constante dielétrica baixa a altas frequências e uma constante dielétrica alta a baixas frequências. Ao passo que a água possui, para ambos os casos, uma constante dielétrica alta (a baixas frequências bastante próxima da constante dielétrica do gelo). Desta forma é possível distinguir entre ambos os materiais ao medir a capacitância utilizando duas frequências em simultâneo, uma baixa (≤ 1 kHz) e uma alta (> 20 kHz). Para efetuar os testes experimentais os autores utilizaram uma trotinete. O sensor em causa, bem como a unidade de controlo capaz de medir as variações de capacitância registadas pelo sensor, encontram-se fixos ao veículo anteriormente referido. Tal como pode ser verificado na Figura 3.1, o sensor possui apenas um eléctrodo, funcionando a trotinete como o segundo eléctrodo.

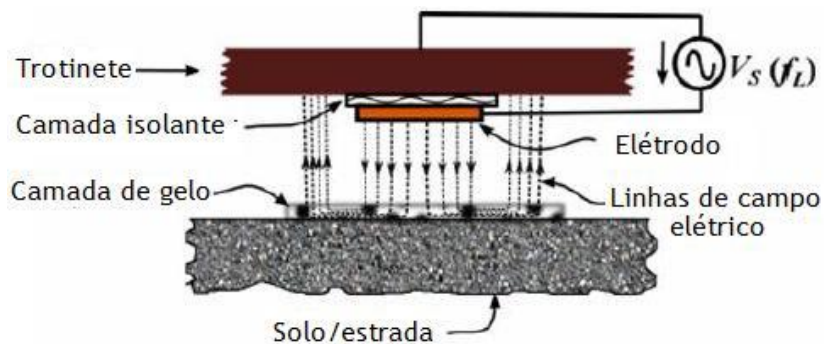


Figura 3.1 - Esquema da montagem experimental.

Ao longo dos testes experimentais os autores depararam-se com uma capacitância parasita entre o eléctrodo e o veículo (trotinete) que comprometia os resultados obtidos. De modo a inverter esta situação foi colocado um eléctrodo protetor tal como se poderá verificar na Figura 3.2.

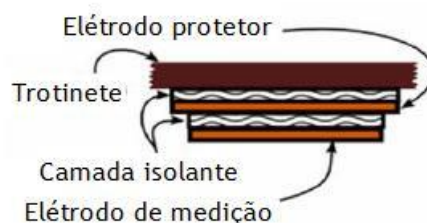


Figura 3.2 - Configuração de eléctrodos utilizada.

Os ensaios experimentais indicam que o sensor localizado a uma distância de 3 cm do solo é capaz de detectar gelo com apenas 1 mm de espessura. Foram efetuados ensaios em diferentes tipos de solo e todos eles com resultados positivos. O sensor é classificado como simples, de baixo custo, fiável, e de precisão razoável na detecção de gelo. Os autores consideram que, efetuando algumas modificações à versão do sensor proposto, este poderá ser implementado nos automóveis para alertar o condutor da formação de gelo na estrada.

Owusu *et al* [22] estudaram um sensor que monitoriza a formação de gelo através da variação da capacitância e resistência resultante da acumulação de gelo entre duas sondas cilíndricas. Considerando gotas de água à temperatura ambiente a “viajar” entre as sondas cilíndricas, tal como se encontra esquematizado na Figura 3.3, a sua probabilidade de chocarem com as sondas anteriormente referidas depende das forças de inércia e de resistência que atuam sobre as mesmas.

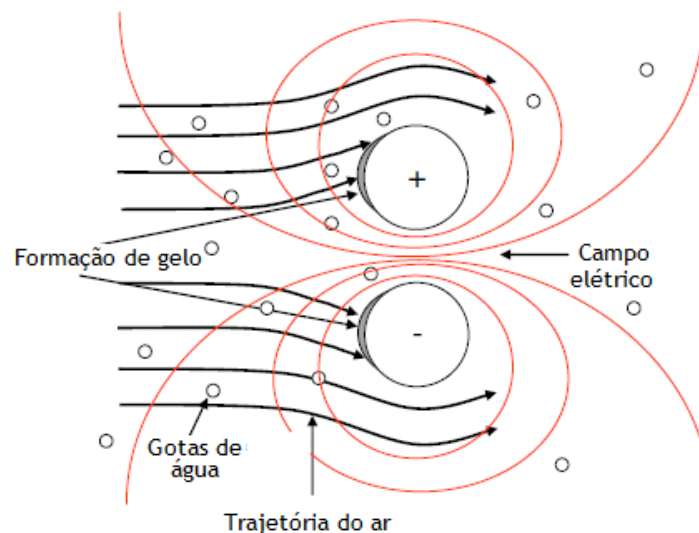


Figura 3.3 - Esquema ilustrativo do princípio de funcionamento.

Quando as forças de inércia são dominantes, as gotas de água chocam com as sondas cilíndricas, aderem à superfície das mesmas, congelam e o gelo começa a formar-se. A capacitância medida aumenta com a formação de gelo entre as sondas eletricamente carregadas uma vez que a constante dielétrica do gelo é superior à constante dielétrica do ar e a capacitância é diretamente proporcional à constante dielétrica do material. Por outro lado, o gelo é melhor condutor elétrico que o ar pelo que a sua formação entre as sondas resulta numa diminuição da resistência medida. A densidade do gelo também se apresenta como sendo um fator importante na diminuição da resistência medida, o que permite distinguir entre os dois tipos de gelo formado. Diversos ensaios experimentais foram realizados de modo a escolher a configuração que resulta num aumento da sensibilidade do sensor, obtendo-se conseqüentemente, resultados de maior precisão. De entre estes destacam-se, orientação, diâmetro e distância entre as sondas. Os resultados obtidos demonstram que o sensor possui potencial para ser utilizado. Para além da sua capacidade

para monitorizar a formação de gelo é, ainda, possível distinguir entre o tipo de gelo formado.

Ge et al [26] apresentaram um sensor de monitorização da formação de gelo de fibra ótica. Para além de ser capaz de monitorizar a formação de gelo, o sensor possui ainda a capacidade de distinguir entre os tipos de gelo formado. O sensor possui como elementos constituintes dois foto transístores, um led infravermelho, uma fonte de feixe de fibras e dois feixes de fibra de sinal. Foram realizados testes experimentais em laboratório para simular a formação de gelo em aeronaves e medir a sua espessura. Os resultados obtidos foram utilizados para “traçar” as curvas de formação dos diferentes tipos de gelo a diferentes condições ambientais, mais concretamente, a diferentes temperaturas. A temperatura demonstrou ser determinante para o tipo de gelo formado, o que conduziu a experiência ao sucesso sendo que, segundo os resultados obtidos, de -5 °C a -12 °C forma-se “glazed ice”, de -18 a -25°C “rime ice” e de -13 °C a -17 °C forma-se uma mistura dos dois tipos anteriores. As curvas obtidas revelaram-se distintas entre si para os diferentes tipos de gelo formado, sendo que as temperaturas testadas foram de -5 °C, -10 °C, -15 °C, -20 °C e -25 °C. Segundo os testes efetuados em laboratório, o erro máximo da medição da espessura de gelo foi de 0,05 mm. O dispositivo em estudo foi capaz de determinar o tipo de gelo com precisão razoável. Apesar dos resultados terem sido obtidos em laboratório, os autores classificam o sensor como uma solução fiável para a deteção direta da formação de gelo e, mais especificamente, para a identificação do tipo de gelo. No entanto, ressaltam que o método terá de ser aperfeiçoado e testado em condições reais.

Xiao et al [27] investigaram a viabilidade de utilização de um sensor fotoelétrico para a monitorização da formação de gelo. Os testes de carácter experimental tinham como objetivo avaliar a correlação existente entre o sinal de saída do sensor e a espessura de gelo formada. De seguida, foi desenvolvida uma correlação generalizada capaz de prever a espessura de gelo de forma direta e com elevada precisão. Os resultados obtidos foram validados para intervalos de temperatura de 17,7 °C a 27,2 °C e de -10,5 °C a 6,5 °C, humidade relativa do ar de 21,6 % a 64,9 % e velocidade do ar de 0,5 m/s a 4,5 m/s. Para as condições testadas, 95 % das previsões foram de encontro aos dados obtidos de forma experimental com um desvio relativo de apenas ± 10 %. É indicado que o método em causa pode ser inserido na estratégia de descongelação, contudo, os autores salientam que a correlação obtida foi efetuada para este trabalho específico e a utilizar noutros casos, esta necessitaria de alterações.

3.4 Dispositivos de monitorização da formação de gelo por métodos indiretos

Tassou et al [3] analisaram a viabilidade de utilização de parâmetros ambientais e de desempenho como parâmetros de controlo para determinar o instante ótimo do início/fim do ciclo de descongelação de modo a economizar energia e aumentar a qualidade e vida útil dos

produtos armazenados. Para tal, o trabalho experimental envolveu testes em condições controladas, num laboratório, e testes em condições reais, num supermercado. Os parâmetros ambientais em estudo foram a temperatura e a humidade relativa do ar. Para além dos parâmetros ambientais foram ainda considerados parâmetros de desempenho, de entre estes destacam-se, a temperatura do ar em qualquer ponto do túnel de escoamento de volta e a duração do ciclo de descongelação anterior. Para os equipamentos testados e para as condições ambientais a que estes estiveram sujeitos, os 4 ciclos de descongelação diários praticados revelaram-se excessivos. Concluiu-se ainda com os testes realizados, que para situações em que a temperatura do ar interior é controlada, ou possui flutuações desprezáveis, o principal parâmetro a ter em conta é a humidade relativa do ar. Para estes casos é então possível utilizar a humidade relativa do ar como um parâmetro de controlo da duração e da frequência dos ciclos de descongelação através da implementação de um sensor de humidade, reduzindo desta forma os custos associados ao sistema de monitorização da formação de gelo. Os autores alertam para o facto do dispositivo de monitorização da formação de gelo ideal ter características tais que se adapte a vários equipamentos e sistemas.

Byun et al [28] efetuaram estudos objetivando analisar a viabilidade de utilização de um tipo de foto sensor, o foto acoplador, como dispositivo de monitorização da formação de gelo nas alhetas de um evaporador. O foto acoplador utilizado é composto por um emissor e um recetor instalado no exterior da serpentina do evaporador, sendo que a tensão de saída do sensor é medida em função da formação de gelo. O foto sensor utilizado é de raios infravermelhos e utiliza um foto díodo. De salientar que a luz infravermelha é mais estável quando exposta à luz solar/elétrica quando comparada com a luz visível/ultravioleta e, em caso de ser bloqueada pela condensação, o seu sinal de saída não contém erro. Para a obtenção de resultados mais fiáveis e precisos, a área frontal da serpentina exterior foi dividida em 9 domínios e foi colocado um foto acoplador no centro de cada um. Aquando da realização da experiência foram testadas 6 configurações e utilizada como referência a descongelação por controlo de tempo (o sistema de descongelação funciona durante 8 minutos e é acionado, de forma cíclica, uma hora após terminar o ciclo de descongelação anterior). Os valores do sinal de saída dos foto acopladores foram escolhidos após análise minuciosa de resultados na fase de testes. A análise de resultados permite considerar este tipo de sensor muito eficiente na automatização do processo de descongelação devido à elevada exatidão com que deteta a formação de gelo. Os resultados obtidos na melhor das configurações testadas permitiram diminuir o número e a duração dos ciclos de descongelação, permitindo portanto, reduzir o consumo de energia do sistema. Com este método obteve-se uma maior capacidade total de aquecimento da bomba de calor na ordem dos 5,4 %, uma duração de aquecimento 9 % superior e uma duração de descongelação cerca de 31 % inferior comparativamente ao método de referência. Para obtenção de um melhor

desempenho na melhor das configurações, o ciclo de descongelação deve-se iniciar antes da área de formação de gelo exceder 45 % da área total da superfície frontal das alhetas.

Wang et al [20] apresentaram um sensor fotoelétrico inovador capaz de monitorizar a formação de gelo. O sensor utilizado é composto por um emissor que envia um sinal de raios infravermelho constante para o recetor. Neste último, a energia é absorvida e convertida em corrente sendo que, caso exista ou não gelo a interromper a emissão do sinal, a tensão de saída é respetivamente, menor ou maior.

As experiências foram realizadas num ambiente controlado ($T_{bh} = 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{bs} = 2 \text{ }^\circ\text{C}$; $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$; $T_{aq} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$) e sob condições de formação de gelo convencionais (temperatura na superfície do evaporador inferior à temperatura de ponto de orvalho e de congelação) com a admissão de dados de cada sensor a ser efetuada de 5 em 5 segundos. O estudo experimental residiu na utilização de 10 sensores testados em 4 modelos diferentes com diferente posição e número de sensores. Os resultados obtidos, quando comparados ao método original de descongelação, revelaram que este método tem potencial para ser utilizado como sensor de monitorização da formação de gelo. O método permitiu aumentar os intervalos entre ciclos de descongelação de vinte e oito minutos para cinquenta e dois minutos e, conseqüentemente, reduzir o número de ciclos de descongelação de nove para cinco. Relativamente à eficiência de aquecimento o método permitiu que, dos 86,6 % registados com o sistema de origem, se atingisse 92,6 %. Por outro lado o COP, anteriormente de 2,76 passou a ser de 2,85.

3.5 Nota conclusiva

Existem na atualidade diversos dispositivos destinados à monitorização da formação de gelo de enorme fiabilidade e sensibilidade no entanto, por possuírem um custo proibitivo, estes não são implementados no mercado destinado à indústria da refrigeração.

Como verificado pelos anteriores artigos, apesar no nível alcançado pelos estudos efetuados, a conclusão é de que existe ainda um enorme potencial de exploração na monitorização da formação de gelo nas mais variadas áreas.

Capítulo 4

Protótipo experimental

4.1 Introdução

A monitorização da formação de gelo é investigada por diversas áreas, de entre estas, destaca-se a área da aviação na qual existe enorme potencial devido aos riscos que a formação de gelo acarreta para o normal funcionamento de um avião [29]. Por esta ser uma indústria com enorme poder económico e, principalmente, por a formação de gelo colocar em risco a segurança de passageiros e tripulação, a importância dos fatores que influenciam a escolha do sensor em causa possuem um “peso” distinto dos mesmos quando afetos à área da refrigeração [30].

Tal como se poderá verificar pela Tabela 4.1, os fatores associados à aviação primam ao máximo a fiabilidade e sensibilidade do sensor, ao passo que o custo passa para segundo plano. Por outro lado, um sensor desenvolvido para a monitorização da formação de gelo aplicado à indústria da refrigeração possui como requerimento determinante o custo deste, aparecendo a fiabilidade e sensibilidade deste como fatores secundários. Desta feita, e observando a seguinte tabela, o dispositivo em causa deverá ser de baixo custo e possuir sensibilidade e fiabilidade razoável [3].

Tabela 4.1- Importância dos diversos fatores por área.

<i>Aviação</i>	<i>Refrigeração</i>
Custo - *	Custo - ***
Fiabilidade - ***	Fiabilidade - **
Sensibilidade - ***	Sensibilidade - **

Atualmente o sistema mais utilizado na indústria da refrigeração é o controlo por tempo. Neste, o sistema de descongelamento é acionado periodicamente e por períodos pré-definidos [31]. Apesar de não permitir a obtenção dos resultados desejados, este continua a ser um dos sistemas mais utilizados atualmente por ser simples e barato, embora a fiabilidade seja comprometida [3]. Tendo em conta os fatores e respetivo “peso” dos mesmos para a aplicação desejada, o sensor escolhido foi um sensor resistivo. Este foi escolhido por ser de baixo custo e por, teoricamente, possuir potencial de obtenção de bons resultados. Para além

do circuito em si ser de baixo custo, não carece de equipamentos especiais para a aquisição de dados e pode ser automatizado de forma simples e barata.

4.2 Princípio de funcionamento do sensor

O conceito do sensor testado baseia-se no princípio de que conforme se dá a formação de gelo entre dois elétrodos paralelos e eletricamente carregados, a resistência elétrica é afetada.

A resistência elétrica de um material representa a capacidade que um determinado corpo possui de se opor à passagem de corrente elétrica mesmo quando existe uma diferença de potencial aplicada. Esta grandeza é calculada através da primeira lei de Ohm, tal como demonstrado na Equação 4.1:

$$R = \frac{U}{I} \quad [4.1]$$

Onde:

- R - Resistência elétrica [Ω];
- U - Diferença de potencial [V];
- I - Intensidade de corrente [A].

Ao passo que a resistividade elétrica é a propriedade que quantifica quão um determinado material se opõe à passagem de corrente elétrica. A seguinte equação demonstra de que forma esta propriedade pode ser calculada:

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad [4.2]$$

Onde:

- ρ - Resistividade elétrica [m/S];
- R - Resistência elétrica [Ω];
- A - Área da secção [m²];
- l - Comprimento característico [m].

Consequentemente, dado que a condutividade elétrica de um material é inversamente proporcional à resistividade elétrica do mesmo vem:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad [4.3]$$

Onde:

- σ - Condutibilidade elétrica [S/m];
- ρ - Resistividade elétrica [m/S].

Desta forma pode-se concluir que quanto menor for a resistividade de um material, maior é a sua condutibilidade e, consequentemente, a capacidade de determinado material de permitir a passagem de corrente elétrica.

Para o caso em estudo é deveras importante que o sensor seja capaz de distinguir a presença de gelo da presença de ar/água. Tal como poderá ser verificado através da Tabela 4.2, a potencial viabilidade do método é corroborada pelas diferentes condutibilidades elétricas dos três diferentes materiais em causa.

Tabela 4.2 - Condutibilidade elétrica dos diferentes materiais em estudo [32].

<i>Material</i>	<i>Condutibilidade elétrica (S/m)</i>
Ar	3×10^{-15} a 8×10^{-15} (20 °C)
Água Potável	5×10^{-4} a 5×10^{-2} (20 °C)
Gelo	1×10^{-6} a 1×10^{-10} (-10 °C)

Uma vez que estes possuem efetivamente diferentes condutibilidades elétricas, é expectável que o circuito testado seja capaz de distinguir entre os diferentes tipos de material.

Em suma, segundo o princípio de funcionamento do sensor, materiais com diferentes condutibilidades elétricas entre dois elétrodos paralelos provocam diferentes quedas de tensão entre as mesmas. O gelo, por ser melhor condutor elétrico comparativamente ao ar, diminui a queda de tensão entre as sondas eletricamente carregadas. Contudo, por ser pior condutor que a água, a queda de tensão registada aquando da presença de gelo é superior.

Em teoria, e caso a diferença de tensão medida para os diferentes tipos de material presente entre a sonda seja notória, com a obtenção gráfico de calibração do sensor é possível ativar o sistema de descongelação para o intervalo de valores de tensão mensurada que correspondem á presença de gelo entre os elétrodos.

4.3 Instalação experimental

A instalação experimental é composta por todos os equipamentos e componentes necessários para a realização do estudo experimental, tal como esquematizado na Figura 4.1.

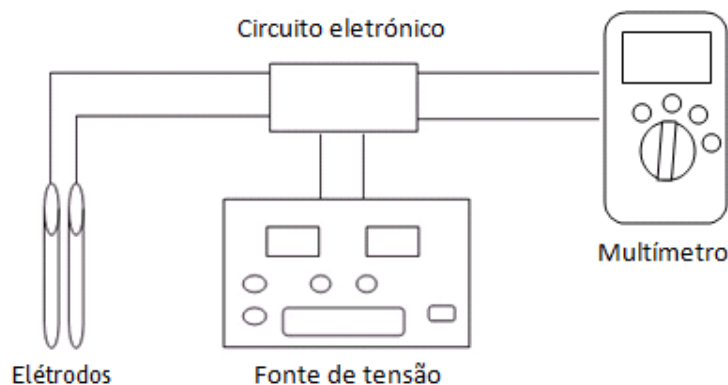


Figura 4.1 - Esquema da montagem experimental.

A fonte de tensão serve de alimentação ao circuito e impõe um diferencial de 12 V de modo a que numa aplicação real se torne mais fácil de se proceder à alimentação.

O circuito eletrônico é bastante simples e é composto exclusivamente por duas resistências de 100 k Ω e por um transistor [33]. Uma das imposições do presente trabalho cifrava-se na utilização de um sensor de baixo custo, pelo que o circuito associado preenche, tal como é possível verificar, o pré-requisito na perfeição.

O material dos eléctrodos é o cobre devido à sua elevada disponibilidade comercial, baixo custo, elevada resistência à corrosão e elevada condutibilidade eléctrica.

O multímetro foi utilizado para obter as curvas características do sensor aquando da presença dos diferentes materiais. A utilização deste último componente para a realização da experiência foi determinante para a obtenção de resultados.

De salientar que ao circuito anterior falta agregar os componentes que permitem ao sistema funcionar de forma autónoma, estes serão apresentados no capítulo seis.

4.4 Nota conclusiva

Estando as opções restritas a um dispositivo de baixo custo e com potencial teórico para a monitorização da formação de gelo com fiabilidade e sensibilidade razoável, o dispositivo escolhido foi um sensor do tipo resistivo. Trata-se de um sensor com um princípio de funcionamento simples sendo que o seu potencial para a aplicação em causa se revela, em teoria, plausível. A instalação experimental prima também pela simplicidade face às condições de projeto de baixo custo.

Capítulo 5

Estudos experimentais

5.1 Introdução

De modo a obter resultados de maior fiabilidade e precisão no sensor, foram definidos de início alguns cuidados a ter com diversos fatores associados ao dispositivo e sua funcionalidade. Um desses fatores é a sua posição. De salientar que os resultados obtidos apenas relatam a presença de determinado material entre os elétrodos no local onde o sensor se encontra situado e não a formação de gelo em todo o evaporador. Desta forma é de extrema importância que o mesmo se encontre numa posição tal que o seu resultado retrate, da melhor forma, o instante de formação de gelo que culmina em desvantagens para o sistema.

O sensor deverá portanto encontrar-se num local onde a formação de gelo não possui condições propícias uma vez que o gelo não se forma uniformemente em toda a superfície do evaporador [11] e dado que o sistema não perde as suas potencialidades no imediato da sua formação em qualquer local mas sim quando uma parte considerável da sua superfície se encontra repleta de gelo.

Definida a posição do sensor surge a inconveniência do material das alhetas do evaporador onde este se fixa, a par do material dos elétrodos, possuir boa condutibilidade elétrica. Desta forma, caso estes entrem em contato direto o circuito fecha e não existirá uma medição da queda de tensão representativa do caso de estudo.

A dificuldade encontrada foi contornada através da utilização de um material isolante entre o elétrodo e a alheta do evaporador a que este se fixa tal como demonstrado na Figura 5.1.

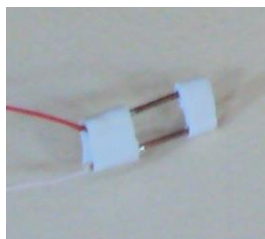


Figura 5.1 - Elétrodos que formam o sensor.

Para além da finalidade anteriormente referida, o material isolante utilizado serviu ainda para garantir que os elétrodos permanecessem paralelos durante a experiência. De salientar que, os elétrodos devem ser paralelos e possuir o mesmo comprimento de modo a eliminar ao máximo uniformidades do campo elétrico [11].

Outros fatores relacionados com a influência da distância entre os eléctrodos nos resultados obtidos, serão apresentados mais adiante no subcapítulo 5.4.

Os estudos experimentais foram realizados no laboratório de transmissão de calor da UBI. Para a realização destes foi utilizada uma UTA (Unidade de Tratamento de Ar) conectada a um evaporador. As suas características encontram-se respetivamente nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1 - Características da UTA.

<i>Caraterísticas da UTA</i>	
Modelo	UTA-AAH
Número de série	240101
Potência da bateria	4 (kW)



Figura 5.2 - Unidade de tratamento de ar.

Tabela 5.2 - Características do evaporador da UTA.

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



Figura 5.3 - Evaporador da unidade de tratamento de ar.

5.2 Software de simulação - Multisim 11.0

O Multisim é um simulador eletrônico que faculta as ferramentas necessárias para a construção e simulação de circuitos eletrônicos na área digital e analógica. Na Figura 5.4 está uma imagem que contempla a interface do *software* Multisim. Nesta é possível verificar os diversos elementos básicos disponibilizados ao utilizador.

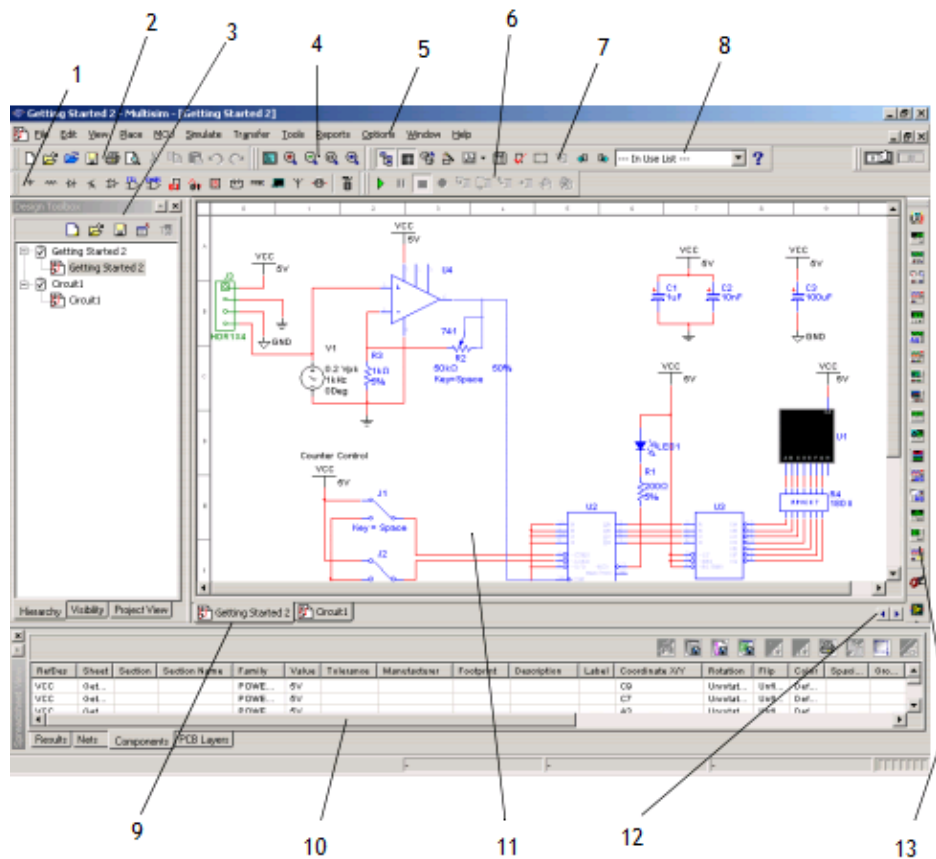


Figura 5.4 - Interface do *software* Multisim [34].

Legenda da Figura 5.4:

- | | |
|------------------------------------|---------------------------|
| 1. Barra de componentes | 8. Lista de “em uso” |
| 2. Barra padrão | 9. Separador ativo |
| 3. Barra de ferramentas de desenho | 10. Barra de navegação |
| 4. Barra de visualização | 11. Janela do circuito |
| 5. Menu | 12. Botões de navegação |
| 6. Barra de simulação | 13. Barra de instrumentos |
| 7. Barra principal | |

Como é possível verificar através da Figura 5.4 o *software* é bastante interativo. Os diversos botões e a organização da sua interface revelam-se uma verdadeira ajuda para quem necessita de o utilizar.

Uma das grandes vantagens da utilização deste *software* reside no facto de que o circuito pode ser facilmente modificado e rapidamente simulado de modo a que o utilizador entenda quais as consequências da modificação efetuada.

Outra das suas vantagens está relacionada com a enorme biblioteca de componentes que este possui. O programa conta com componentes virtuais e reais, sendo que muitos deles são interativos e animados. Por interativos entende-se a capacidade destes de se alterar durante a simulação e por animados entende-se a sua capacidade de mudar a sua aparência (LED's, lâmpadas, entre outros) [34].

O *software* do programa em causa permite ainda a criação de uma placa de circuito impresso que, tal como referido nos objetivos, é um dos passos a alcançar para atingir o objetivo da dissertação.

O Multisim foi utilizado para testar a viabilidade do circuito automatizado dimensionado. Este foi bastante útil para compreender de que forma o circuito dimensionado iria reagir às diferentes tensões de entrada registadas. Alcançados os resultados desejados, esta mesma ferramenta foi utilizada para criar a placa de circuito impresso do circuito anteriormente referido.

5.3 Validação do princípio de funcionamento para o circuito utilizado

Para a validação do princípio de funcionamento foram efetuados testes com os três diferentes materiais (ar, água e gelo) em estudo depositados entre os elétrodos. Os elétrodos encontram-se a cerca de 1cm de distância entre eles e paralelos entre si. O circuito utilizado encontra-se esquematizado na Figura 5.5.

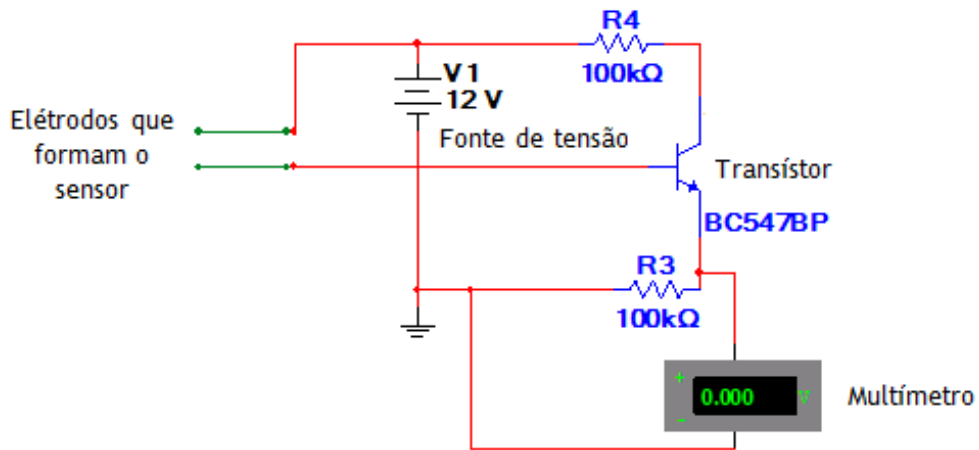


Figura 5.5 - Esquema do circuito de aquisição de dados.

As imagens do circuito em causa, correspondentes à montagem experimental do protótipo, encontram-se na Figura 5.6.

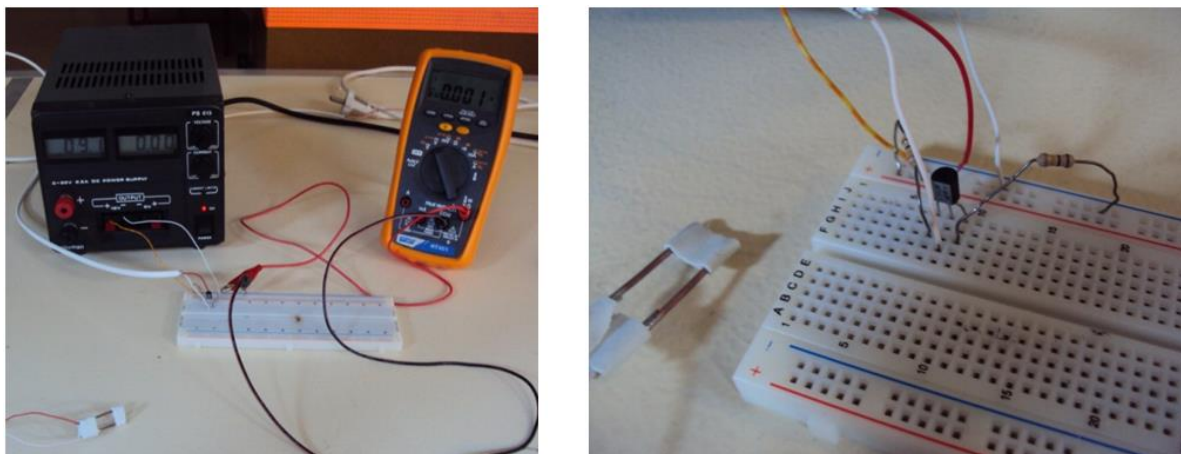


Figura 5.6 - Montagem experimental.

Em primeiro lugar, e seguindo a lógica expectável num teste real, mensurou-se a queda de tensão aos terminais da resistência R_3 quando da presença de ar entre os eléctrodos.

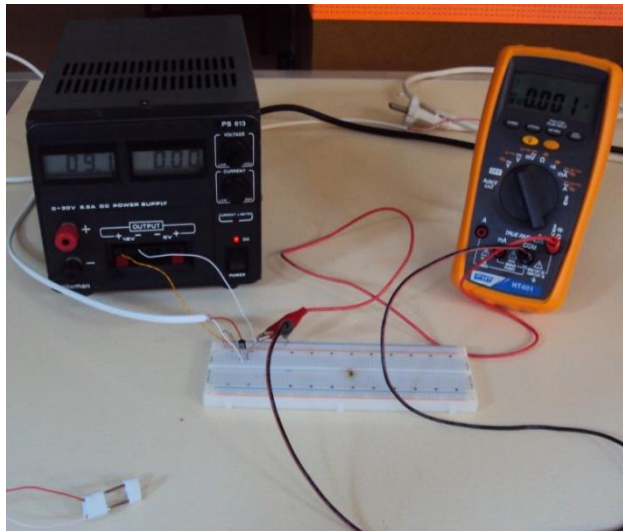


Figura 5.7 - Estudo com ar entre os eléttodos.

Para o primeiro estudo, e tal como é possível observar pela Figura 5.7, a diferença de potencial mensurada pelo multímetro na resistência R_3 é de 1 mV.

De seguida, foi testado o mesmo circuito com outro material presente entre os eléttodos. Para o segundo estudo e, seguindo novamente a sequência lógica expectável, o sensor foi colocado no interior de uma garrafa de água.

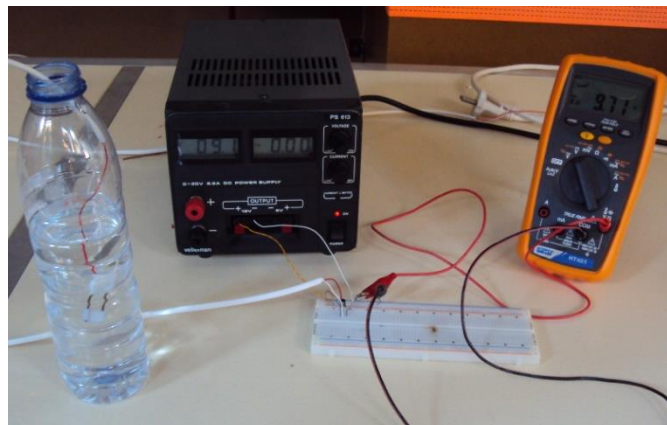


Figura 5.8 - Estudo com água entre os eléttodos.

A diferença de potencial mensurada pelo multímetro nas extremidades da resistência R_3 é, como perspectivado, bastante superior à do estudo anterior. O multímetro registou uma diferença de potencial às extremidades da resistência R_3 de 9,71 V.

Por fim foi colocado gelo entre os eléttodos de modo a verificar se o circuito em causa possui sensibilidade suficiente para distinguir entre a presença de gelo e qualquer um dos outros dois materiais.

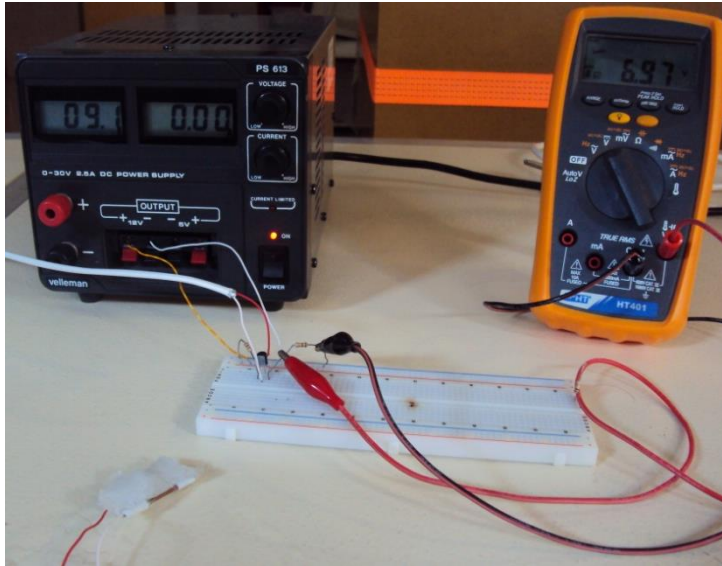


Figura 5.9 - Estudo com gelo entre os eléttodos.

A diferença de potencial mensurada para o último estudo, tal como é possível verificar pela observação da Figura 5.7, é de 6,97 V.

Desta forma comprova-se a viabilidade do princípio de funcionamento do sensor dado que os valores obtidos para os diferentes materiais em estudo possuem valores de tensão mensurados aos terminais da resistência R_3 notoriamente distintos. No entanto, são perspetivadas algumas modificações para os valores obtidos a partir do estudo experimental devido às diferentes condições a que este se encontra sujeito (diferentes massas específicas e ainda possível mistura de gelo-ar, gelo-água, água-ar e gelo-ar-água). Porém, a confirmarem-se diferenças de tensão distintas para cada um dos materiais, confirma-se o potencial da monitorização da formação de gelo através do sensor resistivo testado.

5.4 Estudo de calibração do espaçamento entre eléttodos

Para o estudo de calibração do espaçamento entre eléttodos foram utilizados dois sensores com diferentes distâncias entre os respetivos eléttodos que o constituem. A escolha preliminar dos espaçamentos foi determinada tendo em conta alguns fatores considerados determinantes para o bom funcionamento do mesmo, bem como, a aplicação desejada. De entre estes destacam-se:

- A distância entre os eléttodos não pode ser tal que promova a formação de gelo, desta forma os resultados seriam inconclusivos e não retratariam a situação em estudo.
- A distância entre eléttodos não pode ser tal que a sensibilidade do sensor seja afetada de tal modo que os resultados sejam inconclusivos.

Tendo em conta os fatores anteriormente referidos, o espaçamento utilizado para o sensor 1 e 2 foi respetivamente 0,7 cm e 1,2 cm. Estes valores de espaçamento são na ordem de grandeza do espaçamento entre alheta usualmente encontrado nas serpentinas de evaporadores.

Tal como se pode verificar pela Figura x, os resultados obtidos para ambos os espaçamentos utilizados revelaram-se bastante semelhantes. Tendo em conta o contexto do problema em causa, não existiram variações significativas entre os mesmos. Ambos se revelaram de sensibilidade razoável, tal como objetivado inicialmente. Desta forma conclui-se que, para o intervalo de valores entre eléctrodos testado, a distância entre os mesmos revelou-se pouco influente.

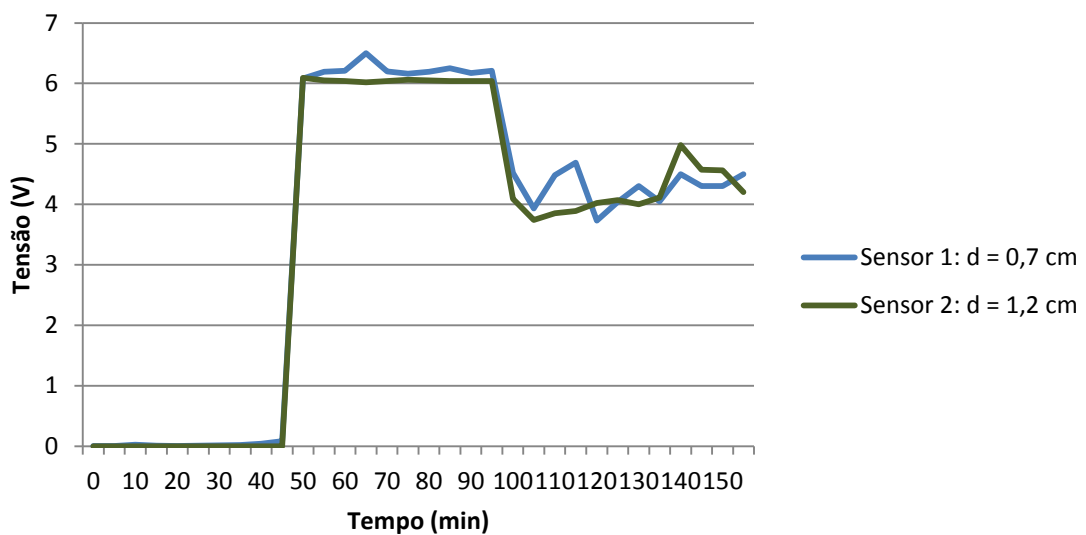


Figura 5.10 - Variação da tensão mensurada ao longo do estudo.

5.5 Nota conclusiva

O dispositivo em causa é efetivamente simples, contudo, existem alguns cuidados a ter aquando da realização dos estudos. Os estudos efetuados com o objetivo de verificar a capacidade experimental do sensor de distinguir entre os três tipos de materiais demonstraram-se bastante positivos na medida que os resultados obtidos possuem grandezas bem distintas entre si. No entanto, é expectável que ocorram variações comparativamente ao estudo experimental. As variações expectadas cifram-se na diferença de condições existentes para ambos os estudos efetuados, como por exemplo, a massa específica do material depositado entre os eléctrodos e presença de dois ou mais materiais em simultâneo. Aquando do estudo efetuado objetivando a calibração da distância entre os eléctrodos verificou-se que, para a gama de distâncias testadas, não existe uma variação significativa da queda de tensão mensurada.

Capítulo 6

Análise e discussão de resultados

Considerando os resultados obtidos no subcapítulo 5.4, onde se concluiu que para a distância entre elétrodos testada não existe uma variação significativa nos resultados obtidos, a distância entre elétrodos selecionada para os restantes estudos experimentais foi de 1,2 cm. De frisar que ambos os estudos realizados foram realizados em circuito aberto.

6.1 Estudo experimental com velocidade do ar de 2 m/s

Através da Figura 6.1 é possível verificar a evolução das diferentes temperaturas registadas ao longo do estudo efetuado. A temperatura do ar à entrada do evaporador aumenta de forma bastante ligeira ao longo de toda a experiência, denotando-se maior acentuação até $t = 40$ minutos. Em contrapartida, a temperatura à saída do evaporador diminui desde o início, até $t \approx 45$ minutos, de seguida mantêm-se relativamente constante com ligeiras oscilações até $t = 95$ minutos, onde começa a aumentar com acentuação ligeira até final do ensaio. Relativamente à temperatura na superfície do evaporador, esta diminui de forma abrupta até $t = 50$ minutos, de seguida diminui ligeiramente até $t = 60$ minutos, de $t > 60$ a $t < 90$ minutos possui ligeiras oscilações, entre $90 < t < 100$ minutos mantém-se constante e a partir deste último valor começa a diminuir com alguma intensidade.

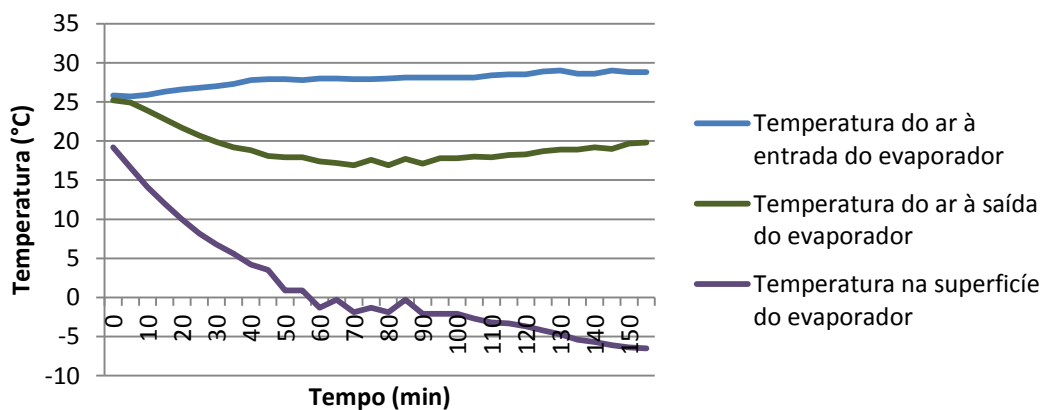


Figura 6.1 -Variação da temperatura em diferentes locais e ao longo do estudo para velocidade do ar a 2 m/s.

Outro dos parâmetros mensurados ao longo do ensaio experimental foi a humidade relativa do ar à entrada e à saída do evaporador. Os resultados obtidos para a humidade do ar à entrada do evaporador demonstram que durante os primeiros cinquenta minutos, esta diminui, e a partir desse instante pouco varia até ao fim do ensaio com valores registados a rondarem os 40 %. Em sentido contrário, surgem os resultados da humidade relativa do ar à saída do evaporador. Esta aumenta constantemente até por volta de $t = 55$ minutos, de seguida oscila

ligeiramente até ao fim do ensaio mantendo-se relativamente constante com valores na ordem dos 65 %.

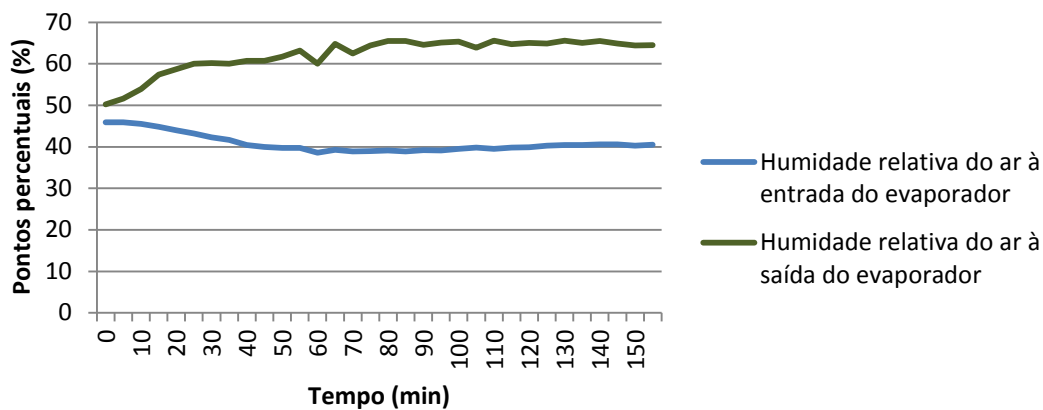


Figura 6.2 - Variação da humidade relativa do ar em diferentes locais e ao longo do estudo para velocidade do ar a 2 m/s.

Como se pode verificar através da observação da Figura 6.2, é possível distinguir entre a presença de gelo de ar ou água. A primeira fase corresponde notoriamente à presença de ar entre os eléctrodos com valores de diferencial de tensão mensurado a rondar 0 V. A sua fase temporal está compreendida entre o início do estudo e $t = 45$ minutos. A segunda fase corresponde à presença de água, com valores entre os 6 V e os 6,5 V. Em termos temporais, a fase para a qual o sensor indicia a presença de água está compreendida entre $50 < t < 95$ minutos. Relativamente à terceira fase, esta corresponde à formação de gelo onde se registaram valores entre sensivelmente os 3,8 V e os 5 V, com a sua fase temporal a ter início a $t = 100$ minutos e a prolongar-se até ao fim do estudo. De salientar que os intervalos compreendidos entre $45 < t < 50$ e entre $95 < t < 100$ minutos correspondem ao intervalo de medição para o qual se verifica a mudança de estado, daí que não sejam contemplados em nenhuma das fases anteriores. Os resultados obtidos vão de encontro ao esperado, uma vez que são similares aos obtidos no subcapítulo 5.4 e estão de acordo com os valores apresentados na Tabela 4.2.

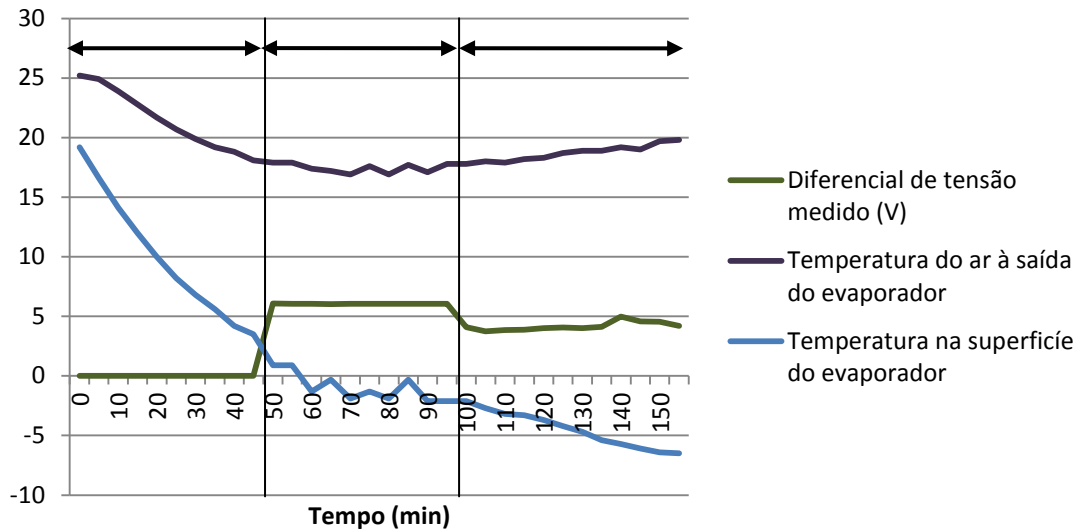


Figura 6.3 - Gráfico da variação dos parâmetros indicadores da formação de gelo para o estudo a 2 m/s.

É ainda possível verificar através da Figura 6.3 que o momento em que o sensor “acusa” a presença de gelo, $t \approx 95$ minutos, coincide com o momento em que a temperatura do ar à saída do evaporador começa a subir de forma contínua. A temperatura do ar à saída do evaporador serve de validação dos resultados obtidos pelo sensor, uma vez que revela a perda de capacidade de refrigeração por parte do sistema. De salientar que, tal como referido anteriormente, esta é uma das consequências da formação de gelo.

A temperatura à superfície do evaporador é outro dos fatores que consolida a capacidade do sensor para a monitorização da formação de gelo. Tal como se pode verificar pela linha a azul claro presente na Figura 6.3, o momento em que o sensor deteta a presença de gelo coincide com o instante em que a temperatura à superfície do evaporador começa a diminuir continuamente e de forma abrupta. De seguida, na Figura 6.4, encontram-se as imagens que ilustram de que forma a formação de gelo evoluiu ao longo do estudo.



a) $t = 0$ min.



b) $t = 30$ min.



c) $t = 60$ min.



d) $t = 90$ min.



e) $t = 120$ min.



f) $t = 150$ min.

Figura 6.4 - Evolução da formação de gelo ao longo do estudo efetuado para velocidade do ar de 2 m/s.

6.2 Estudo experimental com velocidade do ar de 4 m/s

A Figura 6.5 tem como variáveis as temperaturas medidas em diversos pontos da instalação experimental em função do tempo. A temperatura do ar à entrada do evaporador aumenta ligeiramente até $t = 65$ minutos e mantém-se relativamente constante durante o restante período do estudo experimental. Em sentido inverso surge a temperatura do ar à saída do evaporador, com diminuição ligeira até por volta de $t = 45$ minutos e com oscilações de pequeno relevo durante o restante período do estudo efetuado. A temperatura à superfície do evaporador diminui ao longo de toda a experiência, contudo, registam-se períodos onde existem diminuições mais acentuadas. Desde o início do ensaio até $t = 35$ minutos, a temperatura diminui com relativa acentuação. De seguida e até ao fim do ensaio a acentuação diminui. De salientar apenas neste mesmo período um instante em que, esta sofre uma diminuição abrupta em $t = 100$ minutos que coincide com o instante em que esta passa para valores abaixo de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

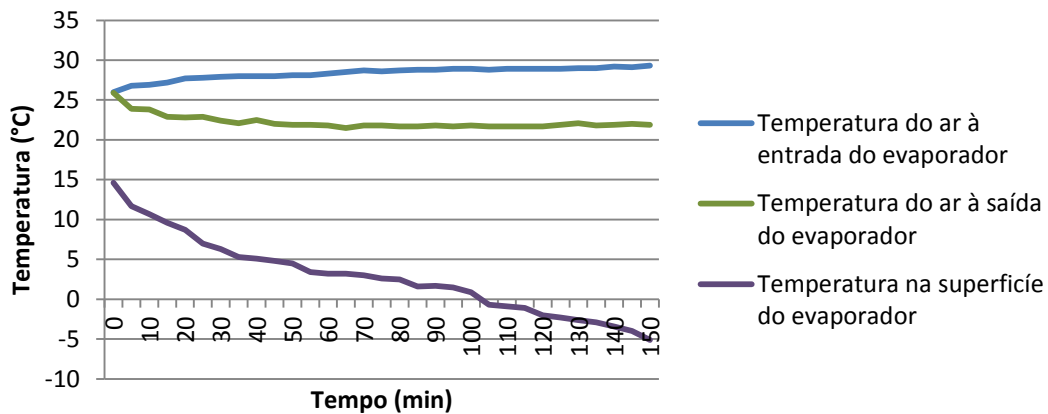


Figura 6.5 - Variação da temperatura em diferentes locais e ao longo do estudo para velocidade do ar a 4 m/s.

Os resultados obtidos para as diferentes humidades relativas do ar obtidas (à entrada e saída do evaporador) relativamente ao ensaio efetuado a 4 m/s encontram-se na Figura 6.6. As maiores oscilações dos valores obtidos registam-se desde o início do ensaio até $t = 50$ minutos. De salientar que a humidade relativa do ar à entrada do evaporador diminui até ao instante anteriormente referido, ao passo que a humidade relativa do ar à saída do evaporador aumenta. A partir deste instante registam-se apenas pequenas oscilações de valor, com aumento bastante ligeiro até final do estudo para ambas os parâmetros.

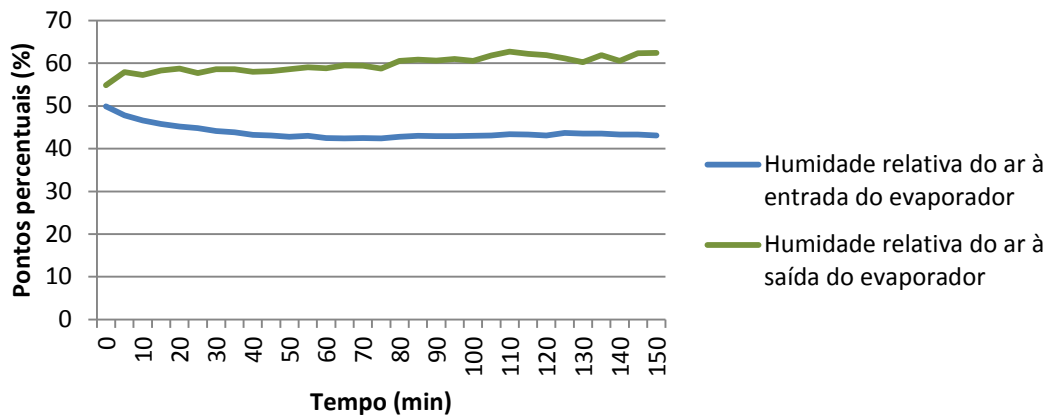


Figura 6.6 - Variação da umidade relativa do ar em diferentes locais e ao longo do estudo para velocidade do ar a 4 m/s.

Em conformidade com os resultados obtidos para o ensaio experimental com velocidade do ar a 2 m/s, também para o presente ensaio se verifica uma clara distinção entre os diferentes tipos de materiais presentes entre os elétrodos (ar, água e gelo). A fase onde se verifica a presença de ar vai desde o início do ensaio até $t = 30$ minutos com valores de diferença de tensão mensurada na ordem dos 0 V. A segunda fase coincide com a presença de água entre os elétrodos. O intervalo para o qual o sensor acusa a sua presença está compreendido entre $35 < t < 95$ minutos, com valores de diferencial de tensão mensurado dos 6,1 V aos 6,9 V. De $t = 100$ minutos até final do estudo, o sensor indicia a presença de gelo com valores situados no intervalo de 3,3 V a 4,9 V. Os intervalos temporais situados entre $30 < t < 35$ minutos e $95 < t < 100$ minutos não são abrangidos por nenhuma das fases anteriores dado que correspondem ao intervalo de tempo no qual a mudança de fase se dá e correspondem ao intervalo entre medições.

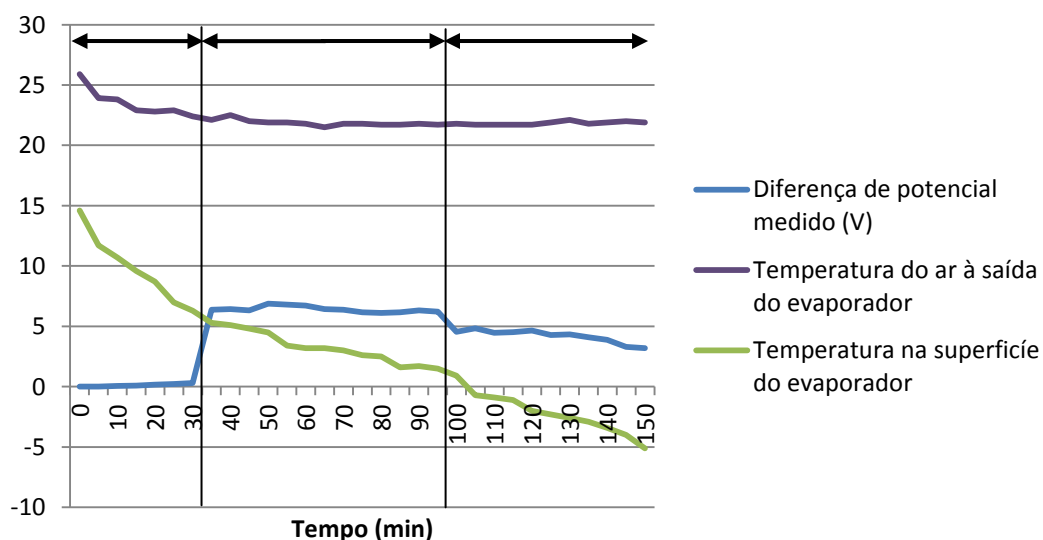


Figura 6.7 - Variação dos parâmetros indicadores da formação de gelo para o estudo para velocidade do ar a 4 m/s.

Para o presente caso, e em conformidade com a análise efetuada para o gráfico homólogo obtido no ensaio experimental com velocidade do ar a 2 m/s, efetuou-se uma comparação entre parâmetros de modo a obter uma correlação que valide a viabilidade do sensor. Porém, contrariamente ao estudo anterior, a temperatura do ar à saída do evaporador para o estudo a velocidade do ar a 4 m/s nada acrescenta, uma vez que esta estabiliza bastante cedo. Em sentido inverso surge a temperatura na superfície do evaporador. Esta regista uma queda abrupta para $t \approx 100$ minutos, ao passo que o sensor indicia a formação de gelo a $t = 95$ minutos. De realçar que o intervalo de medições é de precisamente cinco minutos o que significa que o erro aqui obtido está compreendido entre o seguinte intervalo]0min; 5min[. Apesar da variação aqui verificada, este fator que serve de validação dos resultados obtidos, demonstra que mais uma vez o sensor foi capaz de detetar a formação de gelo. Como ressalva, de destacar que as posições destes dois componentes encontram-se em posições distintas o que não significa que os resultados obtidos pelo sensor possuam efetivamente erro.

De seguida na Figura 6.8, e tal como disponibilizado no anterior caso homólogo, encontram-se as imagens que atestam de que forma a formação de gelo evoluiu ao longo do estudo efetuado.



a) $t=0$ min.



b) $t=30$ min.



c) $t=60$ min.



d) $t=90$ min.



e) $t=120$ min.



f) $t=150$ min.

Figura 6.8 - Evolução da formação de gelo ao longo do estudo efetuado para velocidade do ar de 4 m/s.

6.3 Placa de circuito impresso (PCB)

Obtidos os resultados e confirmada a viabilidade do sensor em estudo foi desenvolvido um circuito capaz de automatizar todo o processo afeto à monitorização da formação de gelo. O circuito em causa carece das mesmas exigências afetas ao sensor de monitorização anteriormente tratado. Desta feita este deverá ser de baixo custo e de fiabilidade e sensibilidade razoável. Um dos problemas afetos ao dimensionamento deste prendeu-se, como verificado pelos resultados anteriormente demonstrados, com o intervalo de tensão mensurada aos terminais da resistência R_3 . Por se encontrar num intervalo de dois valores específicos, mais concretamente de 3 V a 5 V, conduziu à utilização de dois comparadores.

Um comparador de tensão (Figura 6.9) é acionado para qualquer valor igual ou superior à tensão de referência.

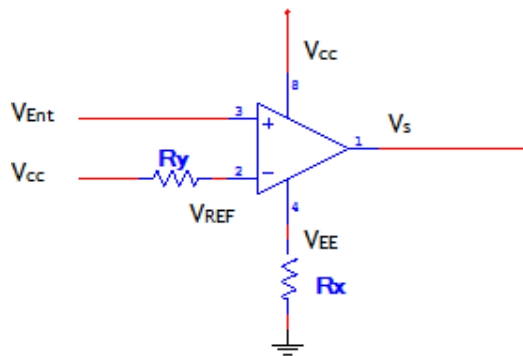


Figura 6.9 - Esquema e respetivas ligações de um comparador de tensão.

Desta forma foi necessário dimensionar as resistências R_x e R_y de tal forma que a tensão de referência (V_{REF}) para um dos comparadores fosse de 3 V e para outro de 5 V. A equação que permite tal dimensionamento para o caso em estudo é a Equação 6.1.

$$V_{Ref} = V_{CC} \cdot \frac{R_x}{R_y} \quad [6.1]$$

Onde:

- V_{Ref} - Tensão de referência [V];
- V_{CC} - Tensão de alimentação positiva [V];
- V_{EE} - Tensão de alimentação negativa [V];
- R - Resistência elétrica [Ω].

Desta forma para a tensão de referência desejada de 3 V, alimentação do circuito (V_{CC}) igual a 12 V, assumindo, como forma de facilitar os cálculos, $R_x = 1 \text{ k}\Omega$ e tendo como base a Equação 6.1, vem:

$$3 = 12 \cdot \frac{1}{R_y} \quad [6.2]$$

Resolvendo agora em ordem a R_y vem:

$$R_y = 3 \text{ k}\Omega \quad [6.3]$$

Em contrapartida para a tensão de referência desejada de 5 V, alimentação do circuito (V_{CC}) igual a 12 V, assumindo novamente $R_x=1 \text{ k}\Omega$ e tendo como base a Equação 6.1, vem:

$$5 = 12 \cdot \frac{1}{R_y} \quad [6.4]$$

Resolvendo agora em ordem a R_y vem:

$$R_1 = 1,43 \text{ k}\Omega \quad [6.5]$$

No entanto, e tendo em conta o funcionamento do comparador de tensão e o objetivo desejável, é necessário colocar à saída do comparador, cuja tensão de referência corresponde a 5 V, uma porta lógica “NOT” de modo a “contrariar” o sinal em causa. Desta forma e, colocando um porta lógica “AND”, cujas entradas correspondem ao sinal à saída da porta “NOT”, e do comparador, cuja tensão de referência corresponde a 3 V, é possível acionar o sistema de descongelação de autónoma. O circuito referido encontra-se esquematizado na Figura 6.10.

De salientar que o circuito anteriormente referido já possui agregado o circuito do sensor de aquisição de dados elaborado para o estudo da monitorização da formação de gelo.

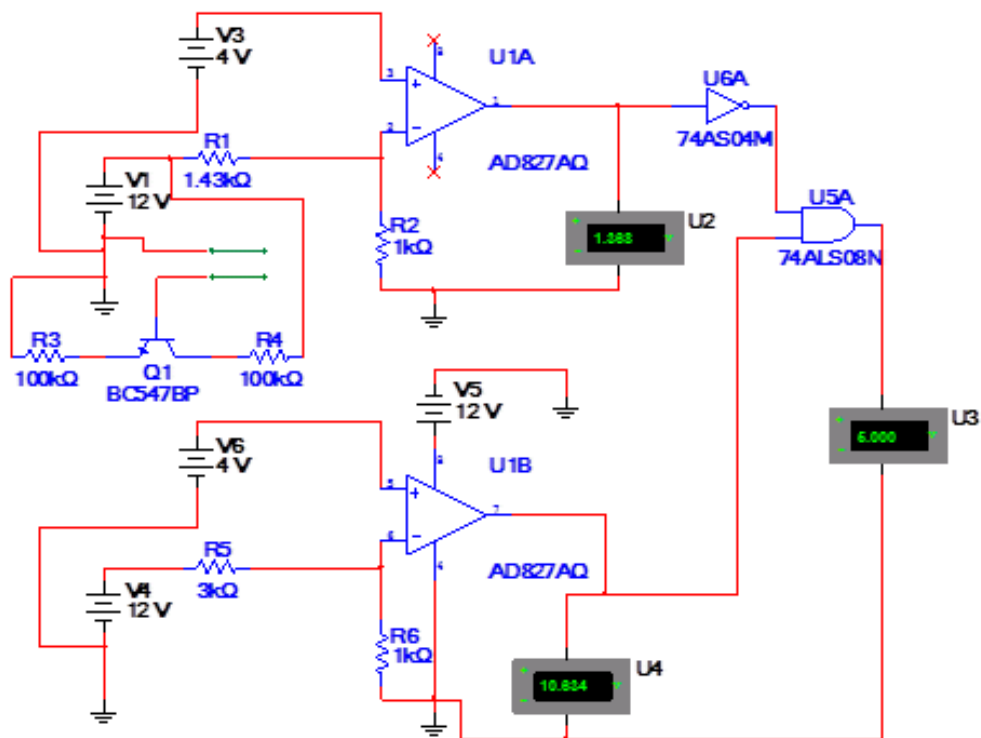


Figura 6.10 - Circuito final dimensionado.

Nas Figuras 6.11 e 6.12 é ainda possível visualizar o PCB resultante do circuito demonstrado na Figura 6.10. De salientar que o PCB projetado possui como dimensões (30 mm x 35 mm).

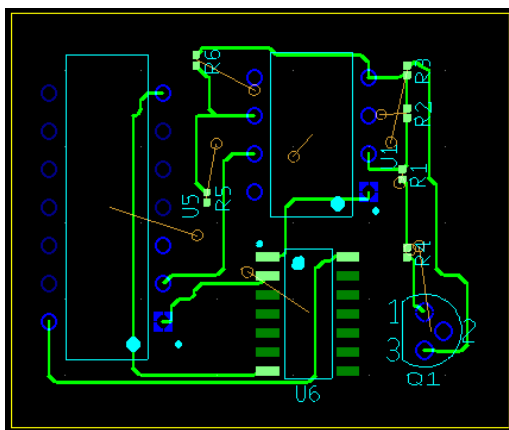


Figura 6.11 - Imagem 2D das ligações do PCB.

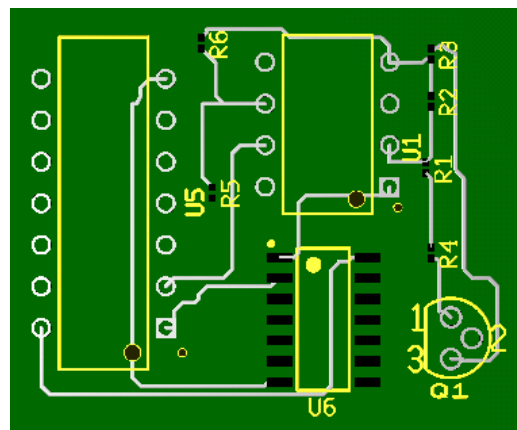


Figura 6.12 - Imagem 2D das ligações do PCB.

Tal como é possível verificar pelas Figuras 6.11 e 6.12, os componentes “U5” e “U6” possuem entradas/saídas excessivas. Estes componentes, numa instalação experimental, deverão ser substituídos por outros mais adequados à necessidade exigida. Tal alteração permitirá uma poupança monetária e ainda uma diminuição do tamanho do PCB. Os componentes mais adequados à aplicação desejada não se encontram no PCB uma vez que a biblioteca do software utilizado (Multisim) não possui nenhum dos componentes em causa.

6.4 Nota conclusiva

O sensor testado possui, para os estudos efetuados, resultados bastante promissores relativamente à sua utilização como dispositivo de monitorização da formação de gelo. Está comprovado que o dispositivo é efetivamente capaz de distinguir entre a presença dos diferentes materiais, sendo que para o único resultado “menos conseguido” não é a sua capacidade/sensibilidade que é posta em causa mas sim a sua localização no evaporador. Este apresenta-se portanto como um sensor a ter em conta na monitorização da formação de gelo na indústria da refrigeração. Porém, é certo que existem ainda ajustes necessários até que este possa atingir um patamar de aplicação generalizada.

Capítulo 7

Conclusões

7.1 Análise do desempenho

A superfície dos evaporados dos sistemas de refrigeração em funcionamento normal, geralmente, opera a temperaturas inferiores à temperatura de congelação da água. A formação de gelo na sua superfície tem consequências a nível térmico e energético para o sistema, bem como, consoante a aplicação, para a segurança alimentar dos produtos a serem refrigerados. Desta forma, o gelo em causa necessita de ser removido de modo a restabelecer as condições normais de funcionamento.

Atualmente grande parte dos sistemas existentes acionam o sistema de descongelação de forma cíclica e por períodos pré-definidos. A razão da utilização deste dispositivo para a monitorização da formação de gelo, baseia-se no seu baixo custo e simplicidade, embora se traduza numa fiabilidade fortemente dependente das condições ambiente e da operação do sistema.

Por forma a apresentar uma alternativa ao sensor anteriormente referido, foram efetuados estudos experimentais recorrendo a um sensor resistivo. Os requisitos pré-definidos para este são o baixo custo e fiabilidade e sensibilidade razoável.

Através do estudo referente à validação do princípio de funcionamento do dispositivo é possível concluir que o circuito testado possui capacidade para distinguir entre o ar, a água e o gelo.

Para a gama de intervalos testados conclui-se que a distância entre elétrodos pouco influenciou os resultados. Desta forma optou-se pela configuração relativa à maior distância de modo a não criar em instância alguma, condições propícias à formação de gelo.

Relativamente aos estudos experimentais efetuados utilizando a UTA e respetivo evaporador, estes revelaram-se bastante positivos. O dispositivo foi capaz de distinguir entre a presença dos diferentes materiais tanto para a velocidade do ar a 2 m/s como a 4 m/s.

À velocidade de 2 m/s, o instante em que o dispositivo acusou a presença da formação de gelo coincidiu com o mesmo em que a temperatura do ar à saída do evaporador começou a aumentar. De salientar que esta é uma das consequências da formação de gelo, ou seja, a perda de capacidade de refrigeração por parte do sistema. Em contrapartida à velocidade de 4 m/s esta analogia não foi possível pelo que se procedeu à comparação do valor da queda de tensão aos terminais da resistência R_3 com a temperatura à superfície do evaporador.

Aquando da formação de gelo à superfície dos evaporadores é expectável que a temperatura na sua superfície sofra quedas abruptas de temperatura como consequência, a par do aumento da temperatura à saída do evaporador, da perda da capacidade de refrigeração sofrida pelo sistema. Esta é uma situação que ocorre em ambos os estudos. No primeiro, com velocidade do ar de 2 m/s, o instante em que este ocorre coincide com a deteção de formação de gelo pelo dispositivo e com o instante do aumento da temperatura à saída do evaporador. Por outro lado para o segundo estudo, referente à velocidade do ar de 4 m/s, o instante em que se verifica uma queda abrupta (e para valores negativos) da temperatura da superfície do evaporador possui um desfasamento de 5 minutos do instante em que o dispositivo acusa a formação de gelo. O desfasamento obtido em nada constitui uma falha comprovada do sensor ou do circuito afeto a este. As suas consequências estão, muito provavelmente, relacionadas com a posição do dispositivo no evaporador. O sensor foi capaz de detetar a formação de gelo, no entanto, o local onde este se encontra posicionado não representa o evaporador como um todo, daí o desfasamento entre resultados (ainda que relativamente pequeno).

Encontrada a gama de resultados correspondentes à formação de gelo, o circuito capaz de automatizar todo o processo foi projetado e dimensionado. A placa de circuito impresso foi simulada no *software* Multisim com resultados coerentes com os obtidos no estudo experimental do sensor, ou seja, a saída é acionada apenas quando aos terminais da resistência R_3 é mensurada uma diferença de potencial compreendida no intervalo de 3 V a 5 V.

Em suma, o dispositivo estudado possui efetivamente capacidade para a deteção da formação de gelo, contudo, a viabilidade deste em aplicações reais carece ainda de alguns estudos.

7.2 Sugestões de trabalhos futuros

O dispositivo em estudo obteve resultados bastante positivos. No entanto, existem alguns estudos a efetuar de modo a melhorar os resultados aqui apresentados, tais como:

- Estudo relativamente à localização do sensor que melhor representa o evaporador como um todo. Caso a configuração utilizando apenas um sensor se apresente como inconclusiva, deverá ser considerada a utilização de dois ou mais sensores em simultâneo.
- Projeto de uma peça fácil de manobrar que permita ao sensor ficar estável, com os eléctrodos paralelos e sem entrar em contato com as alhetas do evaporador.
- Verificação, caso exista, da poupança monetária registada aquando da utilização deste dispositivo comparativamente a um sistema comercial.

- Verificação, caso exista, das melhorias registadas a nível de temperatura de produtos e do ar interior comparativamente a um sistema comercial.
- Estudo acerca do tempo médio de retorno, caso se verifique tal possibilidade.

Bibliografia

- [1] S. A. Tassou e D. Datta, "Influence of Supermarket Environmental Parameters on the Frosting and Defrosting of Vertical Multideck Display Cabinets," Uxbridge, 1999.
- [2] E. A. Aviles, N. R. Miller e T. A. Newell, "Detection of Evaporator Frost," ACRC TR-215, Air Conditioning and Refrigeration Center (ACRC), University of Illinois, Illinois, 2003.
- [3] S. A. Tassou, D. Datta, D. Marriott, "Frost formation and defrost control parameters for open multideck refrigerated food display cabinets," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, vol. 215(2), 1st March, 2001, 213-222..
- [4] IEA, "Key World Energy Statistics," International Energy Agency (IEA), Sorregraph, Paris, 2013.
- [5] U.S. Energy Information Administration, "International Energy Outlook 2013," U.S. Energy Information Administration, 2013.
- [6] B. Prindle, M. Eldridge, M. Eckhardt e A. Frederick, "The Twin Pillars of Sustainable Energy: Synergies between Energy Efficiency and Renewable Energy Technology and Policy", ACEEE Report Number E074, American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE), Washington, 2007.
- [7] P. Baptista, "Higiene e Segurança Alimentar no Transporte de Produtos Alimentares 01," Forvisão, 2006.
- [8] I. Dincer e M. Kanoglu, "Refrigeration Systems and Applications, 2nd edition", Wiley, 2010.
- [9] P. Baptista e C. Antunes, "Higiene e Segurança Alimentar na Restauração - Volume II," Forvisão, 2006.
- [10] B. Na e R. L. Webb, "New model for frost growth rate," International Journal of Heat and Mass Transfer 47(5), 2004:925-936.
- [11] K. P. Owusu, "Capacitive probe for ice detection and accretion rate measurement: proof of concept," Thesis: University of Manitoba, Manitoba, 2010.

- [12] W. B. Gosney, "Principles of refrigeration," Cambridge University Press, Cambridge, 1982.
- [13] P. Baptista e M. Linhares, "Higiene e Segurança Alimentar na Restauração - Volume I," Forvisão.
- [14] A. C. Freitas e P. Figueiredo, "Conservação de alimentos," Lisboa, 2000.
- [15] M. V. Duarte, "Estudo da bomba de calor - Fluidos de trabalho e eficiência energética," Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2013.
- [16] G. Ribatski, L. Gómez e H. Navarro, "Estudo da literatura sobre a intensificação da transferência de calor em ebulição convectiva através de superfícies ranhuradas," Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.
- [17] F. Ferraz e M. Gomes, "Refrigeração," Bahia, 2008.
- [18] J. Q. Dias, "Concepção de Instalações Frigoríficas em Expansão Directa versus Sistemas Inundados. Análise Energética das Soluções," Dissertação - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2012.
- [19] P. Baptista, P. D. Gaspar e J. Oliveira, "Higiene e Segurança Alimentar na Distribuição de Produtos Alimentares 02," Forvisão, 2006.
- [20] W. Wang, J. Xiao, Y. Feng, Q. Guo e L. Wang, "Characteristics of an air source heat pump with novel photoelectric sensors during periodic frost-defrost cycles," Applied Thermal Engineering 50(1) 2013:177-186.
- [21] V. Tudor, M. Ohadi, M. A. Salehi e J. V. Lawler, "Advances in control of frost on evaporator coils with an applied electric field," International Journal of Heat and Mass Transfer 48(21-22), 2005:4428-4434.
- [22] K. P. Owusu, D. C. Kuhn e E. L. Bibeau, "Capacitive probe for ice detection and accretion rate measurement: Proof of concept," Renewable Energy 50, 2013:196-205.
- [23] M.C. Homola, , P.J. Nicklasson , P.A. Sundsbø, "Ice sensors for wind turbines," Cold Regions Science and Technology 46(2), 2006:125-131.
- [24] U. N. Mughal e M. S. Virk, "A Numerical Comparison of Dielectric based Measurement of Atmospheric Ice Using Comsol," Comsol 2013, 2013.

- [25] K. B. Cyril e B. George, "A Capacitive Ice Layer Detection System Suitable for Autonomous Inspection of Runways using an ROV," 2012 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE), Magdeburg, 2012.
- [26] J. Ge, L. Ye e J. Zou, "A novel fiber-optic ice sensor capable of identifying ice type accurately," *Sensors and Actuators A: Physical* 175, 2012:35-42.
- [27] J. Xiao, W. Wang, Q. C. Guo e Y. H. Zhao, "An experimental study of the correlation for predicting the frost height in applying the photoelectric technology," *International Journal of Refrigeration* 33(5), 2010:1006-1014.
- [28] J.-S. Byun, C.-D. Jeon, J.-H. Jung e J. Lee, "The application of photo-coupler for frost detecting in an air-source heat pump," *International Journal of Refrigeration* 29(2), 2006:191-198.
- [29] S. Roy, A. Izad, R. G. DeAnna e M. Mehregany, "Smart ice detection systems based on resonant piezoelectric transducers," *Sensors and Actuators A: Physical* 69(3), 1998:243-250.
- [30] J. M. Lawrence e J. A. Evans, "Refrigerant flow instability as a means to predict the need for defrosting the evaporator in a retail display freezer cabinet," *International Journal of Refrigeration* 31(1), 2008:107-112.
- [31] B. A. Fricke, P. D. e V. Sharma, "Demand Defrost Strategies in Supermarket Refrigeration Systems," Interim Report, Refrigeration Project Team Retail Energy Alliance, Oak Ridge, 2011.
- [32] V. F. Petrenko, "Electrical Properties of Ice," Special Report 93-20, US Army Corps of Engineers, 1993.
- [33] C. A. Wartchow e H. B. Fröhlich, "Projeto e construção de um sensor de umidade relativa do tipo resistivo," *Dissertação - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre*, 2013.
- [34] National Instruments, *Multisim - User Guide*, National Instruments, 2007.

Anexo A - Temperaturas características de alguns microrganismos patogénicos [7].

Microrganismos	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Ótima (°C)
<i>Bacillus cereus</i>	5	55	28 - 40
<i>Campylobacter spp.</i>	32	45	42 - 45
<i>Clostridium botulinum</i> tipo A e B	10 - 12	50	30 - 40
<i>Clostridium botulinum</i> tipo E	3 - 3,3	45	25 - 37
<i>Clostridium perfringens</i>	12	50	43 - 47
<i>Escherichia coli</i> Entero-toxigénico	7	46	35 - 40
<i>Listeria monocytogenes</i>	0	45	30 - 37
<i>Salmonella spp.</i>	5	45 - 47	35 - 37
<i>Staphylococcus aureus</i> : crescimento	7	48	35 - 40
<i>Shigella spp.</i>	7	46	40 - 45
<i>Vibrio cholerae</i>	7	45 - 47	37
<i>Vibrio parahaemolyticus</i>	10	43	37
<i>Vibrio vulnificus</i>	8	43	37
<i>Yersinia enterocolitica</i>	-1	42	28 - 30