



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

**Avaliação experimental da capacidade de
produção de água a partir de ar atmosférico por
intermédio da refrigeração por compressão de
vapor**

Rui Pedro da Silva Miranda

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Eletromecânica

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Luís Carlos Carvalho Pires

Co-orientador: Prof. Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva

Covilhã, outubro de 2016

Resumo

A problemática da escassez de água é nos dias que correm um dos temas em debate pelo mundo. Atualmente surgem cada vez mais medidas de prevenção, assim como têm sido desenvolvidos e melhorados os sistemas de produção, tratamento e armazenamento de água. Com base neste grave problema vivido por uma parte considerável da população mundial, o presente trabalho propõe a utilização de um simples sistema de desumidificação industrial para a obtenção de água a partir de uma fonte de água renovável, a atmosfera terrestre. Como forma de corroborar a utilização deste tipo de equipamentos serão apresentados resultados relativos à capacidade deste tipo de equipamentos de produzir água. Para a realização dos ensaios foram utilizados diversos equipamentos laboratoriais, entre os quais uma unidade de ar condicionado, sondas higrométricas e um controlador de temperatura. Embora a água extraída, do ar atmosférico por sistemas de refrigeração por compressão de vapor, através da condensação de vapor de água, necessite de tratamento e de ser mineralizada, estes equipamentos podem ser utilizados em qualquer habitação como uma fonte de água potável. O trabalho apresentado inclui a realização de estudos experimentais, sendo utilizado um equipamento do fabricante TROTEC, o TTK 75 ECO. De forma resumida este equipamento possui uma capacidade de desumidificação de 20 l/dia, para valores de 30 °C e 80% de temperatura e humidade relativa, respetivamente. Este equipamento possui um intervalo de funcionamento de 5-32 °C para a temperatura e de 30-90% para a humidade relativa. Assim, importa referir que as condições impostas no interior da câmara, onde será testado o equipamento, devem encontrar-se dentro destes limites. No caso destes limites serem ultrapassados o equipamento funciona de forma interrupta. A maior produção de água ocorreu para condições ambiente, no interior da câmara climática, de 43 °C e 43%, de temperatura e humidade relativa, respetivamente, sendo obtidos nessas condições 0,3 l/h. Ocorreram alguns ensaios em que a produção de água verificada foi aproximadamente nula, sendo possível delinear um limite para condições em que ocorre produção e condições em que a utilização deste equipamento não apresenta resultados.

Palavras-chave

Refrigeração por compressão de vapor, produção de água a partir de vapor de água atmosférico, condensação de vapor de água.

Abstract

The problem of water scarcity is nowadays one of the themes under discussion around the world. Currently arise increasingly prevention measures, as well as have been developed and improved systems of production, treatment and storage of water. Based on this serious problem lived by a considerable part of the world's population, the present work proposes the use of a simple industrial dehumidification system to obtain water from a renewable source of water, the Earth's atmosphere. In order to corroborate the use of this type of equipment results will be presented concerning the capacity of this type of equipment to produce water. For the carrying out of the experiments various laboratory equipment, including an air conditioning unit, hygrometric probes and a temperature controller were used. Although the extracted water from, the atmospheric air by condensation of water vapour, in vapour compression refrigeration systems, requires treatment and to be mineralized, this equipment can be used in any house as a source of drinking water. The work includes conducting experimental studies, using a manufacturer's equipment from TROTEC, the TTK 75 ECO. In summary this equipment has a dehumidifying capacity of 20 l/day, for values of 30 °C and 80% of relative humidity and temperature, respectively. This equipment has an operating range of 5-32 °C for the temperature and 30-90% for the relative humidity. In that way the conditions imposed in the interior of the test chamber, where the equipment will be tested, should be within these limits. In the case of these limits be exceeded, the equipment works in an interrupt way. The largest production of water occurred for ambient conditions, inside the climate chamber of 43 °C and 43%, temperature and relative humidity, respectively, being obtained 0,3 l/h. There were some tests where the production of water was approximately zero, being possible to delineate a limit for conditions in which production occurs and the conditions under which the use of this equipment does not present results.

Keywords

Vapour-compression refrigeration, water production from atmospheric water vapour, condensation of water vapour.

Índice

Resumo	iii
Abstract	v
Índice	vii
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas	xv
Lista de Acrónimos	xvii
1. Introdução	1
1.1. Perspetiva geral	2
1.2. O problema em estudo e a sua relevância	5
1.3. Revisão bibliográfica	7
1.3.1. Presença de água potável no planeta Terra e a sua importância	8
1.3.2. Trabalhos de revisão de métodos de obtenção de água potável	11
1.3.3. Trabalho de revisão de tecnologias de tratamento de água	14
1.3.4. Trabalhos de revisão de ensaios realizados	14
1.3.4.1. Equipamentos de captação baseados em superfícies frias	14
1.3.4.1.1. Equipamentos de compressão de vapor	15
1.3.4.1.2. Células de Peltier	17
1.3.4.1.3. Arrefecimento radiante	17
1.3.4.2. Utilização de substâncias dessecantes.....	18
1.3.4.3. Diversos equipamentos	19
1.4. Objetivos e contribuição da presente dissertação.....	19
1.5. Visão geral da organização da dissertação.....	21
2. Produção de água potável.....	23
2.1. Tecnologias de produção de água potável	23
2.1.1. Tecnologias produção de água a partir do ar atmosférico	23
2.1.1.1. Arrefecimento de superfícies abaixo da temperatura do ponto de orvalho	24
2.1.1.1.1. Refrigeração por compressão de vapor	24

2.1.1.1.2.	Arrefecimento radiante	28
2.1.1.1.3.	Célula de Peltier	29
2.1.1.2.	Utilização de substâncias dessecantes	30
2.1.1.3.	Convecção induzida e controlada numa estrutura	32
2.1.2.	Dessalinização	32
2.1.3.	Cloud Seeding	36
2.2.	Tecnologias de tratamento	37
2.2.1.	Tecnologias de tratamento sem utilização de membranas.....	37
2.2.1.1.	Tecnologias de tratamento por processos físicos.....	37
2.2.1.2.	Tecnologias de tratamento por processos químicos.....	38
2.2.1.3.	Tecnologias de tratamento por processos térmicos.....	38
2.2.1.4.	Tecnologias de tratamento integrado	39
2.2.2.	Tecnologias de tratamento com utilização de membranas	39
2.2.2.1.	Tecnologias de tratamento por membrana, realizado por pressão.....	39
2.2.2.2.	Tecnologias de tratamento por membrana, realizado termicamente	39
2.2.2.3.	Tecnologias de tratamento por membrana, realizado osmoticamente	40
3.	Propriedades termodinâmicas do ar	41
3.1.	Noções base	41
3.1.1.	Gráfico psicrométrico	42
3.1.2.	Pressão de vapor (P_v)	43
3.1.3.	Humidade relativa e humidade absoluta (ϕ e ω , respetivamente)	43
3.1.4.	Entalpia (h)	44
3.1.5.	Temperatura do ponto de orvalho (T_{dp})	45
3.1.6.	Temperaturas de bolbo húmido e de bolbo seco (T_{wb} e T)	46
3.2.	Condensação de vapor de água	46
3.2.1.	Mudança de fase	46
3.2.2.	Condensação de vapor de água	48
4.	Refrigeração por compressão de vapor	49
4.1.	Noções base	49
4.2.	Ciclo termodinâmico da refrigeração	52

4.2.1.	Ciclo de refrigeração ideal	53
4.2.2.	Ciclo de refrigeração real	57
4.3.	Sistemas de desumidificação	60
4.4.	Sistemas de condensação	65
5.	Estudo Experimental	66
5.1.	Instalação Experimental.....	66
5.1.1.	Equipamento de desumidificação por compressão de vapor.....	66
5.1.2.	Unidade de ar condicionado	71
5.1.3.	Câmara climática	74
5.2.	Ensaio realizados	78
5.2.1.	Processos de realização dos ensaios.....	78
5.2.1.1.	Processo 1.....	81
5.2.1.2.	Processo 2.....	82
5.2.1.3.	Processo 3.....	84
5.2.1.4.	Processo 4.....	86
5.2.1.5.	Processo 5.....	88
5.2.1.6.	Processo 6.....	90
5.2.1.7.	Processo 7.....	91
5.2.2.	Notas conclusivas	92
5.2.2.1.	Instabilidade gráfica	92
5.2.2.2.	Comparação de ensaios.....	93
5.2.2.2.1.	Comparação dos ensaios 1 e 9	93
5.2.2.2.2.	Comparação dos ensaios 7 e 15.....	94
5.2.2.2.3.	Comparação dos ensaios 2, 4 e 5.....	95
5.3.	Resultados e discussão.....	96
5.3.1.	Quantidade de água produzida	96
5.3.2.	Potência elétrica utilizada	97
5.3.3.	Energia elétrica utilizada por litro de água e o seu custo.....	98
6.	Conclusão	105
6.1.	Recapitulação	105

6.2. Trabalho Futuro	106
7. Referências bibliográficas	108

Lista de Figuras

Figura 2.1- Ilustração de uma bomba de calor, por compressão de vapor. Stuij, B (1995)	25
Figura 2.2- Relação entre a constituição química, a toxicidade, a inflamabilidade e o perigo para a atmosfera terrestre. Duarte. M (2013)	26
Figura 2.3- Exemplo da aplicação de arrefecimento radiante num telhado. Girja Sharan (2011)	29
Figura 2.4- Representação do fluxo de carga através dos semicondutores do tipo p e do tipo n. Muñoz-García, M.A. et al. (2013)	29
Figura 2.5- Possível configuração para um sistema de captação de vapor de água, utilizando uma célula de Peltier. Nandy, A. et al. (2014)	30
Figura 2.6- Representação da configuração Rotating Dissecant Wheel. Adaptado de Autodesk Education Community (2014)	31
Figura 2.7- Processo simples de humidificação-desumidificação. Narayan, G. P. et al. (2010)	34
Figura 2.8- Processo de dessalinização por evaporação parcial em múltiplas etapas. Pagaiame, L. (2011).....	34
Figura 2.9- Representação do processo de Cloud Seeding. Strange Sounds (2014)	36
Figura 2.10- Representação da destilação solar. adaptado de Loo, S. et al. (2012).....	38
Figura 2.11- Representação da osmose direta e inversa. adaptado de Bergstedt, M. (2015) ..	40
Figura 3.1- Gráfico psicrométrico. Sam C. M. Hui (2015).....	42
Figura 3.2- Diagrama T-s para vapor condensável com mudança de fase.	47
Figura 3.3- Ciclo hidrológico. Martinez, M. F. R. (2011)	47
Figura 4.1- Esquema genérico da BC-Bomba de Calor e da MF-Máquina Refrigerífica.	50
Figura 4.2- Esquema do ciclo do refrigerante, num equipamento de compressão de vapor. ..	52
Figura 4.3- Diagrama T-s para o ciclo de Carnot invertido.	53
Figura 4.4- Diagrama T-s para o ciclo de refrigeração ideal.	54
Figura 4.5- Esquema do circuito do ciclo de refrigeração real.	57
Figura 4.6- Diagrama T-s do ciclo de refrigeração real, segundo Çengel, Y. A., Boles, A. (1998).	58
Figura 4.7- Diagrama T-s do ciclo de refrigeração real, segundo Oliveira, P. P. (2012).	59
Figura 4.8- Componentes de um sistema de desumidificação.	60
Figura 4.9- A- Dispensador de água comum; B- Sistema de condensação. EcoloBlue 30 Series (2015)	64

Figura 5.1- Equipamento TROTEC TTK 75 ECO. TTK 75 Eco (2014)	67
Figura 5.2- Componentes visíveis externamente. TTK 75 Eco (2014)	68
Figura 5.3- Localização do evaporador (9), do condensador (10), da bandeja de condensado (11) e do sensor de temperatura (12).....	69
Figura 5.4- Localização da electroválvula (13).....	70
Figura 5.5- Localização do dispositivo de expansão (15) e da ligação do circuito de descongelação ao evaporador (14).	70
Figura 5.6- Localização do compressor (16).	71
Figura 5.7- Localização do ventilador (17)	71
Figura 5.8- Distância mínima às paredes.	72
Figura 5.9- Esquema da unidade de ar condicionado.	73
Figura 5.10- Dimensões da câmara climática utilizada (mm). Pires, L. C. C. (2010)	74
Figura 5.11- Dimensões do módulo oco de ligação utilizado (mm). Pires, L. C. C. (2010)	74
Figura 5.12- Composição das paredes da câmara e localização das aberturas para entrada e saída de ar das câmaras (mm). Pires, L. C. C. (2010).....	75
Figura 5.13- A-Pormenor do fecho da câmara; B- Localização da sonda no interior da câmara.	75
Figura 5.14- Pormenor da ligação da mangueira ao depósito do condensado.	76
Figura 5.15- Medição do condensado obtido pela unidade de desumidificação em análise.	77
Figura 5.16- Localização dos termómetros e da sonda termo higrométrica; A - Pormenor da utilização dos 4 termómetros; B - Pormenor da implementação da sonda termo higrométrica; C - Pormenor da implementação dos termómetros.....	78
Figura 5.17- Pormenor da análise instantânea dos gráficos realizados através da obtenção dos valores das sondas termo higrométricas.....	79
Figura 5.18- Esquema do processo 1.	80
Figura 5.19- Variação das condições ambiente no interior da câmara climática, para o ensaio 3.	82
Figura 5.20- Esquema do processo 2.	82
Figura 5.21- Variação das condições ambiente no interior da câmara climática, para o ensaio 11.	83
Figura 5.22- A - Regulador de potência; B - Controlador de temperatura.....	83
Figura 5.23 - Esquema do processo 3.	84
Figura 5.24 - Variação das condições ambiente no interior da câmara climática, para o ensaio 8.	85
Figura 5.25- Esquema do processo 4.	86

Figura 5.26 - Variação das condições ambiente no interior da câmara climática, para o ensaio 10.	87
Figura 5.27- Esquema do processo 5.	88
Figura 5.28- Variação das condições ambiente no interior da câmara climática, para o ensaio 13.	89
Figura 5.29- Esquema do processo 6.	89
Figura 5.30- Variação das condições ambiente no interior da câmara climática, para o ensaio 12.	90
Figura 5.31- Esquema do processo 7.	91
Figura 5.32 - Variação das condições ambiente no interior da câmara climática, para o ensaio 15.	92
Figura 5.33- Gráfico da produção de água relativa a cada ensaio realizado.	101
Figura 5.34- Potência utilizada pela unidade de desumidificação durante cada ensaio realizado.	102
Figura 5.35- Energia utilizada por litro de água produzida, para cada ensaio realizado.	103
Figura 5.36- Custo do litro de água produzido para cada ensaio realizado.	104

Lista de Tabelas

Tabela 1- Variação da temperatura do ar e do fluido refrigerante ao longo do circuito da bomba de calor.....	28
Tabela 2- Especificações do equipamento. TTK 75 Eco (2014)	69
Tabela 3- Tabela de apresentação de todos os ensaios obtidos através da utilização do processo 1.	81
Tabela 4- - Tabela de apresentação do ensaio obtido através da utilização do processo 2. ...	83
Tabela 5- Tabela de apresentação dos ensaios obtidos através da utilização do processo 3. .	85
Tabela 6- Tabela de apresentação dos ensaios obtidos através da utilização do processo 4. .	87
Tabela 7- Tabela de apresentação do ensaio obtido através da utilização do processo 5.	88
Tabela 8- Tabela de apresentação do ensaio obtido através da utilização do processo 6.	90
Tabela 9- Tabela de apresentação do ensaio obtido através da utilização do processo 7.	91
Tabela 10- Tabela de comparação entre o ensaio 1 e o ensaio 9.	93
Tabela 11- Tabela de comparação entre o ensaio 7 e o ensaio 15.....	94
Tabela 12- Tabela de comparação entre o ensaio 4 e o ensaio 5.	95
Tabela 13- Quantidade de água produzida por hora, para cada ensaio.	96
Tabela 14- Potência utilizada no ensaio, para cada ensaio.	98
Tabela 15- Quantidade de energia utilizada por litro de água produzido e o custo por litro da água produzida, para cada ensaio.	100

Lista de Acrónimos

MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
CFC	Clorofluorcarbonetos
CoR	Condenser-on-Roof
CoG	Condenser-on-Ground
Rac	Roof-as-Condenser
COP	Coefficiente of Performance
SODIS	Solar water disinfection

Capítulo 1

1. Introdução

Água potável é considerada água própria para consumo de humanos e de animais. A água pode ser obtida naturalmente potável, como no caso das nascentes de água, podendo, ainda, ser obtida através de tratamentos químicos ou físicos. Toda a água considerada potável deve ser submetida a controlos de qualidade constantes para evitar o consumo de água contaminada.

Segundo o World Water Vision Report, referido pelo World Water Council (2000), *“There is a water crisis today. But is not about having too little water to satisfy our needs. It is a crisis of managing water so badly that billions of people - and the environment - suffer badly.”*.

Atualmente, ainda é possível tomar medidas que previnam o agravamento da crise mundial de água potável. A existência de consciência, de que os recursos hídricos existentes no planeta são limitados têm vindo a aumentar, assim como a perceção da necessidade de proteger este recurso em termos de quantidade e de qualidade. A crise de água potável não afeta apenas as suas reservas, mas também todos os seres humanos, sendo a água considerada como um assunto de todos (i.e., *“Water is a everybody’s business”*), como referido no segundo World Water Forum (World Water Council, 2000).

Um dos fatores originado pela má gestão dos recursos hídricos potáveis é o acesso ao mesmo. Em países desenvolvidos, o esforço necessário para obter este bem essencial à vida humana é reduzido, bastando abrir uma torneira para obter água, em muitos casos enriquecida por substâncias que ajudam à saúde humana. Em países em desenvolvimento, grande parte da população não tem acesso a água potável.

A água é um bem essencial não só para o ser humano, como para as economias locais e nacionais, sendo necessária para criar e manter empregos em todos os setores da economia. A gestão sustentável dos recursos hídricos também é considerada uma força motriz essencial para o crescimento verde e o desenvolvimento sustentável. A mesma gestão sustentável de recursos hídricos, de infraestruturas hídricas, do acesso ao abastecimento seguro, confiável e regular de água, bem como serviços adequados de saneamento, melhora os padrões de vida, levando ao melhoramento das condições de trabalho e à maior inclusão social.

A negligência das questões ligadas à água, gera impactos negativos nas economias, nos meios de subsistência e nas populações, originando resultados potencialmente catastróficos e extremamente dispendiosos. A gestão insustentável dos recursos hídricos e de outros recursos naturais pode causar graves danos às economias e à sociedade, invertendo significativamente

os benefícios conquistados duramente na redução da pobreza, na criação de empregos e no desenvolvimento.

A relação entre a água e o emprego, deve ser tratada por meio de políticas e investimentos coordenados, tanto em países desenvolvidos como em desenvolvimento.

Como introdução desta dissertação é abordada a problemática da escassez de água, a sua origem, classificação e resultado. São apresentadas ainda, de forma sintetizada, as soluções possíveis de serem utilizadas para reverter ou minimizar esta questão.

Na subsecção da revisão bibliográfica são apresentados artigos, dissertações e estudos, utilizados como base teórica e comparativa para a realização deste trabalho.

São ainda apresentados os objetivos e a contribuição desta dissertação, sendo, por último, dada a conhecer uma visão geral da organização do presente trabalho.

1.1. Perspetiva geral

Em termos químicos, a água é uma molécula formada por dois átomos de hidrogénio e um átomo de oxigénio, sendo denominada de H_2O . Sob a pressão atmosférica encontra-se no estado líquido entre o 0 e os 100 °C, estando no estado gasoso após ser submetida a temperaturas superiores a 100 °C e no estado sólido quando sujeita a temperaturas inferiores a 0 °C. Uma das incríveis características deste recurso é que quando são atingidos os 4 °C este expande antes de ocorrer a mudança de estado. Este facto confere ao gelo a capacidade de flutuar.

Não existe substituto para a água, sendo esta considerada um recurso multifacetado, assumindo diversos significados, dependendo do contexto em que é aplicado. A população mundial valoriza a água em termos económicos e não económicos, podendo ainda assumir um grande significado espiritual e cultural.

Desde os primórdios da civilização que o Homem se localiza perto de reservas de água. Esta escolha de localização deve-se a inúmeros fatores, entre os quais as atividades agrícolas e a obtenção deste bem essencial para consumo próprio. Com o avançar dos anos e com o aumento populacional, foram sendo alargados os centros urbanos, o que exigiu a criação de sistemas de distribuição mais desenvolvidos. Posteriormente, com o aparecimento de pragas, com a poluição do solo e da atmosfera terrestre foi necessária a criação de centros de tratamento de água. Devido ao aumento dos centros urbanos, gerando grandes cidades, ocorreu o desenvolvimento de barragens, situadas, em certos casos, a centenas de quilómetros. Contudo, com o aumento da população e com a diminuição da quantidade de água doce disponível no planeta, de forma natural, começaram a surgir novos debates sobre o uso sustentável da mesma.

Segundo Nunes, L. et al. (2009) a superfície do planeta Terra é constituída por 2/3 de água, estimando-se que apenas 3% é água doce. Desses 3% apenas 1% se encontra à superfície, encontrando-se os restantes 99% distribuídos por água subterrâneas (22%) e Icebergs/Glaciares (77%), significando, por isso, que apenas temos acesso a 23% (i.e., a junção da água doce existente à superfície e existente nas águas subterrâneas) dos 3% de água doce existente no planeta. Parte desse 1% de água doce existente na superfície terrestre, menos de 0,4% encontra-se em rios, aproximadamente 61% encontra-se em lagos e os restantes 39% estão localizados na atmosfera e no solo. A água disponível na atmosfera terrestre sob a forma de vapor de água representa 0,001% do total de água existente no planeta Terra (Anderson, B. 2009).

Segundo o resumo executivo sobre Água e Emprego, englobado no Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos - (2016) (UN Water (2016)), desde o início dos anos 80, a quantidade de água doce captada mundialmente tem aumentado 1% por ano, sendo que nos países desenvolvidos a mesma se tem mantido estável ou até mesmo tem vindo a diminuir.

Segundo Savenije, H. H. G. (2000) a falta de água em certas zonas do planeta, não é um problema de escassez de água, mas sim de gestão deste recurso. Se as reservas de água doce estivessem distribuídas de forma igual por todos os continentes, ou, por outro lado, estivessem distribuídas de forma a que satisfizessem cada uma das zonas deste (i.e., que existissem mais reservas de água doce nas zonas onde é mais necessária, zonas áridas, e menos onde a água, na realidade, é abundante, Continente Americano), a sua quantidade não seria problema num momento atual. Contudo, isto não é o que ocorre, havendo, como referido, locais onde existe excesso de água por habitante (i.e., por exemplo na América Latina existe 12 vezes mais água por pessoa do que no Sul da Ásia, sendo esta parte do continente Americano representativo de 31% dos recursos hídricos do planeta).

A água não se teria tornado essencial para a vida no planeta Terra se não se mantivesse no estado líquido e isso só é possível devido ao extraordinário e relativamente estável intervalo de temperaturas verificado à superfície do planeta. Ao longo dos anos tem-se vindo a observar um aumento da temperatura média do planeta, contribuindo isso para um degelo acelerado dos calotes polares. Foi ainda estimado, pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, que por cada grau de aumento da temperatura global, aproximadamente 7% da população mundial ficará exposta à diminuição de, pelo menos, 20% no acesso a recursos hídricos. Algumas áreas do planeta atravessam dramáticas alterações na disponibilidade de água gerando variações sazonais no fornecimento e na procura. Estas alterações na disponibilidade deste recurso, são originadas pelas alterações climáticas, que por sua vez aumentam a variação dos padrões de precipitação e evaporação normais. Em suma, alguns países recebem grandes quantidades de água ao longo de todo o ano, enquanto que em outras áreas do planeta, a precipitação, ocorre de forma concentrada, normalmente em estações

húmidas. Outro problema ambiental tem a ver com a precipitação em excesso ou com a falta dela. Nos casos em que há demasiada precipitação são observadas inundações, mas quando esta não ocorre são observadas secas, gerando a escassez de água nesses locais, levando a uma necessidade de implementação de métodos de captação de água não afetados ou até mesmo apoiados pelas alterações climáticas. Porém a ausência de precipitação nem sempre se reproduz numa seca, este facto depende da capacidade de armazenamento de humidade pelo solo, mas, por norma, os países mais suscetíveis de sofrer de fraca pluviosidade, são também aqueles possuem um solo com menos capacidade de absorção.

O termo escassez de água é aplicado quando uma pessoa ou conjunto de pessoas não tem acesso a água de forma acessível e segura, por forma a satisfazer as suas necessidades básicas.

Segundo o The United Nations World Water Development Report (2016) - Water and Jobs (UN Water (2016)) a escassez de água é, principalmente, resultado da combinação da variabilidade hidrológica e do elevado uso humano. Apesar dos riscos mensais da escassez de água serem mais graves em África e na Ásia, a escassez sazonal pode ser verificada em todos os continentes. Para 2050 foi projetado um aumento no risco de escassez de água, prevendo-se que 2,3 biliões de pessoas sofrerão de restrição hídrica. No ano de 2030 o mundo irá enfrentar um défice hídrico de 40%.

Segundo Savenije, H. H. G. (2000) continua a existir a necessidade de desenvolver um método capaz de fornecer uma imagem mais real do estado da condição vivida no planeta, em termos de escassez de água. Este método ou indicador deve ter em conta os recursos renováveis, as variações temporais e espaciais do fornecimento de água, a influência das alterações climáticas e ainda deve distinguir entre necessidades primárias e secundárias.

Como referido por Rijsberman, F. R. (2006) atualmente existem diferentes métodos de definição e de medição da escassez de água, sendo que o mais utilizado, relaciona a quantidade de água renovável existente por ano com a população. Existem valores utilizados como delimitantes da escassez existente numa zona, sendo que o primeiro sinal de perigo ocorre quando a quantidade de água renovável é inferior a 1700 m³ por pessoa por ano. É considerado que um local se encontra com escassez de água quando este valor baixa para os 1000 m³ por pessoa por ano. A escassez absoluta é verificada quando apenas podem ser encontrados 500 m³ de água doce por pessoa por ano. Estes valores foram obtidos com base em estimativas do número de pessoas que pode, razoavelmente, sobreviver com uma certa quantidade de água.

Em termos de sumário das tipologias de análise de diferentes tipos de escassez, foram descritas por Wolfe & Brooks (2003) quatro maneiras diferentes de a ver. A primeira trata-se da escassez física ou de primeira ordem, sendo definida pelas quantidades volumétricas de água, o crescimento da população, a projeção da procura e o crescimento industrial. Em segundo encontra-se a escassez económica ou de segunda ordem, definida pelo inadequado desenvolvimento das infraestruturas hídricas, fraca gestão dos recursos e distribuição

institucional. A terceira visão é denominada de capacidade adaptativa ou de terceira ordem, descrita pelo contexto social, político e económico da gestão da água. Por último aparece a escassez resultante de processos político-sociais, onde a escassez é proveniente de questões político-sociais.

Numa tentativa de vencer estes percalços têm sido desenvolvidos equipamentos que aproveitam recursos, que podem ser considerados inesgotáveis, como a água dos oceanos e o vapor de água existente na atmosfera, uma vez que dificilmente são afetados pelas atividades humanas.

O vapor de água existente na atmosfera terrestre é proveniente da evaporação que ocorre nos reservatórios de água superficial, sendo apresentado como um componente variável, em termos de quantidade (i.e., a percentagem de vapor de água existente no ar atmosférico é variável). Este pequeno reservatório de água é bastante importante, funcionando como uma fonte renovável. Através da precipitação é fornecida água no estado líquido e no estado sólido, reabastecendo as reservas de água doce no subsolo ou à superfície. Por outro lado, o fluxo de vapor de água que ocorre entre os oceanos, localizados em zonas tropicais, e as regiões mais frias, fornece um fluxo de calor entre as baixas e as altas latitudes terrestres. Tudo isto é englobado no ciclo hidrológico, começando este na evaporação da água existente nos oceanos e no solo, sendo estimado que esta é seis vezes maior nos oceanos, em comparação com o solo. Uma vez atingida a atmosfera, o vapor de água condensa e, mais tarde, é depositado sob a forma de precipitação. Quando ocorre a pluviosidade, esta atinge quatro vezes mais os oceanos do que o solo terrestre, em parte devido ao rácio de ocupação da superfície terrestre. Quando a precipitação atinge o solo, sofrerá um de três destinos. Poderá evaporar novamente e retorna ao ciclo, poderá abastecer as reservas existentes (i.e., penetra no solo), como referido anteriormente e ainda poderá escoar do solo originando rios e, eventualmente, fluindo para oceanos ou lagos.

Posto isto, é perceptível que o vapor de água existente na atmosfera terrestre pode ser uma importante fonte de água doce no futuro, desde que sejam utilizados os equipamentos ou instalações necessárias para a sua captação, juntamente com processos capazes de tornar a água extraída potável.

1.2. O problema em estudo e a sua relevância

Água doce é o mais importante recurso para a humanidade, qualquer que seja a cultura, situação económica e atividade ambiental. Trata-se de um fator que condiciona a existência de vida no planeta, limitando ou permitindo qualquer desenvolvimento social ou tecnológico. Este recurso proporciona o bem-estar ou a miséria, a cooperação ou o conflito. Por forma a atingir a preservação deste, devemos garantir a proteção dos sistemas hídricos.

Segundo o autor Kuan Tzu (Stikker, A. (1998)) “Now water is the blood and the breath of the earth, flowing and communicating as if in muscles and veins. Therefore, we say that water is the preparatory raw material of all things”, demonstrando a importância da água para a humanidade, comparando-a com o sangue e a respiração.

Quando não existir água suficiente, haverá comida insuficiente, independentemente do quanto capazes fomos de aumentar as colheitas. Faz sentido, portanto, analisar o passado, o presente e prever o futuro da disponibilidade da água doce. Atualmente o que está em jogo passa por preservar este recurso quer em termos de quantidade quer de qualidade. A redução da disponibilidade de água irá intensificar ainda mais a disputa pela água, pelos seus utilizadores, afetando os recursos hídricos regionais, a segurança energética e alimentar, a segurança geopolítica, provocando migrações em várias escalas.

Em certas regiões do nosso planeta, a escassez de água doce é uma enorme limitação ao bem-estar da população que habita nas mesmas. Segundo o The United Nations World Water Development Report (2016) - Water and Jobs (UN Water (2016)) estima-se que num futuro, não muito longínquo, cerca de 2,8 bilhões de pessoas, de 48 países, sofrerão com a escassez de água potável e ainda que a cada 8 segundos uma criança morrerá devido a desidratação ou por ter ingerido água não controlada. Em termos estatísticos, aproximadamente 25% da população mundial, deixará de ter acesso a água potável canalizada. O continente africano e asiático serão os que principalmente irão padecer deste acontecimento.

Como referido por Allerd Stikker (1998), no ano de 1955 encontravam-se 7 países a ultrapassar uma crise hídrica, sendo que em 1990 foram adicionados mais 13 países a essa lista. As Nações Unidas estimam que em 2025 mais 14 países poderão incorporar esta lista.

Segundo Ghislain de Marsily (2007) para prever a procura de água para o ano de 2050 é necessário prever o número de habitantes no planeta, prever a evolução dos hábitos alimentares e ainda a eficiência da produção de comida por m³ de água. Quanto à previsão da evolução populacional, prevê-se que seja atingido um pico no ano de 2050 e posteriormente comece a existir um decréscimo, exceto no continente africano. A evolução dos hábitos alimentares é uma das previsões mais difíceis de obter, sendo importante referir que, se a atual tendência de aumento de alimentação vegetariana, continuar, haverá uma maior procura de água, uma vez que para produção de vegetais é necessária maior quantidade de água do que para produção de carne. A última previsão necessária para estimar a procura de água no ano 2050, eficiência da produção de comida por m³ de água, indica que pode haver um aumento de 20% da eficiência, reduzindo-se assim a procura do recurso.

Nas últimas décadas têm sido desenvolvidas e aprimoradas diversas tecnologias para abrandar a utilização dos recursos naturais (i.e., recursos naturais onde pode ser extraída água doce) e ainda para abastecer zonas onde, em certas alturas do ano ou até mesmo durante grande parte do ano, a água é um bem escasso. As tecnologias referidas são a dessalinização, transporte de

água, transporte e processamento de icebergs, reutilização de águas, modificação meteorológica e extração de vapor de água da atmosfera. O processo mais utilizado é a dessalinização, mas apresenta duas desvantagens significantes, a necessidade de um investimento bastante elevado e a poluição provocada. As tecnologias de captação do vapor de água atmosférico tratam-se de novas tecnologias que podem competir com o processo de dessalinização, em termos de capacidade de extração, tendo a vantagem de serem mais simples e menos dispendiosas em termos de operação e de manutenção. A capacidade de extração depende do tamanho da instalação, podendo fornecer apenas alguns litros até milhões de litros por dia. O processamento de vapor de água atmosférico, tem vindo a aumentar o seu peso entre as soluções apresentadas, podendo ser instalado em qualquer ponto do globo, servindo de apoio a instalações militares improvisadas, instalações de apoio a refugiados, entre outros, possuindo um vasto lote de aplicações. Num futuro bastante próximo espera-se que em cada edifício possa ser incorporada uma unidade de processamento de vapor de água, não dependendo dos meios de fornecimento municipal, ou até mesmo implementar uma unidade central de dimensão superior, com o intuito de fornecer um conjunto de casas na sua proximidade. Métodos de processamento apresentam sempre gastos energéticos, mas a sua utilização não constitui uma ameaça ao meio ambiente. A captação de água que ocorre em meio doméstico pode ser considerada como um ganho secundário (i.e., o equipamento é utilizado para melhorar a qualidade do ar, por isso a água extraída é considerada como objetivo secundário). A implementação destes sistemas em habitações ou edifícios de serviços, em que uma unidade principal possua tal capacidade, de modo a que possa extrair e tratar o ar de todo o edifício, reduzirá os gastos do edifício, em termos hídricos. A quantidade de água extraída do ar ambiente terá de ser tratada, podendo depois ser utilizada para qualquer fim.

A tecnologia das bombas de calor continua em desenvolvimento, com principal ênfase na substituição dos fluidos refrigerantes, por forma a descontinuar a utilização de CFCs. O melhoramento do desempenho energético e a redução do investimento são outros dos temas em debate, por forma a ocorrer um melhoramento da tecnologia. As bombas de calor são imensamente utilizadas, principalmente quando é necessário fornecer tanto calor como frio.

1.3. Revisão bibliográfica

O presente subcapítulo será constituído pela revisão de alguns artigos de anteriores trabalhos, realizados por inúmeros autores, sendo, por isso, denominado de Revisão Bibliográfica.

Os trabalhos aqui referenciados tiveram especial importância na obtenção de informação sobre o estado de arte e na apreensão de grande parte dos conceitos teóricos apresentados posteriormente nesta dissertação.

Como tal, nas subsecções seguintes, serão primeiramente apresentados trabalhos que elucidam sobre a presença de água potável no planeta Terra e a sua importância. Em segundo lugar serão

descritos trabalhos onde foi realizada uma revisão dos métodos possíveis de utilizar para a obtenção de água potável. Por último serão apresentados trabalhos que descrevem ensaios realizados com equipamentos de obtenção de água através da captação de vapor de água do ar atmosférico.

1.3.1. Presença de água potável no planeta Terra e a sua importância

Nesta subsecção, serão revistos diversos trabalhos, realizados quer por entidades responsáveis pelo estudo dos recursos hídricos e tudo o que os envolve, quer por autores independentes, que visam a distribuição dos recursos hídricos no planeta, o seu estado e a sua importância.

Nunes, L., et al. (2009) realizaram um trabalho de recolha de informação sobre a disponibilidade de água doce no planeta Terra, concluindo, com base no United Nations Water Development Report (2003), que cerca de 97% da água existente no nosso planeta se encontra contida nos oceanos e que dos restantes 3% são água doce. Desses 3%, 77% encontra-se nos glaciares e icebergs e 22% representam águas subterrâneas. O restante 1%, águas superficiais, dividem-se em 61%, correspondente aos lagos, 39%, representando a água contida na atmosfera, e os restantes 0,4% encontram-se nos rios. A água doce, pronta a utilizar pelo homem representa 1,7% de toda a água, correspondendo esta percentagem a 24,2 milhões de km³ de água, sendo excluído deste valor a água doce contida em calotes polares e icebergs. Os autores deste trabalho utilizam citações de outro autor, por forma a exemplificar a má distribuição das reservas de água doce no planeta. Segundo o Dr. Rajendra K. Pachuri, os países da América Latina possuem 12 vezes mais água por pessoa do que o Sul da Ásia, tendo esses mesmos países mais água do que aquela que podem na realidade consumir. Pelo mesmo autor é ainda referido que um total de 1531 milhões de pessoas (i.e., 1,2 biliões de asiáticos, 250 milhões de africanos e 81 milhões de latino-americanos) irá ser exposto a um “stress hídrico” a partir de 2020. Em países como a Ásia, onde a água foi sempre tida em conta como um recurso abundante, a sua disponibilidade tem vindo a ser reduzida. O mesmo deverá acontecer com os países da América Latina, como foi dado a entender pela afirmação do Dr. Rajendra K. Pachuri. Atualmente no planeta Terra têm sido utilizados cerca de 30% da água existente nos recursos hídricos, podendo até 2025 este valor subir para os 70%.

Através do The United Nations World Water Development Report (2016) - Water and Jobs (UN Water (2016)), é possível concluir que as reservas mundiais de água doce são consideradas renováveis, devido ao contínuo ciclo de evaporação, precipitação e *runoff*¹, denominado de ciclo hidrológico, que dita a distribuição desta e a sua disponibilidade ao longo do tempo e espaço. Existem diferentes métodos de definição da escassez de água, sendo que o mais utilizado se baseia na medição da capacidade de fornecimento de água renovável *per capita*. Este valor encontra-se abaixo do normal se, para uma determinada zona geográfica, for inferior

¹ Escoamento superficial é a terminologia usada em hidrologia que define o fluxo de água que ocorre na superfície do solo quando este se encontra saturado de humidade.

a 1700 m³ *per capita* por ano. Caso o fornecimento baixe dos 1000 m³ *per capita*, é considerado uma escassez crónica, sendo que se torna absoluta escassez se ultrapassar os 500 m³ *per capita*. É transmitido que algumas áreas do planeta passam por alterações dramáticas na disponibilidade da água ao longo dos meses, sendo gerada uma variação sazonal na oferta e na procura, quer em estações secas ou húmidas.

No Resumo executivo sobre Água e Emprego, englobado no Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos (2016) (UN Water (2016)), é realizada uma perspetiva mundial sobre a água. Nessa perspetiva interessa saber que a utilização de água doce tem aumentado cerca de 1% ao ano, desde os anos oitenta, sendo que nos países altamente desenvolvidos essa captação está estagnada ou até tem vindo a diminuir levemente. Torna-se importante referir que a escassez de água limitará o crescimento económico e a geração de emprego, sendo que a quantidade de água está diretamente relacionada com o a sua qualidade. Quanto pior a qualidade da água mais elevado será o seu custo, devido à necessidade de tratamento. A disponibilidade de água poderá ainda afetar a segurança geopolítica, podendo levar a migrações em várias escalas.

Nos Fatos e números sobre Água e Emprego, englobado no Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos (2016) (UN Water (2016)), é referido que a escassez de água é o resultado da combinação da variabilidade hidrológica e do elevado uso humano, podendo esta ser atenuada com infraestruturas de armazenamento. É descrito que segundo o Global Environmental Outlook's Baseline Scenario (2012), foi projetado um aumento do risco de escassez de água até 2050, com uma perspetiva de 2,3 biliões de pessoas vivendo em áreas com grave restrição hídrica, especialmente no norte e no sul de África e da Ásia Central. O mesmo estudo diz que o planeta irá enfrentar um défice hídrico de 40% em 2030, caso nada seja feito para contrariar a situação. Por forma a contrariar estes números, é fundamental melhorar a eficiência do uso da água. Relativamente à saúde ambiental é dito, no presente relatório que as condições ambientais hídricas necessárias para se manter um nível razoável dos corpos de água doce, variam, mundialmente entre os 20 e os 50%, da média anual do fluxo hídrico dos rios. Foi estimado que em 2050, um quinto da população mundial viverá em ambientes onde o risco de qualidade de água é elevado, devido ao excesso de procura bioquímica de oxigénio e ainda que, no mesmo período de tempo, um terço da população mundial enfrentará riscos pelo excesso de azoto e fósforo na água. Por último para as alterações climáticas e os eventos extremos, como a seca ou inundações, baseadas na avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática, foi estimado que, a cada grau de aumento de temperatura global, aproximadamente 7% da população mundial sofrerá uma diminuição de pelo menos 20% no acesso a recursos hídricos renováveis. É ainda dito que estudos demonstraram que, em 2050, entre 150 e 200 milhões de pessoas poderão ficar desabrigadas em consequência de fenómenos como desertificação, aumento do nível do mar e aumento da quantidade de eventos climáticos extremos.

Lula Mehta (2014) desenvolveu um artigo que relaciona o desenvolvimento humano e a água, explorando a aplicação de dois tipos de abordagens, por forma a estabelecer um ponto da situação, relativamente à escassez de água. A abordagem dos direitos vai além da medição volumétrica da escassez de água *per capita*, direcionando atenção para os problemas estruturais e institucionais, relativamente às desigualdades hídricas. A abordagem das capacidades foca-se na ligação entre a água e o bem-estar. É admitido que a água se trata de um recurso multifacetado, tendo todos os dias diferentes significados, nos quais as pessoas vivem as suas vidas. Podendo ter significado a nível económico, não económico e até cultural. Neste artigo é considerada uma afirmação que estima que atualmente um terço da população mundial vive em países que se encontram com escassez de água. Até 2025 prevê-se que este valor suba para dois terços. O autor define diferentes maneiras de ver a escassez de água, sendo elas a física, a económica, a capacidade adaptativa e escassez decorrente de processos político-sociais. O autor refere a enorme importância de uma maior aproximação do desenvolvimento humano da água.

Allerd Stikker (1998) desenvolveu um artigo que oferece uma visão atual e futura da escassez de água doce no planeta. Inicialmente neste artigo é abordada a constituição atômica da água, bem como as suas características principais. No ano de 1955 haviam já sete países que se encontravam a fazer face à escassez de água, sendo que no ano de 1990 foram adicionados mais treze países a esta lista. É estimado, pelas Nações Unidas, que em 2025 mais dez países, entre os quais Marrocos, Egipto e África do Sul, serão adicionados à lista de países com escassez de água, sendo esta estimativa gerada com base na previsão de crescimento populacional gerado pela mesma entidade. Estas previsões têm como limite os 1000 m³ de água doce por habitante, por ano.

Frank R. Rijsberman (2006) realizou uma revisão dos indicadores de escassez de água, argumentando sobre qual a classificação, da escassez de água, como um fato ou uma ficção. O indicador mais utilizado é o Indicador de tensão de água de Falkenmark, desenvolvido em 1989, baseando-se no valor de 1700 m³ por pessoa por ano, para determinar a existência de escassez de água. Outro dos indicadores, é o Índice de vulnerabilidade dos recursos hídricos. Segundo este índice, se um país atingir valores entre 20 e 40% de rácio, entre a água extraída de rios e águas subterrâneas para uso humano e os recursos renováveis de água, encontra-se perante o problema de escassez de água. O Indicador físico e económico de escassez foi desenvolvido pelo Internation Water Management Institute, avaliando os três problemas. O último dos indicadores apresentados é o Índice de pobreza de água, que se compromete a refletir sobre a disponibilidade física da água, o grau pelo qual as pessoas são servidas desta e ainda a manutenção da integridade ecológica. Sendo ainda previsto que em 2030 trinta e cinco países, situados na Africa e na Ásia, possuam menos de 1500 m³ de água, por pessoa, por ano.

H. H. G. Savenije (2000), estudou os indicadores da escassez de água, afirmando que os problemas que ocorrem em zonas áridas não são derivados da escassez de água, mas sim da má

gestão do recurso. Justifica esta afirmação com o facto de existir virtualmente água suficiente para satisfazer as necessidades básicas das pessoas. Em suma, o problema atravessado deve-se mais a estilos de vida, fraca gestão do recurso e falta de financiamento, do que à indisponibilidade da água. No presente artigo é descrita, pelo autor, uma necessidade de desenvolvimento dos indicadores de escassez de água que forneçam uma visão mais realista da falta do recurso em diferentes partes do mundo. Um indicador adequado deve ter em conta os recursos renováveis, a variação temporal e espacial e ainda as influências climáticas.

Ghislain de Marsily (2007) realizou uma previsão dos recursos de água para o ano de 2050, demonstrando que, em 2006, metade da água que atingia a superfície terrestre sob a forma de chuva era evaporada novamente para a atmosfera. Grande parte do planeta Terra atravessa uma ligeira ou nula falta de água doce, sendo que as restantes já se encontram em escassez física, económica ou próximos da escassez física. Por forma a prever a água necessária para o ano de 2050 é necessário prever a população total do planeta, como serão os hábitos alimentares e qual será a eficiência da utilização dos recursos para produção de alimentos. Em 2050, com o aumento da população e o aumento da necessidade de produção de bens alimentares, mais de metade dos ecossistemas terrestres poderão desaparecer, aumentando o risco de secas e acontecimentos climatéricos extremos, que podem levar à subida do custo dos alimentos e da água.

Bruce Anderson (2009) apresenta um capítulo, no seu livro *Visualizing Weather and Climate*, referente à presença da água na atmosfera, onde é abordado, principalmente, o ciclo hidrológico. O calor latente é apresentado como a energia necessária para quebrar ligações moleculares, sendo necessário fornecê-lo para ocorrer uma mudança de fase sólido-líquido, líquido-gasoso e sólido-gasoso. No sentido inverso a energia é libertada. O vapor de água existente na atmosfera representa apenas 0,001% da hidrosfera, sendo um importante reservatório, abastecendo os reservatórios de água doce na superfície terrestre. Sendo ainda referido, que o facto de as moléculas de água, de forma individual, mudarem de estado continuamente, algumas evaporando e outras condensando, é determinante para um aumento ou diminuição da humidade atmosférica.

1.3.2. Trabalhos de revisão de métodos de obtenção de água potável

Na presente subsecção, serão abordados trabalhos realizados por diversos autores com o intuito de rever todos os processos que podem ser utilizados para obtenção de água potável. Posto isto, nesta subsecção encontra-se presente um importante meio de comparação e de apresentação de processos.

Roland V. Wahlgren (1993) escreveu um artigo para a revista *Waterlines*, onde abordava o processamento de vapor de água atmosférico. Referindo que existem dois métodos de captação do vapor de água existente na atmosfera terrestre. A primeira passa pela intercepção direta das

gotas de água suspensas, enquanto que a outra obriga ao processamento do vapor de água. A captação direta das gotas de água suspensas não engloba a mudança de fase, incorporando menos gastos energéticos, enquanto que no processamento é necessária a utilização de equipamentos para transformar vapor de água em água líquida. Para o processamento é requerida energia, não dependendo a sua utilização de condições meteorológicas, alterações sazonais de nevoeiro ou da existência de nuvens baixas. Quando ocorrem estas alterações é apenas afetada a sua eficiência, caso não ocorram as condições mais favoráveis. O autor afirma que a 20 °C, o calor latente de vaporização ou condensação é de $2,45 \cdot 10^6$ J/kg, sendo, respetivamente, entregue e libertada. Dentro do método que utiliza o processamento, é possível utilizar o arrefecimento de superfícies, substâncias dessecantes ou indução de forma controlada de uma convecção de ar numa estrutura do tipo torre. A primeira experiência realizada para captação de água do ar atmosférico, recorrendo a arrefecimento de superfícies, ocorreu em 1950, sendo obtidos entre 50 l e 70 l por dia. A utilização de substâncias dessecantes ocorreu pela primeira vez em 1986, enquanto que a convecção controlada de ar numa torre realizou-se em 1978, pela primeira vez.

O mesmo autor, Roland V. Wahlgren, em 2001, estudou os processos de produção de água potável, a partir de vapor de água atmosférico, afirmando que as tecnologias de processamento de vapor de água atmosférico podem ser concorrentes da dessalinização, obtendo valores de captação semelhantes, tendo a vantagem de serem mais simples, menos dispendiosas de operar e de manter. São apresentadas as características de cada tipo de método passível de ser utilizado para processamento de vapor de água, bem como as suas diferenças, vantagens e desvantagens. Através da comparação com outras formas de captação de água ou de obtenção de água, o processamento de vapor de água pode ser apresentado como uma das formas de obtenção de água potável mais caro. O autor informa que a água obtida através do processamento pode não ser potável, devido à poluição existente na atmosfera e também devido ao local de armazenamento. Para tal é necessário o tratamento e descontaminação, da água extraída, recorrendo a ozono ou a radiação ultravioleta. Após a descontaminação deve ocorrer a mineralização, por forma a retirar o sabor a água destilada e para promover a saúde gástrica.

Etan Bar (2004), apresentou uma nova tecnologia de obtenção de água, com um consumo energético reduzido. Primeiramente no artigo o autor faz referência à extração da humidade do ar, descrevendo este método de obtenção de água potável, como um recurso alternativo, utilizado desde os tempos bíblicos. A tecnologia apresentada utiliza um sólido dessecante e um condensador pressurizado, fazendo com que a quantidade extraída não seja tão dependente das condições atmosféricas. Esta tecnologia permite a recuperação de 85% do calor latente, utilizado na condensação, podendo ainda ser apoiado com um coletor solar. É apresentada ainda uma alteração possível no equipamento, sendo o condensador pressurizado, substituído por um condensador de cilindro. Esta tecnologia força aproximadamente 50 000 m³ de ar a passar no seu interior, por cada m³ de água extraído. Como tal, por m³ de água extraída são

necessários 5kW para ocorrer o fluxo de ar no equipamento. Ao invés da utilização de 600000 kcal, para alteração de fase, são apenas utilizadas 51000 kcal, uma vez que ocorre a recuperação de 85% do calor latente.

E. Bollay et al. (2005) realizaram um artigo onde é apresentada uma tecnologia recente, o *Cloud Seeding*. A nucleação artificial das nuvens desenvolve a produção de chuva em qualquer lugar e em qualquer altura. Como perspectiva futura, pensa-se que seja possível prevenir a chuva, granizo e trovoadas. Este processo pode passar pela introdução de cristais de gelo seco nas nuvens, o vapor de água é transferido para o cristal, crescendo este rapidamente, por forma a obter massa suficiente para precipitar. Pode ainda ser utilizado fumo de iodeto de prata, sendo produzidos resultados mais satisfatórios. A área afetada depende da direção e intensidade do vento, da estabilidade ou instabilidade da massa de ar e da altura de congelamento.

G. Prakash Narayan et al. (2010), desenvolveram um relatório que visa a dessalinização pelo processo de humificação-desumificação com assistência solar para produção de água potável. Este processo utiliza energia solar para dessalinizar a água dos mares e oceanos. O processo é bastante semelhante ao ciclo hidrológico onde a água é aquecida, humificando o ar e as nuvens, sendo desumificado como chuva. No processo desenvolvido pelo homem, sendo o ciclo hidrológico fruto da natureza, o aquecimento da água do mar ocorre num coletor solar, atravessa uma torre de arrefecimento, onde ocorre a mistura do ar com o vapor de água gerado. O ar aquecido e humificado passa por um desumificador que utiliza água do mar ou do oceano para condensar o vapor de água, este processo apresenta eficiências baixas, devido ao não aproveitamento do calor latente.

WIPO Magazine (2010) publicou um artigo onde era apresentada uma inovação levada a cabo por Marc Parente, um inventor francês. Esta é capaz de extrair a humidade existente no ar, utilizando energia proveniente do vento. A energia retirada do vento é utilizada para ativar uma bomba de calor. A bomba de calor condensa o vapor de água existente no vento que passa pelas pás o aerogerador, sendo esta recolhida para um reservatório. É estimada uma produção de aproximadamente 1000 l por dia, caso o vento se encontre a uma velocidade constante de 35 km/h e a humidade se encontre aproximadamente constante. A água extraída passa por um processo de purificação, dizendo o inventor que pode ser comparável à extraída dos poços.

A.M.K. El Ghonemy (2012) realizou uma importante revisão dos métodos de obtenção de água, seja qual for a sua proveniência. O principal foco do autor foi na produção de água doce a partir do ar atmosférico, utilizando energia solar, e da dessalinização. Em relação a estes dois métodos, de obtenção de água, o autor argumentou sobre as suas necessidades e limitações. O autor apresentou vários tipos de sistemas de dessalinização que têm como base o processo de humificação-desumificação, bem como um sistema de captação de vapor de água

atmosférico recorrendo a substâncias dessecantes. Foi ainda abordada a qualidade da água extraída, os seus custos e a sua aplicação em zonas onde ocorre escassez de água.

Arun Subramani et al. (2015), realizaram uma revisão crítica das tecnologias de dessalinização, abordando as tecnologias que utilizam membranas, como a osmose, as tecnologias baseadas em processos térmicos, como a humificação-desumificação, e ainda algumas tecnologias alternativas, como é o caso das células de dessalinização microbiana e as tecnologias de ionização capacitiva. Os autores apresentam as membranas de nano-compósitos e a dessalinização por circuito fechado, como as mais promissoras na redução dos gastos energéticos. As tecnologias baseadas em aquaporinas e nanotubos oferecem elevada permeabilidade e consumos mínimos de energia. A dessalinização por osmose pode atingir baixos consumos energéticos caso sejam reaproveitados os desperdícios térmicos. As células microbianas não necessitam de uma fonte de energia externa, mas a sua aplicação em grande escala é questionável.

1.3.3. Trabalho de revisão de tecnologias de tratamento de água

Nesta secção da revisão bibliográfica, será apresentado um trabalho de revisão onde serão observáveis as técnicas mais viáveis de tratamento de água. Entendeu-se necessária a necessidade de apresentação desta temática, devido à inevitabilidade de realização de tratamento à água produzida através da captação de vapor de água atmosférico.

Siew-Leng Loo et al. (2012) realizaram uma importante revisão dos processos de tratamento de água, utilizáveis em qualquer situação. Segundo os autores as tecnologias de tratamento existentes na atualidade encontram-se divididas entre processos que realizam o tratamento com base na utilização de membranas ou processos que não utilizam membranas. Pelos autores foi elaborada uma tabela de decisão que permite a determinação de qual será o melhor processo a utilizar, dependendo da situação.

1.3.4. Trabalhos de revisão de ensaios realizados

Na presente subsecção poderão ser encontrados trabalhos de revisão de ensaios realizados com equipamentos que incorporam diversos processos de captação de água através da condensação de vapor de água do ar atmosférico.

Poderão ser observados ensaios de captação recorrendo a superfícies frias, substâncias dessecantes e sistemas considerados hídricos.

1.3.4.1. Equipamentos de captação baseados em superfícies frias

Os trabalhos de seguida apresentados serão referentes à captação de água recorrendo à utilização de equipamentos de compressão de vapor, células de Peltier e ainda a acoplação de membranas a sistemas de compressão de vapor.

1.3.4.1.1. Equipamentos de compressão de vapor

Nos trabalhos abaixo referenciados foram utilizados diversos equipamentos de compressão de vapor, denominados por bombas de calor, sendo todos eles distintos.

B. Hellstrom (1969) desenvolveu um relatório laboratorial que recaiu sobre a extração de vapor de água do ar atmosférico. O presente relatório foi publicado numa data posterior à morte do autor, com alterações realizadas pelo professor E. Reinius. Foram utilizadas unidades de desumidificação comercial, sendo aplicados diferentes valores de humidade relativa e temperatura. O fluido refrigerante utilizado foi o R12. Os ensaios experimentais foram realizados ao longo de 24 horas, sendo impostas condições de 22 °C de temperatura e 78% de humidade relativa, correspondendo a estes valores uma humidade absoluta de 15 g/m³. O autor afirma, com base nos ensaios realizados, que a eficiência do equipamento mais pequeno é baixa, sendo extraídos, quando aplicadas as condições referidas anteriormente, 12 l. Como tal foi necessário realizar os mesmos ensaios utilizando uma unidade de desumidificação maior. Foi verificado pelo autor que, se a temperatura do ar à entrada do equipamento fosse inferior a 19°C, a desumidificação era realizada intermitentemente. A temperatura imposta ao longo dos ensaios variou entre 15 e 22 °C. A quantidade de água captada variou entre 50-170 l, durante ensaios de 24 horas. O consumo energético foi de 0,5 kWh por litro de água extraída.

C. G. Carrington et al. (2000) realizaram um relatório onde foi abordada a otimização da eficiência e produtividade de um desumidificador utilizado para secar lotes de madeira, sendo analisada a sua capacidade de desumidificação e a influência do fluxo de ar. Nos ensaios realizados foram utilizadas duas configurações do condensador, mais propriamente a localização do ventilador. Em ambas as soluções foi utilizado o fluido refrigerante R114. Numa configuração foi utilizado um ventilador para cada lote de madeira, enquanto que na segunda configuração apenas foi usado um ventilador, no circuito de ar da câmara. A primeira é apresentada como mais eficiente energeticamente quando a capacidade de desumidificação é menor. Elevado caudal de ar implica um aumento do consumo energético, reduzindo a taxa de extração de humidade, resultante do cociente entre a massa de água extraída e o gasto energético. É ainda referido pelos autores que quanto maior for a capacidade de desumidificação maior será a sua capacidade de extração.

K. J. Chua et al. (2005) desenvolveram um relatório onde foi estudado o desempenho de uma bomba de calor de duas fases. O equipamento utilizava como refrigerante o R22, sendo constituído por dois evaporadores, um de baixa e outro de alta pressão interna. Quanto ao condensador foram usados dois *subcoolers* por forma a fornecer calor sensível. Foi ainda incorporado no sistema um segundo evaporador, para realizar o pré-arrefecimento, antes dos evaporadores, e um pré-aquecedor, antes do condensador. Pelos autores, foi concluído que ocorre uma recuperação de mais 35% do calor, comparativamente com uma unidade normal de apenas uma fase. A adição dos *subcoolers* apresenta melhorias no desempenho, permitindo uma

diminuição da quantidade de refrigerante no interior dos evaporadores. A realização do pré-arrefecimento e do pré-aquecimento, como referido anteriormente, possibilitou um aumento na recuperação do calor.

Badr A. Habeebullah (2009) estudou a utilização de evaporadores para extração de água em zonas quentes e húmidas, utilizando uma bomba de calor, sendo o refrigerante o R22. Os resultados deste estudo tiveram como base uma simulação algébrica, tendo sido impostas condições que variavam entre 25 e 40 °C, e ainda entre 30 e 100% de humidade relativa. A velocidade do ar à entrada do evaporador foi variada, sendo utilizados 4 valores, 2,25, 4,5, 1 e 0,5 m/s. As velocidades às quais correspondeu um maior valor de extração, foram 1 e 2,25 m/s, sendo extraído em média 1 kg/m²h, em ensaios de 24 horas. Com base nos ensaios os autores admitem que a captação diminui com o aumento da velocidade do ar, devido a uma insuficiente capacidade térmica do evaporador. Para velocidades muito reduzidas ocorre a formação de gelo no evaporador bloqueando a passagem do ar.

Alessandro Scrivani et al. (2008) implementaram um novo sistema de extração de vapor de água do ar atmosférico. A extração ocorre por arrefecimento do ar abaixo do ponto de orvalho. É constituído por um ventilador, que idealmente será alimentado por painéis fotovoltaicos, um permutador, onde é realizada a condensação do vapor de água, sendo que o refrigerante que realiza o arrefecimento do permutador é fornecido por um *chiller* de amoníaco/água. O calor fornecido a este é proveniente de uma parabólica solar. O sistema composto pelo *chiller* e pela parabólica foi descrito pelos autores como uma bomba de calor com um COP de 0,75. O sistema foi testado para condições ambiente de cidades de países do Médio Oriente e do Norte de Africa, sendo que ocorreu uma maior captação de água nas cidades localizadas próximas de grandes depósitos naturais de água, onde a humidade relativa variava em torno dos 75% e a temperatura dos 25 °C. Para, aproximadamente, estas condições foram conseguidas entre 56 e 84 m³/ano de água.

1.3.4.1.2. Sistema de compressão de vapor com utilização de membrana

O trabalho a seguir apresentado, difere dos demais devido à utilização de uma membrana sintética.

D. Bergmair et al. (2014), elaborou uma análise a uma membrana, incorporada numa bomba de calor, para captação de água a partir do vapor de água atmosférico. A membrana funciona como a primeira unidade de processamento. Esta possui uma capacidade seletiva, sendo premiável ao vapor de água, impedindo a passagem dos restantes constituintes do ar. O processamento do vapor de água, pós membrana, é realizado por uma bomba de calor e uma bomba de vácuo. Aqui o vapor de água é condensado e é coletado para um reservatório. Por último é utilizada uma bomba de recirculação por forma a criar baixas pressões no circuito de recirculação. Devido à utilização da membrana é possível reduzir a energia despendida no processo, uma vez que, a quantidade de matéria que é necessário arrefecer é menor. Foi

observado pelos autores que, com o aumento da pressão e o aumento do fluxo de recirculação a capacidade de extração diminui. Podendo, na melhor das hipóteses, atingir 18 m³/dia.

1.3.4.1.2. Células de Peltier

Os seguintes trabalhos referem a utilização de células de Peltier para obtenção de água através da condensação do vapor de água atmosférico.

M. A. Muñoz-García et al. (2013) desenvolveram um relatório onde é abordada a utilização de células de Peltier apoiadas energeticamente por painéis fotovoltaicos para a rega de árvores jovens. O sistema de captação de água possui duas câmaras separadas pela célula de Peltier, uma de baixa temperatura e outra de alta temperatura. Na câmara de alta temperatura, à qual corresponde o lado quente da célula, há a necessidade de incorporação de um pequeno ventilador para fazer a circulação do ar. A capacidade de extração, para humidades relativas inferiores a 20%, depende da diferença entre a temperatura do ar ambiente e a temperatura na superfície da célula, devendo para esta situação a diferença ser de 20 °C. Pelos autores foi definido que o melhor período do dia para captação da água é entre as 5 e as 8 horas da manhã, uma vez que o consumo de energia é menor.

Aditya Nandy et al. (2014) projetaram um gerador de água tendo como base o efeito da célula de *Peltier*, apoiada por painéis solares. O sistema é constituído por uma conduta em “u”, aparecendo numa extremidade um ventilador que força o ar às condições ambiente a passar pelo lado frio da célula, condensando o vapor de água. Após desumidificado o ar passa pelo lado quente da célula e é libertado para o ambiente a uma temperatura superior e seco. A captação do condensado ocorre na parte inferior da conduta. Este sistema de captação de água permite a obtenção de 1 l/h, durante as horas de sol.

1.3.4.1.3. Arrefecimento radiante

Girja Sharan (2011) desenvolveu três tipos de equipamento baseados no arrefecimento radiante, para fornecimento de água potável em zonas semiáridas. A distinção entre os equipamentos era a sua superfície. Um equipamento possuía uma superfície de ferro galvanizado, outro de alumínio e outro era feita de uma mistura de polietileno com dióxido de titânio e sulfato de bário. De cada tipo de equipamento foram construídos quatro sistemas, por forma a perceber qual era a melhor orientação possível. O autor verificou que quanto maior a emissividade da superfície maior será a produção, uma vez que esta atingirá temperaturas inferiores durante a noite. As melhores orientações, segundo o autor, são para Oeste e Norte, uma vez que com o nascer do sol a superfície não recebe imediatamente radiação solar, permitindo-lhe atuar um pouco mais de tempo. Uma orientação para Este reduz a produção em 5% e para Sul em 15%. Embora estes equipamentos não necessitem de energia elétrica, o autor refere que é necessário um elevado investimento, referindo que o custo da água pode estar

entre 0,04 € e 0,08 € cêntimos por litro. Quando ocorre também a captação da água da chuva, o preço é reduzido para 0,01 €/l.

1.3.4.2. Utilização de substâncias dessecantes

Os trabalhos que serão revistos têm como base a utilização de substâncias dessecantes para captação de água, apresentado, todos os trabalhos referidos, diferentes especificações.

H. E. Gad et al. (2001) desenvolveram e analisaram um equipamento de extração de vapor de água do ar atmosférico baseado numa substância dessecante (cloreto de cálcio). A absorção do vapor de água ocorria durante a noite e, durante o dia, ocorria simultaneamente a regeneração da substância dessecante e a condensação do vapor de água. Todos os ensaios realizados ocorreram à temperatura e humidade ambiente, sendo sujeitos a condições variantes ao longo do dia. O equipamento desenvolvido possui uma capacidade de extração de 1,5 l/m² de área de coletor por dia. A eficiência do coletor foi fixada nos 17%. Quando acoplado um condensador a eficiência de extração foi reduzida em 5%.

A. E. Kabeel (2007) desenvolveu um equipamento de extração de vapor de água através de uma substância dessecante (cloreto de cálcio). O equipamento possui a forma de uma pirâmide, sendo todos os lados de vidro. No seu interior é constituída por múltiplas prateleiras, sendo estas saturadas com 30% de líquido dessecante. Os lados da pirâmide estão abertos durante a noite, por forma recolher o vapor de água, e fechados durante o dia para que a água seja condensada. Foram construídas duas pirâmides, numa as prateleiras são feitas de madeira, noutra são feitas de tecido. Ambas a pirâmides são sujeitas às condições ambientes, tendo os ensaios a duração de um dia. A quantidade de água extraída foi de 2,5 l/dia.m². Segundo o autor a produtividade deste equipamento é superior em 90-95% dos sistemas já existentes. As prateleiras de tecido possuem uma maior eficiência do que as de madeira, pois a absorção da solução dessecante no início da experiência é superior.

Ahmed M. Hamed et al. (2011) redigiram um relatório, tendo como base um equipamento utilizado pelos mesmos autores no ano de 2001, sobre a aplicação da energia solar para recuperação da água existente na atmosfera terrestre em zonas áridas. O equipamento utilizado nos ensaios possui uma face de vidro, de 0,5 m², e areia impregnada de cloreto de cálcio. Durante a noite a areia encontra-se sujeita à atmosfera, armazenando vapor de água. Durante o dia a camada de areia é tapada com o vidro, sendo o vapor de água condensado e a substância dessecante regenerada. O cloreto de cálcio encontra-se numa concentração inicial de 30%, e depois de regenerado possui uma concentração de 44%. Os ensaios foram realizados às condições ambiente durante 24 horas, sendo observada uma eficiência média de 22% e obtendo-se 1 l/m² por dia.

Bem Niewenhuis et al. (2012) realizaram um relatório do desenvolvimento de um gerador de água a partir do ar atmosférico. O equipamento possui um canal onde flui o ar atmosférico e

outro onde passa o fluido dessecante. A substância dessecante é pulverizada numa torre constituída por camadas no seu interior, aumentando assim a área de contacto com o ar, obrigando-o a passar por todas elas. O fluido dessecante após entrar em contacto com o ar vai para um tanque onde ocorre a evaporação da água, regressando depois ao tanque de armazenamento do dessecante. O ar livre de água e de fluido dessecante regressa à atmosfera passando por um condensador. A substância dessecante possui uma concentração de 40% de cloreto de cálcio. Este equipamento possui uma capacidade de absorção entre 1 e 1,92 g/dia, produzindo 72,1 ml/kWh. Os ensaios decorreram ao longo de 6h, tendo sido verificadas condições ambiente constantes de 85% de humidade relativa e 30 °C de temperatura.

1.3.4.3. Diversos equipamentos

No trabalho referido abaixo, o autor realizou diversos ensaios, sendo utilizados 3 sistemas distintos.

Eliezer Henker (2012) elaborou o estudo e a construção de equipamentos desumidificadores para obtenção de água potável. Como tal foram desenvolvidos três equipamentos. O primeiro foi realizado à escala laboratorial, sendo utilizadas duas garrafas de plástico com água congelada no interior e um pequeno ventilador, permitindo observar a condensação em superfícies frias. Foram realizados 3 ensaios, sem a utilização do ventilador, com a duração média de 4h30, com temperatura de cerca de 35 °C e humidade relativa em torno dos 50%, sendo produzidos, no total, 0,24 l/m²h. Com a presença de ventilador a captação apresentou valores superiores, cerca de 0,47 l/m²h, no total dos três ensaios realizados. Os sistemas Peltier e Ice Maker foram os outros dois sistemas elaborados pelo autor. No sistema de *Peltier* são utilizados 2 ventiladores, por forma a serem obtidos maiores valores de velocidade de ar à passagem pela superfície da célula. Com este sistema, para condições de 30°C e 60%, de temperatura e humidade relativa, respetivamente, foram coletados 1,39 l/m²h, durante 8 horas. O sistema Ice Maker teve como objetivo a utilização do ciclo dia/noite para geração de gelo a partir de uma solução de amoníaco e cloreto de cálcio. A solução é aquecida pelo sol num tubo que atravessa um refletor em forma de paraboloide. Com o aumento da temperatura ocorre um aumento da pressão fazendo com que o amoníaco passe por uma serpentina, havendo troca com o meio exterior, arrefecendo-o e condensando-o. Durante a noite o gerador arrefece o amoníaco, realizando este o processo inverso. O retorno ocorre devido ao facto do cloreto de cálcio ser um agente dessecante e ao facto de a temperatura diminuir, fazendo com que a pressão também diminua. Com este processo o amoníaco retira o calor existente no meio fazendo com que a superfície alhetada arrefeça, formando gelo e condensado.

1.4. Objetivos e contribuição da presente dissertação

É do conhecimento geral a problemática da escassez de água. Para alguns autores a escassez de água resulta de uma má distribuição da rede hidrográfica mundial, sendo defendido que, se

esta fosse mais equilibrada, atualmente não seria tão notado a redução deste recurso. Contudo, outros autores defendem que a escassez de água é resultado da combinação da variabilidade hidrológica e do elevado uso humano.

Ambas as razões podem subsistir, tendo argumentos válidos para serem tidas em conta. Atualmente tem-se assistido a uma diminuição do aumento da utilização da água doce, estimando-se, no presente ano, um aumento de 1% ao ano, sendo que nos países desenvolvidos a sua utilização até tenha estagnado.

A diminuição da procura deve-se em parte ao melhoramento de infraestruturas, à criação de novas infraestruturas e ainda às políticas direcionadas para a preservação do meio ambiente, em especial da água existente no planeta.

A diminuição da quantidade de água que pode ser utilizada pelo Homem tem efeitos na economia mundial, limitando o crescimento económico e a geração de emprego. Com a criação de grandes centros urbanos, com a criação de empresas poluidoras, com a necessidade de distribuição de água potável e com o aparecimento das centrais de tratamento de águas, teve início o “poder hídrico”.

Um bem tão essencial como a água, deixava de estar acessível a toda e qualquer pessoa, sem custos. A contaminação das águas obriga ao seu tratamento em centrais, quanto mais poluídas as águas se encontram e quanto menor for a quantidade de água existente maior será o seu custo.

Por forma a tentar contrariar a evolução deste problema, começaram a ser desenvolvidas tecnologias capazes de produzirem água potável, quer seja através do tratamento de água salgada, quer seja através da captação do vapor de água existente na atmosfera. As tecnologias que utilizem estas duas fontes de água, são as mais relevantes, uma vez que quer os oceanos, quer o vapor de água atmosférico são considerados fontes de água inesgotáveis.

Posto isto, esta dissertação tem como objetivo principal a avaliação experimental de um sistema de refrigeração por compressão de vapor para produção de água a partir do ar atmosférico.

Para a avaliação experimental será utilizado um equipamento de desumidificação comercial, desenvolvido pela empresa TROTEC, tendo como designação comercial TTK 75 ECO.

A avaliação do desempenho deste equipamento, ocorreu no Laboratório de Termodinâmica Aplicada e Transmissão de Calor do DEM/UBI, sendo necessária a preparação do mesmo. Para tal será utilizada uma unidade laboratorial de ar condicionado, uma câmara climática, diversos

aparelhos de medição, quer para humidade relativa quer para temperatura, um controlador de temperatura e um regulador de potência.

Com este conjunto de equipamentos pretende-se impor e registar determinadas condições no interior da câmara climática, observando a resposta do equipamento de desumidificação comercial.

A realização de estudos experimentais permitirá a obtenção da quantidade de água extraída, pelo equipamento utilizado, do ar atmosférico para uma determinada condição ambiente.

Será por último avaliado o desempenho do equipamento, consoante as variáveis aplicadas no interior da câmara climática, ou seja, humidade relativa e temperatura

1.5. Visão geral da organização da dissertação

A presente dissertação é constituída por 6 capítulos, sendo cada um deles apresentado de seguida.

No capítulo 1 é encontrada introdução à dissertação, sendo este capítulo iniciado com a perspetiva geral que faz referência à distribuição dos recursos hídricos no planeta Terra e à escassez de água. No subcapítulo que refere o problema em estudo e a sua relevância é mencionada a importância da água e o desenvolvimento da sua degradação. De seguida é apresentada uma revisão bibliográfica por forma a enquadrar o presente trabalho no contexto dos trabalhos realizados anteriormente. Por fim são divulgados os objetivos e a contribuição da presente dissertação.

No que ao capítulo 2 diz respeito, a sua constituição é dividida pela apresentação das tecnologias de obtenção de água potável e pela referência às tecnologias de tratamento de água possíveis de aplicar. Todas as tecnologias de obtenção são apresentadas em detalhe, embora relativamente às tecnologias de tratamento seja apenas dada a conhecer a sua existência e divulgada a informação mais importante. A parte referente às tecnologias de obtenção de água é subdividida em tecnologias que obtêm água a partir do vapor de água atmosférico e tecnologias que a obtêm a partir da água salgada.

No capítulo 3 é abordada a psicrometria, sendo primeiramente dadas a conhecer as suas noções base, passando posteriormente para a condensação de vapor de água, que é o mais relevante para a realização desta dissertação.

O capítulo 4, é mais aprofundado no que à refrigeração por compressão de vapor diz respeito. São aí apresentadas as noções base, os ciclos termodinâmicos de refrigeração, os sistemas de desumidificação existentes e os sistemas de condensação, mais direcionados para a obtenção de água potável. Para os dois tipos de sistemas referidos é abordada a sua constituição e

funcionamento de forma mais detalhada, quando comparado com a referência a eles feita no capítulo 2.

No capítulo 5 são apresentados os estudos experimentais realizados, sendo dado a conhecer todos os processos utilizados, os valores obtidos e as conclusões retiradas da observação dos gráficos realizados. Neste capítulo é ainda feita referência à instalação experimental, quanto à sua constituição e montagem.

No capítulo 6 é realizada a revisão dos objetivos propostos, fazendo uma análise geral ao trabalho realizado. Por último é ainda dada a indicação para um trabalho a desenvolver no futuro.

Capítulo 2

2. Produção de água potável

No presente capítulo será abordada a produção de água potável, sendo apresentadas as tecnologias que conseguem satisfazer este fim. A maioria das tecnologias referidas utilizam o processamento do vapor de água atmosférico, sendo também apresentada a dessalinização, como tecnologia de produção de água potável. Tanto o vapor de água atmosférico como a água salgada, podem ser consideradas fontes renováveis deste recurso. O vapor de água pode-o ser considerado, uma vez que, devido ao ciclo hidrológico, esta pequena reserva de água renova-se de forma natural. As reservas de água salgada do planeta Terra, são consideradas fontes de água renovável, uma vez que representam 97,5% de toda a água existente no planeta. De forma simplificada, a dessalinização produz água potável em uma única etapa, a remoção do sal da água juntamente com a eliminação dos poluentes nela existentes. O processamento de vapor de água, para obtenção de água potável, é realizado em duas etapas. Primeiramente é realizado a condensação do vapor de água e posteriormente são removidos os agentes nocivos para o Homem, devendo ainda ser realizada a mineralização da água.

2.1. Tecnologias de produção de água potável

Neste subcapítulo será realizada a descrição das técnicas de produção de água potável. Entre estas técnicas será possível observar a descrição de equipamentos de processamento de vapor de água e ainda de sistemas de dessalinização.

2.1.1. Tecnologias produção de água a partir do ar atmosférico

Segundo Wahlgren, R. V. (2001) existem duas formas de obtenção de água a partir da atmosfera terrestre. Uma passa pelo processamento de vapor de água existente no ar atmosférico enquanto a outra realiza a captação direta das gotas de água suspensas. A forma de obtenção de água através do processamento, pode ser descrita como a condensação não natural do vapor de água atmosférico. O processamento de vapor de água utiliza sempre energia, independentemente da proveniência desta, podendo ser elétrica, solar ou mecânica. Contudo, estas tecnologias podem operar em qualquer localização. Por outro lado, a captação direta das gotículas de água suspensas no ar, apenas pode operar em locais onde são usualmente verificadas condições climáticas como nevoeiro ou nuvens a baixa altitude. Assim como referido por Wahlgren, R V. (2001) as tecnologias de processamento de vapor de água podem ser subdivididas em três tipos. Um tipo de tecnologia procede ao arrefecimento de superfícies, até uma temperatura inferior à temperatura de ponto de orvalho, outro realiza a concentração de vapor de água através de substâncias dessecantes e a terceira, passa pela convecção induzida e controlada do ar numa torre.

Serão agora dadas a conhecer as diversas tecnologias que fazem uso dos diversos processos apresentados anteriormente.

2.1.1.1. Arrefecimento de superfícies abaixo da temperatura do ponto de orvalho

O processamento de valor de água pressupõe uma mudança de fase, havendo a necessidade de aplicação de energia para ocorrer o processo de condensação. A condensação origina libertação de calor, devido à quebra de ligações intramoleculares. Este calor é denominado de calor latente, sendo que segundo Wahlgren, R V. (2001), para 20 °C, o calor latente de vaporização ou condensação é de $2,45 \cdot 10^6$ J/kg, e o seu aproveitamento pode resultar num aumento da eficiência do equipamento. O arrefecimento da superfície pode ocorrer por meio mecânico, de forma natural ou eletricamente. Se o arrefecimento ocorrer mecanicamente estamos na presença de um equipamento de compressão de vapor, embora o equipamento utilizado para realizar a compressão possa ser ativado de diversas formas. Caso o arrefecimento ocorra sem utilização de energia elétrica (i.e., o arrefecimento ocorra de forma natural) estamos na presença do arrefecimento radiante. Em situações em que o arrefecimento é realizado eletricamente, muito provavelmente, trata-se de uma célula de Peltier.

Nas subsecções seguintes serão apresentados e descritos os três tipos de tecnologias apresentados em cima.

2.1.1.1.1. Refrigeração por compressão de vapor

Na teoria existem dois tipos de bomba de calor, embora na prática o funcionamento seja bastante semelhante. O primeiro tipo pode ser descrito como uma bomba de calor convencional, de uso doméstico e de tamanho reduzido. O refrigerante utilizado para arrefecer a superfície, que entra em contacto com o ar, é o próprio refrigerante que é comprimido e expandido no circuito. Ou seja, existe apenas um fluido de trabalho. Este tipo de bomba de calor permite arrefecer o ar até à temperatura de 6 a 7 °C. A sua utilização não é aconselhável para condições ambiente em que a temperatura de ponto de orvalho é inferior a 4,6 °C, uma vez que o vapor de água se torna mais propício a congelar. Se ocorrer a formação de gelo a passagem do ar pelas alhetas do evaporador será dificultada. Este problema, pode ser facilmente resolvido com a implementação de um sistema de descongelamento. O segundo tipo de bombas de calor é denominado de *chiller*. O seu funcionamento difere em pouco da bomba de calor convencional, uma vez que são utilizados dois fluidos de trabalho, um primário e outro secundário. O fluido de trabalho secundário é aquele que realiza o arrefecimento da superfície. Por sua vez o fluido de trabalho primário é utilizado para arrefecer o secundário. Os *chillers* são mais indicados para uso industrial.

Na sua conceção são utilizados diversos componentes, sendo os fundamentais, um compressor, dois ou mais permutadores (i.e., fluido de trabalho-ar e ar-fluido de trabalho) e um dispositivo de expansão. No caso do *chiller* um dos permutadores é substituído por um outro permutador,

onde é realizada a permuta térmica entre os dois fluidos de trabalho, sendo que o outro permutador existente realiza a permuta térmica entre o fluido de trabalho primário e o ar. É ainda utilizada uma bomba hidráulica para realizar a circulação do fluido de trabalho secundário. Contudo existem componentes que ao longo dos tempos foram sendo introduzidos por forma a melhorar o desempenho da unidade. Um exemplo de adição de componentes é a utilização de membranas permeáveis. Este tipo de membranas permite apenas a passagem de vapor de água, para o local onde é realizada a condensação. Com a implementação deste componente ocorre uma redução dos custos energéticos do equipamento, uma vez que a energia despendida para arrefecer na totalidade um volume de ar é superior à energia que tem de ser utilizada para arrefecer apenas o vapor de água existente nesse mesmo volume de ar. Outra alteração pode ser verificada no controlo ou ativação do compressor. Recorrendo a um melhor controlo do compressor, é possível uma diminuição dos gastos energéticos. Este controlo pode ser realizado consoante as condições ambiente, permitindo ao compressor atuar consoante a necessidade (i.e., para condições ambiente quentes e húmidas a energia consumida será superior do que para ambientes frios e secos). O compressor pode ser alimentado de diversas formas dependendo da necessidade e do local. Em locais onde não é fácil o acesso a fontes de energia elétrica, este pode ser ativado com recurso a energias renováveis ou mecanicamente. Mecanicamente implica que o compressor de alguma forma esteja interligado a algo que depende de outro tipo de energia, como é o caso dos motores de combustão interna e de combustão externa. Segundo a WIPO Magazine (2010), é ainda possível a associação de uma bomba de calor a um aerogerador, podendo ser produzida energia e ainda, com o movimento de rotação do rotor, dá-se a ativação do compressor, permitindo a captação do vapor de água existente no ar que atravessa as pás do aerogerador.

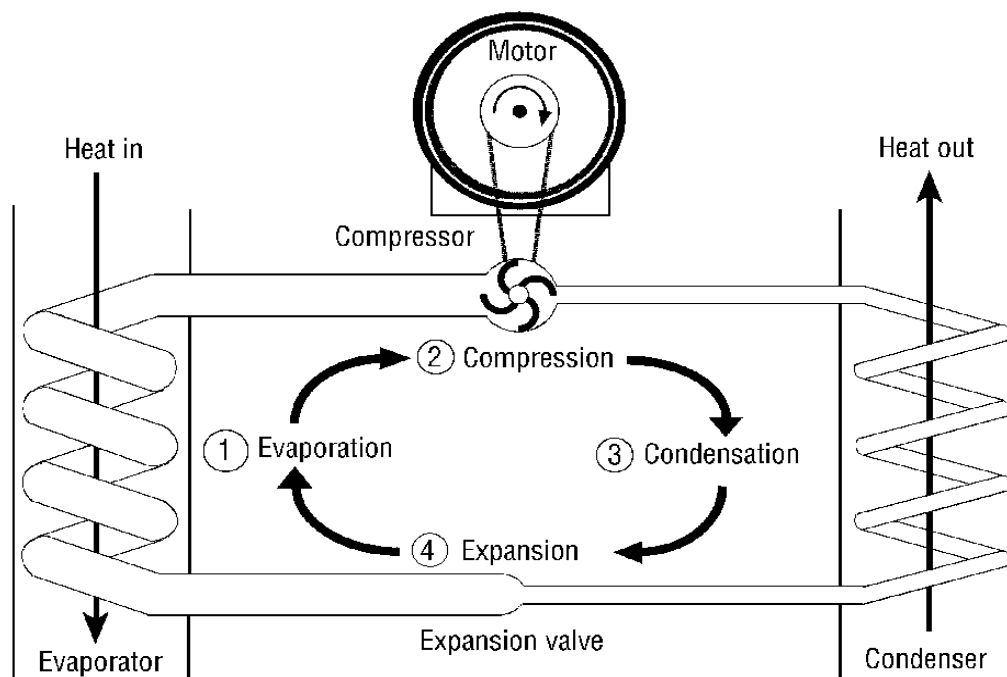


Figura 2.1- Ilustração de uma bomba de calor, por compressão de vapor. Stuij, B (1995)

As bombas de calor baseiam-se no princípio do ciclo de compressão de vapor. Para tal são utilizados fluidos refrigerantes denominados também de fluidos de trabalho, no caso do *chiller* é o fluido de trabalho primário que está sujeito aos mesmos processos. Este fluido circula por todos os componentes constituintes deste tipo de equipamentos, sendo sujeito a diversos tipos de alterações de fase, de temperatura e de pressão.

No evaporador o fluido refrigerante encontra-se a baixa temperatura. Contudo, quando a sua superfície entra em contacto com o ar a temperatura do refrigerante sobe, evaporando-o. É no evaporador que ocorre a captação de água, por outras palavras, o vapor de água é condensado na superfície fria do evaporador. No compressor o fluido refrigerante, que à entrada se encontra na fase de vapor, é comprimido, aumentando assim a sua temperatura e a pressão. Posteriormente passa pelo condensador, onde condensa, através da troca de calor com o ar, que passa nas alhetas deste componente. Por norma, num desumidificador, o ar que chega ao condensador passa primeiramente no evaporador, como tal, chega seco e a uma temperatura inferior. O condensador é considerado a última etapa de processamento do ar atmosférico, sendo este expelido a uma temperatura superior e seco. Após a passagem no condensador, o fluido de trabalho encontra-se com uma pressão elevada, sendo expandido num sistema de expansão, diminuindo a sua pressão e temperatura. Como é possível observar na *figura 2.1*, o fluido de trabalho percorre um circuito fechado.

Na atualidade os fluidos de trabalho mais utilizados são CFCs. Estes fluidos são utilizados devido às suas características distintas da água, como é o caso das temperaturas de mudança de fase. Possuem grande capacidade de absorção de energia térmica, ocorrendo a evaporação a uma temperatura inferior à da água. Contudo, dependendo da sua constituição, estes fluidos

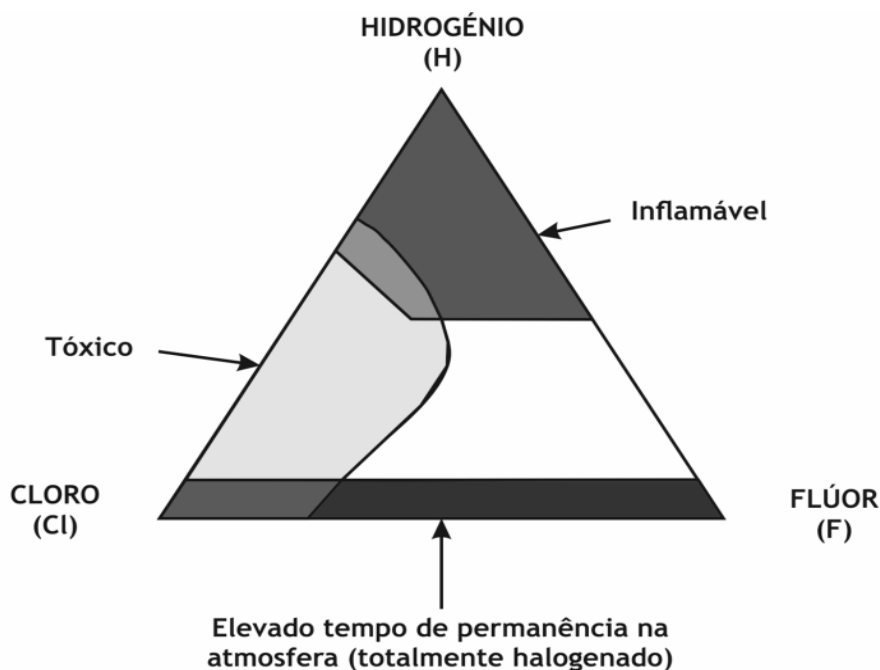


Figura 2.2- Relação entre a constituição química, a toxicidade, a inflamabilidade e o perigo para a atmosfera terrestre. Duarte. M (2013)

apresentam elevada toxicidade e inflamabilidade, além de serem altamente nocivos para a atmosfera terrestre, como é possível observar na *figura 2.2*.

Tem-se vindo a aumentar a pesquisa relativamente aos fluidos refrigerantes, por forma à descontinuação dos CFCs. Atualmente tem-se assistido à introdução no mercado de outros fluidos, como por exemplo o R290, devido ao seu baixo impacto ambiental e excelente desempenho termodinâmico.

Diversos fatores afetam o desempenho destas unidades, entre os quais se pode destacar o refrigerante utilizado, os permutadores em uso, o número de evaporadores, bem como a potência do ventilador. Por norma, quando falamos de unidades comerciais, o ventilador é projetado por forma a obter o melhor desempenho dos permutadores utilizados. Posto isto, deve salientar-se que a capacidade do desumidificador diminui com o aumento da velocidade do fluxo de ar que passa pelos permutadores, ocorrendo o mesmo para velocidades demasiado reduzidas. A implementação de mais do que um evaporador, embora implique o aumento dos gastos energéticos e da dimensão do equipamento, possibilita um aumento da captação, funcionando como um sistema de dupla fase. Devido a estes fatores e ao elevado número de equipamentos desenvolvidos ao longo dos anos é difícil definir um valor geral da quantidade de água que este método é capaz de captar.

Segundo Wahlgren, R. V. (2001), a eficiência destes equipamentos é superior quando a temperatura do ar no condensador é baixa, quando a temperatura do ar à entrada do equipamento é elevada e quando o nível de humidade é elevado. No caso da terceira condição, um nível de humidade relativa elevado permite maior capacidade de produção, bastando uma menor diferença de temperatura, entre o ar e a superfície do evaporador, para ocorrer condensação de vapor de água. As duas primeiras condições apresentadas são justificadas com a realização de uma maior transferência de calor. Utilizando a *tabela 1* para a justificação e definindo T como a temperatura ambiente, T^- como uma temperatura inferior a T , T^+ como uma temperatura superior a T , T_{ref-} como uma temperatura baixa do refrigerante e T_{ref+} como uma temperatura alta do refrigerante, é possível visualizar as alterações térmicas sofridas pelo ar e pelo refrigerante ao longo do ciclo. Como tal, se a temperatura à entrada do equipamento for alta o refrigerante vai aquecer mais rápido, por outro lado se a temperatura do ar à entrada do condensador for baixa irá arrefecer mais rápido o refrigerante.

Este método tem como principais pontos positivos o facto de se encontrar bem desenvolvido, a reduzida necessidade de manutenção e ser satisfatoriamente eficiente. Contudo os pontos negativos são a utilização de CFCs como fluido de trabalho, a possível formação de gelo, através do arrefecimento em demasia do vapor de água condensado, a quantidade de energia que tem de ser empregue para o seu funcionamento e a necessidade de tratamento da água extraída.

Tabela 1- Variação da temperatura do ar e do fluido refrigerante ao longo do circuito da bomba de calor.

	Evaporador		Condensador	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
Ar atmosférico	T	T-	T-	T+
Fluido refrigerante	T _{ref-}	T _{ref+}	T _{ref+}	T _{ref-}

2.1.1.1.2. Arrefecimento radiante

Esta forma de captação de água a partir da recolha do vapor de água atmosférico, funciona a céu aberto. Estes sistemas são referidos como fenómenos de arrefecimento passivo, baseados no conceito de que qualquer superfície exposta a céu aberto emitirá e receberá radiação térmica, para e da atmosfera. Ao mesmo tempo o sistema recebe radiação semelhante à emitida pela atmosfera. A superfície irá manter-se mais fria durante a noite, se a energia emitida, pela superfície, for superior à energia absorvida. Só ocorrerá condensação de vapor de água, se a temperatura da superfície estiver a baixo da temperatura de ponto de orvalho. A eficiência deste equipamento está dependente das condições ambientais verificadas, principalmente elevados níveis de humidade, de um ambiente calmo e das propriedades da superfície. A superfície pode ser feita em diversos materiais, onde a sua característica principal deve ser a emissividade, uma vez que quanto maior esta for, menor será a temperatura verificada à sua superfície. Por forma a ocorrer a recolha do condensado a superfície deve estar inclinada, possuindo um depósito na sua base. O ângulo de inclinação deve estar situado entre 0 e 90°. A orientação do sistema também possui influência na quantidade produzida, sendo, segundo Sharan, G. (2011), a orientação dos equipamentos para oeste ou para norte a mais produtiva. A principal razão para esta ocorrência, segundo o autor, é porque, desse modo, durante as primeiras horas do dia a superfície não se encontra exposta à radiação solar, permitindo a deposição de condensado durante um pouco mais de tempo. Apesar do investimento inicial, o facto de não ser necessário fornecer energia para o seu funcionamento reduz em muito o custo do litro de água.

Segundo Sharan, G. (2011) existem três tipos de configurações, os condensadores colocados em telhados (CoR), em que são aplicadas superfícies radiantes nos telhados, como observável na *figura 2.3*, condensadores localizados no chão (CoG), sendo a prática mais normal, em que as superfícies radiantes estão assentes no solo, e telhados como condensadores (RaC), em que o próprio telhado já é feito de material com elevada emissividade por forma a produzir água a partir da condensação de vapor de água atmosférico durante a noite, funcionando os caleiros como dispositivo de condução da água até ao depósito de recolha desta.



Figura 2.3- Exemplo da aplicação de arrefecimento radiante num telhado. Girja Sharan (2011)

2.1.1.1.3. Célula de Peltier

O sistema termoelétrico de Peltier têm dois lados, sendo um do tipo p e outro do tipo n, como representado na *figura 2.4*. Estes lados são constituídos por semicondutores dopados, sendo o seu tipo determinado pela sua valência, positiva ou negativa. São utilizados semicondutores, uma vez que estes possuem melhor eficiência do que metais, no que diz respeito à obtenção de uma grande diferença de temperatura. Quando estas células são alimentadas por corrente

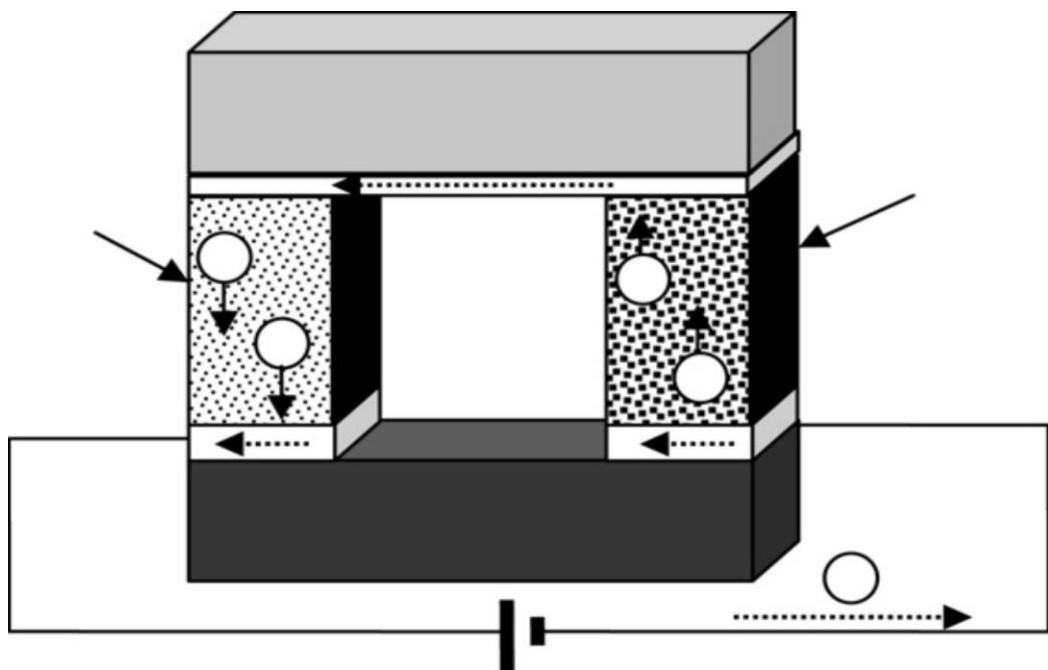


Figura 2.4- Representação do fluxo de carga através dos semicondutores do tipo p e do tipo n. Muñoz-García, M.A. et al. (2013)

continua, o calor existente num dos lados move-se para o lado oposto. Desta transição resultará numa diferença de temperatura considerável entre ambos os lados. Uma elevada diferença de temperatura depende também de um arrefecimento apropriado no lado quente, normalmente realizado por dissipadores. Caso não ocorra o correto arrefecimento do lado quente, começará a aquecer o lado frio, e o equipamento não funcionará corretamente.

Os elementos termoelétricos e as conexões elétricas estão localizadas entre duas placas de cerâmica, que fazem com que toda a estrutura se mantenha sólida, quer de forma mecânica, quer de forma elétrica. Estas placas fazem ainda com que os elementos, de forma individual, estejam isolados uns dos outros, e ainda de elementos externos.

Normalmente a configuração das células de Peltier possui desde 32 a 256 uniões singulares, permitindo diferenças de temperatura a rondar os 70 °C, podendo o lado quente encontrar-se a 50 °C e o lado frio a -20 °C. A utilização deste sistema para captação de água, possui um funcionamento um pouco semelhante ao de uma bomba de calor, no que ao tratamento do ar atmosférico diz respeito, como é possível verificar na *figura 2.5*. Normalmente o ar é forçado a passar pela superfície fria da célula, condensando assim o vapor de água, e posteriormente o ar seco e frio passa pelo lado quente da célula, ajudando a arrefecer este lado e aquecendo a massa de ar. Assim, o ar sai do sistema mais quente e mais seco do que à entrada.

2.1.1.2. Utilização de substâncias dessecantes

Estas substâncias podem ser utilizadas em estado sólido ou líquido. Se estiverem em estado sólido são denominadas de adsorventes, uma vez que não ocorre nenhuma mudança física nem química na substância quando lhe é adicionado vapor de água. Caso estejam no estado líquido

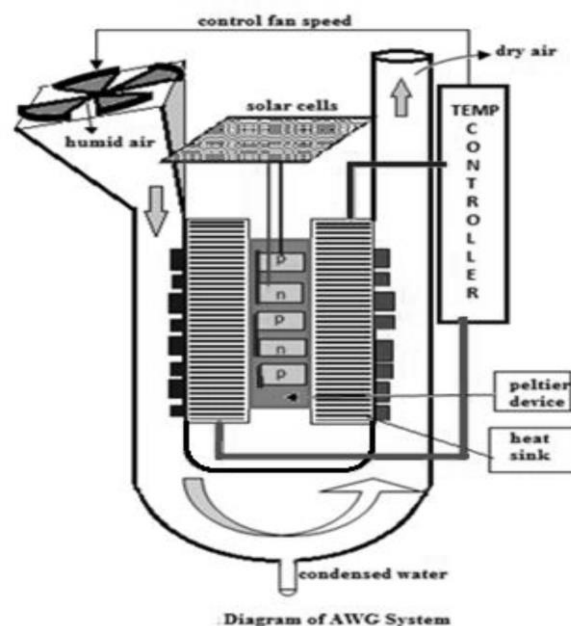


Figura 2.5- Possível configuração para um sistema de captação de vapor de água, utilizando uma célula de Peltier. Nandy, A. et al. (2014)

são denominadas de absorventes, pois sofrem alterações químicas e físicas, com a adição de vapor de água.

Os sólidos dessecantes possuem uma elevada área interna por unidade de massa, devendo-se isto à existência de inúmeros capilares, onde a água é condensada, após ser atraída por um campo elétrico. Por forma a ser retirada a água condensada do sólido dessecante, é forçada a passagem de ar quente pelo rotor, vaporizando-a novamente. O ar rico em vapor de água passa por uma superfície refrigerada, condensando o vapor de água novamente. É possível observar todo o processo na representação do rotor dessecante, na *figura 2.6*.

Substâncias líquidas dessecantes atuam como uma força de atração para o vapor de água, extraíndo-o do ar atmosférico. Esta atração ocorre devido a um gradiente de pressão causado pelo fluxo de moléculas de água em direção à superfície do dessecante. A condensação do vapor de água ocorre após a absorção. Estes equipamentos por norma funcionam a céu aberto. O ar pode entrar no equipamento durante a noite, permitindo ao absorvente captar o vapor de água existente na atmosfera. Durante o dia a radiação solar é utilizada para retirar o vapor de água existente no absorvente e para o regenerar. Também é possível a utilização de líquidos dessecantes em equipamentos colocados no interior de habitações, sendo o líquido borrifado, captando o vapor de água existente no ar. Posteriormente, o líquido tem de ser aquecido por forma a ser possível evaporar a água existente no líquido dessecante, tendo depois de ocorrer condensação desta.

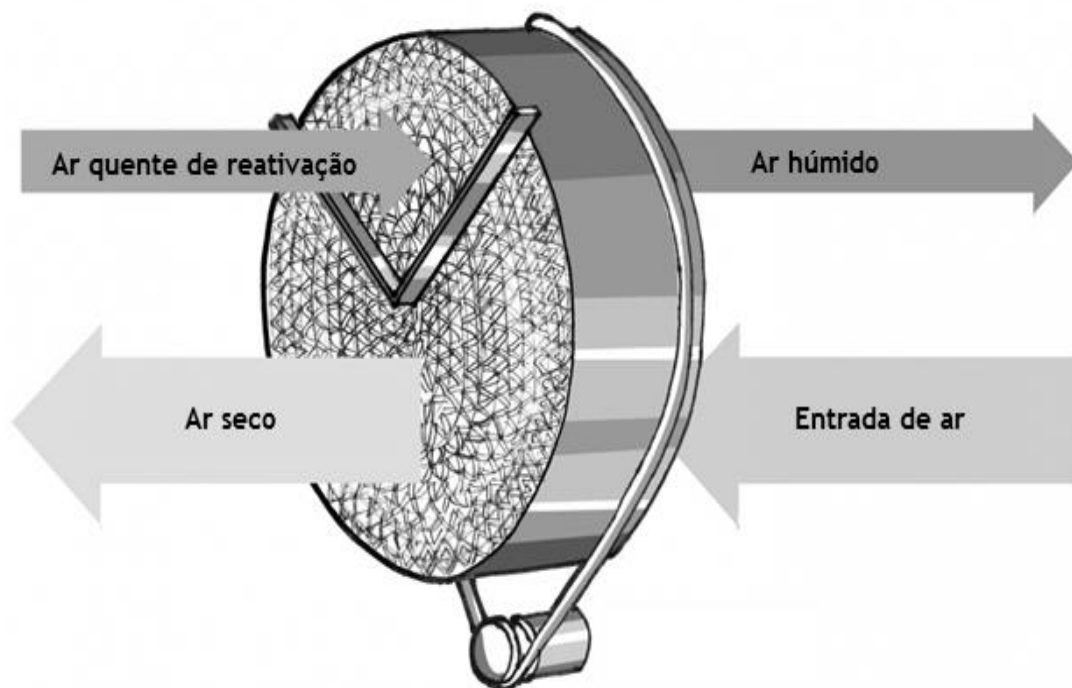


Figura 2.6- Representação da configuração Rotating Desiccant Wheel. Adaptado de Autodesk Education Community (2014)

Esta tecnologia encontra-se bem desenvolvida, em aplicações de grande escala. Podendo ser necessária uma grande quantidade de energia para ser possível recuperar a água potável, recorrendo a processos como a destilação. A possibilidade de os líquidos absorventes poderem captar contaminantes da atmosfera, é um dos principais pontos negativos destes equipamentos. Além da possível contaminação da água, os contaminantes podem reduzir a capacidade do dessecante. As substâncias dessecantes possuem uma elevada capacidade de fixação e quanto maior for a sua quantidade maior será a sua capacidade de captação. Sistemas que utilizam substâncias dessecantes obtêm melhores desempenhos quando a temperatura do ar à entrada é baixa, podendo ser utilizado o pré-arrefecimento deste. Os métodos baseados em substâncias dessecantes possuem, também, melhor desempenho se o dessecante possuir uma elevada capacidade de captação e se tiver pouca massa.

2.1.1.3. Convecção induzida e controlada numa estrutura

Outra forma de reduzir a temperatura do ar abaixo da temperatura de ponto de orvalho, passa por fazer com que parcelas de ar expandam, transformando parte da sua energia em trabalho, para arrefecer o ar e extrair o vapor de água.

Este tipo de processadores de vapor de água contêm uma célula de convecção de vapor de água, dentro de um tubo vertical ou torre que pode atingir alturas próximas de 100 metros de altura. O arrefecimento adiabático do vapor de água ocorre quando a célula de convecção expande o seu volume, forçando a subida para zonas de baixa pressão. A condensação e a precipitação do vapor de água ocorrem dentro da torre quando a temperatura da célula de convecção é inferior à temperatura do ponto de orvalho.

2.1.2. Dessalinização

A dessalinização é a tecnologia mais utilizada atualmente para produção de água potável. Segundo Subramani, S. A. et al. (2015) esta tecnologia utiliza processos térmicos ou recorre a membranas para atingir o seu fim. A dessalinização térmica é, atualmente, a escolha da maior parte dos países do Médio Oriente.

Contudo, os processos de dessalinização com base em membranas, foram rapidamente desenvolvidos desde os anos 60, tendo superando os processos térmicos em termos de desempenho.

Como referido por Subramani, S. A. et al. (2015), nos processos que utilizam membranas a água salgada é pressurizada, sendo forçada a passar por uma membrana semipermeável, deixando esta passar apenas a água e rejeitando o sal. Por forma a gerar essa pressurização, e para colmatar as perdas de carga no sistema, são utilizadas bombas de elevada pressão, podendo estas ser apoiadas por outros equipamentos. A introdução de equipamentos de apoio a estas bombas faz com que seja diminuído o tamanho da bomba e ainda a quantidade de energia que

tem de ser empregue. Para este processo, quanto maior a quantidade de sal na água maior a energia que terá de ser utilizada para dessalinizar. A energia necessária neste processo é ainda função da resistência da membrana ou permeabilidade, do caudal de água, da configuração do sistema, da qualidade da água pretendida e das variações de temperatura. O tipo de sistema de membrana mais utilizado é a osmose inversa, tendo vindo a ser desenvolvidos novos tipos de membranas que visam um melhor desempenho deste processo.

Os tipos de membranas apresentados de seguida são alternativos à utilização da osmose inversa. As membranas nano compósitas permitem a utilização de um caudal superior, sendo os gastos energéticos inferiores. As membranas de aquaporinas são membranas biológicas baseadas em tecidos humanos, apresentando uma permeabilidade cem vezes superior à das membranas de osmose inversa. As membranas de nano tubos de carbono são apresentadas como tendo propriedades de transporte rápido de água, grande área de superfície e fácil utilização. Estas características, das membranas de nano tubos de carbono, permitem uma diminuição significativa da energia gasta para realizar a dessalinização, quando comparado com o sistema de osmose inversa. De forma semelhante a estas, as membranas de grafeno apresentam velocidades de transporte elevadas e boas propriedades mecânicas.

Existem ainda diversas variações do sistema de osmose inversa. A osmose inversa de *semi-batch* combina a variação de pressão com a recirculação interna de concentrado e a configuração da membrana, consistindo em apenas três ou quatro elementos por vaso de pressão, para reduzir o consumo de energia. O consumo de energia é reduzido devido à diminuição da pressão necessária para a dessalinização.

A osmose direta, ao contrário de utilizar pressão hidráulica, utiliza uma solução concentrada que atrai a água salgada, gerando pressão osmótica. Esta pressão puxa a água através da membrana semipermeável. A solução que gera a pressão osmótica pode ser uma mistura de amoníaco com dióxido de carbono.

As tecnologias que têm como base a energia térmica para a dessalinização, dependem da transição de fase através da adição ou remoção de energia, para separar a água do sal. As formas mais utilizadas e mais desenvolvidas são a evaporação parcial em múltiplas etapas, a destilação de efeito múltiplo e a compressão de vapor.

A dessalinização por evaporação parcial em múltiplas etapas, representada na *figura 2.7*, realiza a destilação da água salgada através da evaporação parcial em diversas fases através de permutadores de contracorrente. A condensação é realizada através da passagem do vapor pelos tubos que levam a água salgada até à caldeira, onde esta é aquecida. Este tipo de dessalinização é responsável por 60% da água dessalinizada mundialmente. A destilação de efeito múltiplo, é realizada em diversas etapas. Na primeira etapa a água é aquecida por vapor, que atravessa um conjunto de tubos submersos na água salgada, proveniente de uma fonte externa. A fase seguinte funciona como um permutador de duplo efeito. O vapor gerado na

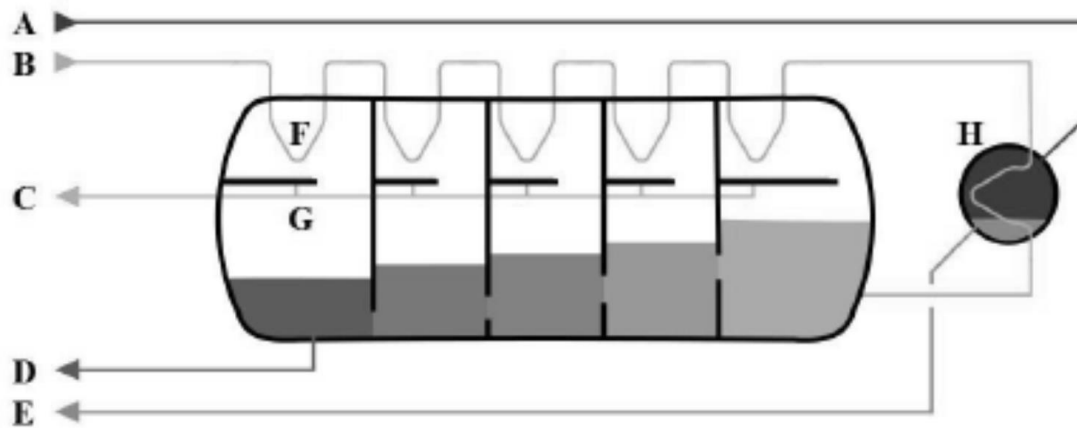


Figura 2.8- Processo de dessalinização por evaporação parcial em múltiplas etapas. Pagaime, L. (2011)
 primeira fase é utilizado para evaporar a água salgada existente na segunda fase, por sua vez, a água existente na segunda fase é utilizada para condensar o vapor de água proveniente da primeira fase. Como anteriormente, o vapor gerado na segunda fase é transportado para a fase seguinte. O processo de dessalinização por compressão de vapor de água utiliza também calor, proveniente da compressão de vapor. A compressão de vapor de água permite o aumento da pressão e da temperatura. A utilização do calor latente durante a condensação permite gerar vapor adicional.

Segundo Narayan, G. P. et al. (2010), existe ainda o processo de humidificação-desumidificação, que ocorre livremente na natureza, podendo ser replicado pelo homem para produção de água doce a partir de água salgada, como é possível visualizar na *figura 2.8*. Este

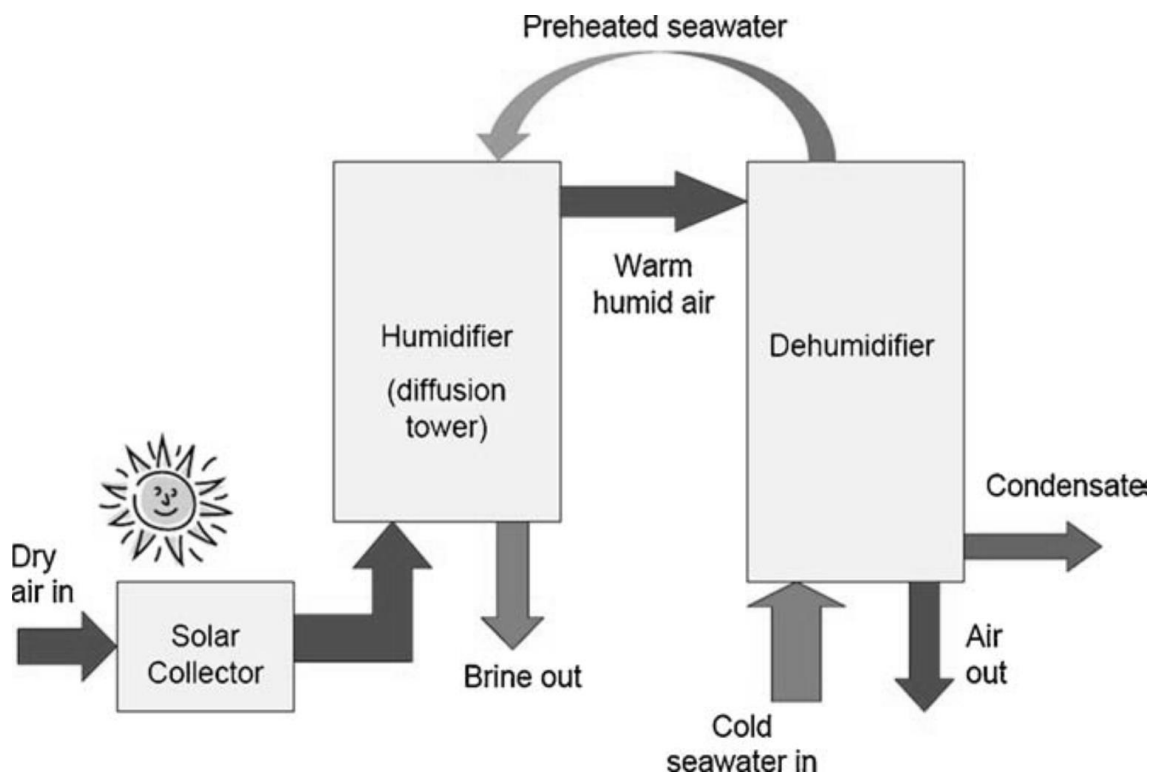


Figura 2.7- Processo simples de humidificação-desumidificação. Narayan, G. P. et al. (2010)

processo ocorre de forma natural no ciclo hidrológico. Contudo, para a “realização” de um ciclo hidrológico que tenha por objetivo a obtenção de água potável, são necessários diversos equipamentos, entre os quais um que seja capaz de elevar a temperatura da água salgada até ao ponto de ebulição e outro que possibilite desumidificação do ar proveniente do equipamento anterior. O transporte do ar é assegurado por ventiladores. Novas tecnologias de base térmica têm vindo a ser colmatadas com membranas, como por exemplo a destilação através de membrana. Esta tecnologia combina uma membrana e o processo de evaporação numa única unidade, obrigando o vapor de água a passar através dos poros de uma membrana hidrofóbica. Devido à diferença de temperatura ao longo da membrana, é gerado um diferencial de pressão que leva o vapor a passar através da membrana, até atingir a superfície de condensação. O desempenho desta tecnologia não é afetado pelo grau de salinidade da água. A dessalinização por adsorção aplica calor a baixas temperaturas, podendo este ser proveniente das perdas de fontes de calor ou de coletores solares, para fornecer um ciclo de sorção, onde é utilizado um gel de sílica para captação da água. Nesta tecnologia, a vaporização da água salgada ocorre num evaporador, sendo de seguida captada por adsorção, ocorrendo, posteriormente, a condensação num condensador.

A *pervaporation*, é outra tecnologia, que separa a mistura, sal-água, através de uma membrana. Esta membrana tem a propriedade de ter afinidade com um dos componentes da mistura. À substância compatível com a membrana é permitida uma difusão mais rápida através da membrana. Esta tecnologia pode atingir a rejeição de 100% do sal contido na água, necessitando de pequenas quantidades de energia.

Existem ainda tecnologias alternativas, pois não utilizam membranas nem são de base térmica, sendo bastante complexas. A célula de dessalinização microbiana é baseada na transferência de espécies iónicas existentes na água em proporção com a corrente gerada por bactérias. Assim sendo, é gerada energia elétrica para remover os contaminantes. Para a utilização desta tecnologia é necessária a existência de três câmaras, uma onde está colocada uma membrana de troca aniónica ao lado de um ânodo, outra com uma membrana de troca catiónica colocada adjacientemente a um cátodo e a terceira câmara, câmara do meio, encontra-se entre a câmara do ânodo e do cátodo, estando cheia de água salgada, para dessalinizar. Na câmara onde se encontra o ânodo, desenvolve-se uma bactéria em torno deste gerando uma corrente elétrica, carregada positivamente por espécies iónicas, sendo, a bactéria, impedida de se libertar do nodo pela membrana de troca aniónica. Simultaneamente as espécies iónicas, presentes na câmara intermédia, carregadas negativamente, movem-se para o ânodo. Na câmara do cátodo ocorre uma diminuição dos protões, deslocando-se as espécies iónicas carregadas positivamente desde a câmara intermédia até a câmara do cátodo. A perda de espécies iónicas, na câmara intermédia, provoca a dessalinização.

As tecnologias de desionização capacitiva são apresentadas como não poluentes e eficientes energeticamente. Neste tipo de tecnologia a solução salina flui através de um módulo condensador, composto por inúmeros pares de elétrodos com grande área de superfície, sem restrições. A capacidade de adsorção dos elétrodos é o parâmetro chave para o desempenho da tecnologia. A polarização de concentração de iões, é utilizada para a dessalinização, sendo um processo eficiente a nível energético. Neste processo, a utilização de microfluídica² e nanofluidos³ em combinação com a polarização de concentração de iões, são utilizadas para dessalinizar água salgada. É utilizado um potencial elétrico para gerar uma zona de repulsão, atuando como uma membrana que separa os iões carregados, bactérias, vírus e micróbios da água salgada. A água flui através do canal micro que se encontra tangencial ao canal nano, onde a tensão é aplicada. A força resultante cria a zona de repulsão e a corrente de fluido separa-se em dois pequenos canais na zona da junção nano. Estas duas correntes são a água tratada e o concentrado de resíduos extraído da água. Este processo rejeita 99% do sal. Por fim, o último dos processos apresentados é o Hidrato de Clatrato, que é um composto cristalino baseado em água e semelhante ao gelo. A utilização deste sólido facilita a dessalinização por congelamento da água salgada.

2.1.3. Cloud Seeding

Segundo Bollay E. et al. (2005), este processo, não é uma tecnologia de produção de água, tão direta como as apresentadas anteriormente. A utilização desta técnica para obtenção de água obriga à utilização de coletores de precipitação. A nucleação artificial das nuvens permite a produção de chuva onde e quando esta é precisa. Pensa-se que os desenvolvimentos desta

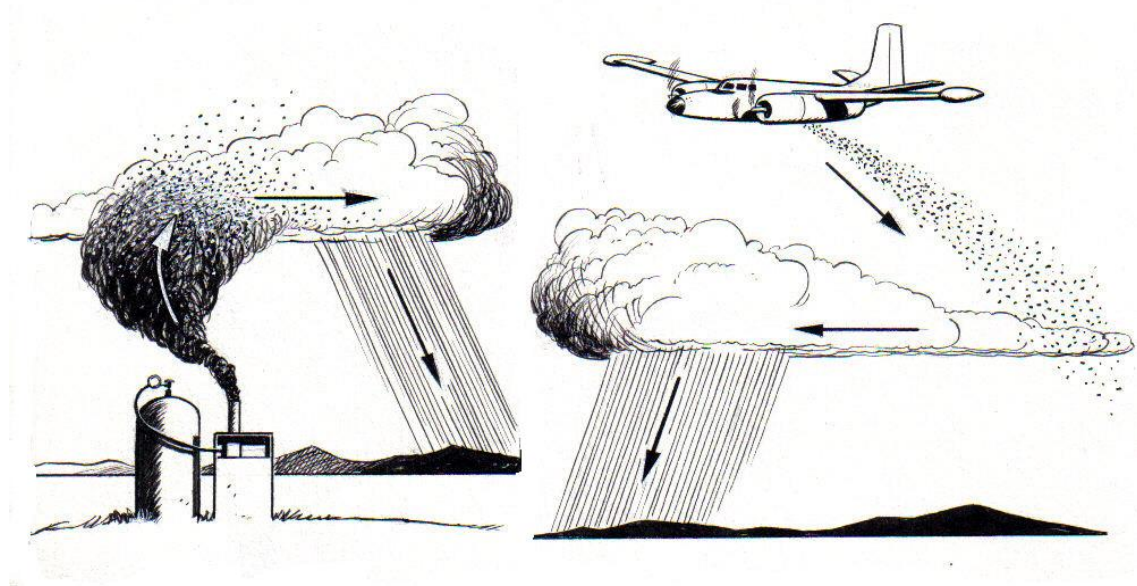


Figura 2.9- Representação do processo de *Cloud Seeding*. Strange Sounds (2014)

² Ciência que estuda o comportamento dos fluidos a uma escala reduzida, normalmente em canais com dimensões aproximadas à de um cabelo humano.

³ Ciência que estuda o comportamento dos fluidos à escala do nanómetro.

tecnologia possam vir a ser utilizados para prevenir chuvas e tempestades. Este processo pode ocorrer através da introdução de pequenos cristais de gelo nas nuvens. O vapor de água, existente nas nuvens, irá transferir-se para a superfície do cristal, aumentando o seu tamanho. Quando o cristal possuir massa suficiente, irá precipitar como floco de neve. Consoante vai precipitando vai derretendo, transformando-se numa gota de água. Os cristais de gelo podem ainda ser substituídos por cristais de iodeto de prata, sendo esta substância mais fácil de produzir e de libertar para a nuvens, uma vez que é produzido em forma de fumo e é libertada a partir do solo. Contudo a área afetada nunca pode ser totalmente definida, uma vez que depende da direção do vento e da estabilidade ou instabilidade das massas de ar. Mas será sempre afetada uma grande área plana de terreno. Na *figura 2.9* estão presentes os dois tipos de formas de realizar o *cloud seeding*.

2.2. Tecnologias de tratamento

Para tecnologias de processamento de vapor de água há a necessidade de realizar tratamentos à água extraída. Normalmente esta captação ocorre em ambiente fechados, por isso é bastante provável a existência de fungos, micróbios, entre outros agentes nocivos para o Homem.

Em ambientes abertos, a poluição atmosférica contamina o vapor de água, não garantindo a boa qualidade da água extraída. Por estas razões será necessária a utilização de tratamentos de desinfecção e ainda de mineralização, por forma a retirar o sabor a água destilada e para garantir a saúde gástrica.

A distinção dos processos de tratamento de água é feita com base na utilização, ou não, de membranas.

2.2.1. Tecnologias de tratamento sem utilização de membranas

Dentro das tecnologias que não têm como base membranas, existem métodos que envolvem tratamentos físicos, químicos, térmicos e ainda tratamentos integrados.

2.2.1.1. Tecnologias de tratamento por processos físicos

Nos tratamentos que utilizam processos físicos, está englobado o filtro de *biosand*, ou seja, trata-se de um pequeno recipiente cheio de areia ou gravilha, que permite que uma camada bioativa seja responsável pela remoção de agentes patogénicos. O filtro pressurizado é outra das tecnologias de tratamento físico, consistindo num pequeno canal com um sistema de distribuição de água para cima do filtro. Possui ainda um sistema de drenagem para recolher o filtrado. Por último, nas tecnologias de tratamento físico, existem os filtros nobres. A estrutura deste tipo de filtros incorpora adsorção, materiais de seleção molecular e a introdução de cargas electrostáticas na microestrutura do filtro.

2.2.1.2. Tecnologias de tratamento por processos químicos

Dentro das tecnologias de tratamento, sem utilização de membranas, por processos químicos existe a clarificação, a cloração, a combinação de coagulante com desinfetante em pó, e a adsorção. A clarificação é normalmente assistida por coagulantes, para redução da turvação da água. A utilização de coagulantes permite a separação por decantação da água purificada. A cloração é um tratamento bastante conhecido, de baixo custo e eficaz. A introdução de Hipoclorito de Sódio na cloração, revela ser um grande melhoramento na qualidade da água armazenada. A combinação de coagulante e desinfetante em pó, combina o sulfato de ferro, bentonite, carbonato de sódio, poliacrilamida, quitosona, permanganato de potássio e hipoclorito de cálcio. Esta solução misturada com água turva, permite a obtenção de água limpa, por triagem da solução resultante através da filtragem por peças de algodão. A adsorção é utilizada para remoção de substâncias tóxicas, orgânicas e partículas. Contudo a remoção de micróbios é baixa.

2.2.1.3. Tecnologias de tratamento por processos térmicos

Este tipo de tratamentos encontra-se dividido em fervura, pasteurização térmica, desinfecção UV, SODIS e destilação solar. A fervura permite a desativação de agentes patogénicos, incluindo vírus e cistos protozoários, que a cloração não consegue remover. A pasteurização térmica, é realizada com base na aplicação de calor, mas ao contrário da fervura, são atingidas temperaturas moderadas. É possível a utilização de perdas de calor, de outros equipamentos, para realizar este tratamento. SODIS trata-se de uma desinfecção solar, que envolve o

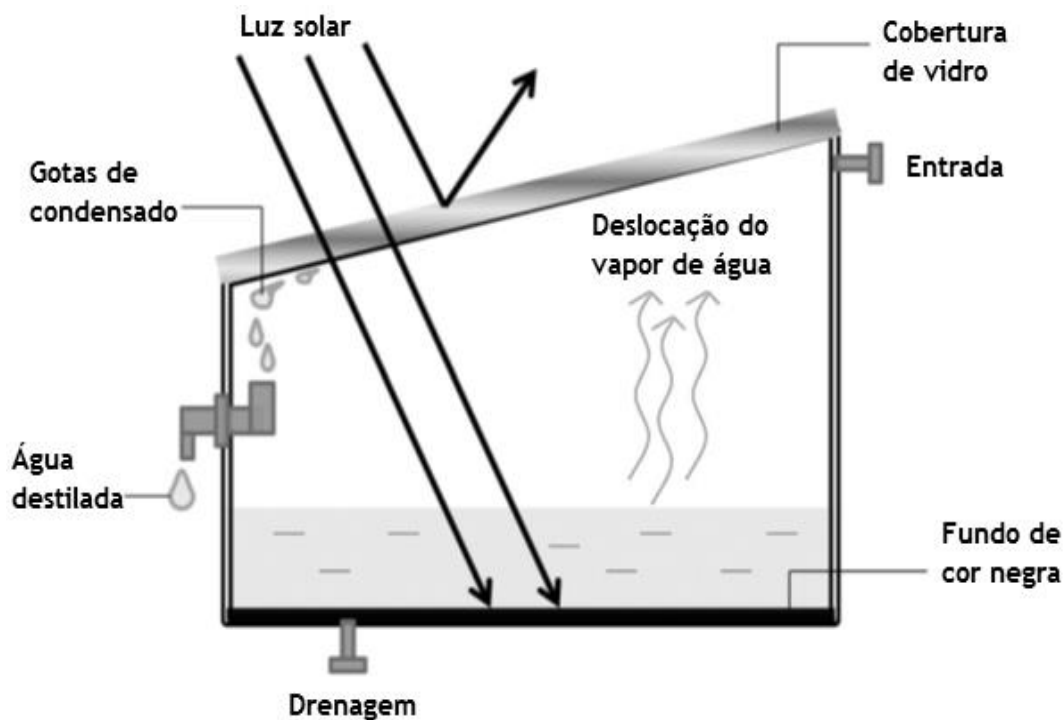


Figura 2.10- Representação da destilação solar. adaptado de Loo, S. et al. (2012)

enchimento de um reservatório de politereftalato de etileno (i.e., uma típica garrafa de água transparente), com água pouco turva. Em seguida o reservatório deve ser agitado até ser assegurada a saturação de oxigênio e posteriormente exposto à luz solar durante 6 horas. Para dias de céu encoberto o período de exposição deve ser de 2 dias. A desinfecção UV utiliza uma lâmpada ultravioleta de comprimento de onda adequado para a eliminação de germes. A destilação solar, apresentada na *figura 2.10*, é o tratamento mais utilizado pois utiliza a radiação solar direta para evaporação da água, destilando-a.

2.2.1.4. Tecnologias de tratamento integrado

Estas tecnologias utilizam diversos processos de separação, realizando diversos tipos de tratamentos referenciados anteriormente, sem utilização de membranas. Normalmente este tipo de tratamento é móvel, sendo instalado em caminhões, onde são aplicados tratamentos como a coagulação, sedimentação, filtração rápida e cloração.

2.2.2. Tecnologias de tratamento com utilização de membranas

Os processos de tratamento que têm por base a utilização de membranas podem ser classificados consoante o método que é utilizado para realizar a separação, tal como por diferença de pressão, por diferenças de temperatura ou por diferença osmótica, através da membrana.

2.2.2.1. Tecnologias de tratamento por membrana, realizado por pressão

Dentro desta classificação de processos de tratamento, a distinção entre tecnologias tem por base o tamanho dos poros da membrana, podendo ser microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração ou osmose inversa. A microfiltração é dos tratamentos mais utilizados em pequena escala, sendo os filtros de cerâmica. A ultrafiltração possui uma excelente capacidade de rejeição de bactérias, vírus, reduzindo ainda a turvação da água. A nanofiltração possui capacidade de rejeição para substâncias orgânicas dissolvidas na água, podendo ser utilizada para a dessalinização. A osmose inversa possui uma elevada capacidade de rejeição para um grande número de contaminantes, incluindo elementos radioativos, estando representada na *figura 2.11*.

2.2.2.2. Tecnologias de tratamento por membrana, realizado termicamente

Esta tecnologia são também denominadas de destilação por membrana, sendo um processo de separação híbrido. Este processo é realizado em três passos, evaporação da água, passagem do vapor de água pela membrana e condensação do vapor de água. A pressão que obriga a passagem do vapor de água do lado permeável para o lado impermeável da membrana é originada pelo gradiente de temperatura existente.

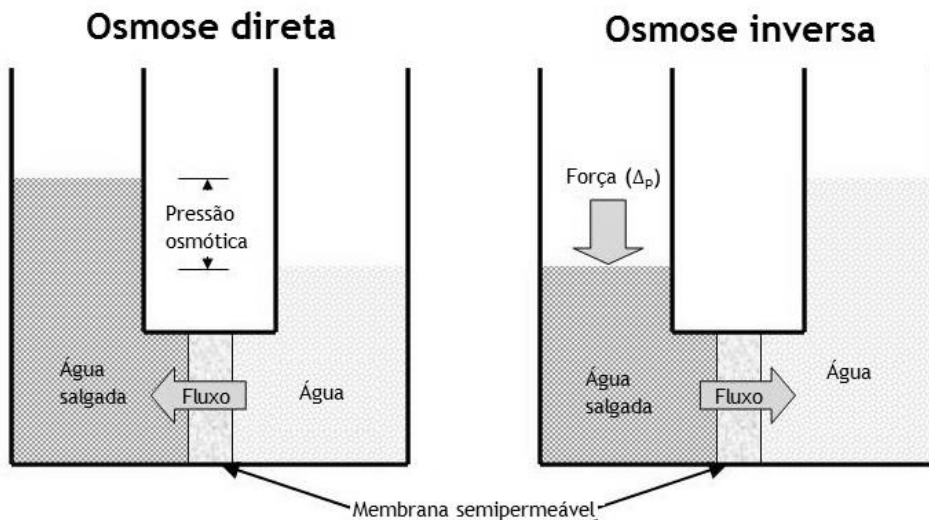


Figura 2.11- Representação da osmose direta e inversa. adaptado de Bergstedt, M. (2015)

2.2.2.3. Tecnologias de tratamento por membrana, realizado osmoticamente

Estas tecnologias possuem a mesma capacidade de rejeição do que a osmose inversa, mas, não é necessária a utilização de pressão. Desta forma estas tecnologias são denominadas de osmose direta, representada na *figura 2.11*. Este processo consiste na utilização de uma membrana dupla, revestida de uma solução concentrada de açúcar. O compartimento externo está cheio de água contaminada enquanto que o compartimento interno, esta livre de encher, com a água que vai atravessando a membrana. Este processo ocorre devido à diferença de pressão osmótica.

Capítulo 3

3. Propriedades termodinâmicas do ar

O controlo da humidade assume uma familiaridade com as propriedades e o comportamento do vapor de água. A psicrometria é uma ciência que estuda a transferência de massa e de energia associada a processos onde está presente o vapor de água, em condições ambiente.

Numa região abaixo da temperatura crítica, uma substância, no estado gasoso, é normalmente denominada de vapor. O termo vapor implica um estado gasoso, perto da região da saturação, sendo aumentada a possibilidade de condensação durante o processo.

Nos subcapítulos seguintes será abordada a psicrometria, as suas noções base, sendo apresentadas as suas variáveis e o gráfico que caracteriza esta ciência. Será ser ainda revisto o processo de condensação do vapor de água e a energia associada a este processo.

3.1. Noções base

Devido ao facto de a psicrometria visar o estudo de processos relacionados com vapor de água, torna-se interessante abordar a composição do ar atmosférico e a presença de vapor de água na composição do mesmo.

O ar atmosférico pode ser considerado como a mistura de azoto, oxigénio e pequenas quantidades de outros gases. Englobado nestes gases, que representam uma pequena percentagem da composição atmosférica, está o vapor de água, sendo que se o ar atmosférico não possuir vapor de água é denominado de ar seco. É possível visualizar o ar atmosférico como uma mistura de ar seco e vapor de água, podendo o primeiro ser considerado relativamente constante, em termos de quantidade, nos processos comuns de tratamento/condicionamento de ar. Contudo o vapor de água varia devido à condensação e à evaporação de oceanos, lagos, rios, atividades humanas e até devido ao corpo humano. Apesar de o vapor de água se encontrar em pequenas quantidades, no ar atmosférico, este, representa um importante parâmetro para o conforto humano.

Neste subcapítulo importará apresentar o gráfico psicrométrico e as variáveis associadas à psicrometria, como a temperatura de bolbo húmido, a humidade relativa, a humidade absoluta, a pressão de vapor, a temperatura de ponto de orvalho, a temperatura de bolbo seco e a entalpia.

3.1.1. Gráfico psicrométrico

O estado do ar atmosférico a uma determinada pressão é completamente descrito por duas propriedades. As restantes propriedades podem ser calculadas através de expressões apresentadas mais adiante neste subcapítulo, ou através da consulta do gráfico psicrométrico, representado na *figura 3.1*.

Segundo Çengel, Y. A., Boles, A. (1998), este gráfico foi desenvolvido no século vinte por um engenheiro alemão, permitindo obter informações sobre as condições do ar atmosférico, em diferentes situações. Inicialmente a consulta deste gráfico pode parecer complicada, devido à imensa informação disposta num gráfico tão pequeno.

No eixo horizontal está presente a temperatura de bolbo seco, que pode ser descrita como a temperatura ambiente, e no eixo vertical é apresentada a humidade absoluta. Ainda no eixo vertical é possível ser observado, em alguns gráficos, a temperatura de ponto de orvalho e a pressão de vapor. A linha curva apresentada à esquerda do gráfico é denominada de linha de saturação, estando nesta linha todas as condições que representam ar saturado, assim como os estados em que a humidade relativa é de 100%. As linhas curvas iniciadas no topo do gráfico e terminando no lado vertical esquerdo, caracterizam a variação constante de valores de humidade relativa. As linhas inclinadas, com menor declive, representam valores de temperatura de bolbo húmido constante. O volume específico constante é representado por linhas, também inclinadas, embora com o declive mais acentuado. As linhas de entalpia

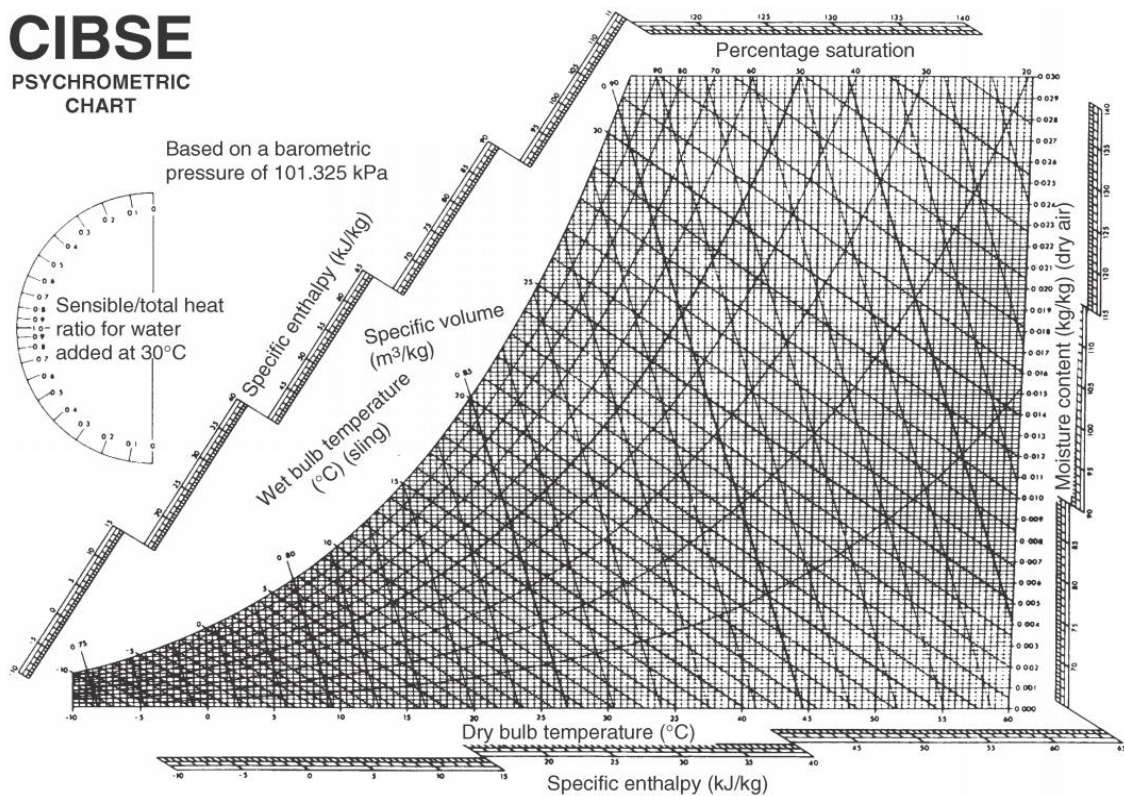


Figura 3.1- Gráfico psicrométrico. Sam C. M. Hui (2015)

constante apresentam-se quase paralelas às linhas da temperatura de bolbo húmido. Em alguns gráficos, tanto a entalpia como a temperatura de bolbo húmido, são apresentadas nas mesmas linhas.

3.1.2. Pressão de vapor (P_v)

A pressão parcial de vapor de água é normalmente denominada de pressão de vapor, sendo a pressão que o vapor de água iria exercer se existisse isolado a temperatura e volume iguais ao da mistura.

3.1.3. Humidade relativa e humidade absoluta (ϕ e ω , respetivamente)

É possível quantificar o vapor de água existente no ar de diferentes maneiras, sendo a mais lógica, a especificação direta da massa de vapor de água existente numa unidade de massa de ar seco. A esta especificação dá-se o nome de humidade absoluta, ou humidade específica, representada pela letra ω , como é possível observar na *equação 3.1*.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v \cdot V / (R_v \cdot T)}{P_a \cdot V / (R_a \cdot T)} = \frac{P_v / R_v}{P_a / R_a} = 0.622 \cdot \frac{P_v}{P_a} = \frac{0.622 \cdot P_v}{P - P_v} \quad (3.1)$$

Sendo m_v a massa de vapor de água, m_a a massa de ar seco, P_a a pressão de ar seco e R_v e R_a as constantes do vapor de água e do ar seco respetivamente. A pressão total é dada pela letra P .

$$P_a = P - P_v \quad (3.2)$$

Como referido por Çengel, Y. A., Boles, A. (1998), através da observação das equações apresentadas, é possível compreender a utilização da equação de estado que define um gás perfeito. Esta consideração representa um erro de apenas 0,2%, mesmo quando se trata de vapor saturado. Contudo, apenas se pode recorrer a esta consideração se a pressão for inferior a 12,3 kPa, pressão de saturação da água a 50 °C. Como tal, é considerado que o vapor de água existente no ar obedece à relação dos gases perfeitos. Posto isto, o ar atmosférico pode ser tratado como uma mistura de gases perfeitos, cuja pressão total é obtida pela soma da pressão do ar com a pressão do vapor, como é possível observar na *equação 3.2*.

A humidade absoluta será igual a zero se o ar for considerado seco. A introdução de vapor de água, numa determinada massa de ar, faz com que a humidade absoluta aumente, até esta não conseguir armazenar mais vapor de água. Nessa altura o ar é dito como saturado. Se, após ocorrer a saturação do ar, continuar a ser introduzido vapor de água, a quantidade que for introduzida condensará.

A quantidade de vapor de água no ar tem um efeito definitivo no quão confortável o Homem sente o ambiente que o rodeia. Contudo, o nível de conforto depende da relação entre a quantidade de vapor de água existente no ar e a quantidade de vapor de água máxima que o ar pode conter, para a mesma temperatura. A esta relação dá-se o nome de humidade relativa, podendo ser obtida através da *equação 3.3*.

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v \cdot V / (R_v \cdot T)}{P_g \cdot V / (R_g \cdot T)} = \frac{P_v}{P_g} \quad (3.3)$$

$$P_g = P_{sat@T} \quad (3.4)$$

Sendo P_g , a pressão de ar saturado (*equação 3.4*). A humidade relativa varia entre 0 e 1, correspondendo 0 a ar seco e 1 para ar saturado. A humidade relativa pode, igualmente, ser apresentada em percentagem.

É de notar que a quantidade de vapor de água que o ar pode absorver, depende da temperatura, por isso, a humidade relativa do ar é alterada com a temperatura, mesmo quando a humidade absoluta é mantida constante. A relação entre a humidade relativa e humidade absoluta, e vice-versa, é dada pelas *equações 3.5 e 3.6*.

$$\omega = \frac{0.622 \cdot \phi \cdot P_g}{P - \phi \cdot P_g} \quad (3.5)$$

$$\phi = \frac{\omega \cdot P}{(0.622 + \omega) \cdot P_g} \quad (3.6)$$

3.1.4. Entalpia (h)

Segundo Oliveira, P. P. (2012), esta propriedade é utilizada para definir a energia total existente no ar. Quando o ar está a uma temperatura elevada a entalpia é elevada, devendo-se esta relação ao facto de ter sido necessário fornecer calor para evaporar a água. Quanto maior a quantidade de água mais calor será necessário para a evaporar. Portanto a entalpia é

função da temperatura sensível, da quantidade absoluta de vapor de água e da pressão total (*equação 3.7*). Este parâmetro pode ser ainda definido como a soma do calor sensível e do calor latente.

$$h_v(T, low P) = h_g(T) \quad (3.7)$$

Desde que o vapor de água seja considerado um gás perfeito, a sua entalpia é apenas função da temperatura. Portanto, a entalpia do vapor de água existente no ar pode ser considerada igual à entalpia do vapor saturado à mesma temperatura. A entalpia do ar atmosférico é expressa em unidade de massa de ar seco, em vez de unidade de massa de mistura ar-vapor de água. A entalpia total do ar atmosférico é dada pela soma das entalpias do ar seco e do vapor de água.

3.1.5. Temperatura do ponto de orvalho (T_{dp})

Como referido por Çengel, Y. A., Boles, A. (1998), o excesso de humidade no ar condensa em superfícies frias, formando orvalho. Este fenómeno ocorre maioritariamente no verão, devido ao aumento da vaporização da água durante o dia. Consoante ocorre uma diminuição da temperatura, durante a noite, ocorre, paralelamente, uma diminuição da capacidade do ar. A capacidade do ar é a quantidade máxima de humidade que uma massa de ar consegue conter. Consoante o tempo vai decorrendo a capacidade do ar iguala-se à quantidade de humidade existente no ar, tornando-o saturado (i.e., humidade relativa de 100%). Após a capacidade do ar se igualar com a humidade nele existente, qualquer que seja a diminuição da temperatura, resultará na condensação de algum do vapor de água existente no ar, sendo este o princípio da formação de orvalho.

Assim, a temperatura de ponto de orvalho é definida como a temperatura em que a condensação se inicia, quando o ar é arrefecido a uma pressão constante.

$$T_{dp} = T_{sat@P_v} \quad (3.8)$$

Como é perceptível na *equação 3.8* a temperatura de ponto de orvalho é igual à temperatura de saturação à mesma pressão de vapor. Cada vez que ocorre condensação de vapor de água, logicamente, a quantidade de vapor de água diminui, e por consequência diminui a pressão de vapor.

3.1.6. Temperaturas de bolbo húmido e de bolbo seco (T_{wb} e T)

O método mais prático para a determinação da humidade relativa e/ou da humidade absoluta, passa pela utilização de um termómetro convencional, em que o seu bolbo está coberto por um pavio. Este pavio, exposto ao ar, deverá estar saturado de água. A temperatura medida nestas condições é denominada de temperatura de bolbo húmido.

Segundo Çengel, Y. A., Boles, A. (1998), quando o ar, não saturado, passa pelo pavio, alguma da água no pavio evapora. Como resultado da evaporação, a temperatura da água diminui, criando uma diferença de temperatura entre o ar e a água. Após algum tempo, o calor perdido pela vaporização da água iguala o calor ganho pelo ar, estabilizando a temperatura. Nesta altura o termómetro lê a temperatura de bolbo húmido. Caso o ar que passa pelo pavio esteja saturado, não haverá evaporação de água e a temperatura de bolbo húmido será igual à temperatura de bolbo seco.

A temperatura de bolbo seco é descrita como a temperatura ambiente, i.e., a temperatura do ar medida em cada instante com um termómetro convencional, sem alterações.

3.2. Condensação de vapor de água

O processo de condensação é descrito como a mudança de fase do estado gasoso para o estado líquido. Este processo é parte importante de uma unidade de desumidificação. É com base neste processo de mudança de fase que ocorre a redução da humidade existente no ar atmosférico, podendo posteriormente permitir a obtenção de água potável.

De seguida, neste subcapítulo, será abordado o processo de mudança de fase, sendo posteriormente referido o processo de condensação de vapor de água.

3.2.1. Mudança de fase

Uma substância pode coexistir em duas ou mais fases (sólida, líquida e gasosa). A mudança de fase é realizada a temperatura constante e pressão constante. A esta temperatura dá-se o nome de temperatura de saturação, sendo descrita como a temperatura em que é possível a coexistência da mesma substância em fases diferentes.

Na *figura 3.2*, segundo Oliveira, P. P. (2012) a linha de saturação representa a separação entre a parte líquida, do lado esquerdo do diagrama, e a parte gasosa do lado direito do mesmo. Na zona central, delimitada pela linha de saturação há a coexistência das duas fases. O ponto no extremo superior da linha de saturação, é designado de ponto crítico, uma vez que para

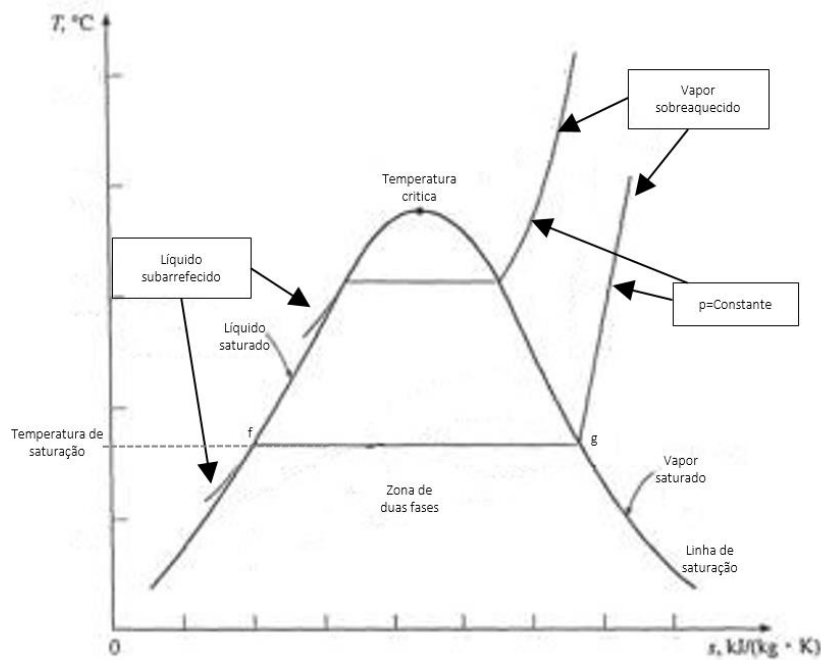


Figura 3.2- Diagrama T-s para vapor condensável com mudança de fase.

temperaturas e pressões superiores aos correspondentes valores para este ponto, não há distinção entre a fases líquida e a fase gasosa.

A linha horizontal delimitada pela linha de saturação, e que possui pontos de interceção com esta denominados por f e g, corresponde à mudança de fase realizada a temperatura constante. O ponto f indica o estado de líquido saturado e o ponto g o estado de vapor saturado.

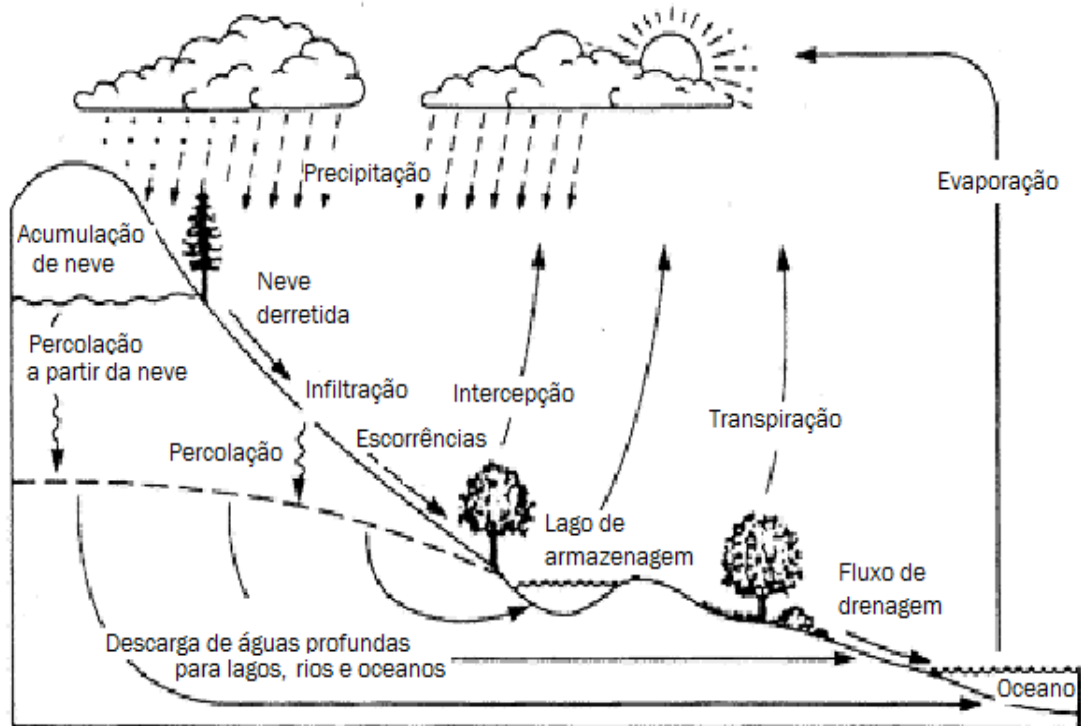


Figura 3.3- Ciclo hidrológico. Martinez, M. F. R. (2011)

A evaporação de cada litro de água requer aproximadamente 0,64 kWh de energia, sendo esta energia denominada de calor latente. Na mudança de fase inversa, condensação, dá-se a libertação da mesma quantidade de energia. A energia, sob a forma de calor latente, existe nas moléculas de água assim como nas suas redondezas. Na evaporação a energia absorvida é utilizada para quebrar ligações intermoleculares. No caso da condensação há libertação de energia, com o intuito de ocorrer uma diminuição da energia interna das moléculas, assim, as moléculas não possuem energia suficiente para resistir às forças intermoleculares.

3.2.2. Condensação de vapor de água

A condensação é um processo importante no ciclo hidrológico, que se encontra representado na *figura 3.3*. Segundo Anderson, B. (2009), este processo permite o reabastecimento das reservas de água na terra, através da precipitação. Apenas uma pequena parte do total de água existente no planeta está presente na atmosfera. A água presente na superfície terrestre, quer seja em oceanos, rios, na terra, etc., altera o seu estado evaporando. Uma vez na atmosfera, o vapor de água condensa ou fica depositado sob a forma de precipitação. Esta pode precipitar como chuva, neve, granizo ou saraiva. Quando a precipitação atinge a superfície terrestre pode evaporar novamente, pode infiltrar-se no solo ou pode concentrar-se em rios ou ribeiros, que eventualmente conduzirão a água até grandes reservatórios de água, como lagos ou oceanos, podendo também escoar sobre a forma de *runoff*⁴. A condensação de vapor de água, de forma natural, ocorre de duas formas, pelo arrefecimento do ar até ao ponto de orvalho, ou por o ar se torna saturado de modo a que não consegue suportar mais vapor de água. A primeira forma de condensação ocorre de forma natural sob a forma de orvalho, acontecendo durante as horas noturnas. O arrefecimento de um volume de ar reduz a energia cinética e de translação das moléculas de vapor de água, aumentando a proximidade das moléculas que se vão agrupando formando gotas de água. Durante a mudança de fase, gasoso-líquido, há uma barreira de energia que é necessário ultrapassar, estando essa barreira relacionada com a tensão da interação líquido-vapor. Sendo as nuvens consideradas massas de gotículas de água, na atmosfera, quanto maior a quantidade de vapor de água que é por elas captada, mais perto se encontram da saturação. Quando é atingida a saturação a densidade de moléculas de água aumenta, o vapor condensa e água começa a precipitar. O ar em regiões frias pode suportar menor vapor de água do que o ar em regiões quentes. Esta é a razão pela qual climas quentes são normalmente mais húmidos, pois o vapor de água mantém-se no ar em vez de condensar e precipitar, como nos climas frios.

A condensação pode ainda ocorrer de forma forçada através do arrefecimento de superfícies abaixo da temperatura de ponto de orvalho.

⁴ Escoamento superficial é a terminologia usada em hidrologia que define o fluxo de água que ocorre na superfície do solo quando este se encontra saturado de humidade.

Capítulo 4

4. Refrigeração por compressão de vapor

Uma das principais áreas de aplicação da termodinâmica é a refrigeração. Equipamentos que realizam a refrigeração podem ser denominados de bombas de calor ou máquinas frigoríficas, sendo o seu ciclo denominado de ciclo de refrigeração. Diversos métodos podem ser utilizados para a refrigeração, mas o mais utilizado é a refrigeração por compressão de vapor. Neste processo é necessária a utilização de um fluido refrigerante, sendo este vaporizado e condensado, alternadamente, e comprimido, quando se encontra na fase de vapor.

Nesta secção será apresentada a refrigeração por compressão de vapor, as suas noções base, bem como o seu ciclo termodinâmico, a composição dos sistemas de desumidificação e os sistemas de condensação, especialmente destinados à produção de água potável.

4.1. Noções base

Por experiência é sabido que o calor flui no sentido da diminuição da temperatura, ou seja, de regiões onde a temperatura é mais elevada até regiões onde a temperatura é mais reduzida. Este processo ocorre de forma natural sem a necessidade da intervenção de qualquer tipo de equipamentos. O processo inverso não é realizável de forma natural, tem que ser apoiado por equipamentos desenvolvidos para esse fim. Portanto, para a transferência de calor desde uma região de temperatura mais reduzida até a região de temperaturas mais elevadas, é necessária a utilização de equipamentos específicos para este fim.

Os ciclos frigoríficos, de refrigeração por compressão de vapor, têm um funcionamento inverso aos ciclos de potência, uma vez que, ao invés de fornecerem trabalho, é-lhes fornecido trabalho. Por esta razão a representação de um ciclo frigorífico, por exemplo no diagrama T-s, possui sentido anti-horário, contrário ao dos ciclos de potência.

Como referido por Oliveira, P. P. (2012) os principais equipamentos que devem o seu princípio de funcionamento à compressão de vapor, são a bomba de calor e as máquinas frigoríficas. Ambas podem ser tratadas como equipamentos iguais, sendo o seu objetivo o único fator que os distingue. O objetivo da máquina frigorífica é manter uma temperatura reduzida dentro do espaço refrigerado, através da remoção de calor do seu interior. Para as máquinas frigoríficas a descarga de calor a temperaturas elevadas para o ambiente é apenas uma operação necessária e não um objetivo. Por outro lado, o objetivo da bomba de calor é manter um espaço aquecido, podendo este ser realizado através da absorção de calor de uma fonte a baixa temperatura, assim como água ou o ar frio do exterior.

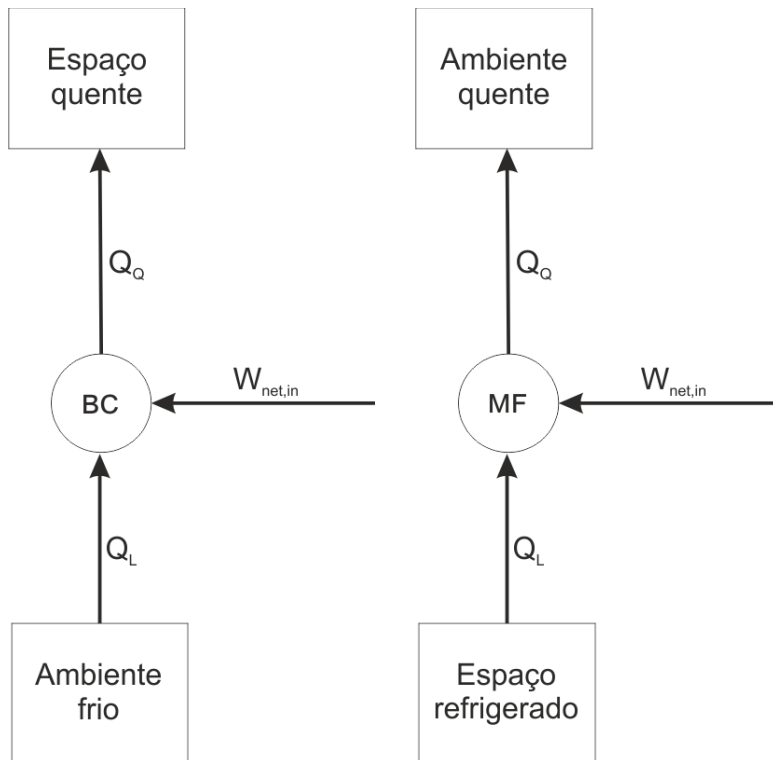


Figura 4.1- Esquema genérico da BC-Bomba de Calor e da MF-Máquina Frigorífica.

Na *figura 4.1* é possível observar a representação da máquina frigorífica e da bomba de calor, assim como as trocas de calor existentes. Nesta figura, Q_F (representado por q_e , calor de evaporação, em termos de balanço energético) representa o calor removido de um espaço refrigerado, no caso da máquina frigorífica, ou do ambiente, no caso da bomba de calor, a uma temperatura reduzida T_F . Q_Q (representado por q_c , calor de condensação, em termos de balanço energético) é representativo o calor rejeitado para o ambiente, ou para o espaço aquecido, dependendo do objetivo do equipamento, sendo T_Q a temperatura do calor rejeitado. $W_{net,in}$ representa o trabalho necessário para ocorrerem as transferências de calor pretendidas, em ambos os equipamentos.

O desempenho destes equipamentos é definido pelo coeficiente de desempenho, mais conhecido por COP (*equação 4.1 e 4.2*). O coeficiente de desempenho da máquina frigorífica e da bomba de calor pode ser determinado de igual forma, sendo apenas distinto no efeito desejado, como é possível observar nas seguintes equações.

$$COP_{MF} = \frac{Q_F}{W_{net,in}} \quad (4.1)$$

$$COP_{BC} = \frac{Q_Q}{W_{net,in}} \quad (4.2)$$

Sendo que COP_{MF} e COP_{BC} , representam o coeficiente de desempenho da máquina frigorífica e da bomba de calor, respetivamente. O trabalho, necessário para a realização das transferências de calor necessárias para a obtenção do objetivo de cada um dos equipamentos, $W_{net,in}$, pode ser ainda apresentado pelo subtração do calor removido e do calor rejeito, como é possível observar pela *equação 4.3*.

$$W_{net,in} = Q_Q - Q_F \quad (4.3)$$

Ambos os coeficientes de desempenho podem ser superiores a 1, mas para valor fixos de Q_F e Q_Q é possível obter os coeficientes de desempenho através da *equação 4.4*.

$$COP_{BC} = COP_{MF} + 1 \quad (4.4)$$

Esta relação implica que o coeficiente de desempenho da bomba de calor seja superior à unidade, desde que o coeficiente de desempenho da máquina frigorífica seja positivo. Isto é, a bomba de calor irá funcionar, no pior dos casos, como um simples aquecedor de resistência, fornecendo tanta energia como aquela que consome, sendo o COP igual a 1.

Uma vez que as bombas de calor consomem menos energia primária do que os sistemas convencionais de aquecimento, tornam-se uma importante tecnologia para redução da emissão dos gases de aquecimento de estufa.

As máquinas frigoríficas e as bombas de calor, podem ser facilmente caracterizadas pela utilização de apenas um compressor, como é possível visualizar na *figura 4.2*. Num sistema básico de compressão de vapor, ocorrem quatro processos termodinâmicos fundamentais, a evaporação, a compressão, a condensação e a expansão. Todos estes processos são aplicados ao fluido refrigerante utilizado.

Relativamente à *figura 4.2*, a transição do ponto 1 para o ponto 2 dá-se através de uma compressão adiabática do fluido refrigerante, aumentando a pressão e a temperatura deste. Na transição do ponto 2 para o ponto 3 tem lugar um arrefecimento isobárico, condensando o fluido de trabalho. Na passagem pela válvula de expansão (3-4) ocorre uma expansão isentálpica, diminuindo a pressão e evaporando parte o fluido refrigerante. Na transição final do ciclo, de 4 para 1, ocorre um aquecimento isobárico, ocorrendo a evaporação total do fluido refrigerante.

4.2. Ciclo termodinâmico da refrigeração

No circuito de refrigeração encontra-se um fluido de trabalho, sendo este fluido um vapor condensável que possui propriedades adequadas na evaporação, a uma temperatura próxima da temperatura que deve existir no ambiente frio referido no subcapítulo anterior. Por outro lado, na condensação são verificadas temperaturas próximas das que ocorrem no ambiente quente. Este tipo de fluidos deve ser bastante volátil, i.e., para pressões próximas da atmosférica deve evaporar a baixas temperaturas. Esta evaporação do fluido é que permite absorver o calor proveniente do ambiente frio, produzindo o efeito de refrigeração.

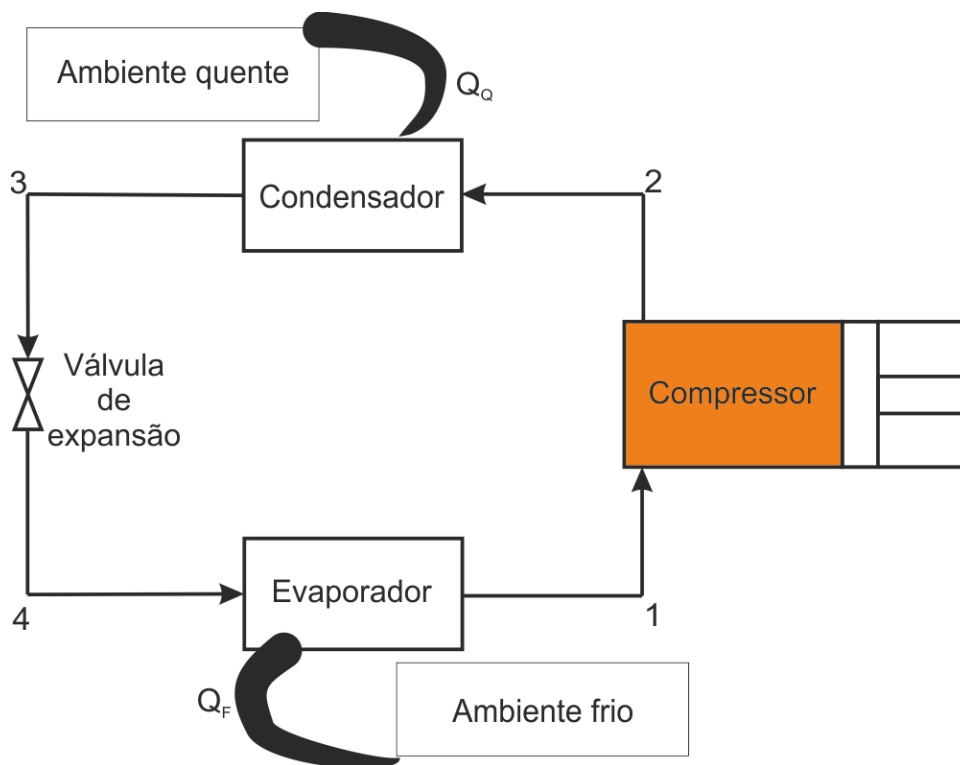


Figura 4.2- Esquema do ciclo do refrigerante, num equipamento de compressão de vapor.

Nos ciclos frigoríficos é possível observar a existência de um evaporador, onde a evaporação ocorre a pressão constante com a entrada de calor, um condensador, onde a condensação ocorre a pressão constante, um compressor, onde ocorre compressão adiabática com a entrada de trabalho e a válvula de expansão, ocorrendo a expansão do fluido com diminuição da sua temperatura.

O ciclo de Carnot invertido seria a primeira opção para o ciclo frigorífico, mas percorrido em sentido inverso, ou seja, em sentido anti-horário. Neste ciclo a compressão (1-2) é isentrópica, a condensação (2-3) é isobárica e isotérmica, a expansão (3-4) é isentrópica e a evaporação (4-1) é isobárica e isotérmica, como é possível observar na *figura 4.3*. No ciclo de Carnot invertido, em vez de uma válvula de expansão é utilizada uma turbina para realizar a expansão. Na *figura 4.3*, a temperatura e a pressão de condensação, são representadas por T_c e p_c , respetivamente. T_e e p_e , representam a temperatura e pressão de evaporação, respetivamente. Segundo

Oliveira, P. P. (2012), o ciclo de Carnot invertido é inviabilizado por ser difícil parar a evaporação no ponto 1 de forma que a entropia seja exatamente igual à do ponto 2. Isto deve-se ao facto de não ser possível a construção de um compressor que funcione com uma mistura vapor/líquido, com uma taxa de líquido elevada e ainda devido à impossibilidade de construção de uma turbina que conseguisse funcionar com uma mistura de líquido/bolhas de vapor.

Nas subsecções seguintes serão apresentados os ciclos de refrigeração ideal e o real, bem como os seus diagramas T-s e as equações dos balanços energéticos dos componentes que constituem o ciclo.

4.2.1. Ciclo de refrigeração ideal

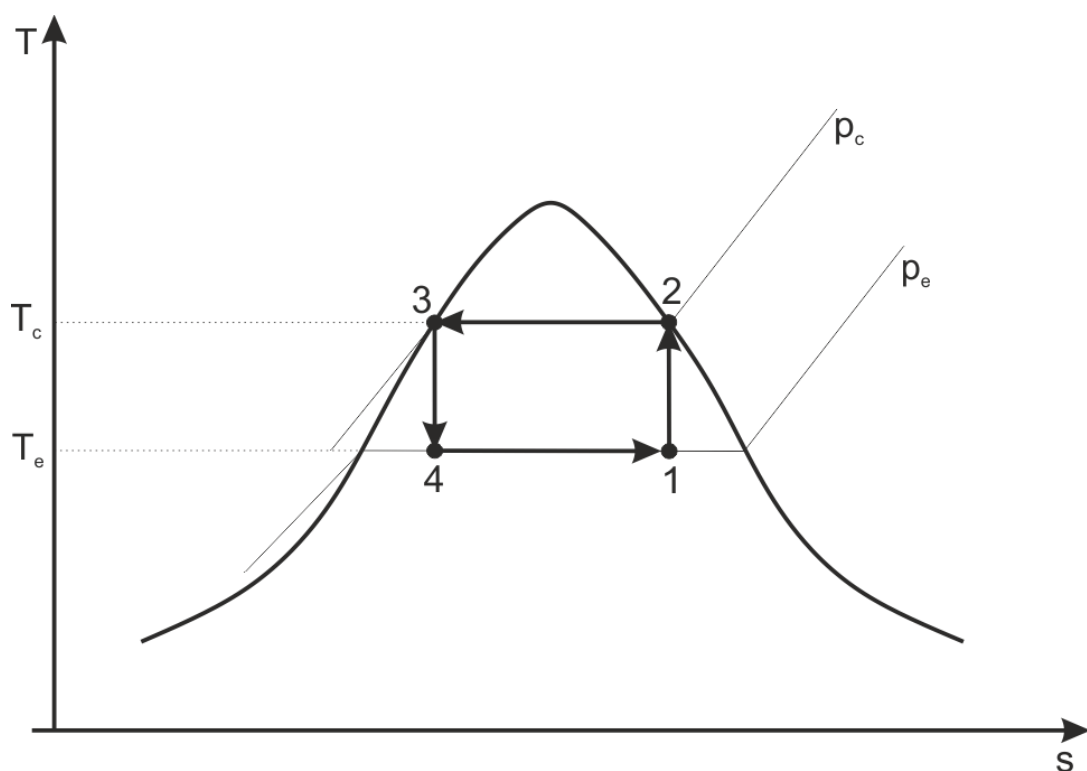


Figura 4.3- Diagrama T-s para o ciclo de Carnot invertido.

Segundo Oliveira, P. P. (2012), os problemas práticos que impossibilitam a utilização do ciclo de Carnot invertido, são solucionados através de uma evaporação até ao estado de vapor saturado, uma compressão de vapor sobreaquecido, ocorrendo no compressor, e uma expansão a ocorrer numa válvula de expansão ao invés de ser realizado numa turbina.

Este ciclo pode ser considerado ideal, uma vez que não são consideradas as perdas que ocorrem no compressor, se admite que a compressão é isentrópica, e se desprezam as perdas de carga no condensador e no evaporador, considerando que ambos os processos a pressão constante.

Como é possível observar na *figura 4.4*, a compressão adiabática é reversível, ocorrendo desde o ponto 1, encontrando-se o fluido de trabalho na forma de vapor saturado à pressão de

evaporação (p_e), até ao ponto 2, que o fluido como vapor sobreaquecido a uma pressão igual à pressão de condensação (p_c).

Durante a condensação dá-se o arrefecimento do fluido de trabalho, ocorrendo a pressão constante (p_c). O arrefecimento do fluido ocorre por transferência de calor com outro fluido. Esse fluido, normalmente ar atmosférico, encontra-se a uma temperatura inferior à temperatura de condensação (T_c). A transferência de calor entre os fluidos ocorre por meio de um permutador de calor, normalmente denominado de condensador. A condensação ocorre desde o ponto 2, vapor sobreaquecido à saída do compressor, até ao ponto 3, onde o fluido se encontra como líquido saturado.

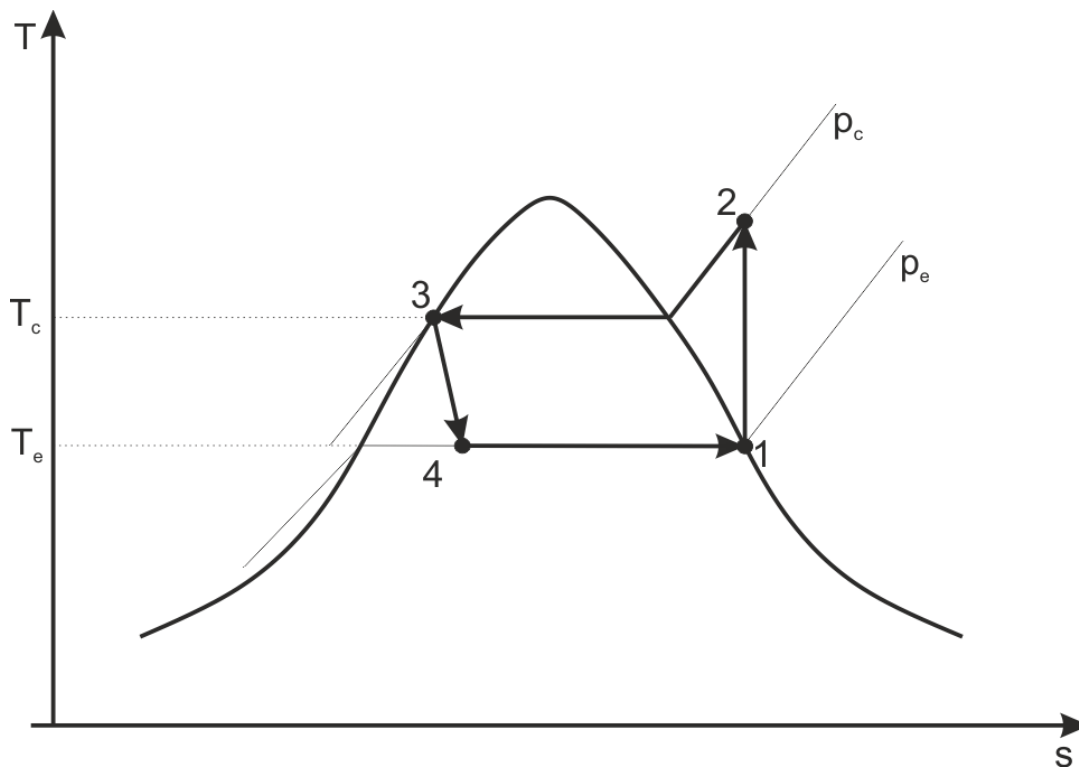


Figura 4.4- Diagrama T-s para o ciclo de refrigeração ideal.

A passagem pelo dispositivo de expansão ocorre desde o ponto 3, onde o fluido de trabalho se encontra como líquido saturado à pressão de condensação, até ao ponto 4, reduzindo-se a pressão até à pressão de evaporação. O processo de expansão é referenciado como isentálpico, e promove o arrefecimento do fluido de trabalho desde a temperatura de condensação até à temperatura de evaporação.

O último processo ocorre num permutador de calor, normalmente denominado de evaporador. De forma semelhante ao que ocorre no condensador, há uma transferência de calor, mas em sentido contrário. O fluido de trabalho absorve calor proveniente de outro fluido, normalmente ar atmosférico, que atravessa as alhetas do permutador. O fluido de trabalho evapora até atingir o estado de vapor saturado do ponto 1. Este processo ocorre a temperatura constante.

O balanço energético dos vários componentes do ciclo de refrigeração ideal, é determinado através das entalpias nos vários estados. A pressão de evaporação é igual à pressão de saturação à temperatura de evaporação e a pressão de condensação é igual à pressão de saturação à temperatura de condensação, como é observável na *equação 4.5 e 4.6*.

$$p_c = P_{sat}(T_c) \quad (4.5)$$

$$p_e = P_{sat}(T_e) \quad (4.6)$$

O ponto 1 e o ponto 3 encontram-se na linha de saturação, ou seja, a sua entalpia pode ser diretamente retirada das tabelas de refrigerante saturado. A entalpia do ponto 1 é igual à entalpia de vapor saturado à pressão de evaporação, enquanto para o ponto 3 a igualdade dá-se com a entalpia de vapor saturado à pressão de condensação (*equação 4.7 e 4.8*).

$$h_1 = h_g(p_e) \quad (4.7)$$

$$h_3 = h_f(p_c) \quad (4.8)$$

Sendo h_1 a entalpia do ponto 1 e h_3 a entalpia do ponto 3. A entropia do ponto 1 é igualmente retirada da tabela de refrigerante saturado, sendo igual à entropia de vapor saturado à pressão de evaporação, igualdade que é dada pela *equação 4.9*.

$$s_1 = s_g(p_e) \quad (4.9)$$

Relativamente ao ponto 2, é sabido que se encontra na zona de vapor sobreaquecido, que a sua pressão é igual à pressão do ponto 3 e que a sua entropia é igual à do ponto 1. Através da consulta das tabelas de refrigerante sobreaquecido é possível retirar diretamente a sua entalpia. A entalpia do ponto 4 é considerada igual à entalpia do ponto 3, visível na *equação 4.10*).

$$h_4 = h_3 \quad (4.10)$$

Sendo h_4 a entalpia do ponto 4 e h_3 a entalpia do ponto 3. As equações de balanço energético para cada componente do ciclo, demonstrados na *figura 4.2*, são as seguintes:

- Compressor

$$w_c = h_2 - h_1 \text{ [kJ/kg]} \quad (4.11)$$

Em que w_c representa do trabalho fornecido ao compressor;

- Condensador

$$q_c = h_2 - h_3 \text{ [kJ/kg]} \quad (4.12)$$

Em que q_c representa o calor de condensação, absorvido pelo ar atmosférico (rejeitado no condensador);

- Válvula de expansão

$$h_4 = h_3 \text{ [kJ/kg]} \quad (4.13)$$

- Evaporador

$$q_e = h_1 - h_4 \text{ [kJ/kg]} \quad (4.14)$$

Em que q_e representa o calor de evaporação, absorvido pelo fluido de trabalho (calor removido do espaço refrigerado).

Segundo Çengel, Y. A., Boles, A. (1998) a existência de um processo de expansão no ciclo de refrigeração faz com que a nível interno o ciclo não se torne reversível, uma vez que este processo é irreversível. Este processo é mantido no ciclo por forma a tornar este ciclo mais realista. A substituição da expansão, realizada por um capilar, válvula de expansão, ou outro qualquer dispositivo de expansão, por uma turbina isentrópica, o fluido de trabalho iria entrar no evaporador num estado designado de 4', situado à mesma temperatura do estado 4, mas com uma entropia inferior (*figura 4.4.*), causando uma diminuição da capacidade de refrigeração por parte deste ciclo. Por sua vez, esta diminuição iria resultar num aumento do trabalho fornecido ao compressor.

4.2.2. Ciclo de refrigeração real

Uma vez que um ciclo ideal não podia ser considerado como um ciclo reversível, devido à utilização de um dispositivo que realiza a expansão, o ciclo real de refrigeração possui diversas fontes de irreversibilidades, tornando o desempenho deste inferior relativamente ao do ciclo ideal.

A distinção entre um ciclo ideal e um ciclo real é realizada com base na irreversibilidade do ciclo. Estas irreversibilidades ocorrem, entre outras razões, devido ao atrito do fluido refrigerante com as paredes dos componentes utilizados e devido às transferências de calor com o ambiente, que ocorrem de forma despropositada devido à não perfeição dos isolamentos.

Para que um ciclo real se aproxime o máximo possível de um ciclo ideal ocorrem alterações no sistema. A irreversibilidade é também comprovada com a impossibilidade de controlo preciso do estado do refrigerante em certos momentos.

No diagrama T-s de um ciclo ideal de refrigeração, estão apenas representados 4 pontos, localizados entre cada componente do sistema. Contudo, um ciclo de refrigeração real faz-se representar por 8 pontos no diagrama T-s, como pode ser observado na *figura 4.5*. Esta alteração da estrutura do diagrama, visível na *figura 4.6*, deve-se às razões apresentadas anteriormente como as responsáveis pela irreversibilidade do sistema. Num ciclo de refrigeração ideal, o refrigerante chega ao compressor na forma de vapor saturado, ao contrário do que ocorre num ciclo de refrigeração real comum. Na tentativa de colmatar esta falta de controlo, é utilizado o sobreaquecimento do refrigerante, por forma a garantir que este se

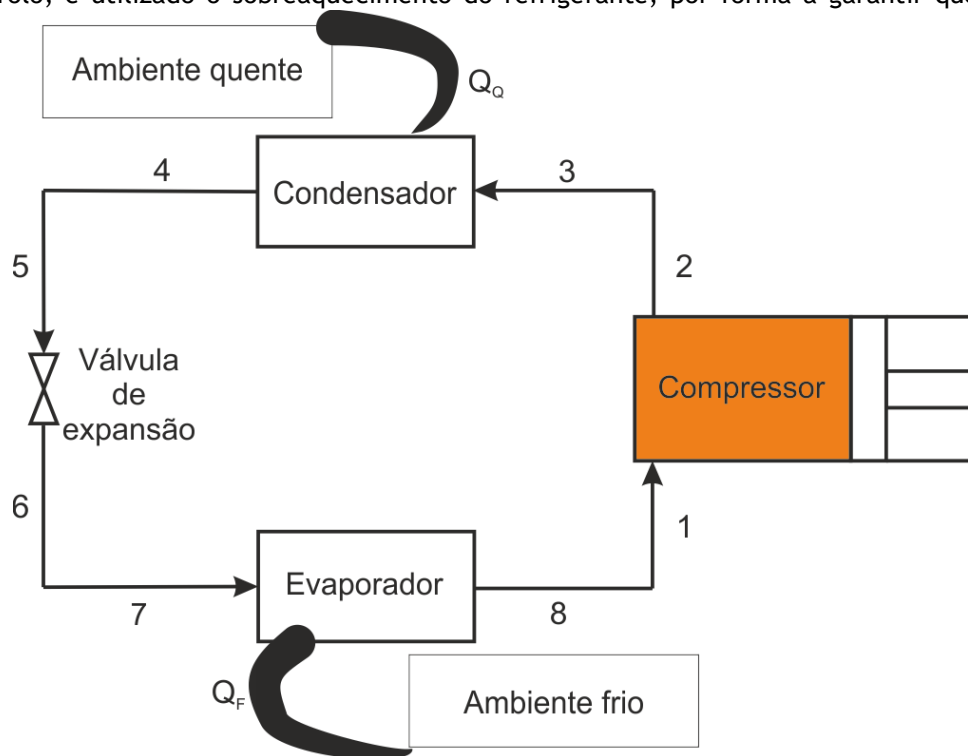


Figura 4.5- Esquema do circuito do ciclo de refrigeração real.

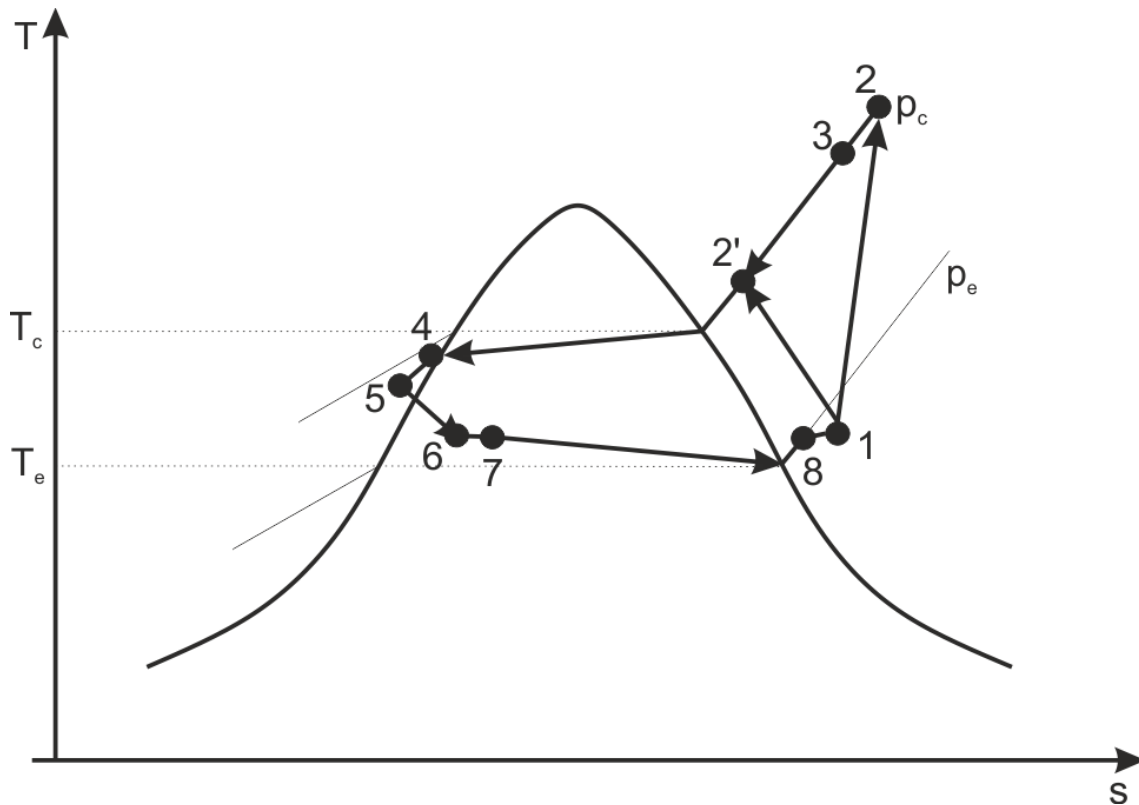


Figura 4.6- Diagrama T-s do ciclo de refrigeração real, segundo Çengel, Y. A., Boles, A. (1998).

encontra totalmente evaporado antes de entrar no compressor. Esta técnica além de aumentar a vida útil do compressor melhora o seu rendimento. No diagrama T-s este processo ocorre do ponto 8 para o ponto 1. O sobreaquecimento do fluido de trabalho representa um ganho de calor na tubagem que liga o evaporador e o compressor, havendo uma redução de pressão ao longo do evaporador (7-8) e um aumento do volume específico. Segundo Çengel, Y. A., Boles, A. (1998), o volume específico do refrigerante é proporcional ao consumo energético do compressor.

Ainda segundo Çengel, Y. A., Boles, A. (1998), o processo de compressão, num ciclo de refrigeração real, não pode ser considerado reversível, adiabático ou isentrópico, devido aos efeitos do atrito e à transferência de calor. O atrito faz com que a entropia aumente e a transferência de calor pode resultar num aumento ou diminuição de entropia, dependendo do sentido da transferência. Se a entropia do refrigerante aumentar, a transição ocorre de 1-2, se a entropia diminuir a transição ocorre de 1-2', dependendo do efeito dominante. O processo mais desejável ocorre com a diminuição da entropia do refrigerante, uma vez que o volume específico é menor, logo a necessidade energética do compressor é menor.

À saída do condensador, num ciclo ideal de refrigeração, o refrigerante encontrava-se como líquido saturado e com a mesma pressão que tinha à saída do compressor. No ciclo de refrigeração real ocorrem quedas de pressão, quer ao longo do compressor (3-4 ou 2'-4), quer nas tubagens que interligam os componentes (4-5 e 2-3) e na válvula de expansão (5-6). Contudo não é possível realizar a condensação de forma que à saída do condensador possa ser

encontrado líquido saturado. Por forma a controlar a condição do refrigerante à entrada da válvula de expansão, este é subarrefecido (4-5). A sua utilização permite que o refrigerante entre no evaporador com uma entalpia menor, conseguindo assim absorver uma maior quantidade de calor, aumentando a potência de refrigeração e diminuindo o consumo de potência elétrica.

Por forma a reduzir as perdas de pressão nas tubagens e a absorção de calor do ambiente exterior, entre a válvula de expansão e o evaporador, estes dois componentes encontram-se próximos um do outro, na montagem física do equipamento (6-7).

Segundo Oliveira, P. P. (2012), o ciclo de refrigeração real pode ser representado por um diagrama T-s de diferente configuração ao apresentado na *figura 4.6*. Segundo o autor as alterações realizadas relativamente ao apresentado como sendo o diagrama T-s do ciclo ideal, têm, também, a ver com as razões da irreversibilidade do ciclo. Além das perdas de pressão nas tubagens e das transferências de calor que nelas ocorrem, são apresentadas ainda duas razões. A primeira, e a mais preponderante, refere-se ao facto de a compressão não ocorrer de forma isentrópica, havendo na realidade um aumento da entropia num compressor adiabático, sendo isto visível na *figura 4.7*, transição do ponto 1 para o ponto 2. A segunda refere-se às perdas de carga nos permutadores.

No diagrama T-s apresentado pelo autor, apenas é referenciado o facto de o fluido de trabalho, à saída do condensador, não se encontrar na situação de líquido saturado, mas sim se encontrar

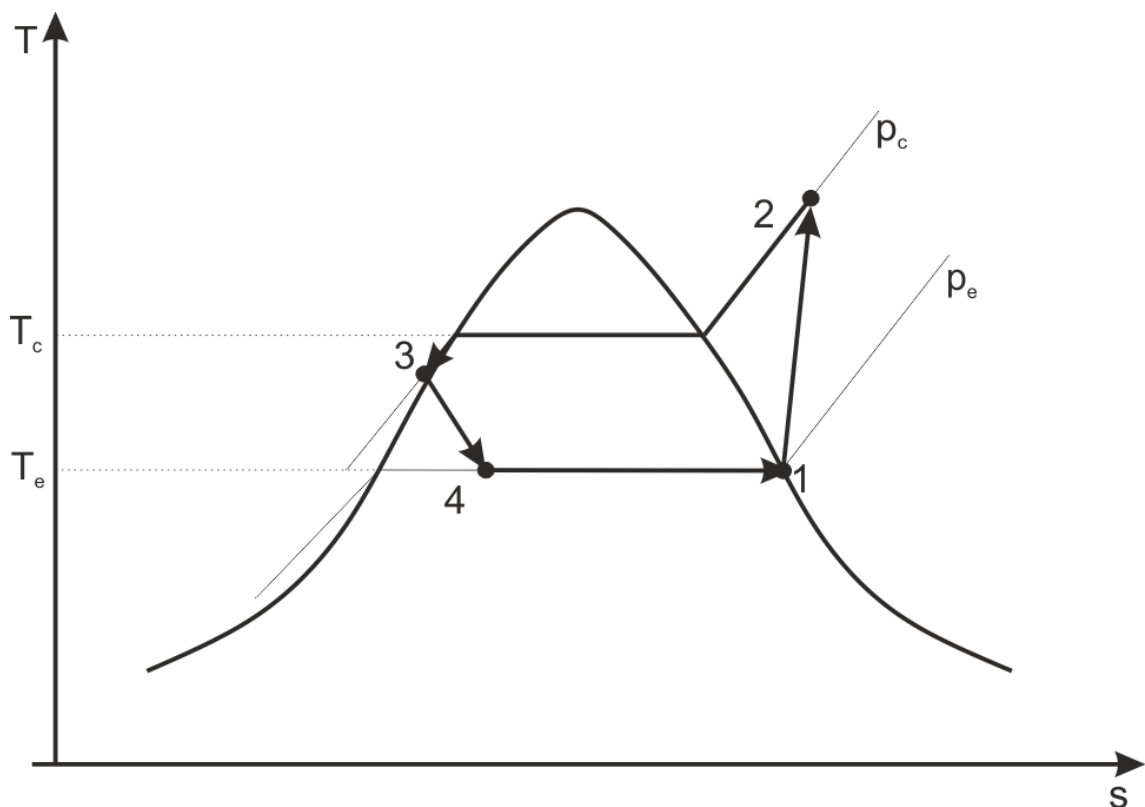


Figura 4.7- Diagrama T-s do ciclo de refrigeração real, segundo Oliveira, P. P. (2012).

em líquido subarrefecido, com uma temperatura um pouco inferior. Este efeito é contemplado na *figura 4.7*, com a deslocação do ponto 3 para a esquerda. É ainda visível o aumento da entropia do ponto 2, sendo este deslocado para a sua direita.

4.3. Sistemas de desumidificação

Grande parte da população encontra-se familiarizada com o princípio de condensação. Quando o ar é arrefecido abaixo da temperatura de ponto de orvalho, a humidade condensa na superfície mais próxima. O ar fica então desumidificado através do arrefecimento e da condensação. A quantidade de humidade que é removida do ar depende da temperatura até à qual o ar pode ser arrefecido, ou seja, quanto menor a temperatura, mais seco estará o ar.

O processo apresentado na *figura 4.8*, é o princípio operativo por de trás da maior parte das bombas de calor comerciais e residenciais. Os sistemas de refrigeração arrefecem o ar, retiram alguma da sua humidade, através da condensação, e enviam o ar frio e seco para o espaço. Neste caso, as bombas de calor são utilizadas para o controlo da condição térmica do ar em espaços interiores, sendo o principal objetivo a redução da humidade. Os desumidificadores, com o intuito de poderem ser deslocados e também devido ao facto de serem utilizados maioritariamente em alturas em que a temperatura ambiente é reduzida, apresentam um

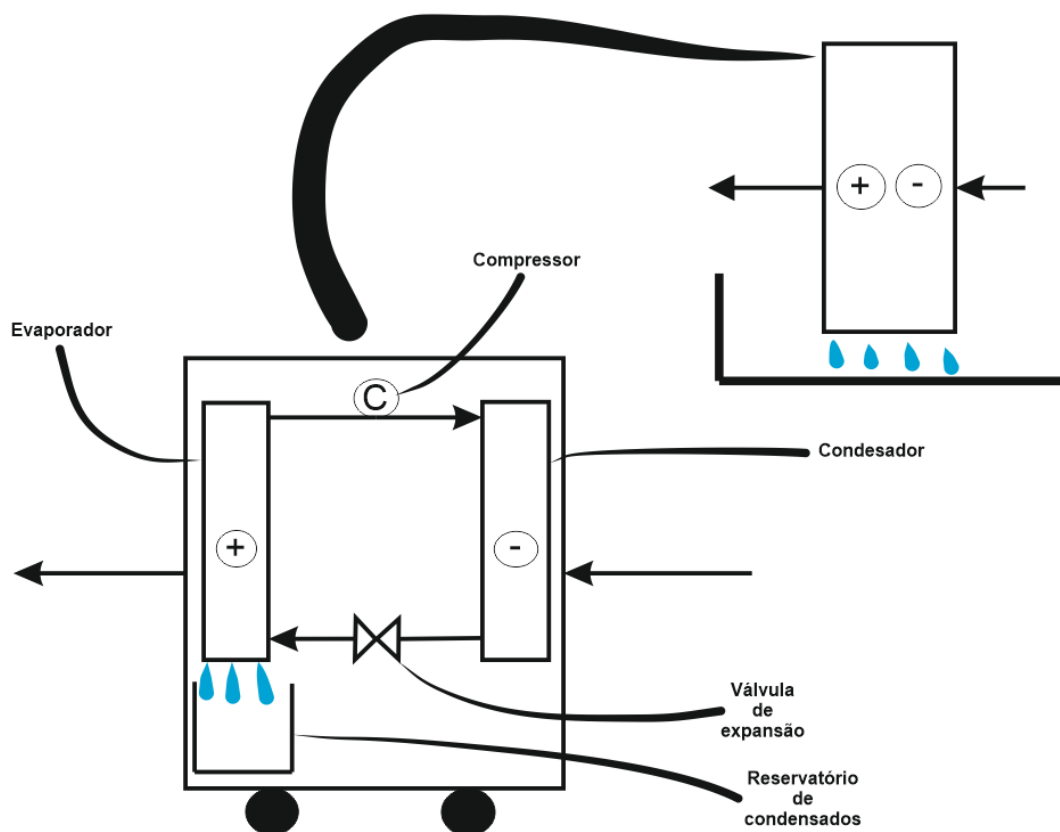


Figura 4.8- Componentes de um sistema de desumidificação.

sistema de aquecimento do ar. Ou seja, a massa de ar que é aquecida e desumidificada é a mesma que é aquecida à saída do equipamento.

Da mesma forma que foi referido anteriormente as máquinas frigoríficas ou as bombas de calor são constituídas por diversos componentes. Os componentes principais são os permutadores (i.e., condensador e evaporador), um compressor e um dispositivo de expansão, sendo possível observar um esquema deste tipo de equipamentos na *figura 4.8*.

O compressor, acionado mecanicamente por um motor normalmente elétrico, realiza a circulação do fluido através de um aumento da pressão no circuito. Este componente pode ser classificado consoante o processo de compressão e o tipo de vedação que existe entre o compressor e o seu acionamento. Em termos de vedação o conjunto compressor-motor pode ser do tipo hermético, semi-hermético ou do tipo aberto. Uma configuração hermética apresenta elevada robustez, baixo custo e reduzida necessidade de manutenção, uma vez que ambos os componentes se encontram no interior de uma carcaça sólida e totalmente isolados do exterior. Esta configuração permite o aquecimento do motor elétrico através do fluido de refrigeração em circulação, sendo preferencialmente utilizada para pequenos equipamentos de desumidificação domésticos. Os equipamentos semi-herméticos apresentam apenas uma diferença relativamente aos herméticos, sendo esta o facto de existir a possibilidade de remoção do cabeçote do compressor para permitir o acesso aos componentes constituintes do compressor. Numa configuração do tipo aberto o compressor é acionado através de um eixo que atravessa a carcaça deste, permitindo a utilização de motores de combustão interna ou motores elétricos de elevada potência. Relativamente ao processo de compressão, os compressores podem ser distinguidos como equipamentos de deslocamento positivo ou dinâmico. Os compressores de deslocamento positivo, como é o caso dos compressores alternativos, de parafuso, rotativo de palhetas e de Wankel, realizam a compressão através da diminuição do volume interno da câmara de compressão. Os compressores de turbina ou centrífugos, caracterizados por serem máquinas dinâmicas, aumentam a pressão do fluido de trabalho através da conversão da pressão dinâmica em pressão estática. A compressão do fluido refrigerante resulta num aumento da sua temperatura, sendo o compressor escolhido com base na sua capacidade de refrigeração, no caudal de fluido refrigerante, na razão de compressão e nas propriedades térmicas e físicas do fluido refrigerante (Duarte, M. V. (2013)).

O evaporador possui esta designação pois no seu interior o fluido refrigerante evapora, passando do estado líquido para o estado gasoso. Para ocorrer a evaporação do fluido de trabalho, este tem de receber calor, podendo este ser proveniente do ar ou de água que se encontra a uma temperatura superior à do fluido de trabalho. A transmissão de calor ocorre através das alhetas do evaporador e da sua serpentina, podendo resultar na condensação de vapor de água, no caso de a troca de calor ser realizada com o ar. À saída do evaporador, o refrigerante é conduzido a um compressor, onde a sua pressão aumenta consideravelmente (i.e., entre 5 a 10 vezes maior do que a pressão verificada no evaporador). A classificação dos

evaporadores é realizada com base no fluido que realiza a transmissão de calor com a superfície do evaporador. Assim, os evaporadores podem ser do tipo seco ou do tipo inundado. Os evaporadores secos são comumente utilizados em espaços fechados, utilizando o ar para evaporar o fluido refrigerante. Os evaporadores do tipo inundado são utilizados para o arrefecimento de líquidos, como a água e leite (Duarte, M. V. (2013)).

O fluido refrigerante, comprimido e a uma temperatura elevada, condensa no interior de um permutador, sendo este designado de condensador. O calor do fluido de trabalho é transferido para o ar ou para a água que atravessa das alhetas e a serpentina do condensador. Os condensadores podem ser distinguidos com base no tipo de arrefecimento que utilizam, podendo ser arrefecidos a água, a ar ou por efeito evaporativo. A utilização de um determinado tipo de condensador está principalmente dependente da sua capacidade de transferência de calor (Duarte, M. V. (2013)).

Após a condensação do fluido refrigerante, ocorrida no condensador, o fluido é enviado para um dispositivo de expansão onde é realizada uma diminuição da pressão, desde a pressão de condensação até à pressão de evaporação, dando-se também uma redução da temperatura. Assim, o fluido de trabalho, novamente gasoso e a baixa temperatura, é enviado para o evaporador para arrefecer novamente o ar com o intuito de diminuir a humidade ambiente. Os dispositivos mais utilizados para a realização deste processo são a válvula de expansão termostática, a válvula de expansão a pressão constante, a válvula de boia e o tubo capilar, realizando estes o controlo do caudal do fluido refrigerante consoante a quantidade de calor a ser removido do espaço a refrigerar (Duarte, M. V. (2013)).

Existem ainda outros componentes que embora possuam importância para os sistemas de desumidificação, a sua inexistência não representa um impedimento à realização do processo. O acumulador é um componente utilizado como reservatório temporário para o excesso de mistura óleo-fluido refrigerante, devolvendo-a a uma taxa que não prejudique o funcionamento normal do compressor. Também para a preservação do compressor, pode ser utilizado um separador de óleo que limita a quantidade de óleo existente no fluido de trabalho. O recetor é um dispositivo utilizado apenas quando é utilizada uma válvula de expansão, proporcionando o armazenamento de fluido de trabalho em excesso sempre que o caudal de fluido refrigerante é alterado pela válvula. O filtro é utilizado para remoção de materiais estranhos ou impurezas que se possam ter depositado no circuito de refrigeração. Para evitar a degradação do fluido de trabalho pode ser utilizado um secador, diminuindo este a humidade existente no refrigerante. O controlador de descongelamento é outro dos dispositivos passíveis de utilizar nos equipamentos de desumidificação, definindo intervalos de tempo em que deve ser acionado o sistema de remoção de gelo da superfície do evaporador. Este processo pode ser realizado através da utilização do fluido refrigerante, havendo a possibilidade de ser apoiado por uma válvula de retenção e por uma válvula de solenoide, embora estes componentes possam ser utilizados mesmo que não exista o controlador de descongelamento. A válvula de retenção

impede o retorno do fluido refrigerante, sendo acionada mecanicamente, enquanto a válvula de solenoide permite interromper ou alterar a circulação deste através do acionamento elétrico.

Equipamentos de desumidificação podem possuir diferentes modos de funcionamento, estando estes ligados com a alteração de funcionamento do compressor ou do ventilador. Relativamente ao ventilador é possível regular a velocidade do ar, através da regulação da velocidade das pás do ventilador. Isto permite o aumento ou a diminuição da extração de humidade do ar atmosférico. O funcionamento do compressor pode ser regulado de três formas distintas, podendo ainda funcionar em contínuo. No funcionamento em contínuo o desumidificador apenas para de funcionar se o reservatório, de recolha dos condensados, estiver cheio ou se for desligado manualmente. Em qualquer uma das formas utilizadas para a regulação do compressor, este funciona num ciclo de *on/off*, ou seja, liga e desliga diversas vezes por forma a cumprir o que lhe é pedido. A regulação da temperatura, pretendida na superfície do evaporador, é uma das formas de ajustar o funcionamento do compressor, uma vez que este desligará quando a temperatura pretendida é atingida e ligará novamente quando a temperatura verificada assumir um valor superior ao solicitado. Quanto menor for a temperatura na superfície do evaporador maior será a captação de vapor de água atmosférico e maior será a potência utilizada pelo compressor. A regulação da temperatura pode ocorrer de forma analógica ou digital. A regulação da humidade é outra das formas de impor alterações ao funcionamento do compressor. A humidade referida é a humidade existente no espaço ambiente, normalmente medida à entrada do evaporador. A seleção da humidade pretendida pode ser realizada de igual forma à regulação da temperatura. Neste modo de funcionamento o desumidificador, por meio do comportamento do compressor, realiza o controlo da humidade existente, tentando manter as condições pretendidas pelo utilizador. Em comparação, a regulação da temperatura na superfície do evaporador é bastante mais precisa do que a regulação da humidade, devido ao modo como ambas são medidas. Por último, é ainda possível apresentar outro modo de funcionamento dos desumidificadores, onde não é possível seleccionar os valores de temperatura, ou de humidade, que se pretende obter. Neste tipo de funcionamento o desumidificador é definido por valores limites de humidade e de temperatura, ou seja, o compressor estará em funcionamento sempre que as condições ambiente estejam entre os valores limite seleccionados pelo construtor. Este modo de funcionamento pode ser considerado como funcionamento contínuo, uma vez que, se o espaço onde está colocado o desumidificador, não for completamente isolado e for de um volume considerável, será praticamente impossível ultrapassar os limites devido à renovação do ar. Como referido anteriormente, a medição da temperatura é mais precisa do que a medição da humidade, logo o compressor desligará, na maioria das vezes, devido à temperatura, mesmo que o limite de humidade já tenha sido ultrapassado.

A capacidade de desumidificação é tida como uma das mais importantes especificações a ter em conta para a seleção de um desumidificador, embora possa ser um valor bastante ilusório. Este valor vem sempre expresso numa unidade de volume por unidade de tempo, normalmente litros por dia (i.e., l/dia). A capacidade de desumidificação indica a quantidade de água que um equipamento pode extrair do ambiente durante um determinado intervalo de tempo, sendo importante referir que este valor só é verdadeiro para as condições ambiente referidas para a obtenção deste valor. Isto é, para serem determinados os valores da capacidade de desumidificação, os construtores têm de sujeitar o equipamento a um conjunto de testes com condições ambiente impostas. Para que o valor da capacidade de desumidificação chame à atenção do comprador, são utilizadas condições ambiente que conduzam a elevadas capacidades de desumidificação. Quase todos os construtores utilizam valores de humidade e de temperatura diferentes, levando a que esta especificação do equipamento possa ser enganadora. Um equipamento A que possui uma capacidade de desumidificação de 12 l/dia em condições de 30 °C e de 80%, temperatura e humidade respetivamente, não possui garantidamente uma maior capacidade de desumidificação do que um equipamento B que é capaz de captar 6,4 l/dia em condições de 20 °C e de 60%, de temperatura e humidade respetivamente. Na verdade, neste exemplo é possível ter a certeza de qual o equipamento que apresenta melhor desempenho, uma vez que um dos construtores fornece valores de capacidade de desumidificação para condições ambiente diferentes. Assim, o equipamento B apresenta uma capacidade de desumidificação de 20 l/dia, para as condições ambiente referidas para o equipamento A, e por isso apresenta melhor desempenho.

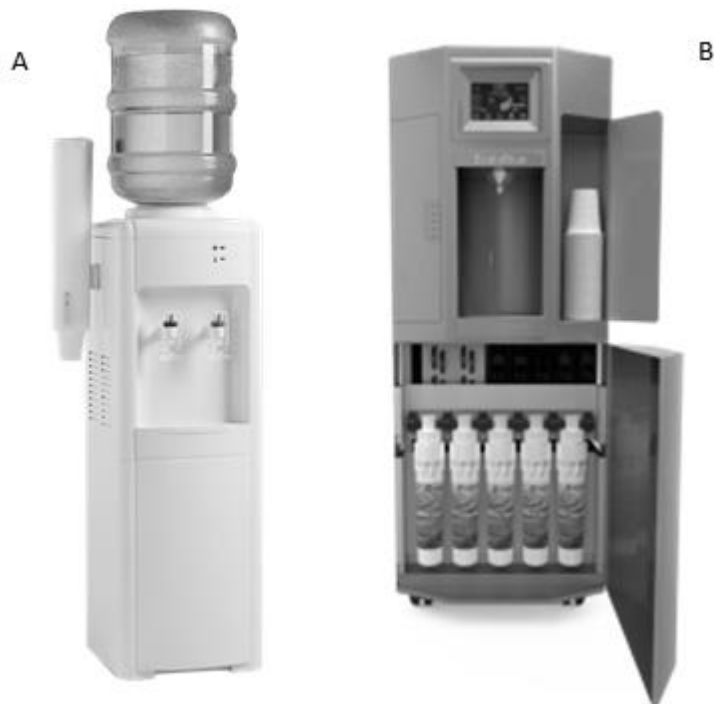


Figura 4.9- A- Dispensador de água comum; B- Sistema de condensação. EcoloBlue 30 Series (2015)

4.4. Sistemas de condensação

Estes sistemas possuem em funcionamento em tudo igual aos desumidificadores, assim como os aspetos construtivos, contudo o seu objetivo é a obtenção de água potável. Para poder se obtida água potável é necessária a incorporação de sistemas de tratamento de água e de mineralização. Para que a água captada do ar atmosférico passe pelo processo de eliminação de contaminantes têm de ser incorporada uma bomba hidráulica, para que o condensado possa ultrapassar todas as etapas de purificação. É ainda possível o aproveitamento do fluido de trabalho do sistema de refrigeração para realizar o aquecimento ou o arrefecimento da água à saída do equipamento.

Estes tipos de equipamentos podem apresentar ser de diversos tamanhos, dependendo do seu fim. Na atualidade já se encontram desenvolvidos diversos sistemas de condensação como o que é apresentado na *figura 4.9B*. Estes sistemas são normalmente utilizados no interior de edifícios de serviços ou até mesmo domésticos, por forma a diminuir os consumos hídricos dos edifícios. Na *figura 4.9A* é possível observar os dispensadores anteriormente utilizados. Estes sistemas além de necessitarem de energia necessitam da introdução de um garrafão de água. As tecnologias de produção de água por condensação abastecem-se sozinhas, sendo apenas necessário fornecer-lhes energia elétrica. Por último, estes equipamentos possuem ainda a capacidade de melhorar a qualidade do ar onde estão inseridos, uma vez que a humidade é reduzida, tornando o ar mais seco.

Capítulo 5

5. Estudo Experimental

Nos capítulos anteriores foram apresentadas diversas formas de produção de água potável, dando especial destaque à produção de água a partir da condensação do vapor de água atmosférico. Foram ainda apresentados os balanços energéticos que ocorrem durante o processamento do ar atmosférico, bem como os processos, pelos quais este é obrigado a passar e os componentes utilizados.

Apesar da diversa gama de equipamentos capazes de satisfazer a necessidade mundial de obtenção de soluções para colmatar a crescente escassez de água doce, foi escolhido um equipamento comercial de desumidificação por compressão de vapor para comprovar, através de ensaios experimentais, que o futuro da água doce pode passar pelo processamento de vapor de água atmosférico.

O presente capítulo abordará todos os pontos necessários para a caracterização da instalação experimental, bem como a caracterização dos ensaios realizados e ainda serão apresentados os resultados obtidos. Por último, neste capítulo, será importante a discussão dos resultados por forma a serem retiradas conclusões sobre o funcionamento do equipamento.

5.1. Instalação Experimental

Todos os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios referidos posteriormente, serão apresentados e descritos neste subcapítulo, permitindo uma melhor perceção da constituição e funcionamento da instalação experimental.

Como tal nas subsecções seguintes será descrito o equipamento de desumidificação por compressão de vapor, o sistema ar condicionado utilizado e a câmara climática. Será ainda referida, durante os subcapítulos seguintes, a localização dos equipamentos de medição das condições ambiente aplicados ao longo da instalação experimental.

5.1.1. Equipamento de desumidificação por compressão de vapor

O equipamento utilizado nos ensaios experimentais trata-se de um desumidificador comercial fornecido pela empresa TROTEC (TTK 75 Eco (2014)). O TTK 75 ECO apresentado na *figura 5.1*, segundo o fornecedor, apresenta uma estrutura robusta de metal adequado para processos de desumidificação semiprofissional.

Utilizando o princípio de compressão de vapor, este equipamento assegura uma redução automática da humidade existente no interior de um local fechado. Os componentes visíveis



Figura 5.1- Equipamento TROTEC TTK 75 ECO. TTK 75 Eco (2014)

externamente são apresentados na *figura 5.2*. O sistema funciona através da aspiração, realizada pelo ventilador (17) (*figura 5.7*), de ar húmido através da entrada de ar (6), forçando-o a atravessar o filtro (3), o evaporador (9) e o condensador (10) (*figura 5.3*) localizados por detrás do filtro. Como descrito anteriormente, o ar é arrefecido no evaporador, que se encontra a uma temperatura reduzida, até uma temperatura inferior à temperatura do ponto de orvalho. O vapor de água contido no ar é condensado nas alhetas do evaporador. No condensador o ar frio e seco é aquecido e enviado novamente para o exterior. Através da constante circulação do ar através do equipamento a humidade ambiente é reduzida no local da instalação.

Dependendo da temperatura e da humidade verificada no local, a água condensada escorre, do evaporador para a bandeja de condensado (11) (*figura 5.3*), constantemente ou apenas durante as fases periódicas de descongelação. Posteriormente o condensado é armazenado no depósito (5) (*figura 5.2*).

O sistema de descongelação é ativado pelo sensor de temperatura (12) localizado no evaporador, como é possível observar na *figura 5.3*. Este sensor ativa a electroválvula (13) (*figura 5.4*), fazendo com que o fluido refrigerante à saída do compressor rotativo (16) (*figura 5.6*) tome outro caminho, passando logo pelo evaporador e realizando o descongelamento. Este circuito secundário é representado pelo número 14 na *figura 5.5*.

Quando o depósito do condensado atinge o seu limite é acesa uma luz de controlo (7) (*figura 5.2*) e o equipamento desliga-se. Esta lâmpada apenas é desligada quando o depósito é esvaziado e é novamente colocado no local correto, retomando novamente a operação. Opcionalmente, o condensado pode ser conduzido para outro local através da colocação de uma

mangueira na conexão sinalizada pelo número 4, da *figura 5.2*. Esta opção ajuda a que a água captada não seja contaminada no depósito do equipamento, permitindo também a medição da quantidade de água captada, sem a necessidade de extração do depósito.

No painel do utilizador é ainda apresentado um contador de horas de funcionamento (8) e um botão para ligar e desligar o equipamento (1), ambos representados na *figura 5.2*.

Segundo o fabricante o TTK 75 ECO permite uma redução de até 30% na humidade do ar, assim como um aumento da temperatura de 1 a 3 °C no ambiente.

Como descrito anteriormente os fornecedores definem, através de ensaios, a capacidade de desumidificação dos equipamentos para determinadas condições. Para este equipamento a TROTEC define dois valores, sendo um para condições de 30°C e de 80% de temperatura e humidade relativa, respetivamente. Para estas condições podem ser obtidos 20l/dia, enquanto que para condições inferiores, ou seja, de 20°C e 60% de temperatura e humidade relativa, respetivamente, podem ser atingidos 6,4 l/dia de condensado.

O funcionamento deste equipamento pode ser tido como contínuo, como explicado no capítulo anterior, uma vez que, pelo fabricante são impostas condições limite de funcionamento. Posto isto, este sistema opera apenas para condições que se localizem entre 5 e 32 °C de temperatura e entre 30 e 90% de humidade relativa.

Outras especificações fornecidas pelo fabricante podem ser observadas na *tabela 2*.

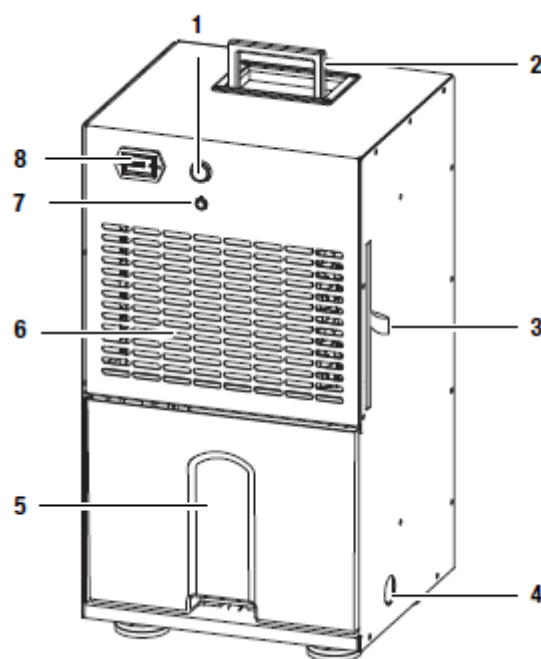


Figura 5.2- Componentes visíveis externamente. TTK 75 Eco (2014)

Tabela 2- Especificações do equipamento. TTK 75 Eco (2014)

Parâmetro	Valor
Modelo	TTK 75 ECO
Fluxo de ar	260 m ³ /h
Tamanho da divisão	20 m ² /6 0m ³
Fonte elétrica	230 V/ 50 Hz
Potência (max.)	0.44 kW
Corrente nominal	1.6 A
Corrente de arranque	10 A
Tanque de condensado	4 l
Refrigerante	R134a
Quantidade de refrigerante	190 g
Dimensões (xyz) (figura 5.8)	315 x 310 x 555
Distância mínima de paredes	Figura 5.8
Nível de pressão acústica dB(A) (1m)	51 dB(A)

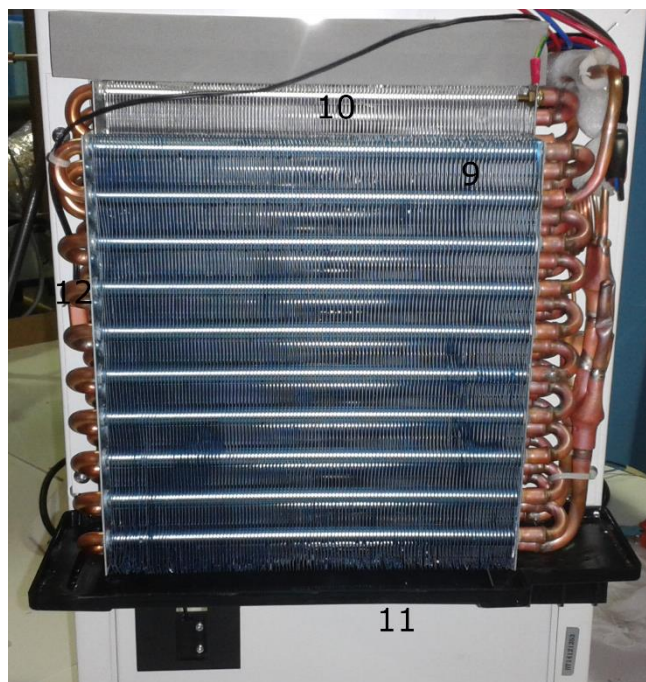


Figura 5.3- Localização do evaporador (9), do condensador (10), da bandeja de condensado (11) e do sensor de temperatura (12).



Figura 5.4- Localização da electroválvula (13).



Figura 5.5- Localização do dispositivo de expansão (15) e da ligação do circuito de descongelação ao evaporador (14).



Figura 5.6- Localização do compressor (16).

5.1.2. Unidade de ar condicionado

Por forma a poderem ser testadas diferentes condições ambiente no interior da câmara climática foi utilizado um sistema de ar condicionado, o Air Conditioning Laboratory Unit A573 (Air Conditioning Laboratory Unit A573), fornecido pela P.A. Hilton Ltd.. Este sistema está ligado à câmara através de tubos flexíveis de alumínio isolados com lã de vidro. Como é possível

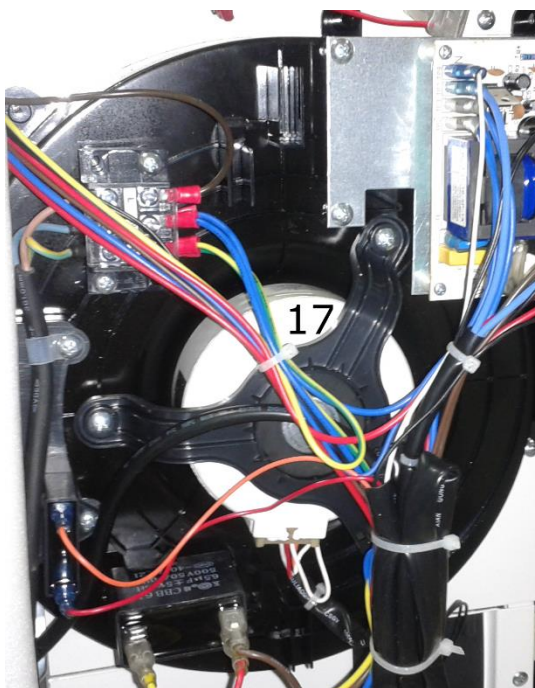


Figura 5.7- Localização do ventilador (17).

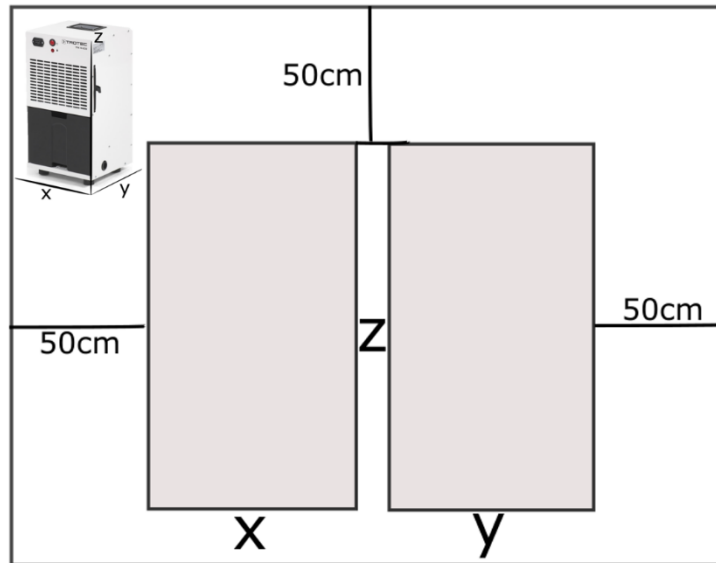


Figura 5.8- Distância mínima às paredes.

observar na figura 5.9, esta unidade é constituída por um ventilador (1), dois pares de resistências elétricas para aquecimento do ar (2 e 4), uma unidade de arrefecimento com desumidificação (3), uma caldeira elétrica (5) e o painel de controlo (6).

Todos os componentes são controlados através do painel de controlo. A caldeira elétrica é composta, no seu interior, por três resistências e uma boia de nível para caldeira. A boia permite uma entrada quase constante de água, não perturbando significativamente a geração de vapor de água. As três resistências existentes (i.e., de 1 kW, de 2 kW e de 2 kW) no seu interior, são acionadas separadamente, permitindo no máximo uma potência de 5 kW e no mínimo de 1 kW. É ainda possível seleccionar 2, 3 e 4 kW de potência na caldeira. Independentemente da potência escolhida a água entra em ebulição, mas quanto maior a potência elétrica seleccionada maior será a temperatura e mais rapidamente será atingida a ebulição, ou seja, quanto maior a potência elétrica maior a taxa de produção de vapor.

A saída de vapor de caldeira elétrica está posicionada na entrada do ventilador, permitindo a entrada de ar húmido e quente no túnel do ar condicionado. A velocidade de rotação do ventilador pode ser controlada no painel de controlo, permitindo regular o fluxo de ar e por sua vez a alteração da taxa de renovação no interior da câmara climática.

As resistências elétricas para aquecimento do ar encontram-se divididas em dois pares de resistências de 1 kW cada. Um dos pares de resistências encontra-se à saída do ventilador permitindo aumentar a temperatura do ar antes de este atravessar a unidade de desumidificação. O segundo par de resistências encontra-se à saída da unidade de ar condicionado, sendo a ultima alteração possível de realizar às condições do ar que atravessa do túnel.

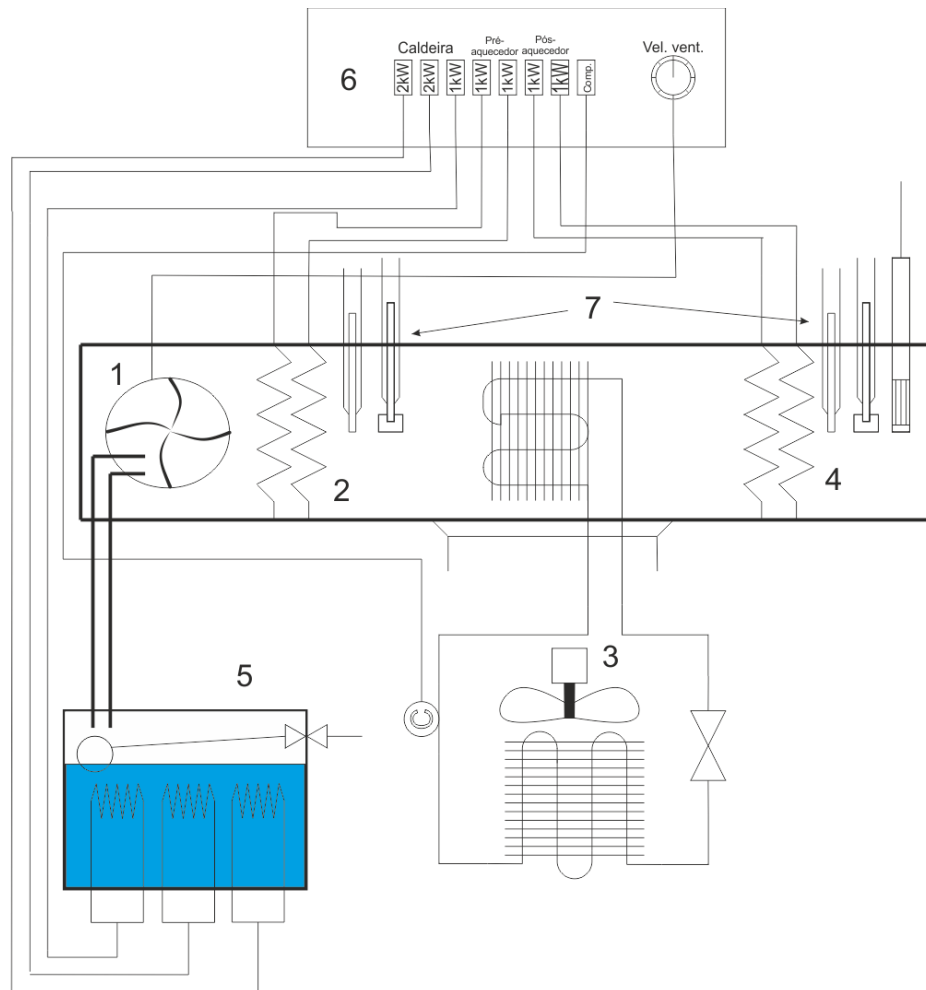


Figura 5.9- Esquema da unidade de ar condicionado.

A unidade de arrefecimento por desumidificação (*figura 5.9*), representada no painel de controlo pela palavra compressor, utiliza o princípio da compressão de vapor. Permite o arrefecimento e a redução da humidade do ar após a passagem deste pelo primeiro par de resistências. O ar atravessa apenas o evaporador da unidade, levando apenas a uma diminuição da humidade e da temperatura do ar.

A combinação de todos estes componentes permite a obtenção de diversos conjuntos de condições ambiente no interior da câmara, como será apresentado durante o presente capítulo. Torna-se importante referir a possível influência do próprio sistema de desumidificação por compressão de vapor, em análise, nas condições existentes no interior da câmara climática.

O número 7 da *figura 5.9* representa os locais onde é possível a colocação de termómetros ou sondas para a medição de diversos parâmetros, como por exemplo a temperatura, humidade ou velocidade do ar no interior do túnel. A implementação destes componentes permite uma análise mais aprofundada das alterações sofridas pelo ar no interior do túnel do ar condicionado.

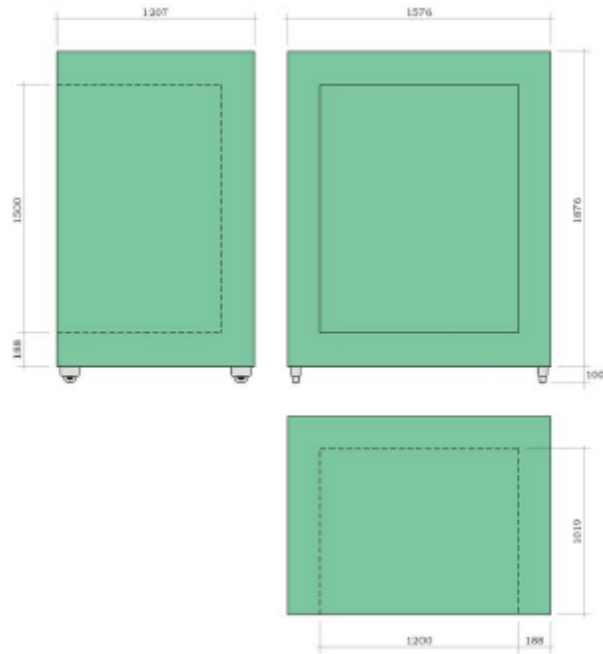


Figura 5.10- Dimensões da câmara climática utilizada (mm). Pires, L. C. C. (2010)

5.1.3. Câmara climática

Para a realização dos ensaios foi utilizada uma câmara climática existente no Laboratório de Termodinâmica Aplicada e Transmissão de calor, cujos detalhes podem ser encontrados em Pires, L. C. C. (2010). No seu conjunto a câmara é formada por duas câmaras de menor dimensão de formato paralelepípedo, estando umas das faces abertas. Estas duas câmaras podem ser ligadas diretamente entre si, formando uma única câmara fechada, ou podem ser intercaladas por um módulo. Para o presente trabalho foi utilizado apenas uma das câmaras de menor dimensão (*figura 5.10*) e um módulo oco de ligação, visível na *figura 5.11*.

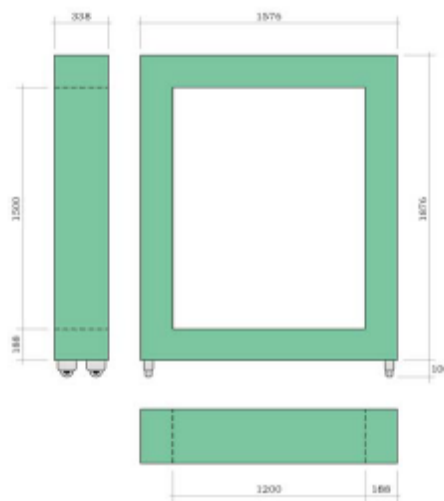


Figura 5.11- Dimensões do módulo oco de ligação utilizado (mm). Pires, L. C. C. (2010)

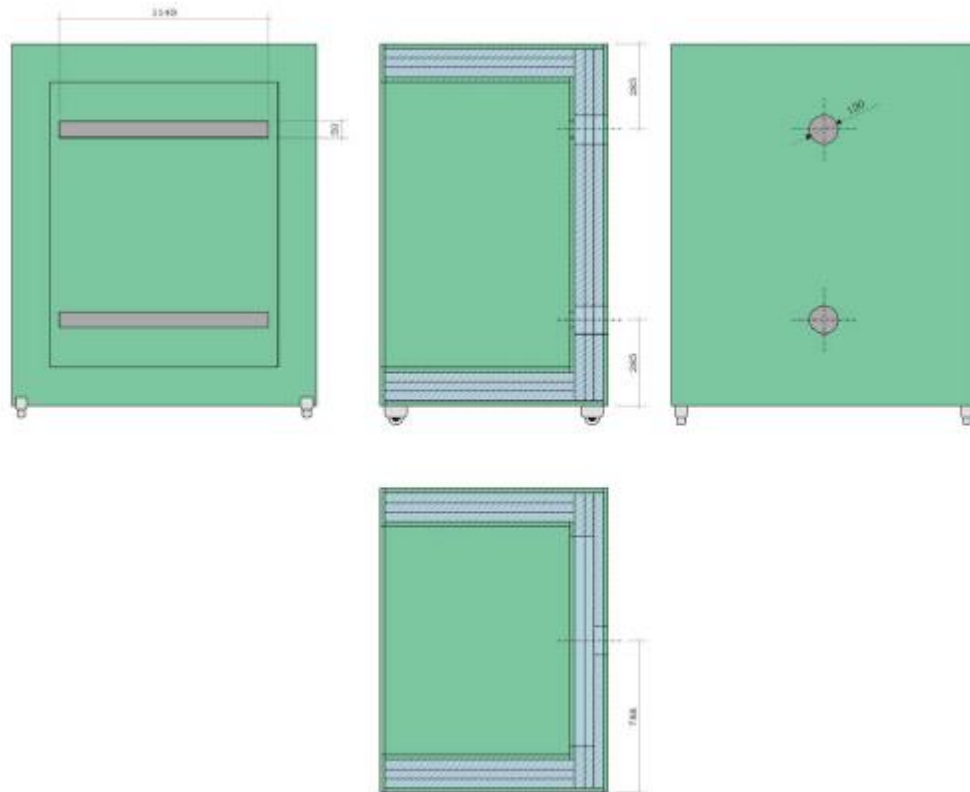


Figura 5.12- Composição das paredes da câmara e localização das aberturas para entrada e saída de ar das câmaras (mm). Pires, L. C. C. (2010)

A câmara utilizada foi construída com placas de MDF hidrófugo e de poliestireno extrudido, possuindo espessuras de 19 e 50 mm, respetivamente. A espessura final das paredes da câmara é de 188mm, devendo-se este valor à sobreposição de 3 camadas de poliestireno extrudido mais duas camadas, uma de cada lado, de MDF hidrófugo, como é possível observar na *figura 5.12*.



Figura 5.13- A-Pormenor do fecho da câmara; B- Localização da sonda no interior da câmara.

A câmara possui duas aberturas, sendo uma destinada para a entrada de ar e a outra para a sua saída, estando estas localizadas na parede oposta àquela que se encontra aberta, como se pode observar na *figura 5.12*. No interior da câmara, estas aberturas têm secção retangular para ser possível uma distribuição mais uniforme do ar no interior da câmara. Por outro lado, no exterior as aberturas possuem secção circular, para facilitar a ligação dos tubos flexíveis de alumínio isolados por lã de vidro, referidos anteriormente. A interface entre a superfície circular e a retangular é assegurada por uma câmara de plenum⁵.

Uma vez que, apenas foi utilizada uma das câmaras de menor dimensão, foi necessário utilizar o módulo oco de ligação para fecho da face aberta da câmara. Para tal, foram utilizadas placas de poliestireno extrudido de 50 mm de espessura. O módulo oco de ligação serviu de tampa para segurar as placas, enquanto que uma cinta de carga com catraca foi utilizada para que não permitir a saída de ar para o exterior da câmara, como é visível na *figura 5.13A*.



Figura 5.14- Pormenor da ligação da mangueira ao depósito do condensado.

⁵ Câmara destinada a conter ar, gás ou líquido a uma pressão positiva.

No interior da câmara climática encontrava-se instalada uma sonda termo higrométrica, por forma fornecer os valores representativos da temperatura e da humidade do ar dentro da câmara, como é visível na *figura 5.13B*.

Na *figura 5.15* é possível observar a localização da unidade de desumidificação no interior da câmara climática. Esta localização foi adotada por forma a tentar cumprir com as especificações fornecidas pelo fabricante, em termos de distância mínima às paredes.

Antes de serem apresentados os processos, utilizados para a realização dos ensaios, importa demonstrar o processo de captação do condensado. Primeiramente foi necessário conectar uma mangueira ao orifício de captação do condensado existente na unidade de desumidificação como é visível na *figura 5.14*. Contudo, a conexão para a mangueira não se encontra na face inferior do depósito de condensado, tendo de ser adicionada água no depósito para ser possível medir todo o condensado que será extraído. Em condições em que a extração de vapor de água do ar atmosférico é elevada, pode não existir a necessidade de encher essa pequena parte do depósito, uma vez que até às condições estabilizarem no interior da câmara, o condensado necessário para colmatar a diferença, entre o fundo do depósito e a conexão, será facilmente obtido. Por outro lado, se a extração for reduzida essa diferença nunca será preenchida, logo o resultado obtido será nulo. Até as condições estabilizarem no interior da câmara o condensado é armazenado num depósito de 20 l. Atingindo a condições pretendidas o condensado verterá para uma pipeta volumétrica de 1 l, como visível na *figura 5.15*.



Figura 5.15- Medição do condensado obtido pela unidade de desumidificação em análise.

5.2. Ensaio realizados

Após a apresentação da instalação experimental empregue na realização dos ensaios a realizar, foi possível observar uma enorme variedade de opções para fazer variar as condições no interior da câmara climática. Para uma melhor exploração do potencial do equipamento em análise serão utilizadas o maior número de combinações, temperatura e humidade, possíveis.

Neste subcapítulo serão apresentados os processos utilizados para a realização dos ensaios, bem como as condições em que o ensaio pode ser validado. Serão ainda apresentadas todas as condições obtidas no interior da câmara e quais os parâmetros do ar condicionado seleccionados para as obter. Por último serão apresentados alguns dos ensaios realizados, por forma a demonstrar a forma escolhida para o tratamento de dados durante a realização dos ensaios.

5.2.1. Processos de realização dos ensaios

Para a obtenção do maior número possível de condições ambiente possível, foram sendo realizadas alterações nos parâmetros do ar condicionado, no local para onde saía o ar da câmara climática, na proveniência do ar à entrada do ar condicionado, na temperatura ambiente do laboratório, no controlo da temperatura do ar à saída do ar condicionado e no controlo extra de uma resistência da caldeira elétrica de modo a poder atingir potências intermédias.

Todos os ensaios realizados estão dependentes da temperatura e humidade do ambiente, uma vez que, mesmo que se forme um circuito fechado (i.e., entre a entrada e saída do ar



Figura 5.16- Localização dos termómetros e da sonda termo higrométrica; A - Pormenor da utilização dos 4 termómetros; B - Pormenor da implementação da sonda termo higrométrica; C - Pormenor da implementação dos termómetros.

condicionado com a entrada e saída da câmara climática), o ventilador do ar condicionado capta sempre algum ar externo para o interior do circuito. Outro dos problemas enfrentados, na tentativa de atingir a estabilização das condições no interior da câmara, deve-se ao fato de a unidade de compressão de vapor ser dimensionada para uma área de 20 m², mas encontrar-se a operar numa área de pouco mais de 1 m².

De igual forma para todos os processos adotados, a colocação de termómetros e sondas, para medição da temperatura e da humidade, foi distribuída ao longo do túnel da unidade de ar condicionado. Após as resistências elétricas de pré-aquecimento, foram colocados dois termómetros, estando um encarregue de medir a temperatura de bolbo seco e outro a temperatura de bolbo húmido, ambos medindo no interior do túnel. Através da obtenção destes valores de temperatura é possível obter a humidade absoluta e relativa que caracteriza o fluxo de ar, como explicado no terceiro capítulo. Outro par de termómetros foi colocado após as resistências de reaquecimento, sendo posteriormente substituídos por uma sonda termo higrométrica, por facilitar a recolha de dados. A localização dos equipamentos de medição pode ser visualizada na *figura 5.16*.

Além das sondas termo higrométricas, colocadas quer no interior da câmara, quer no túnel, foi ainda utilizada uma terceira sonda com o objetivo de registar as condições verificadas no interior do laboratório para perceber qual a sua influência.

Os dados, dos termómetros e das sondas termo higrométricas, foram registados com intervalos de 10 minutos. Contudo, os dados, obtidos pela sonda termo higrométrica colocada no interior da câmara climática, foram registados a cada minuto para ser possível obter gráficos, da humidade relativa/absoluta e da temperatura, mais completos. Os valores retirados dos termómetros foram adquiridos visualmente e apontados um por um, por outro lado, a utilização

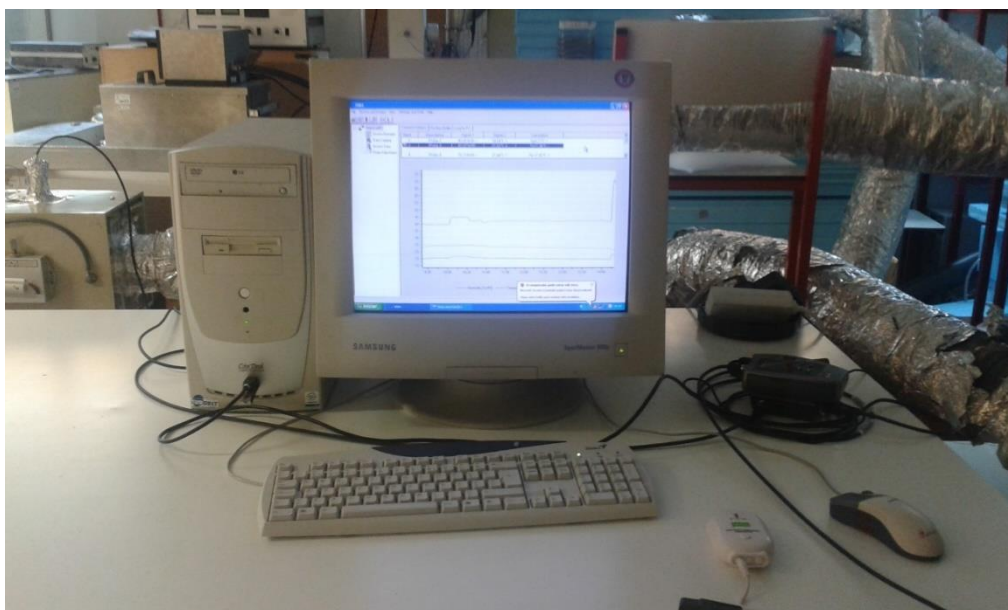


Figura 5.17- Pormenor da análise instantânea dos gráficos realizados através da obtenção dos valores das sondas termo higrométricas.

de sondas termo higrométricas permite a conexão direta, do equipamento de medição a um computador, gerando automaticamente gráficos através do *software* HW4 da Rotronic (HygroLog HL-NT Data Logger (2015)), como é possível observar na *figura 5.17*. Apenas para os valores de humidade relativa e da temperatura, no interior da câmara, a aquisição de dados foi iniciada no começo do ensaio. Para os outros pontos de medição apenas começou a ser feito o registo após as condições internas estarem estabilizadas.

Estando este trabalho debruçado sobre a obtenção de água potável, importa também quantificar a energia gasta para obter uma certa quantidade de água. Para tal, em todos os ensaios foi monitorizado o gasto energético, utilizando dois equipamentos. Ambos realizavam a medição da corrente que atravessava o fio condutor através de uma pinça amperimétrica. Um dos equipamentos, da empresa Circutor (Balcells, J. (2014)), foi desenvolvido para a utilização em sistemas trifásicos, sendo necessário recorrer a pinças amperimétricas de melhor resolução por forma a ser possível captar a corrente eléctrica utilizada. Este equipamento armazena os valores medidos num cartão de memória externo, permitindo obter os valores utilizando o *software* *PowerVision Plus*. O sistema de medição da Circutor necessita também de ser alimentado pela rede eléctrica, podendo dessa forma obter a tensão da rede, para calcular o valor da potência gasta. O segundo equipamento utilizado foi desenvolvido pela Efergy (E2 Wireless Electricity Monitor (2012)), possuindo um transmissor e um recetor. Este tipo de comunicação de dados permitia a visualização instantânea do valor da potência medido pelo aparelho. A obtenção dos dados de forma computacional ocorre por conexão direta do recetor ao computador, recorrendo à utilização do *software* *elink2.1*, onde era gerado um relatório dos gastos.

Nas secções seguintes serão apresentados os processos utilizados e as condições obtidas através da utilização destes. Durante cada processo, os parâmetros da unidade de ar condicionado vão sendo alterados, sendo que, o que distingue os processos é o facto de o circuito formado ser

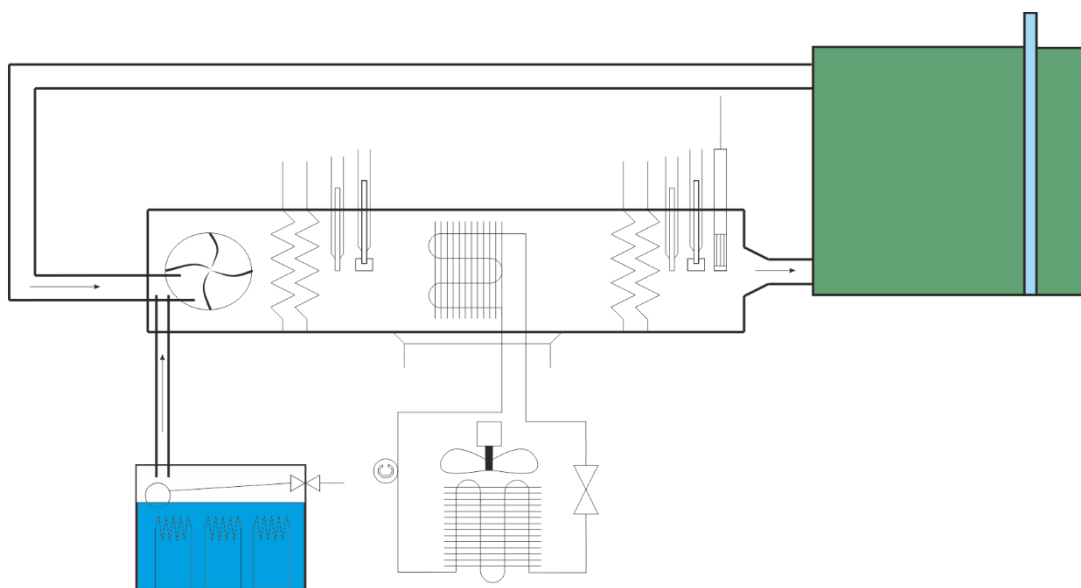


Figura 5.18- Esquema do processo 1.

fechado ou aberto, haver ou não controlo da temperatura à saída do ar condicionado e a possibilidade de existir regulação da potência de uma resistência elétrica da caldeira. Posto isto, é possível separar os ensaios realizados em sete processos distintos.

Para cada processo serão indicados os ensaios correspondentes, sendo ainda apresentados o gráfico das condições no interior da câmara climática para alguns ensaios.

5.2.1.1. Processo 1

O processo 1, primeiro processo a ser utilizado, é caracterizado por um circuito fechado, sendo que, a massa de ar, que passa por todos os processos no túnel do ar condicionado, é direcionada para o interior da câmara climática. Dentro da câmara climática esta é processada pela unidade de compressão de vapor e posteriormente é novamente aspirada pelo ventilador da unidade de ar condicionado. A isto se designou de circuito fechado, uma vez que o ar utilizado pode ser sempre considerado o mesmo. Na *figura 5.18* são observáveis as ligações existentes neste processo.

A presente configuração foi utilizada para obtenção dos valores correspondentes aos ensaios 1, 2, 3, 4, 5 e 6, sendo mostrado na *tabela 3* os parâmetros utilizados, a data de realização, os valores médios das condições obtidas, tanto no interior da câmara, como no túnel.

Tabela 3- Tabela de apresentação de todos os ensaios obtidos através da utilização do processo 1.

Dia/Mês	Ensaio n°.	Condições impostas no túnel				Interior da câmara			Vent.		Saída	
		Caldeira (kW)	Pré-aquecimento (kW)	Compressor	Reaquecimento (kW)	ϕ (%)	T (°C)	ω (kg/kg)	ϕ (%)	T (°C)	ϕ (%)	T (°C)
06/05	1	1kW	Não	Não	Não	38	44	0,02	66	34	68	32
09/05	2	2kW	Não	Sim	Não	46	30	0,01	85	28	100	23
10/05	3	1kW	Não	Sim	Não	48	19	0,01	67	24	100	14
11/05	4	2kW	Não	Sim	1	31	43	0,02	75	35	37	45
18/05	5	2kW	1	Sim	Não	38	44	0,03	24	60	60	40
19/05	6	1	1	Sim	Não	37	37	0,02	19	59	50	36

É importante referir que tanto no ensaio número 1 como no ensaio número 5 as condições obtidas no interior da câmara são iguais, embora os parâmetros impostos na unidade de ar condicionado sejam diferentes. Este assunto entrará em discussão no subcapítulo seguinte.

Para o ensaio 3 é apresentado o gráfico (*figura 5.19*) da evolução da temperatura e da humidade relativa no interior da câmara climática. No caso deste ensaio o período decorrido até à

Ensaio 3: Condições no interior da câmara

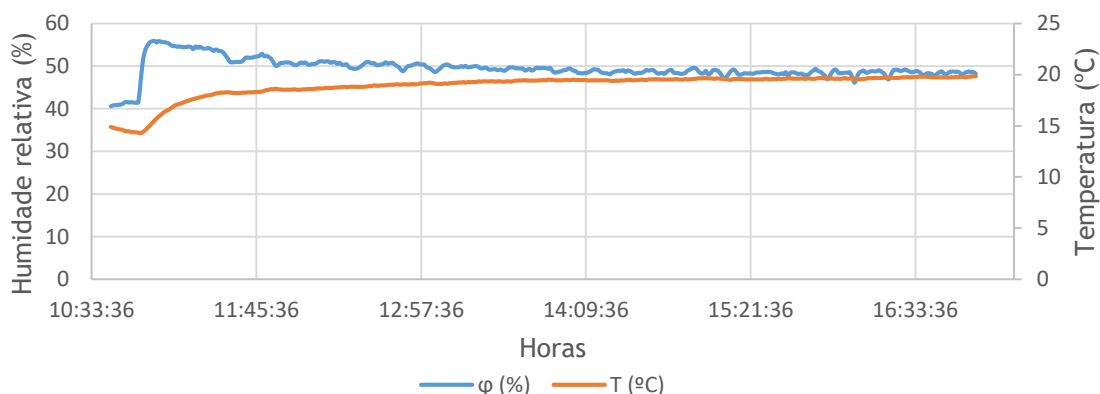


Figura 5.19- Variação das condições ambiente no interior da câmara climática, para o ensaio 3.

estabilização das condições no interior da câmara climática foi de 260 minutos, enquanto que o ensaio válido (i.e., tempo decorrido desde que as condições se encontram estabilizadas até que o ensaio é dado como terminado) teve a duração de 120 minutos.

5.2.1.2. Processo 2

Relativamente ao processo 2, este pode ser considerado em circuito aberto, como ilustrado na *figura 5.20*. A massa de ar que é processada tanto pela unidade de ar condicionado como pela unidade de desumidificação é libertada para uma área exterior ao laboratório. Por sua vez, o ventilador aspira o ar existente no interior do laboratório. Por estas razões o circuito realizado pelo ar é considerado aberto. Este tipo de configuração permite que sejam atingidas temperaturas inferiores no interior da câmara climática.

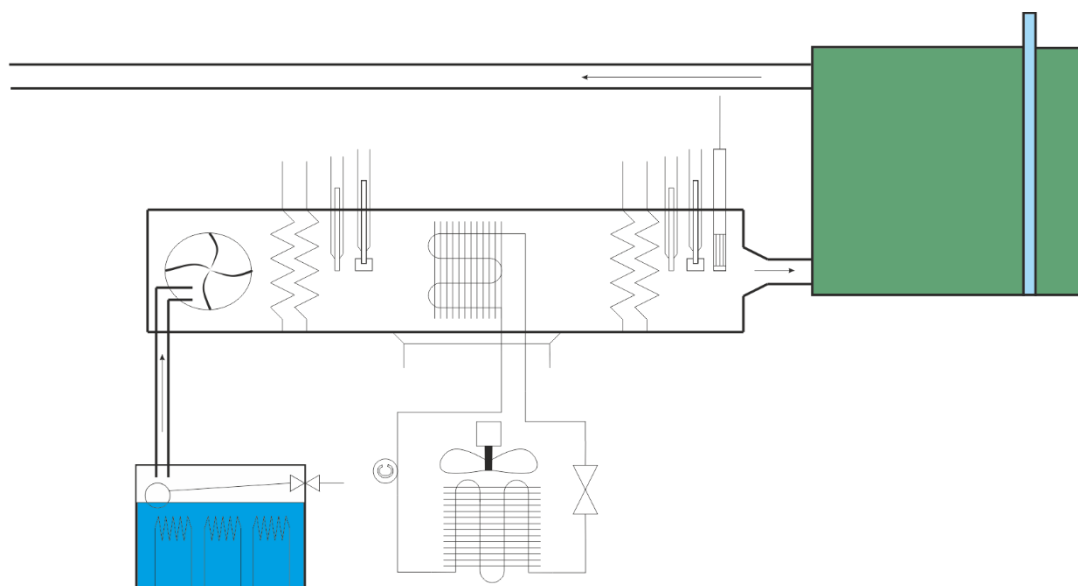


Figura 5.20- Esquema do processo 2.

Para este processo foi apenas realizado um ensaio, o ensaio número 11, apresentado na *tabela* 4.

Tabela 4- - Tabela de apresentação do ensaio obtido através da utilização do processo 2.

Dia/Mês	Ensaio n°.	Condições impostas no túnel				Interior da câmara			Vent.		Saída	
		Caldeira (kW)	Pré-aquecimento	Compressor	Reaquecimento	ϕ (%)	T (°C)	ω (kg/kg)	ϕ (%)	T (°C)	ϕ (%)	T (°C)
19/06	11	1	Não	Sim	Não	40	25	0,01	76	26	96	15

Ensaio 11: Condições no interior da câmara

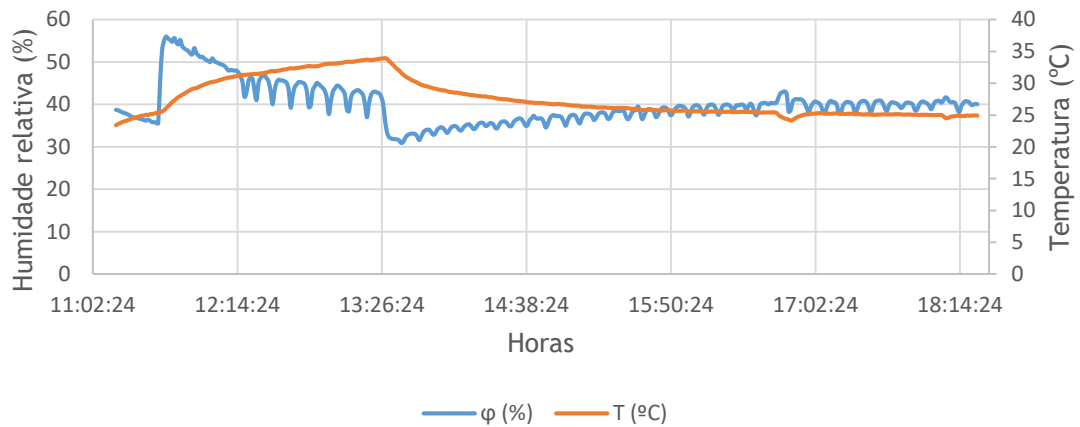


Figura 5.21- Variação das condições ambiente no interior da câmara climática, para o ensaio 11.

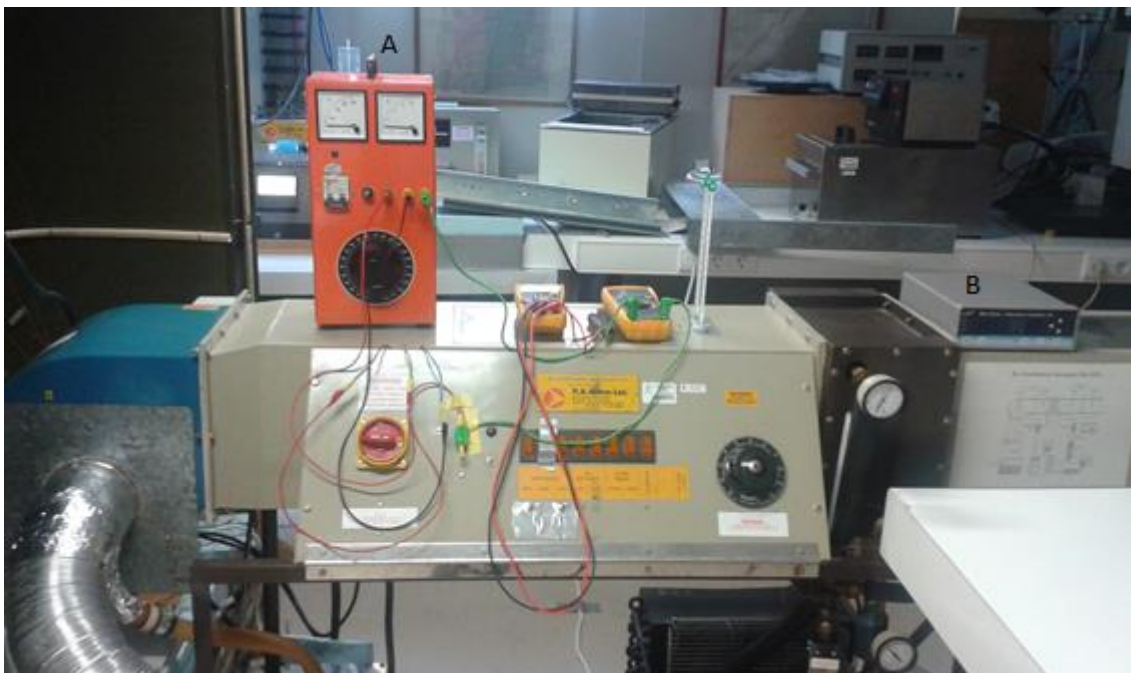


Figura 5.22- A - Regulador de potência; B - Controlador de temperatura.

Através da observação da *figura 5.21*, é possível observar a variação das condições ambiente no interior da câmara climática. É ainda observável, que as condições impostas no túnel do ar condicionado ao longo do ensaio foram sendo alteradas, até os valores obtidos começarem a aproximar-se dos valores pretendidos. Como tal, até à estabilização, este ensaio teve a duração de 356 minutos, sendo que apenas nos últimos 220 minutos é que foram selecionados, no ar condicionado, os parâmetros apresentados na *tabela 4*. A duração do ensaio válido é de apenas 73 minutos.

5.2.1.3. Processo 3

O processo número 3, desenvolvido para avaliar o desempenho da unidade de desumidificação por compressão de vapor apresenta um carácter fechado, ou seja, o circuito onde o ar se desloca é considerado fechado, tal como acontece no processo 1. Contudo, para este processo foram adicionados dois equipamentos para realizar o controlo de uma das resistências da caldeira e para realizar o controlo de uma das resistências de reaquecimento, como é possível visualizar na *figura 5.23*.

Foi utilizado um regulador de potência, visível na *figura 5.22A*, para variar a potência de uma resistência de 2 kW da caldeira. Deste modo é possível a variação desde 0 kW até perto dos 2 kW, conseguindo assim obter valores intermédios. Com este regulador é possível obter uma maior variedade de valores de potência aplicados na caldeira, permitindo aumentar o número de ensaios realizados.

Para obter o valor mais exato da potência entregue à resistência da caldeira foi necessário ligar dois multímetros ao circuito criado (i.e., circuito que engloba a resistência e o regulador), como é possível observar na *figura 5.22*.

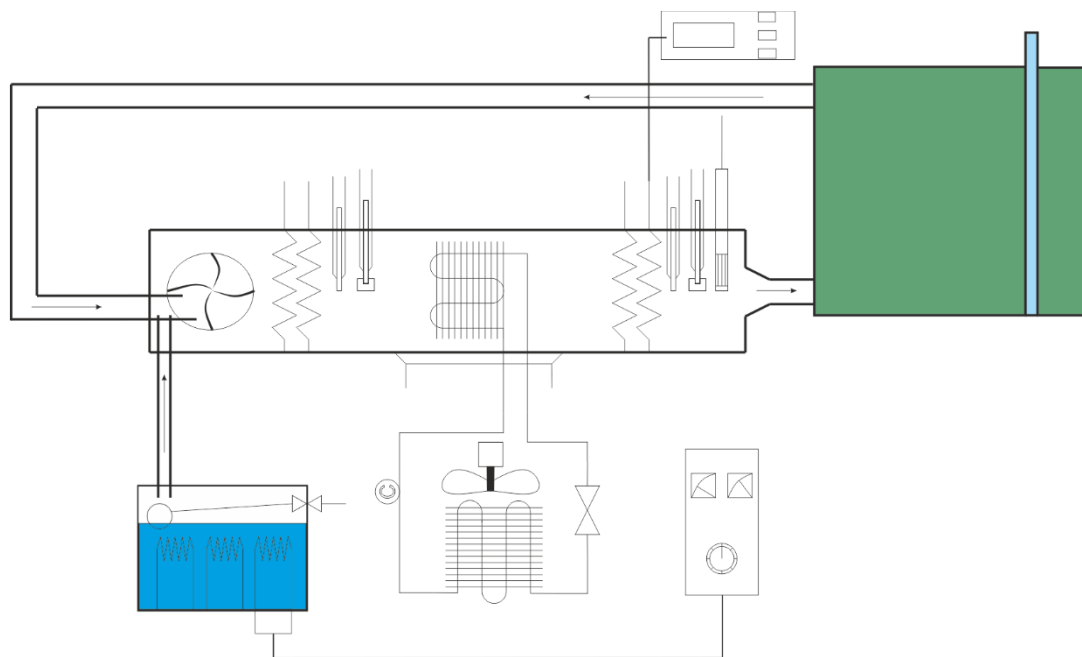


Figura 5.23 - Esquema do processo 3.

A regulação da potência de uma das resistências, de 1 kW, do sistema de reaquecimento, instalado na unidade de ar condicionado, foi realizada por um controlador de temperatura, demonstrado na *figura 5.22B*. Este tipo de controlador permite a escolha de uma temperatura ótima, e consoante a temperatura que por ele é medida o aparelho deixa ou não deixar passar corrente para a resistência. Em caso de a temperatura ser demasiado elevada o controlador desliga a resistência, caso contrário permite que esta seja alimentada.

Com este processo foram realizados apenas três ensaios, os ensaios 7, 8 e 9, sendo todos eles apresentados na *tabela 5*.

Tabela 5- Tabela de apresentação dos ensaios obtidos através da utilização do processo 3.

Dia/Mês	Ensaio n°.	Condições impostas no túnel				Interior da câmara			Vent.		Saída	
		Caldeira (kW)	Pré-aquecimento	Compressor	Reaquecimento	ϕ (%)	T (°C)	ω (kg/kg)	ϕ (%)	T (°C)	ϕ (%)	T (°C)
15/06	7	a) 0,63	Não	Sim	b) Sim	40	20	0,01	60	24	78	13
16/06	8	c) 1,51	Não	Sim	d) Sim	40	30	0,01	86	29	96	21
17/06	9	e) 2,79	Não	Sim	f) Sim	38	46	0,03	100	31	100	35

Os valores apresentados nas tabelas que se encontram precedidos de uma letra, são referentes a uma nota de esclarecimento, sendo estas apresentadas abaixo.

Ensaio 8: Condições no interior da câmara

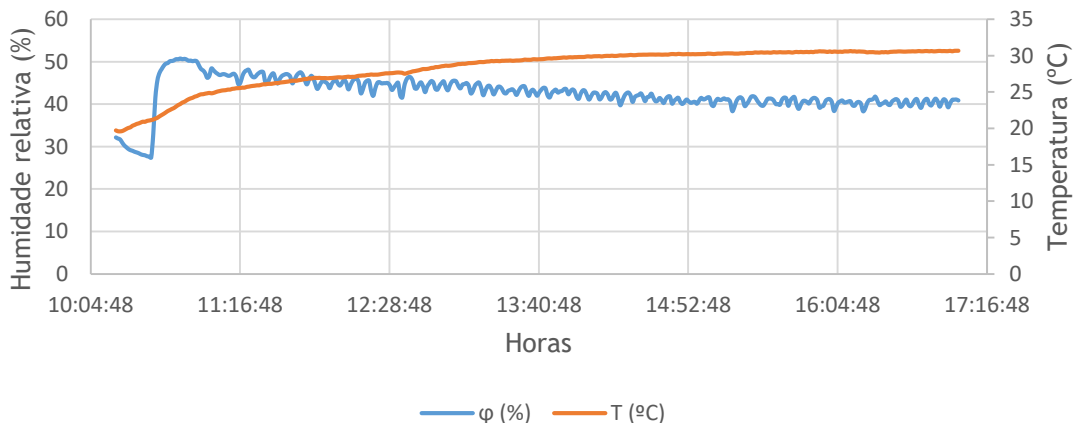


Figura 5.24 - Variação das condições ambiente no interior da câmara climática, para o ensaio 8.

- a) A potência utilizada na caldeira foi de 0,63 kW, sendo que no regulador de potência foi selecionada uma tensão de 131 V e uma corrente de 4,84 A.
- b) O controlador de temperatura encontrava-se a fornecer energia a uma resistência, sendo a temperatura selecionada igual a 7,2 °C.
- c) A potência utilizada na caldeira foi de 1,510 kW, sendo que no regulador de potência foi selecionada uma tensão de 205 V e uma corrente de 7,37 A.
- d) O controlador de temperatura encontrava-se a fornecer energia a uma resistência, sendo a temperatura selecionada igual a 16,5 °C.
- e) A potência utilizada na caldeira foi de 2,79 kW, sendo que no regulador de potência foi selecionada uma tensão de 224,2 V e uma corrente de 8,02 A, tendo ainda sido ligada a resistência de 1 kW.
- f) O controlador de temperatura encontrava-se a fornecer energia a uma resistência, sendo a temperatura selecionada igual a 29,5 °C.

A título demonstrativo foi escolhido o ensaio número 8, estando representada na *figura 5.24* a variação das condições existentes no interior da câmara climática. Este ensaio, até as condições no interior da câmara se encontrarem estabilizadas, teve uma duração total de 313 minutos, sendo que o ensaio válido se prolongou durante 93 minutos.

5.2.1.4. Processo 4

O processo número 4 trata-se de um processo com algumas semelhanças com o processo 2, em que uma das resistências da caldeira e uma das resistências de reaquecimentos são controladas. Como é possível visualizar na *figura 5.25*, e através da explicação dada no processo 2, este circuito é apresentado sendo em um circuito aberto.

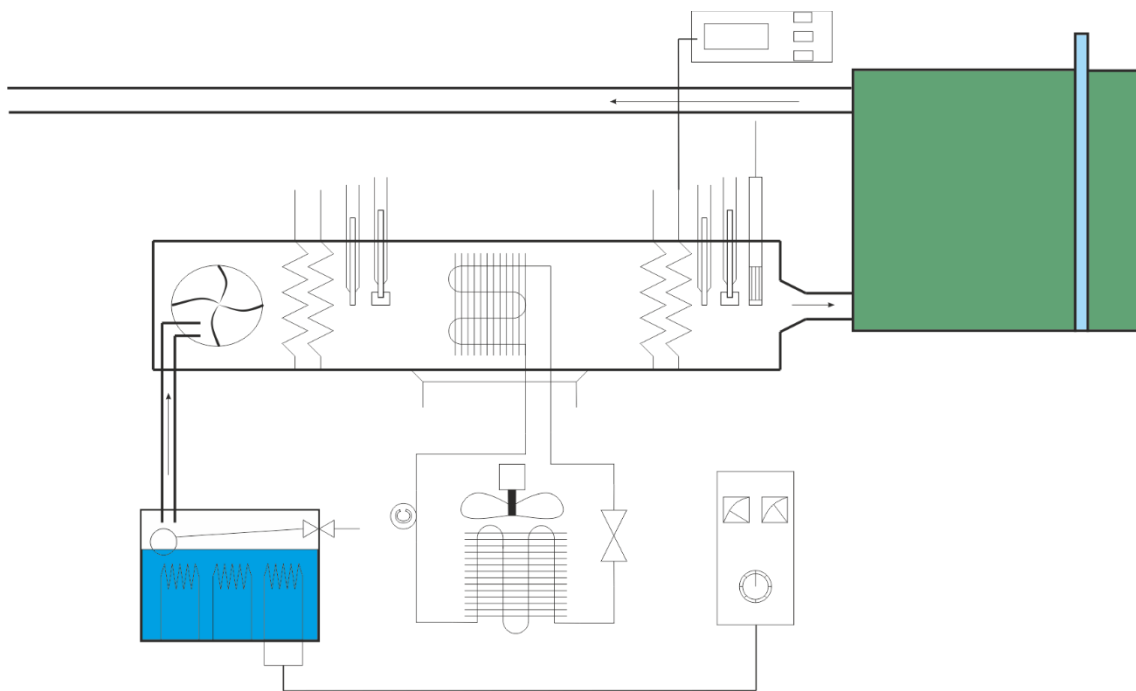


Figura 5.25- Esquema do processo 4.

Para este processo o controlo da resistência da caldeira e da resistência de reaquecimento é em tudo semelhante ao que ocorre no processo 3.

Com base neste processo foram realizados dois ensaios, sendo eles o ensaio 10 e o ensaio 14. Na tabela 6 são apresentadas a condições impostas no interior do túnel do ar condicionado, bem como as condições obtidas no seu interior e no interior da câmara climática.

Tabela 6- Tabela de apresentação dos ensaios obtidos através da utilização do processo 4.

Dia/Mês	Ensaio n°.	Condições impostas no túnel				Interior da câmara			Vent.		Saída	
		Caldeira (kW)	Pré-aquecimento	Compressor	Reaquecimento	ϕ (%)	T (°C)	ω (kg/kg)	ϕ (%)	T (°C)	ϕ (%)	T (°C)
18/06	10	g) 2,81	Não	Sim	h) Sim	40	36	0,02	100	38	100	26
22/06	14	r) 0,75	Não	Sim	s) Sim	34	28	0,01	48	30	52	25

- g) A potência utilizada na caldeira foi de 2,81 kW, sendo que no regulador de potência foi selecionada uma tensão de 225,2 V e uma corrente de 8,05 A, tendo ainda sido ligada uma resistência de 1 kW.
- h) O controlador de temperatura encontrava-se a fornecer energia a uma resistência, sendo a temperatura selecionada igual a 20 °C.
- r) A potência utilizada na caldeira foi de 0,75 kW, sendo que no regulador de potência foi selecionada uma tensão de 142,4 V e uma corrente de 5,24 A.
- s) O controlador de temperatura encontrava-se a fornecer energia a uma resistência, sendo a temperatura selecionada igual a 21 °C.

Ensaio 10: Condições no interior da câmara

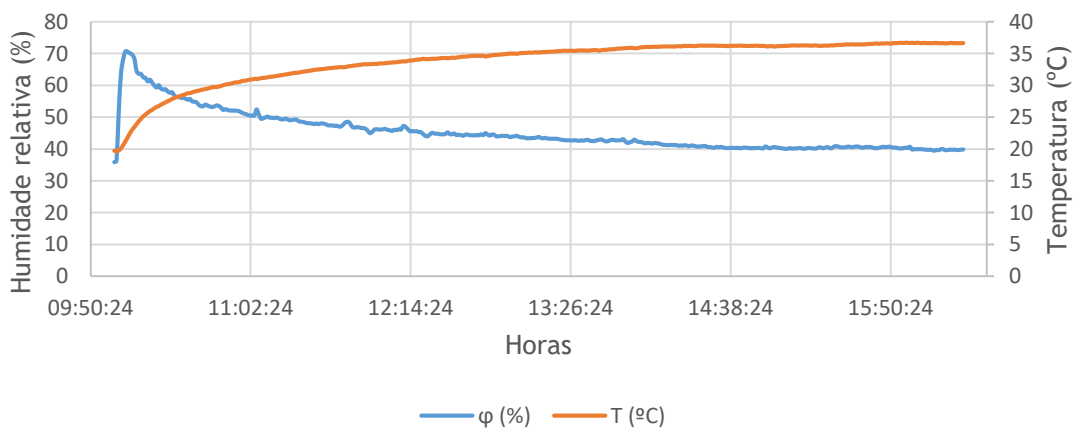


Figura 5.26 - Variação das condições ambiente no interior da câmara climática, para o ensaio 10.

Por forma a demonstrar os resultados obtido através do processo 4, foi escolhido o ensaio número 10, sendo possível observar a variação das condições ambiente, impostas no interior da câmara climática, na *figura 5.26*. Este ensaio, até estabilizar, teve a duração de 321 minutos, sendo que o ensaio válido durou cerca de 61 minutos.

5.2.1.5. Processo 5

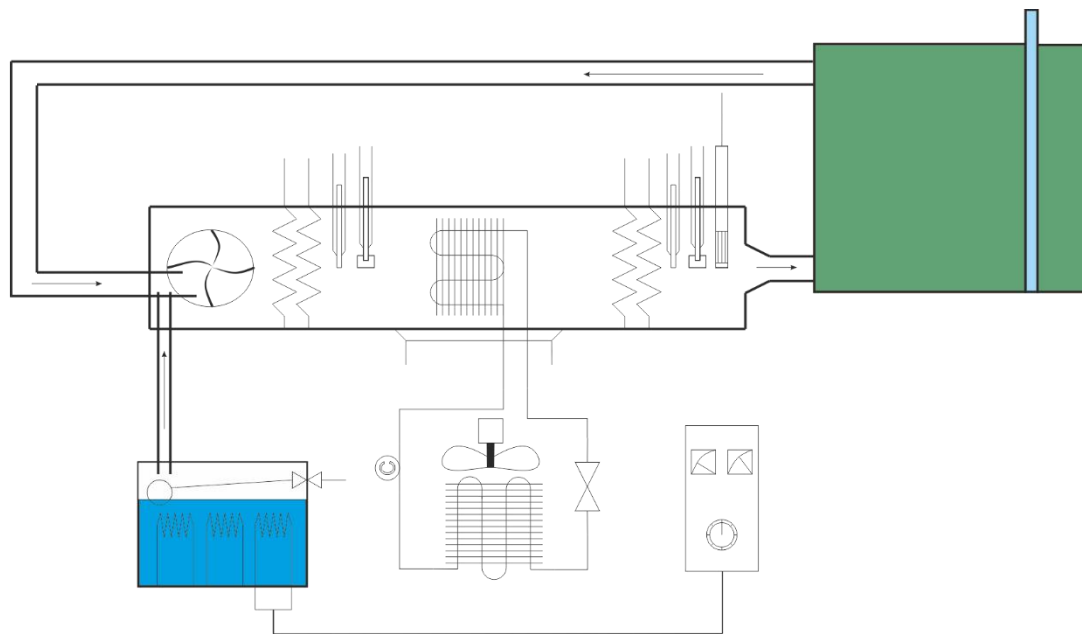


Figura 5.27- Esquema do processo 5.

Relativamente semelhante ao processo número 3, o processo número 5 também é caracterizado por ser um processo que ocorre em circuito fechado, contudo apenas a resistência da caldeira é controlada, como descrito no processo número 3. O esquema deste processo está presente na *figura 5.27*.

Da utilização deste processo apenas resultou um ensaio, o ensaio número 13, sendo as suas características principais representadas na *tabela 7*.

Tabela 7- Tabela de apresentação do ensaio obtido através da utilização do processo 5.

Dia/Mês	Ensaio n°.	Condições impostas no túnel				Interior da câmara			Vent.		Saída	
		Caldeira (kW)	Pré-aquecimento	Compressor	Reaquecimento	ϕ (%)	T (°C)	ω (kg/kg)	ϕ (%)	T (°C)	ϕ (%)	T (°C)
21/06	13	o) 2,38	Não	Sim	Não	43	43	0,03	88	37	100	33

Ensaio 13: Condições no interior da câmara

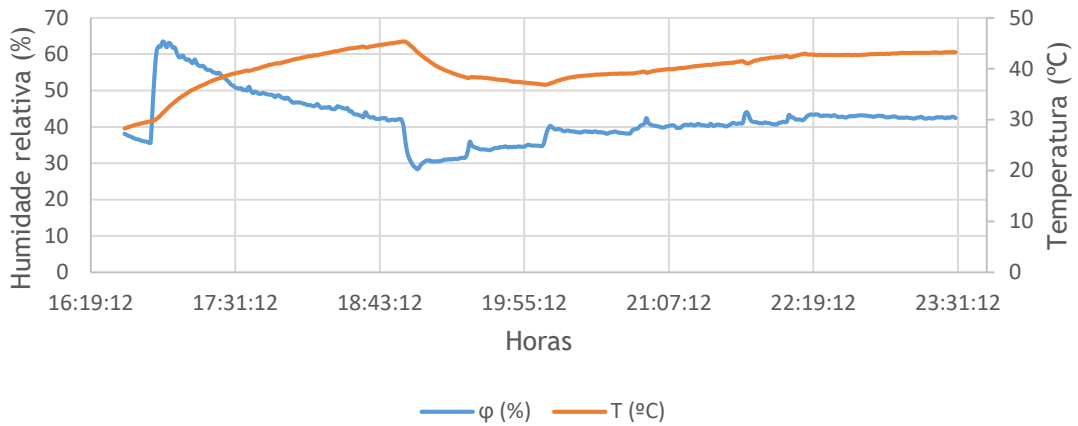


Figura 5.28- Variação das condições ambiente no interior da câmara climática, para o ensaio 13.

- o) A potência utilizada na caldeira foi de 2,38 kW, sendo que no regulador de potência foi selecionada uma tensão de 195,4 V e uma corrente de 7,04 A, tendo ainda sido ligada uma resistência de 1 kW.

Na *figura 5.28* está representada a variação das condições ambiente, verificadas no interior da câmara climática, resultantes das condições impostas na unidade de ar condicionado. Até estabilizarem as condições no interior da câmara climática, este ensaio teve a duração de 355 minutos, sendo que apenas nos últimos 15 minutos foram impostos os parâmetros apresentados na *tabela 7*, por não estarem a ser atingidos os valores pretendidos. O ensaio válido teve a duração de 60 minutos.

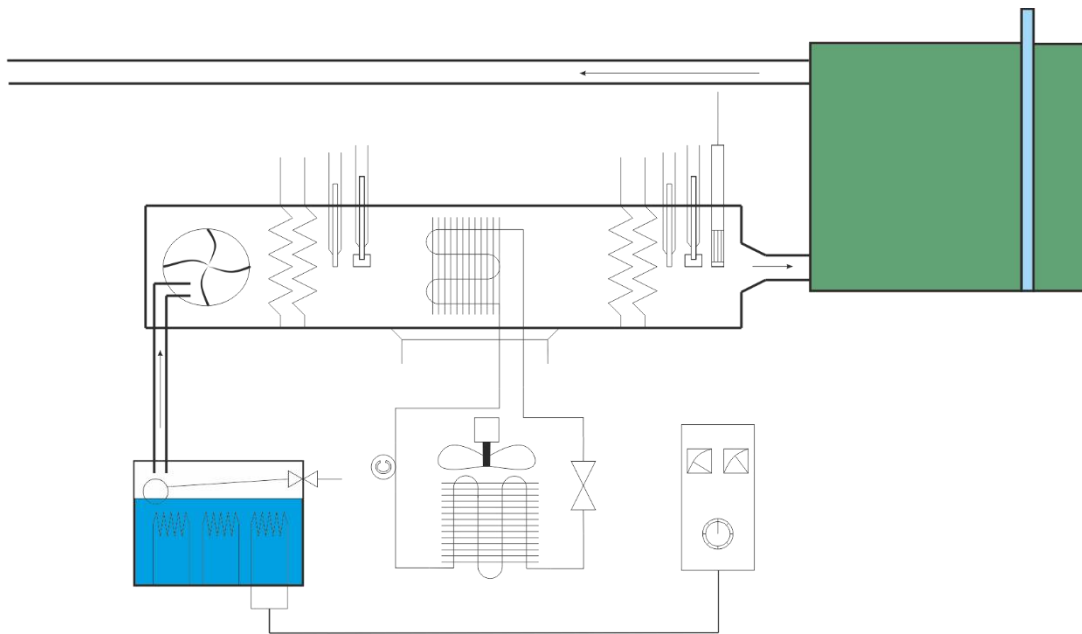


Figura 5.29- Esquema do processo 6.

5.2.1.6. Processo 6

O processo 6 é bastante semelhante ao, anteriormente descrito, processo número 4. Também se trata de um processo que ocorre em circuito aberto, sendo que apenas a resistência da caldeira é controlada, como pode ser verificado na *figura 5.29*.

Tabela 8- Tabela de apresentação do ensaio obtido através da utilização do processo 6.

Dia/Mês	Ensaio n°.	Condições impostas no túnel				Interior da câmara			Vent.		Saída	
		Caldeira (kW)	Pré-aquecimento	Compressor	Reaquecimento	ϕ (%)	T (°C)	ω (kg/kg)	ϕ (%)	T (°C)	ϕ (%)	T (°C)
20/06	12	m) 2,76	Não	Sim	Não	44	34	0.017	94	30	100	26

O ensaio número 12 foi o único realizado tendo como base este processo, como tal, na *tabela 8* são apresentadas as condições obtidas e os parâmetros selecionados.

- m) A potência utilizada na caldeira foi de 2,76 kW, sendo que no regulador de potência foi selecionada uma tensão de 221,8 V e uma corrente de 7,92 A, tendo ainda sido ligada uma resistência de 1kW.

A variação das condições ambiente verificadas no interior da câmara climática ao longo do ensaio estão representas no gráfico da *figura 5.30*. O ensaio demorou aproximadamente 388 minutos até estabilizar, embora, apenas durante os últimos 60 minutos tenham sido impostas no túnel as condições apresentadas na *tabela 8*. A duração do ensaio válido foi de 60 minutos.

Ensaio 12: Condições no interior da câmara

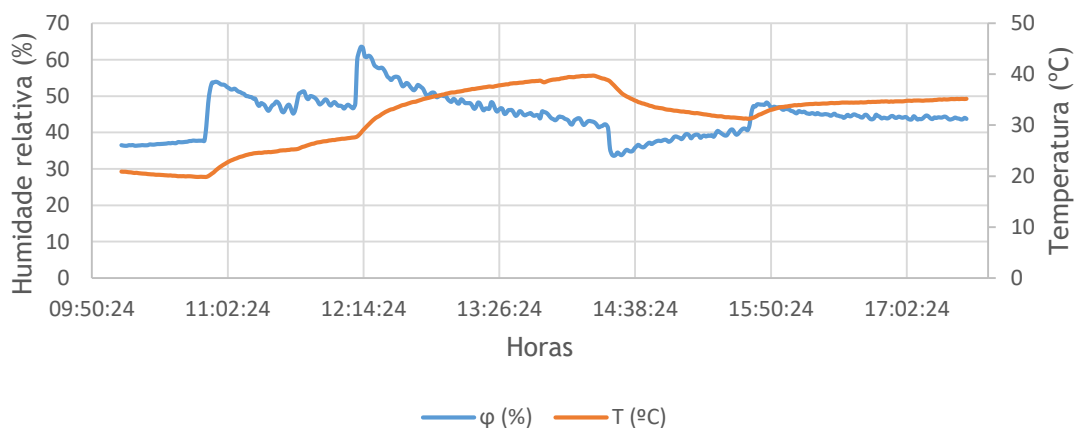


Figura 5.30- Variação das condições ambiente no interior da câmara climática, para o ensaio 12.

5.2.1.7. Processo 7

O último dos processos utilizados é o processo número 7, e apresenta uma característica que os distingue dos restantes. Trata-se de um processo realizado em circuito aberto, mas sem alimentação na caldeira, ou seja, as condições impostas na câmara apenas irão depender do controlo de temperatura utilizado para alimentar a resistência de reaquecimento instalada no túnel da unidade de ar condicionado. O esquema deste processo encontra-se na *figura 5.31*.

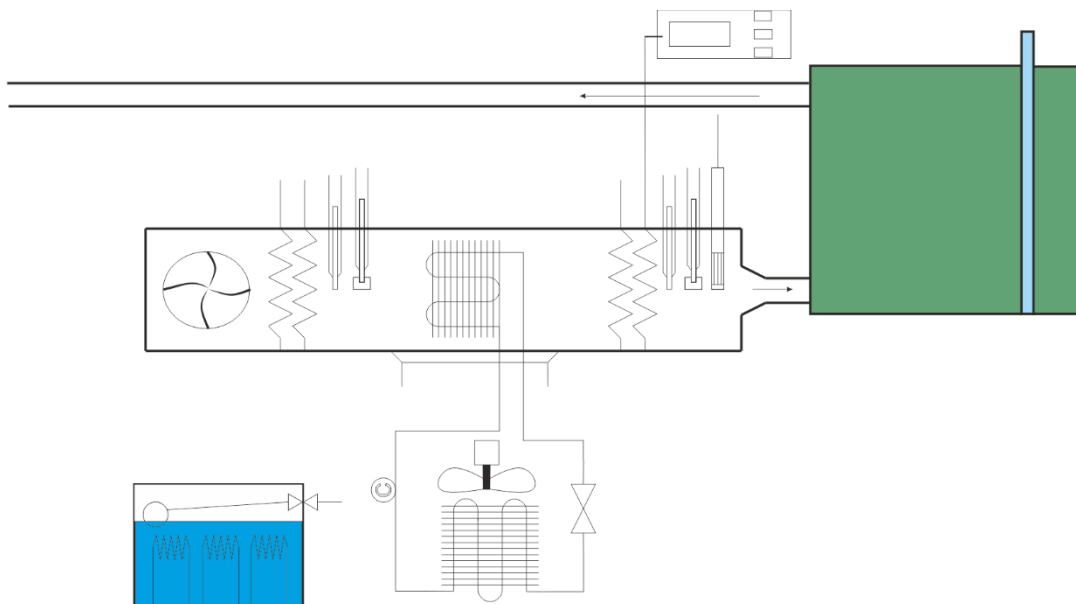


Figura 5.31- Esquema do processo 7.

O único ensaio resultante da utilização deste processo é o ensaio 15, encontrando-se este representado na *tabela 9*, onde estão discriminadas as condições impostas no túnel da unidade de ar condicionado e as condições daí obtidas.

Tabela 9- Tabela de apresentação do ensaio obtido através da utilização do processo 7.

Dia/Mês	Ensaio n.º	Condições impostas no túnel				Interior da câmara			Vent.		Saída	
		Caldeira	Pré-aquecimento	Compressor	Reaquecimento	ϕ (%)	T (°C)	ω (kg/kg)	ϕ (%)	T (°C)	ϕ (%)	T (°C)
23/06	15	Não	Não	Sim	v) Sim	42	22	0,01	49	29	88	13

- v) O controlador de temperatura encontrava-se a fornecer energia a uma resistência, sendo a temperatura selecionada igual a 10 °C.

Na *figura 5.32*, está representada a variação das condições ambiente existentes no interior da câmara climática. O ensaio número 15 teve uma duração de 289 minutos, até estabilizar, sendo a duração do ensaio válido igual a 100 minutos.

Ensaio 15: Condições no interior da câmara

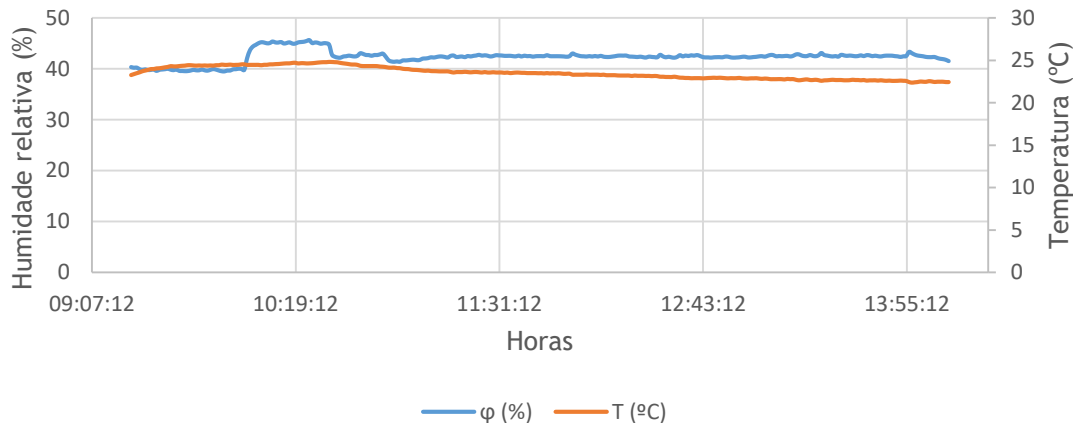


Figura 5.32 - Variação das condições ambiente no interior da câmara climática, para o ensaio 15.

5.2.2. Notas conclusivas

Neste subcapítulo serão apresentadas algumas conclusões obtidas através da análise dos gráficos e dos valores provenientes dos ensaios a cima apresentados.

Numa primeira secção será abordada a existência de uma instabilidade de valores em alguns gráficos, sendo que posteriormente serão comparados ensaios realizados através de diferentes processos e com diferentes condições impostas, na unidade de ar condicionado.

5.2.2.1. Instabilidade gráfica

No caso de alguns ensaios, como é visível principalmente nos ensaios 8 e 11, é de realçar uma ligeira variação nos valores da umidade relativa, podendo esta apenas ser notada devido ao tempo decorrido entre medições (i.e., o equipamento utilizado, para a medição da umidade relativa e da temperatura no interior da câmara climática, guardava os valores medidos de minuto a minuto). Estas variações são originadas pela entrada de água na caldeira, uma vez que o seu abastecimento de água é gerido de forma mecânica por uma boia de nível. A água ao atingir o ponto de ebulição torna-se agitada, originando uma variação momentânea do nível de água da caldeira. Como a boia acompanha continuamente o nível de água, este ao baixar faz com que entre água através da torneira da boia. Este acontecimento, resulta numa diminuição da temperatura da água e por sua vez conduz a uma diminuição do vapor de água gerado, diminuindo a umidade relativa. Este fenómeno ocorre quando é empregue na caldeira uma potência de ordem de grandeza suficientemente alta para resultar num aumento da agitação da água. Contudo, para ensaios onde a potência entregue, à caldeira, for bastante mais elevada do que a necessária para criar esse tipo de agitação, a instabilidade gráfica praticamente deixa de ser notada. Isto ocorre porque a quantidade de energia transferida para a água é de tal ordem, que a quantidade que entra pela torneira da boia de nível, devido à agitação da água, é imediatamente aquecida, não sendo quase notada a sua influência. Por outro lado, se a potência for muito baixa a quantidade de água que sai da caldeira sob a forma de vapor é

reduzida e a variação provocada pela ebulição é reduzida, não fazendo notar estas variações. Pode ainda ser referido, que a não utilização da caldeira elétrica, não resulta em instabilidade gráfica. No caso da temperatura não é notada a variação, para casos em que a potência utilizada na caldeira é superior a 1 kW, uma vez que a água se mantém em ebulição e a temperatura desta mantém-se praticamente constante. Para casos em que a potência utilizada é inferior a 1 kW, a variação da temperatura não é notada uma vez que, nos ensaios em que ocorreu esta condição, foi utilizado o controlador de temperatura, logo a temperatura no interior da câmara mantém-se constante. Ambas as variações não podem ser justificadas com base em valores medidos ao longo do túnel da unidade de ar condicionado, uma vez que as medições foram realizadas em intervalos de 10 minutos e algumas delas foram obtidas de termómetros, onde a variação não é notada com tanta facilidade.

5.2.2.2. Comparação de ensaios

Nesta secção serão comparados os resultados obtidos para alguns ensaios que apresentem grau de comparação, ou seja, os ensaios que sejam realizados através do mesmo processo e que apresentem apenas um parâmetro distinto na lista de condições impostas no túnel serão analisados por forma a perceber qual a influência dessa alteração. Contudo, também serão analisados ensaios que apresentem condições ambiente no interior da câmara climática iguais ou aproximadas.

5.2.2.2.1. Comparação dos ensaios 1 e 9

Os ensaios 1 e 9 apresentam condições ambiente, no interior da câmara, semelhantes, embora tenham sido impostas condições distintas no túnel da unidade de ar condicionado. O ensaio 1 foi realizado segundo o processo número 1, enquanto que o ensaio 9 foi realizado pelo processo número 3. Ambos os ensaios possuíam uma configuração de circuito fechado, embora no ensaio 9 tenha sido controlada a resistência da caldeira elétrica e a resistência de reaquecimento.

Tabela 10- Tabela de comparação entre o ensaio 1 e o ensaio 9.

Dia/Mês	Ensaio n°.	Condições impostas no túnel				Interior da câmara		Saída		Exterior		Pot. (kW)
		Caldeira (kW)	Pré-aquecedor	Compressor	Reaquecimento (°C)	ϕ (%)	T (°C)	ϕ (%)	T (°C)	ϕ (%)	T (°C)	
06/05	1	1	Não	Não	Não	38	44	68	32	50	15	0,48
17/06	9	2,79	Não	Sim	29,5	38	46	100	35	35	17	0,52

Como é possível observar na *tabela 10*, tanto as condições impostas no interior do túnel do ar condicionado, como as condições verificadas à saída deste e no exterior da câmara climática, são distintas. A semelhança dos valores, das condições medidas no interior da câmara climática, apenas se pode dever ao funcionamento do equipamento, isto é, uma vez que a temperatura à saída do ar condicionado é bastante elevada, para o ensaio 9, o compressor utiliza mais energia, como é possível observar na *tabela 10*. Como é utilizada mais energia há uma maior diminuição da humidade existente.

5.2.2.2.2. Comparação dos ensaios 7 e 15

Relativamente aos ensaios 7 e 15, realizados com base nos processos 3 e 7, respetivamente, apresentam condições ambiente no interior da câmara climática semelhantes. Nesta situação o ensaio 7 é realizado em circuito fechado enquanto o ensaio 15 é realizado em circuito aberto.

Na *tabela 11*, é possível observar os valores impostos e os valores obtidos nos ensaios 7 e 15. No ensaio 7 a humidade relativa existente no sistema é renovada na caldeira, ou seja, a humidade absorvida pelo desumidificador é repostada pela caldeira, enquanto, para o ensaio 15 a humidade é proveniente do exterior. É importante verificar, que o ar proveniente do exterior, é aspirado junto ao ventilador da unidade de ar condicionado. Assim ao passar pelo evaporador desta unidade e pela resistência de reaquecimento, aumenta a sua humidade relativa. Importa referir que a comparação entre estes dois ensaios comprova o que foi dito anteriormente. Apesar da temperatura à saída da unidade de ar condicionado, para os dois ensaios, ser igual, a humidade relativa é bastante diferente. O ensaio em que humidade relativa à saída do túnel é superior foi mesmo ensaio em que a unidade de desumidificação possuiu um consumo energético mais elevado, sendo também aquele que produziu uma maior diminuição da humidade relativa.

Tabela 11- Tabela de comparação entre o ensaio 7 e o ensaio 15.

Dia/Mês	Ensaio n°.	Condições impostas no túnel				Interior da câmara		Saída		Exterior		Pot. (kW)
		Caldeira (kW)	Pré-aquecimento	Compressor	Reaquecimento (°C)	ϕ (%)	T (°C)	ϕ (%)	T (°C)	ϕ (%)	T (°C)	
15/06	7	0,63	Não	Sim	7,2	40	20	78	13	34	17	0,07
23/06	15	Não	Não	Sim	10	42	22	88	13	41	19	0,33

5.2.2.2.3. Comparação dos ensaios 2, 4 e 5

Os ensaios 4 e 5, diferem no local onde decorre o aquecimento, no interior do túnel, ou seja, para o ensaio 4 é utilizado o sistema de reaquecimento enquanto para o ensaio 5 foi utilizado o pré-aquecimento. Ambos os ensaios seguem o processo número 1, sendo os dois realizados em circuito fechado. O ensaio número 2, também relativo ao processo 1, difere dos anteriores pela não utilização de um dos sistemas de aquecimento. Contudo as restantes condições impostas são iguais.

Tabela 12- Tabela de comparação entre o ensaio 4 e o ensaio 5.

Dia/Mês	Ensaio n°.	Condições impostas no túnel				Interior da câmara		Saída		Exterior		Pot. (kW)
		Caldeira (kW)	Pré-aquecedor (kW)	Compressor	Reaquecimento (kW)	HR (%)	T (°C)	HR (%)	T (°C)	HR (%)	T (°C)	
11/05	4	2	Não	Sim	1	31	43	37	45	44	16	0,45
18/05	5	2	1	Sim	Não	38	44	60	40	40	17	0,48
09/05	2	2	Não	Sim	Não	46	30	100	23	46	15	0,37

Como é possível observar na *tabela 12*, as condições obtidas no interior da câmara climática são distintas. Uma vez que ambos os ensaios são realizados em circuito fechado, será considerado que as condições ambiente externas não influenciaram as condições obtidas. Através dos valores apresentados na *tabela 12*, é visível que não existe diferença significativa entre a temperatura obtida no ensaio 4 e no ensaio 5. A utilização do sistema de reaquecimento possibilita um aumento da temperatura e uma redução da humidade relativa à saída da unidade de ar condicionado. A utilização das resistências de pré-aquecimento, resulta num aumento da humidade relativa à saída do túnel da unidade de ar condicionado, como foi referido na explicação da *tabela 11*.

Relativamente ao ensaio número 2, a não utilização de um sistema de aquecimento permitiu a obtenção de uma humidade relativa superior e uma temperatura inferior, à saída do túnel da unidade de ar condicionado. Com um consumo inferior por parte do desumidificador, relativamente aos ensaios 4 e 5, o ensaio 2 apresentou uma maior redução do vapor de água existente no interior da câmara climática.

No ensaio 5 o consumo da unidade em análise apresenta um consumo superior, uma vez que, no geral, o valor da temperatura e da humidade relativa à saída do túnel é superior ao do ensaio 4, como descrito anteriormente.

5.3. Resultados e discussão

O objetivo deste trabalho passa pela obtenção de valores que descrevam o desempenho, quanto à sua capacidade de produção de água da unidade de desumidificação em estudo. Para tal é necessário avaliar a quantidade de água obtida por unidade de tempo, sendo também necessária a obtenção do gasto energético associado à produção dessa mesma quantidade de água.

Os resultados expostos anteriormente neste capítulo apenas dizem respeito às condições que foram geradas no interior da câmara climática, apesar de que os resultados analisados agora serem influenciados por essas mesmas condições.

Nos gráficos apresentados nas secções seguintes foi retirado o ensaio número 1. Como referido anteriormente, o ensaio 1 e o ensaio 5 produziram as mesmas condições no interior da câmara climática, embora com condições impostas no interior do túnel do ar condicionado distintas. Esta opção foi tomada com base na observação dos mesmos gráficos.

Nas secções seguintes serão apresentadas as conjugações de resultados obtidas, os respetivos gráficos e as conclusões retiradas.

5.3.1. Quantidade de água produzida

Nesta secção será abordada a produção de água obtida através da utilização da unidade de desumidificação em análise. Para a obtenção dos valores apresentados na *tabela 13*, foi necessária a medição da água obtida e do tempo de ensaio. É importante relembrar que o tempo de ensaio apresentado é apenas o tempo que a unidade se encontrou a operar após serem atingidas condições estáveis no interior da câmara.

Tabela 13- Quantidade de água produzida por hora, para cada ensaio.

Dia	Ensaio nº.	Água total (ml)	Tempo ensaio (min)	Produção (l/h)
09/maio	2	460	120	0,230
10/maio	3	250	120	0,125
11/maio	4	61	120	0,031
18/maio	5	475	145	0,197
19/maio	6	275	122	0,135
15/junho	7	0	89	0,000
16/junho	8	170	93	0,110
17/junho	9	210	60	0,210

18/junho	10	212	61	0,209
19/junho	11	95	73	0,078
20/junho	12	285	60	0,285
21/junho	13	300	60	0,300
22/junho	14	0	41	0,000
23/junho	15	120	100	0,072

Com base na observação da *figura 5.33*, localizada na página 102, foram retiradas as seguintes conclusões:

- Quanto maior for o valor da temperatura, menor será o valor de humidade relativa que deve existir no ar atmosférico, para obtenção de água através da condensação de vapor de água. Este acontecimento é visível quando se compara as condições verificadas no interior da câmara climática e a produção obtida, para os ensaios 7 e 15.
- Fixando um valor de temperatura e aumentando a humidade relativa num espaço controlado, resulta num aumento de produção. Por exemplo, para uma temperatura de 30 °C, se ocorrer um aumento de 12% da humidade relativa do ar, a produção aumentará para o dobro. No caso de a temperatura ser de 43 °C, e existir um aumento da humidade relativa, também de 12%, a produção crescerá dez vezes.
- Fixando um valor de humidade relativa e aumentando a temperatura ambiente, resultará do aumento da produção de água. Contudo, quanto mais se aumente a temperatura, maior será a percentagem de aumento. Por exemplo, para 40% de humidade relativa a 25 °C, obteve-se uma produção de 0,078 l/h, e para o mesmo valor de humidade relativa a uma temperatura de 30 °C, a produção obtida foi de 0,11 l/h. Para este caso ocorreu um aumento de produção de 6% por litro de água, por hora e por grau Celcius. Para o mesmo valor de humidade relativa, o aumento de temperatura de 30 para 35 °C, resultou num aumento de 8% por litro de água produzida, por hora e por °C.
- Quer ocorra uma redução de 2% na humidade relativa, quer se realize um aumento de 1% na humidade relativa, verifica-se um aumento de produção de 4% por °C aumentado.

5.3.2. Potência elétrica utilizada

A potência utilizada foi analisada para obter uma percepção do funcionamento do compressor existente na unidade em análise. Segundo o fabricante, a potência máxima que o equipamento deve atingir é de 0,44 kW.

Tabela 14- Potência utilizada no ensaio, para cada ensaio.

Dia	Ensaio n°.	Energia (kWh)	Tempo ensaio (min)	Potência (kW)
09/maio	2	0,752	120	0,376
10/maio	3	0,631	120	0,316
11/maio	4	0,92	120	0,460
18/maio	5	1,179	145	0,488
19/maio	6	0,849	122	0,418
15/junho	7	0,109	89	0,073
16/junho	8	0,549	93	0,354
17/junho	9	0,515	60	0,515
18/junho	10	0,378	61	0,372
19/junho	11	0,203	73	0,167
20/junho	12	0,402	60	0,402
21/junho	13	0,452	60	0,452
22/junho	14	0,111	41	0,162
23/junho	15	0,541	100	0,325

Após uma observação cuidada e atenta da *figura 5.34*, localizada na página 103, e à *tabela 14*, é de referir o seguinte:

- Quando dois ensaios são realizados a temperaturas iguais, a potência utilizada em cada ensaio é igual.
- A marca dos 0,44 kW, designada pelo fabricante como a potência máxima atingida pelo equipamento em análise, foi ultrapassada em alguns ensaios realizados, sendo que todos os ensaios em que a potência utilizada foi superior a esse limite, foram ensaios em que a temperatura no interior da câmara climática era superior a 40 °C. Posto isto, o desumidificador foi utilizado em condições para as quais o seu uso não é aconselhado.

5.3.3. Energia elétrica utilizada por litro de água e o seu custo

Segundo ERSE (2016) a empresa Audax Energia, no caso A, para uma potência contratada de 6,9kVA, para uso doméstico, o custo por kWh, com contador simples, é de 0,1560€. Para uso não doméstico, caso B, o custo por kWh é de 0,1584€, para um contador simples e uma potência contratada de 6,9kVA.

A obtenção de valores para a energia utilizada ao longo do ensaio foi realizada através da multiplicação da potência, verificada anteriormente para cada ensaio, com o tempo de ensaio

decorrido em condições estabilizadas. Através da quantidade de energia utilizada é possível obter o custo de um litro de água. Este preço varia de ensaio para ensaio, mesmo com a utilização da mesma unidade de desumidificação. Este fato deve-se à dificuldade encontrada pelo equipamento em conseguir condensar o vapor de água existente no ar, para certas condições ambiente.

Com a observação dos dados fornecidos na *tabela 15* e com a observação atenta da *figura 5.35* e *5.36*, localizadas respetivamente nas páginas 104 e 105, foram obtidas as seguintes conclusões:

- Fixando uma temperatura e reduzindo a humidade relativa, o consumo de energia necessário para obter um litro de água aumenta. Por exemplo, para uma temperatura de 43 °C, se reduzirmos a humidade relativa em 12%, o aumento da energia por litro é de 90%, aumentando 7,5%, por cada ponto percentual de descida da humidade relativa. Outro exemplo, é a fixação da temperatura nos 30 °C, e com a redução da humidade relativa em 6%, a energia utilizada passará para o dobro, a uma taxa de 8,33% por ponto percentual de redução da humidade relativa
- Para ensaios com onde se obteve a mesma humidade relativa, primeiramente o consumo aumenta em 6% por °C, atingindo um máximo, e de seguida diminui a uma taxa de 9% por °C aumentado.
- Uma vez que o preço da energia é igual para todos os ensaios, o custo de um litro de água, obtida por este equipamento com base na condensação de vapor de água, é diretamente proporcional à energia despendida para a produção de água.
- Por norma, os ensaios que apresentaram uma maior produção de água apresentam um custo por litro inferior.
- Segundo a Deco Proteste (2015), o distrito onde a água canalizada possui um custo mais elevado é no Porto, sendo o concelho de Santo Tirso o que apresenta o custo mais elevado. Neste concelho, o litro de água é pago a 0,0036 €. Em relação à água engarrafada o preço mínimo obtido em distribuidores ronda os 0,08€. O objetivo deste trabalho não é substituir estas fontes de água potável. Estes valores, apresentados a cima, servem apenas como base para a apresentação dos custos de produção de algumas tecnologias referidas na presente dissertação. A produção de água a partir da condensação do vapor de água existente no ar atmosférico, na melhor das hipóteses é de 0,22 €/l e para no pior dos casos é de 2,353 €/l. Estes valores são apenas referentes às condições testadas em laboratório. A estes valores de produção devem ser acrescidos os custos do consumo energético dos sistemas de tratamento de água a ser implementados. Segundo Nandy, A., Saha, S. Ganguly, S. Chattopadhyay, S. (2014) três células de Peltier, de 40 W cada, produzem 1 l/h de água. Para esta tecnologia, utilizando os mesmos valores de custo da energia elétrica da rede, um litro de água possui um custo de 0,019€. Segundo Lenntech, Water Treatment Solutions (2015) para

sistemas de dessalinização o custo mínimo é de 0,5€/m³ (0,0005€/l). Contudo, tanto a dessalinização como as células de Peltier apresentam diversas desvantagens em relação aos sistemas de condensação por compressão de vapor, entre elas o investimento necessário e a poluição gerada.

- Tanto na *tabela 15*, como nas *figuras 5.35 e 5.36*, os resultados correspondentes aos ensaios 7 e 14, encontram-se representados pela letra C. Para estes mesmos ensaios, a produção de água, através da condensação de vapor de água, foi nula. Assim, sendo a energia necessária para a produção de um litro de água é igual à divisão da energia consumida, pela unidade em análise durante o período de ensaio estável, pela quantidade total de água captada nesse mesmo período, o valor da quantidade de energia precisa para produzir um litro de água pode ser considerado infinito. Esta consideração, além de poder ser fundamentada matematicamente, pode ser factual tendo como base que o equipamento de desumidificação poderia estar ligado uma quantidade de tempo indeterminada, sujeito às mesmas condições climatéricas, e a sua produção seria nula. Posto isto seria um erro quantificar a energia necessária à produção como nula. Em termos de custo de produção de um litro de água, o caso é apresentado de igual forma, não sendo possível determinar o seu valor.

Tabela 15- Quantidade de energia utilizada por litro de água produzido e o custo por litro da água produzida, para cada ensaio.

Dia	Ensaio nº.	Água total (ml)	Energia (kWh)	Energia por litro (kWh/l)	Custo (€/l)	
					Caso A	Caso B
09/maio	2	460	0,752	1,635	0.225	0.259
10/maio	3	250	0,631	2,524	0.394	0.399
11/maio	4	61	0,92	15,082	2.353	2.389
18/maio	5	475	1,179	2,482	0.387	0.393
19/maio	6	275	0,849	3,087	0.482	0.489
15/junho	7	0	0,109	C	C	C
16/junho	8	170	0,549	3,229	0.504	0.511
17/junho	9	210	0,515	2,452	0.383	0.388
18/junho	10	212	0,378	1,783	0.278	0.282
19/junho	11	95	0,203	2,137	0.333	0.339
20/junho	12	285	0,402	1,411	0.22	0.224
21/junho	13	300	0,452	1,507	0.235	0.239
22/junho	14	0	0,111	C	C	C
23/junho	15	120	0,541	4,508	0.703	0.714

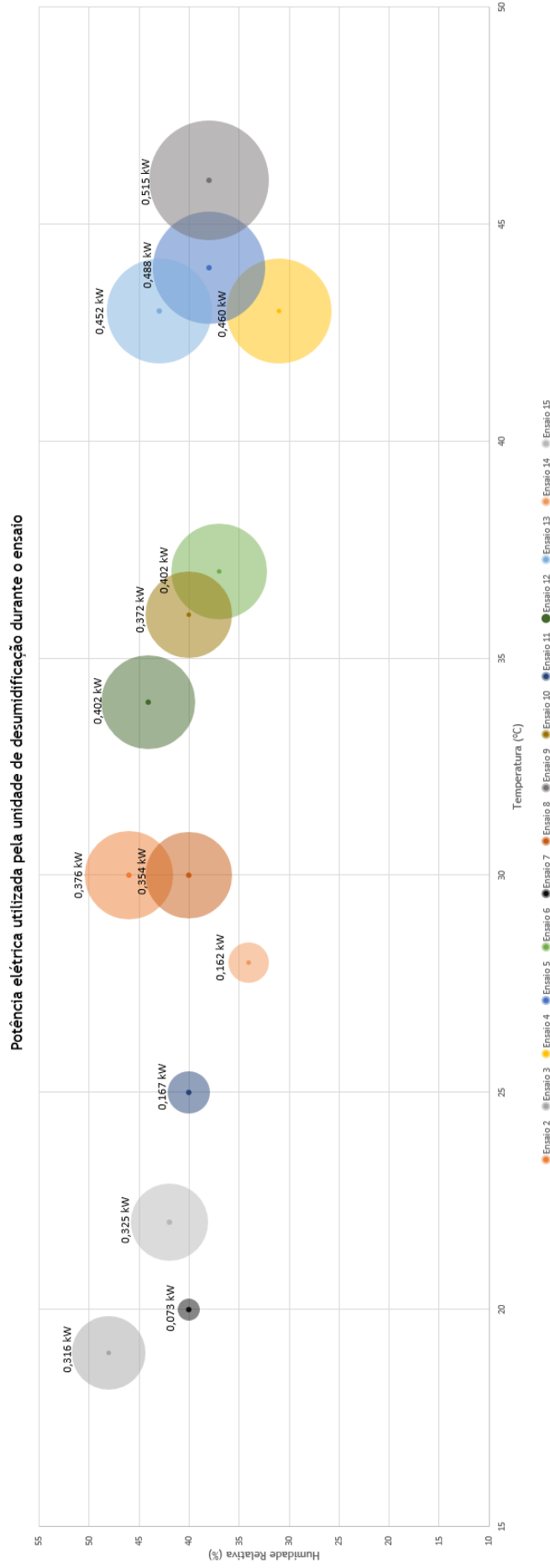


Figura 5.34- Potência utilizada pela unidade de desumidificação durante cada ensaio realizado.

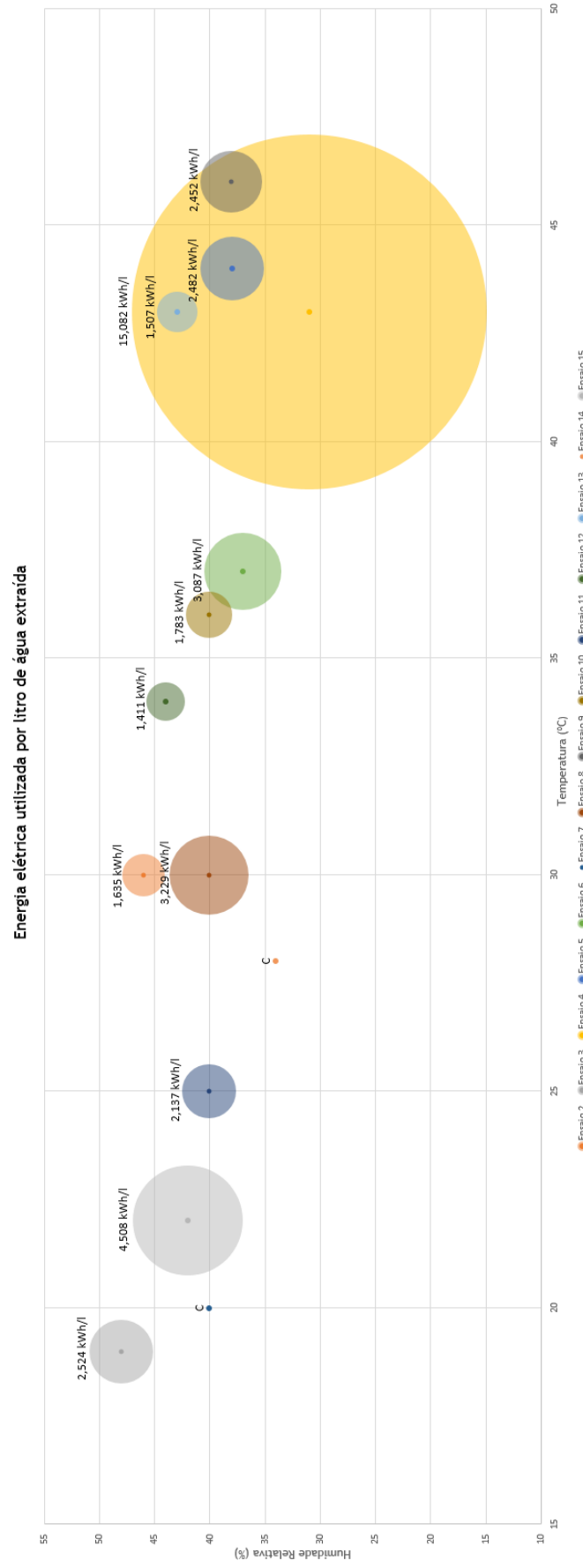


Figura 5.35- Energía utilizada por litro de agua producida, para cada ensayo realizado.

Custo do litro de água produzida, para cada um dos ensaios realizados

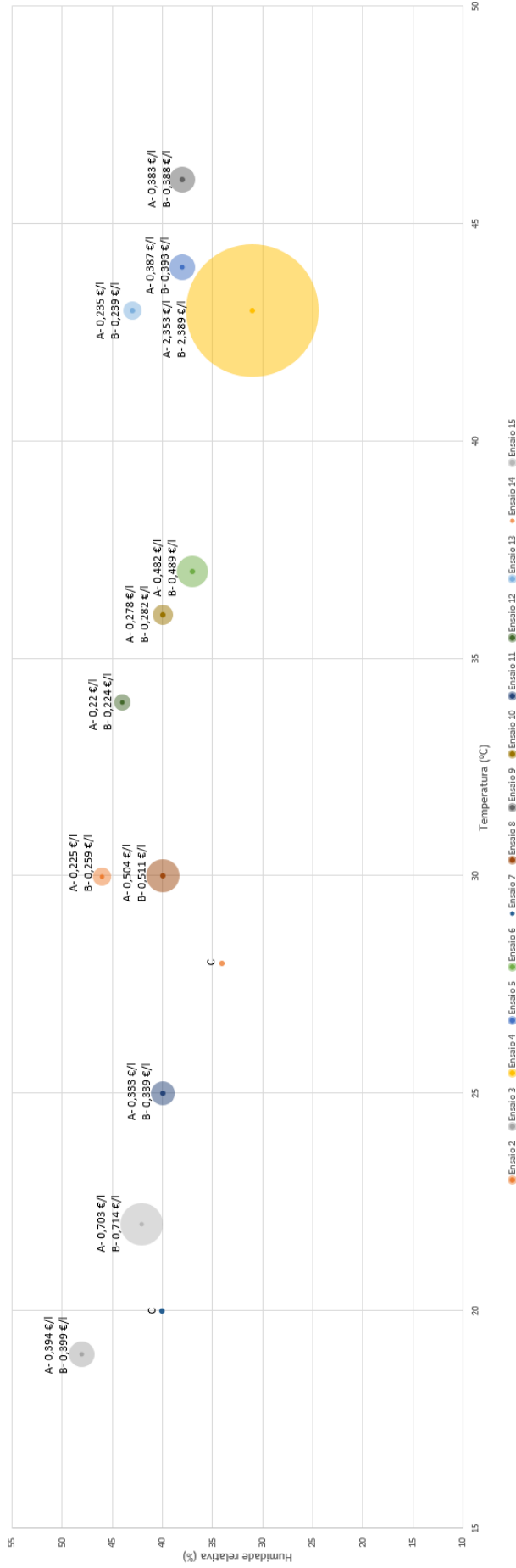


Figura 5.36- Custo do litro de água produzida para cada ensaio realizado.

Capítulo 6

6. Conclusão

A utilização de sistemas de refrigeração por compressão de vapor para obtenção de água, face às utilizadas atualmente para produção de água potável, apresenta um equilíbrio entre produção, gastos energéticos e perigo ambiental. Possui gastos energéticos inferiores aos da dessalinização e capacidade de produção mais constante do que sistemas que utilizam substâncias dissecantes. Em termos de poluição ambiental, estes equipamentos podem ser considerados amigos do ambiente. Na atualidade os perigos ambientais que estes sistemas representam encontram-se legislados, sendo punível penalmente qualquer ato ou alteração realizada no circuito do fluido de trabalho, sem qualificação e licença para tal.

Em termos económicos importa ainda referir a necessidade de aquisição de um equipamento de desumidificação por compressão de vapor, embora existam unidades de desumidificação de diversos valores monetários. Este fator permite a utilização desta forma de obtenção de água por quase toda a população, até porque grande parte da população, embora não seja possível determinar uma percentagem, já possui um equipamento capaz de produzir água.

Em termos ambientais, a utilização de unidades de desumidificação para produção de água, permite uma redução da extração de água das reservas naturais, tanto na água engarrafada como na água canalizada. Para a água engarrafada, a utilização desta tecnologia permite, indiretamente, a redução do consumo de plástico, uma vez que possui a capacidade de reduzir o número de garrafas de água vendidas.

6.1. Recapitulação

O trabalho realizado apresenta como contribuição o estudo experimental de um sistema passível de ser utilizado para a produção de água através da extração de vapor de água atmosférico.

O trabalho desenvolvido, foi realizado em diferentes fases, até serem atingidas condições para a obtenção dos valores finais. Numa primeira fase foram realizadas alterações na distribuição do laboratório para permitir localizar a câmara climática à distância correta da unidade de ar condicionado. Posteriormente procedeu-se à colocação de todas os instrumentos de medição a ser utilizados.

Na segunda fase foram realizados testes a todos os equipamentos utilizados, por forma a obter informação sobre o seu funcionamento. Uma vez que nesta dissertação importa aplicar

condições ambiente constantes no interior de uma câmara climática de dimensões reduzidas, tendo que contar com a influência de um equipamento demasiado potente para o espaço existente, o desafio inicial foi controlar o caudal de água à entrada da caldeira elétrica da unidade de ar condicionado. Após a realização de algumas alterações na mesma, foi possível iniciar o registo de valores coerentes e aproximadamente constantes.

A terceira fase foi caracterizada pelo início da realização de ensaios experimentais, primeiramente com a câmara climática aberta. Posteriormente, ao fechar-se a câmara climática, começou-se a observar os limites possíveis do sistema, em termos de condições impostas no interior da câmara climática.

A quarta fase do trabalho ficou marcada pelo início dos ensaios apresentados na presente dissertação. Ao longo desta fase o trabalho começa a ganhar estrutura, tendo sido sempre necessário obter novas formas de realizar os ensaios, por forma a obter um maior leque de valores, dentro dos limites determinados numa fase anterior.

Na parte final do trabalho o conjunto de resultados obtidos foram analisados. Como termos de comparação foram utilizados todos os dados obtidos, desde as condições ambiente, estabilizadas, no interior da câmara, a produção de água obtida, o tipo de sistema utilizado (i.e., circuito aberto e fechado) e as condições ambiente existentes no laboratório. De seguida deu-se início à elaboração de gráficos capazes de demonstrar os resultados obtidos, o que se revelou uma tarefa complicada. Sendo que os gráficos tinham de representar 3 variáveis, passíveis de ser consideradas independentes, optou-se pela realização de gráficos de 2 eixos, em que o diâmetro do marcador é diretamente proporcional ao valor obtido para a variável em análise (quantidade de água produzida, consumo energético associado, custo por litro, etc).

Esta configuração gráfica permite a observação da variação dos resultados obtidos com o aumento ou diminuição do valor da humidade relativa e da temperatura ambiente.

Com base nos gráficos foi possível obter, de forma mais clara, as conclusões apresentadas no final da presente dissertação.

6.2. Trabalho Futuro

Devido à percepção obtida com a realização do presente trabalho, torna-se possível propor alguns desenvolvimentos futuros para o presente trabalho.

É do meu entender que seria bastante gratificante o desenvolvimento deste trabalho, para a obtenção de água potável. Para tal seria interessante determinar a diferença entre a água potável e a água extraída do vapor de água atmosférico, relativamente à sua constituição, sabor, etc. Tal trabalho irá requerer a utilização de sistemas de purificação e de filtração, podendo ainda ser adotado um equipamento de mineralização.

Pode ainda ser interessante, uma tentativa de alteração do equipamento utilizado visando a melhoria do seu desempenho, ou até uma tentativa de alteração dos parâmetros de funcionamento do equipamento por forma a verificar o seu comportamento.

Capítulo 7

7. Referências bibliográficas

Air Conditioning Laboratory Unit A573, “*Experimental operating and maintenance manual*”, P.A. Hilton Ltd.

Anderson, B. (2009), “*Water in the Atmosphere*”, Capítulo 5.

Autodesk Education Community - “*Humidity Control*”, <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com>, 2014.

Balcells, J. (2014), “*Instructions Manual: CIR-e³*”, CIRCUTOR.

Bar, E. (2004), “*Extraction of water from atmospheric air: An alternative water source demanding minimal energy consumption*”, EWA Tech Ltd.

Bem Niewenhuis, et al., “*Atmospheric Water Generator - Water from air*”, Calvin College, 2012.

Bermair, D., Metz, S. J., de Lange, H. C., van Steenhoven, A. A. (2013), “*System analysis of membrane facilitated water generation from air humidity*”, *Desalination* 339 pp. 26-33.

Blackburn, N. J., Peters, G. M. (2009), “*Atmospheric water generation - An environmentally friendly alternative to bottled water?*”, Centre for Water and Wastewater Technology.

Bollay, E., Elliott, R. D. (2005), “*Cloud Seeding - A New Technology*”, pp. 7-10.

Carrington, C. G., Sun, Z. F., Sun, Q., Bannister, P., Chen, G. (2000), “*Optimizing efficiency and productivity of a dehumidifier batch dryer. Part 1: Capacity and airflow*”, *International Journal of Energy Research* 24, pp. 187-204.

Çengel, Y. A., Boles, A. (1998), “*Thermodynamics: Na Engineering Approach*”, Mc Graw-Hill, 4ª Edição.

Chua, K. J., Chou, S. K. (2005), “*A modular approach to study the performance of a two-stage heat pump system for drying*”, *Applied Thermal Engineering* 25, pp. 1363-1379.

Deco Proteste - Defesa do Consumidor, “*Tarifas da água: Portugal com custos pouco coerentes*”, <https://www.deco.proteste.pt>, 2015.

Duarte, M. V. (2013), “*Estudo da bomba de calor - Fluidos de trabalho e eficiência energética*”, Universidade da Beira Interior.

E2 Wireless Electricity Monitor (2012), “*Instruction Manual*”, Efergy.

EcoloBlue 30 Series (2015), “Manual”, EcoloBlue.

El-Ghonemy, A. M. K. (2012), “Fresh water production from/by atmospheric air arid regions, using solar energy: Review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 6384-6422.

ERSAR - Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos, “Agregações de sistemas multimunicipais dos serviços de águas”, <http://www.ersar.carto.com>, 2015.

ERSE (2016), “Preços de referência no Mercado liberalizado de energia elétrica e gás natural em Portugal Continental”, Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, p. 7.

Gad, H. E., Hamed, A. M. El-Sharkawy, I. I. (2001), “Application of a solar desiccant/collector system for water recovery from atmospheric air”, Renewable Energy 22, pp. 541-556.

Habeebullah, B. A. (2009), “Potential use of evaporator coils for water extraction in hot and humid areas”, Desalination 237, pp. 330-345.

Hamed, A. M., Aly, A. A., Zeidan, E. B. (2011), “Application of solar energy for recovery of water from atmospheric air in climatic zones of Saudi Arabia”, Natural Resources 2, pp. 8-17.

Harriman, L. G. (2002), “The Dehumidification Handbook”, Munters Corporation.

Hellstrom, B. (1969), “Potable water extracted from the air- Report on Laboratory Experiments”, Journal of Hydrology 9, pp. 1-19.

Henker, E. (2012), “Estudo e construção de equipamentos desumidificadores para obtenção de água potável utilizando sistemas”, Santa Cruz do Sul.

HygroLog HL-NT Data Logger (2015), “Instruction Manual”, Rotronic AG.

Kabeel, A. E. (2006), “Water production from air using multi-shelves solar glass pyramid system”, Renewable Energy, pp. 157-172.

Lafarie, J. P. (2004), “Hw4: Instruction Manual”, Rotronic AG.

Lenntech, Water Treatment Solutions - “Análise de custos de dessalinização por osmose inversa”, <http://www.lenntech.com.pt>, 2015.

Loo, S., Fane, A. C., Krantz, W. B., Lim, T. (2011), “Emergency water supply: A review of potential technologies and selection criteria”, Water Research 46, pp. 3125-3151.

Marsily, G. (2007), “An overview of the world’s water resources problems in 2050”, Ecohydrologt Hydrobiology Vol. 7, pp- 147-155.

Martin Bergstedt - “A Novel Forward Osmosis Draw Solution”, <http://www.aiche.org>, 2015.

- Martinez, M. F. R. - “Ciclo Hidrológico”, <http://mundociencia.webnode.com.br>, 2011.
- Mehta, L. (2014), “Water and Human Development”, World Development Vol. 59, pp. 59-69.
- Muñoz-García, M. A., Moreda, G. P., Raga-Arroyo, M. P., Marín-González, O. (2012), “Water harvesting for young trees using Peltier modules powered by photovoltaic solar energy”, Computers and Electronics in Agriculture 93, pp. 60-67.
- Nandy, A., Saha, S. Ganguly, S. Chattopadhyay, S. (2014), “A project on Atmospheric water generator with the concept of Peltier effect”, International Journal of Advanced Computer Research Vol. 4, pp- 481-486.
- Narayan, G. P., Sharqawy, M. H., Summers, E. K., Lienhard, J. H., Zubair, S. M., Antar, M. A. (2010), “The potential of solar-driven humidification-dehumidification desalination for small-scale decentralized water production”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, pp. 1187-1201.
- Nikolayev, V. S., Beysens, D., Gioda, A., Milimouk, I., Katiushin, E., Morel, J. P. (1996), “Water recovery from dew”, Journal of Hydrology 182, pp. 19-35.
- Nunes, L., Fernandes, J., Cardoso, J., Parente, J., Almeida, P., Bettencourt, T. (2009), “Disponibilidade de água doce no Planeta”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Oliveira, P. P. (2012), “Fundamentos de Termodinâmica Aplicada - Análise Energética e Exergética”, Lidel, 1ª Edição.
- Pagaime, L. M. T. (2011), “Dimensionar uma instalação de dessalinização de água por destilação a baixa temperatura”, Instituto Superior Técnico.
- Pires, L. C. C. (2010), “Desenvolvimento e estudo experimental de uma unidade para o arrefecimento passivo de edifícios”, Universidade da Beira Interior.
- Ray Agua (2010), “General Catalogue”.
- Rijsberman, F. R. (2005), “Water scarcity: Fact or fiction?”, Agricultural water management 80, pp. 5-22.
- Savenije, H. H. G. (2000), “Water scarcity indicators; the Deception of the Numbers”, Physics and Chemistry of the Earth Vol. 25, pp. 199-204.
- Scrivani, A., Bardi, U. (2008), “A study of the use of solar concentrating plants for the atmospheric water vapour extraction from ambient air in Middle East and Northern Africa region”, Desalination 220, pp. 592-599.

- Sharan. G. (2011), "*Harvesting dew with radiation cooled condensers to supplement drinking water supply in semi-arid Coastal Northwest India*", International journal for Service Learning in Engineering Vol. 6, pp. 130-150.
- Song, K., Mohseni, M., Taghipour, F. (2016), "*Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review*", Water Research 94, pp. 341-349.
- Stikker, A. (1998), "*Water today and tomorrow*", Futures Vol. 30, pp. 43-62.
- Strange Sounds - Cloud Seeding: Weather Modification Used by NASA to Battle California Drought, <http://strangesounds.org>, 2014.
- Stuij, B. (1995), "*Heat pumping technologies, applications and markets*", Energy for Sustainable Development Vol. 2, pp. 27-40.
- Subramani, A., Jacangelo, J. G. (2014), "*Emerging desalination technologies for water treatment: A critical review*", Water Research, pp. 165-187.
- Sultan, A. (2004), "*Absorption/regeneration non-convective system for water extraction from atmospheric air*", Renewable Energy 29, pp. 1515-1535.
- TTK 75 Eco (2014), "*Manual de instruções*", TROTEC.
- UN Water (2016), "*Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2016 - Água e Emprego - Fatos e números*", Nações Unidas.
- UN Water (2016), "*Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2016 - Água e Emprego - Resumo executivo*", Nações Unidas.
- UN Water (2016), "*The United Nation World Development Report 2016 -Water and Jobs*", United Nations.
- Vingerhoeds, M. H., Vries, M. A. N., Ruepert, N., van der Laan, H., Bredie, W. L. P., Kremer, S. (2016), "*Sensory quality of drinking water produced by reverse osmosis membrane filtration followed by remineralisation*", Water Research 94, pp. 42-51.
- Wahlgren, R. V. (1993), "*Atmospheric water vapour processing*", Waterlines Vol. 12, pp. 20-22.
- Wahlgren, R. V. (2001), "*Atmospheric water vapour processor designs for potable water production: A review*", Water Research, pp. 1-22.
- Wipo Magazine - "*Turning Air into Water and IP into Profit*", <http://www.wipo.int>, 2010.