UNIVERSIDADE
BEIRA INTERIOR

Avaliação das necessidades energéticas de um sistema autónomo para produção de água a partir de ar atmosférico

Vasco Rodrigues Andrade Correia

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

Orientador: Prof. Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva
Co-orientador: Prof. Doutor Luís Carlos Carvalho Pires

outubro 2023

Declaração de Integridade

Eu, Vasco Rodrigues Andrade Correia que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M11811 de Engenharia Eletromecânica da Universidade da Beira Interior, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o Código de Integridades da Universidade da Beira Interior.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria. Universidade da Beira Interior, Covilhã 24/09/2023

Universidade da Beira Interior, Covilhã 24/09/2023

Agradecimentos

Esta dissertação marca o final de uma das etapas mais importantes da minha vida, que muita gente refere como a melhor de todas, a vida de estudante. Durante os longos meses de escrita relembro-me de todos os excelentes momentos que vivi ao longo dos últimos seis anos nesta instituição de ensino e especialmente de todas as pessoas que estiveram ao meu lado durante estes seis anos nos bons e nos maus momentos, que me ajudaram a concluir este capítulo.

Começo por agradecer ao meu orientador, o Professor Doutor Pedro Dinho da Silva, e ao meu co-orientador, o Professor Doutor Luís Pires, pela ajuda, compreensão, tempo disponibilizado e conhecimento transmitido ao longos destes meses.

Gostaria de também agradecer ao Sr. João Correia, técnico do laboratório de Transmissão e Calor, por toda a sua disponibilidade e auxílio na montagem e execução da instalação experimental.

Não poderia também deixar de agradecer a todos os meus amigos sem os quais eu não estaria aqui, não só pelo apoio e incentivo constante ao longo da escrita desta dissertação e dos últimos seis anos de universidade, mas por todos os momentos de festa e companheirismo partilhado ao longo destes anos.

E, por último, mas não menos importante, agradecer, do fundo do meu coração, aos meus pais, José e Margarida, ao meu irmão José Pedro e à minha namorada Sofia, por toda a disponibilidade, dedicação, amizade e amor demonstrados ao longo não só destes últimos meses de escrita desta dissertação, mas como também em todo o meu percurso, nos melhores e piores momentos, e sem os quais seria impossível ter concluído esta etapa.

A todos os que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta dissertação.

Resumo

A produção de água através de ar atmosférico é uma inovação tecnológica que facilita a extração de água da atmosfera utilizando vários processos diferentes. Como forma de responder às crescentes preocupações com a escassez de água em várias regiões do mundo, esta técnica surgiu como uma solução promissora para fornecer água potável em áreas onde as fontes de água mais comuns são limitadas ou correm o risco de contaminação. Os sistemas de produção de água através de ar atmosférico podem ser implementados em diversos cenários, desde residências individuais até edifícios industriais de grande escala, podendo ser alimentados por fontes de energia renovável. Apesar dos desafios inerentes à ampliação destas tecnologias, de forma a garantir a sua acessibilidade e viabilidade, esta técnica possui o potencial de fazer uma contribuição significativa para atender às necessidades de água das comunidades, tanto em países desenvolvidos como em desenvolvimento. Este estudo tem como objetivo investigar o desempenho e as limitações de um desumidificador comercialmente disponível, nomeadamente o Trotec TTK140S, através da análise experimental do seu desempenho. Além disso, é explorada a viabilidade de integrar este desumidificador com uma fonte de energia fotovoltaica. Inicialmente, a produção de água e o consumo de energia do desumidificador foram avaliados sob condições específicas. Posteriormente, foi realizada uma comparação em três localizações diferentes (Lisboa, Pretória e Riyadh) para avaliar o funcionamento do desumidificador e determinar a área necessária para que ele funcione de forma independente.

Palavras-chave

Produção de água através de ar atmosférico; refrigeração por compressão de vapor; condensação de vapor de água; arrefecimento ativo; energia fotovoltaica

Abstract

Atmospheric water generation (AWG) is a technological innovation that facilitates the extraction of water from the atmosphere using various techniques. In response to mounting concerns regarding water scarcity in multiple regions globally, AWG has emerged as a promising solution for providing potable water in areas where conventional water sources are limited or contaminated. AWG systems can be implemented across diverse settings, ranging from individual households to large-scale industrial operations, and can be powered by renewable energy sources. Despite the inherent challenges associated with upscaling AWG technology to ensure its affordability and reliability, it possesses the potential to make a significant contribution towards meeting the water requirements of communities in both developed and developing nations. This study aims to investigate the performance and limitations of a commercially available dehumidifier, namely the Trotec TTK140S, through experimental analysis. Additionally, the feasibility of integrating this dehumidifier with a photovoltaic energy source is explored. Initially, the dehumidifier's water production and energy consumption were assessed under specific conditions. Subsequently, a comparison was conducted across three different locations (Lisbon, Pretoria, and Riyadh) to evaluate the dehumidifier's operation and ascertain the area necessary for it to function independently. This approach effectively addresses one of the main drawbacks of the technology, namely its substantial energy consumption.

Keywords

atmospheric water generation; vapor compression refrigeration; condensation of water vapor; active cooling; photovoltaic energy;

Índice

Declaração de Integridade ..... **i**
Agradecimentos ..... **iii**
Resumo ..... **v**
Lista de Figuras ..... **xi**
Lista de Tabelas ..... **xiii**
Nomenclatura ..... **xv**
1. Introdução **1**
1.1. Perspetiva geral 1
1.2. O problema em estudo e a sua relevância 3
1.3. Revisão bibliográfica 6
1.3.1. Técnicas de produção de água 6
1.4. Objetivos e contribuição da dissertação 25
1.5. Visão geral e organização da dissertação 26
2. Fundamentos Teóricos **27**
2.1. Psicrometria 27
2.1.1. Noções Básicas 27
2.1.2. Condensação 32
2.2. Refrigeração por Compressão de Vapor 33
2.2.1. Noções Base 34
2.2.2. Ciclos de refrigeração 39
2.3. Energia Fotovoltaica 47
2.3.1. Células Solares e o Efeito Fotovoltaico 48
2.3.2. Sistemas Fotovoltaicos 49
3. Instalação experimental **53**
3.1. Introdução 53
3.1.1. Equipamento de desumidificação por compressão de vapor 53
3.1.2. Unidade de ar condicionado 55
3.1.3. Câmara Climática 59
3.1.4. Ensaios e Equipamentos de medição 60
3.1.5. Estudo de Localizações 65
3.1.6. Estudo Fotovoltaico 68
4. Análise e discussão de resultados **73**

4.1. Procedimento experimental 73
4.2. Ensaios realizados 74
4.3. Análise de Resultados Experimentais 79
4.3.1. Produção de água 80
4.3.2. Consumo de Energia e Consumo Específico de Energia 80
4.3.3. Comparação com trabalhos anteriores 82
4.3.4. Curvas de Funcionamento para Produção de água e Consumo de Energia . 83
4.3.5. Estudo das Localizações 85
5. Conclusão 91
5.1. Recapitulação 91
5.2. Sugestão para trabalho futuro 92
Referências bibliográficas 95

Lista de Figuras

Figura 1 - Instalação experimental usada no estudo referido em Patel et al., (2020). .15

Figura 2 - Desumidificador Drinkable Air C-8, retirado de Faraz Ahmad et al., (2022).16

Figura 3 - Instalação e esquema do sistema termoelétrico referido em Joshi et al., (2017) 18

Figura 4 - Modelos usado no estudo referido em He et al., (2019). 20

Figura 5 - Esquema da instalação usada em Kadhim, Abbas & Kadhim, (2020). 21

Figura 6 - Esquema da instalação usada em Chen et al., (2016). 25

Figura 7 - Gráficos psicrométrico, retirado de Oliveira, (2012). 29

Figura 8 - Esquema de como ler o gráfico psicrométrico, retirado de Beck, (2021) 30

Figura 9 - Representação da linha de saturação e a mudança de fase de liquido para gasoso da água, retirado de Oliveira, (2012). 33

Figura 10 – Esquemas da máquina frigorifica e bomba de calor, retirados de Oliveira, (2012). 35

Figura 11 - Diagrama de temperatura e entropia (T-s), retirado de Ferreira, (2016). .38

Figura 12 - Diagrama de pressão e entalpia (P-h), retirado de Ferreira, (2016). 38

Figura 13 - Diagrama T-s do ciclo de Carnot ideal invertido, retirado de Oliveira, (2012). 42

Figura 14 - Esquema de uma instalação do ciclo de refrigeração simples por compressão, retirado de (Oliveira, 2012). 43

Figura 15 - Diagrama T-s para um ciclo de refrigeração simples ideal, retirado de (Oliveira, 2012). 43

Figura 16 - Diagrama T-s para um ciclo de refrigeração simples real, retirado de Oliveira, (2012). 45

Figura 17 - Diagrama T-s para o ciclo de refrigeração real, retirado de Cengel & Boles, (2015). 47

Figura 18 - Desumidificador TTK 140S, Trotec 54

Figura 19 - Unidade de ar condicionado usada 56

Figura 20 - Esquema da unidade de ar condicionado.....57

Figura 21 - Controlador de Temperatura 58

Figura 22 - Caldeira e sistema de humidificação da unidade de ar condicionado 58

Figura 23 - Dimensões da câmara climática usada 59

Figura 24 - Esquema da instalação experimental 60

Figura 25 - Transmissor e monitor de energia 62

Figura 26 - Balança usada durante os ensaios 62

Figura 27 - Higrómetros da Lascar Eletronics.....64

Figura 28 - Higrómetros da Rotronic 64

Figura 29 - Rotronic HydroLog.....65

Figura 30 - Humidade Relativa para 15 de janeiro 66

Figura 31 - Temperatura para 15 de janeiro.....67

Figura 32 - Humidade Relativa para 15 de julho 67

Figura 33 . Temperatura para 15 de julho 68

Figura 34 - Irradiância média para 15 de janeiro 70

Figura 35 - Irrandiancia média para 15 de julho 71

Figura 36 - Produção de água para o mesmo valor de humidade relativa e temperaturas diferentes.....76

Figura 37 - Produção de água para o mesmo valor de temperatura e humidades relativas diferentes.....77

Figura 38 - Consumo de energia no periodo completo do ensaio e Consumo Específico de energia para o mesmo valor de humidade relativa e temperaturas diferentes 78

Figura 39 - Consumo de energia no periodo completo do ensaio e Consumo Específico de energia para o mesmo valor de temperatura e humidades relativas diferentes 79

Figura 40 - Curva de funcionamento para a produção de água.....84

Figura 41 - Curva de funcionamento para o consumo de energia.....84

Figura 42 - Produção média de água para as três cidades escolhidas 86

Figura 43 - Consumo de energia médio para as três cidades escolhidas.....86

Figura 44 - Área mínima para produzir 1 litro de água por dia para as três cidades 88

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Especificações do desumidificador 55
Tabela 2 - Alcance e precisão dos aparelhos de medição 65
Tabela 3 - Especificações do módulo HTM 550H5-72 da Haitai Solar.....69
Tabela 4 - Resultado dos ensaios.....75
Tabela 5 - Produção total de água por mês e para o ano (apresentado em litros [L]) ..87

Nomenclatura

Acrónimos:

WHO	World Health Organization;
UNICEF	United Nations Children's Fund;
UN	United Nations;
MED	Multi-effect Distillation;
MSF	Multi-flash Distillation;

1. Introdução

No primeiro capítulo desta dissertação é dada uma perspetiva geral sobre a importância da água a nível mundial, as consequências da sua escassez nos tempos de hoje e possíveis soluções mais sustentáveis para a produção da mesma.

É também abordado o principal foco desta dissertação, a produção de água a partir de ar atmosférico, através da refrigeração por compressão de vapor, que é uma das melhores alternativas sustentáveis para a produção de água. Além desta técnica para a produção de água através de ar atmosférico, são abordadas também, numa perspetiva mais geral, outras técnicas usadas na atualidade. Ao longo do capítulo são referenciados vários artigos, estudos e dissertações que abordam a mesma temática.

Por último, é apresentada uma visão geral da organização desta dissertação, bem como seus objetivos e contribuições

1.1. Perspetiva geral

A água limpa é um recurso extremamente precioso sendo usado para consumo, higiene pessoal, produção de comida e até, em certas locais do planeta, produção de energia. Nos tempos de hoje, o acesso a água potável é considerado um privilégio e, infelizmente, nem todas as pessoas têm acesso a este recurso. Para ser usado para consumo humano, qualquer tipo de água tem de ser submetida a testes químicos, de forma a ser considerada potável. O consumo excessivo e por vezes descuidado de água potável está a levar a uma crise global de falta de água, que a cada dia que passa mais se agrava.

De acordo com o Relatório de Desenvolvimento Hídrico das Nações Unidas desenvolvido em 2003, referido em United Nations, (2003) a superfície do nosso plante está coberta em 71% de água, mas muita dela é considerada inacessível ou imprópria para consumo humano. Apesar de cerca de 71% do planeta estar coberto em água, 96,5% desta está contida nos mares e oceanos. Esta água é imprópria para consumo humano e apenas cerca de 2,5% da água está disponível como água fresca. Mesmo estes 2,5% não podem ser considerados na sua totalidade como água potável, visto que 68,7% está contida em glaciares e icebergs, e 30,1% está no subsolo, restando apenas 1,2% da água fresca que está disponível à superfície, e, mesmo assim, apenas 0,49% está contida nos rios e nascentes que são as principais fontes de água potável para consumo humano. Uma

muito pequena parte de toda a água existente no planeta é usada para consumo e é, portanto, extremamente necessário proteger e conservar o seu consumo.

No entanto, existem formas de tratar a água imprópria para consumo humano tornando-a assim potável. O problema mundial que leva à escassez de água não é a própria falta de água no planeta, mas sim o ritmo de consumo desta. De acordo com United Nations, (2023), a escassez de água mundial resulta, não só do elevado consumo humano, mas também da variabilidade hidrológica. A falta de água em certas zonas do globo não é devido à escassez de recursos, mas por vezes simplesmente devido a uma má gestão do consumo de água, havendo consumos excessivos e pouco eficazes em algumas zonas, como referido por Savenije, (2000).

Com o aumento da população, a tendência é haver um aumento do consumo de recursos naturais, nos quais a água está incluída. Em algumas regiões, o ritmo de consumo de água é maior do que a capacidade de oferta das fontes hídricas, levando à ocorrência de secas nestas regiões. A isto dá-se o nome de stress hídrico. A existência de água limpa e potável é extremamente importante em qualquer região do globo, pois esta não serve apenas para consumo, mas também para higiene pessoal, produção de comida e, em algumas zonas, produção de eletricidade. A perceção de que os recursos hídricos que existem no nosso planeta são limitados e que têm de ser protegidos, tanto quantitativamente como qualitativamente, é cada vez maior e cada vez mais o esforço para a proteção deste recurso tem vindo a aumentar, mas talvez não a um ritmo suficiente. É por isso necessário desenvolver novas técnicas para a produção de água limpa e potável, de forma a ajudar a combater a má gestão do consumo de água e a consequente escassez que poderá vir a ser o maior problema mundial num futuro próximo.

Uma das técnicas mais comuns para a produção de água limpa e fresca é a dessalinização da água marítima, seja ela do oceano ou do mar. Esta técnica é limitada a zonas costeiras e requer uma grande infraestrutura. Em regiões sem acesso ao mar ou oceano e com pouca precipitação, a produção de água é muito difícil. Existem técnicas que conseguem recolher água a partir do ar atmosférico, aproveitando a humidade existente no ar e a transformando-a em água limpa que pode ser tratada e usada para consumo humano. Esta técnica é considerada uma técnica sustentável, pois pode ser usada em qualquer lugar sem a necessidade de uma fonte de água e não requer nenhum tipo de infraestrutura, embora em alguns casos grandes instalações possam ser usadas para produção em grande escala.

O ar atmosférico contém água principalmente na forma de vapor, mas em algumas regiões e certas condições, também pode ocorrer a formação de nevoeiro ou orvalho. Estes dois são mais facilmente transformados em água limpa, pois já são ambos formas de água líquida e basta uma

técnica para os recolher. Contudo, nem todas as regiões reúnem as condições para sua formação. Por outro lado, o vapor de água precisa de passar pelo processo de condensação e só então pode ser recolhido. Para que ocorra o processo de condensação, o ar precisa de ser arrefecido até uma temperatura mais baixa que o seu ponto de orvalho, e por isso a principal técnica usada para este processo é a refrigeração por compressão de vapor.

Esta técnica é usada em todos os tipos de sistemas de refrigeração, desde frigoríficos e congeladores, até sistemas de ar-condicionado sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado - AVAC), portanto, muita pesquisa e estudos foram feitos ao longo dos anos sobre os princípios básicos desta técnica. Para o processo de produção de água, os principais sistemas usados são os desumidificadores. Nestes sistemas, o ar atmosférico entra no evaporador com a ajuda de um ventilador. Dentro dele, o ar é arrefecido abaixo do seu ponto de orvalho e ocorre condensação. O ar seco sai do sistema e o condensado é simplesmente recolhido. O rendimento destes sistemas depende muito, não apenas, da sua capacidade de refrigeração, mas também das condições psicométricas do ar de entrada, como a sua temperatura, a humidade relativa e o ponto de orvalho. Num estudo destes sistemas, Peeters *et al.*, (2020) observaram que os sistemas de desumidificação requerem muita energia para operar, especialmente em condições não favoráveis. Em condições de baixa humidade relativa, o desumidificador precisa de arrefecer uma grande quantidade de ar para produzir água, e para temperaturas de ponto de orvalho mais baixas, o desumidificador requer muito mais energia para arrefecer o ar de entrada. Devido a estes dois fatores, o desumidificador, ou qualquer outro sistema que produza água por meio de refrigeração por compressão de vapor, é mais eficaz para condições quentes e húmidas.

1.2. O problema em estudo e a sua relevância

A água é um recurso fundamental à vida e é, portanto, considerado um dos mais importantes recursos naturais do nosso planeta, tornando-o assim único no nosso sistema solar e até talvez na galáxia e universo. Este recurso é fundamental para a sobrevivência da espécie humana, sendo usado todos os dias, seja para consumo próprio, produção de comida, higiene pessoal, etc… fazendo com que este seja um recurso multifacetado.

É considerado água potável toda a água que pode ser usada para consumo humano. Esta água pode ser diretamente recolhida em fontes naturais como nascentes de rios, ou eventualmente tratada através de processos químicos, caso seja impropria para consumo.

Conforme referido por Guppy *et al.*, (2017), apesar da água cobrir 70% da superfície do nosso planeta, apenas 2,5% desta água está disponível como água fresca, portanto a ideia de que a

água existe em grandes quantidades no planeta, pode ser um pouco mal interpretada, visto que uma muito pequena parte está disponível para consumo humano.

De acordo com um estudo feito pela *World Health Organization* (WHO) e pelo *United Nations International Children's Emergency Fund* (UNICEF), referido em WHO/UNICEF, (2021), em 2020 2 biliões de pessoas não tinham acesso a água para consumo que seja tratada num ambiente controlado e seguro, das quais 367 milhões usavam água de fontes não controladas e 122 milhões usavam água de superfície. 8 em cada 10 pessoas que não tinham acesso a serviços básicos de água para consumo, viviam em zonas rurais, metade das quais vivia nos países menos desenvolvidos. De acordo com o mesmo estudo, 2,3 biliões de pessoas não tinham acesso a serviços básicos de higiene. Segundo Mekonnen & Hoekstra, (2016), cerca de 4 biliões de pessoas sofrem de seca, pelo menos durante um mês por ano, das quais metade vive em regiões como a China e a India. Estas duas regiões juntamente com as regiões de França e dos Estados Unidos, podem vir a sofrer de falta de água potável pelo ano de 2040, se o consumo de água continuar ao mesmo ritmo, conforme referido por Faeth *et al.*, (2014).

Numa perspetiva mais global, é afirmado por Ercin & Hoekstra, (2014) é referido que que pelo ano de 2050, mais de metade da população mundial pode vir a sofrer de secas extremas, devido ao aumento da população e do consequente aumento de recursos naturais, no qual se inclui a água.

No estudo de Mekonnen & Hoekstra, (2016) é referido que pelo menos 2/3 da população mundial sofre de secas extremas pelo menos durante um mês anualmente, metade das quais vive nas regiões da China e India, e pelo menos 500 milhões de pessoas sofrem de secas extremas durante o ano todo. Neste estudo os autores sugerem que para controlar a crise global de falta de água que afeta, não só a população humana, mas sim toda a biodiversidade, a chave é um melhor controlo do consumo de água e também um aumento da eficácia do uso deste recurso.

Com o aumento da população e o contínuo consumo de água a um ritmo preocupante, a estimativa para o aumento da procura por água fresca é de 55% e cerca de 25% de grandes cidades já têm algum grau de stress hídrico. Este índice pode ser definido quando a procura de água por habitante é maior que a oferta de água pelos corpos hídricos (rios, nascentes, etc.) da região. De acordo com Maddocks, Young & Reig, (2015), referido pelo Instituto de Recursos Mundiais, no ranking de países com maior stress hídrico, os 17 países com nível extremamente elevado de stress hídrico abrigam ¼ da população mundial, estando estes países situados em zonas do Médio Oriente e África, sendo a maioria considerados subdesenvolvidos ou em desenvolvimento. Mesmo alguns dos países desenvolvidos na Europa já se encontram neste ranking, como é o caso da

Bélgica, 23º no ranking, Espanha, 28º no ranking, e Portugal 41º no ranking, estando todos num nível de stress hídrico alto.

De acordo com o Relatório Mundial de Desenvolvimento da Água das Nações Unidas de 2023, disponível em United Nations, (2023), é projetado que a população que enfrenta escassez de água passe dos 933 milhões apontados em 2016, para entre 1,7 a 2,4 biliões em 2050, sendo a India o pais mais afetado devido, não só, ao aumento do consumo de água devido ao continuo aumento da população, mas também à redução das fontes de água fresca disponíveis. Este panorama não parece que vá melhorar, pois a população mundial está a crescer a um ritmo alarmante, tendo já atingido os 8 biliões de pessoas no final de 2022. Uma projeção feita pelas Nações Unidas, referido em United Nations Department of Economic & Social Affairs, (2022), aponta para que no ano de 2050 a população já tenha chegado aos 9 biliões.

Apesar do ritmo alarmante do crescimento da população, a escassez de água vem também de uma má gestão deste tão precioso recurso. Afirmado por Savenije, (2000), a escassez de água em algumas regiões é contrariada pela abundância da mesma noutras regiões. Dando o exemplo presente no artigo referido, na região da América Latina, a quantidade de água existente por pessoa é 12 vezes maior do que a quantidade de água existente por pessoa no Sul da Ásia.

As regiões do Sul da Ásia e Médio Oriente são das zonas mais preocupantes quando se fala em escassez de água. Como afirmado por Nair & Kumar, (2013), a zona do Médio Oriente é uma zona com pouca precipitação e com taxas de evaporação altas, levando a uma escassa quantidade de água superficial, e, portanto, a maior e principal fonte de água nesta região vem da dessalinização da água do mar. Estas técnicas não são as mais sustentáveis, pois é necessária uma grande infraestrutura e são técnicas que produzem vários resíduos, maioritariamente sal. Contudo, nem todos os países desta zona têm acesso a água marítima, como por exemplo, o Iraque. Reportado por Al-Aloosy, (2021), no Iraque a zona costeira é muito pequena comparada com o resto do país, sendo as principais fontes de água os rios Eufrates e Tigre, que fornecem 98% da água do país inteiro. Devido a vários problemas, como o aquecimento global, ou a construção de barragens em países por onde estes rios também passam, a capacidade de fornecimento destes rios tem diminuído e é necessário arranjar novas alternativas para a produção de água.

No Sul da Ásia, a preocupação vem da grande quantidade de população, sendo esta a região mais ocupada no mundo. De acordo com as últimas estimativas das Nações Unidas, apresentado no website do Worldometer, disponível em Worldometer, (2023), a população nesta zona é de aproximadamente 2 biliões de pessoas, 25% da população mundial em apenas 9 países. A Índia

representa quase 75% desta população. Na India, a grande fonte de água vem da precipitação que ocorre durante as monções de Verão, entre junho e setembro, e de Inverno, entre outubro e dezembro, como referido por Mishra *et al.*, (2021). Nas outras alturas do ano, esta precipitação não ocorre e por vezes existe uma maior escassez de água. Durante a altura das monções, a India está muito dependente da quantidade de água que vem das precipitações. Nos períodos de monções nos anos de 2016, 2017 e 2018, foi notado uma chuva fraca, referido por Mishra *et al.*, (2021). Este período de 3 anos de chuvas fracas foi 40% mais fraco do que a média esperada, resultando no maior período de seca dos últimos 150 anos, afetando muito o setor agrícola desta zona e o próprio consumo de água. Este período de seca levou a que algumas plantas termoelétricas na India que usam água para produção de eletricidade, sofressem de falhas energéticas levando à ocorrência de alguns apagões em várias zonas, como reportado por Luo, (2017). Durante 2016 a estimativa para energia perdida devido à falta de água foi de 14 TWh, energia suficiente para alimentar o país do Sri Lanka por um ano.

A escassez de água vai ser, a cada ano que passa, um problema maior. A água não é apenas usada para consumo ou higiene pessoal, mas também para outras atividades, como produção de comida e até geração de eletricidade. A escassez deste recurso pode levar então, não só a falta de água potável, mas também a uma queda na produção de comida e possivelmente falhas de energia. Encontrar soluções para a produção de água limpa é urgente de forma a combater a escassez de água que poderá a vir a ser um dos maiores problemas globais num futuro muito próximo

1.3. Revisão bibliográfica

Nesta subsecção será feita a revisão de trabalhos, estudos e dissertações feitas anteriormente que serviram de base para a perceção do estado da arte e para obter a maioria dos princípios teóricos que irão ser apresentados ao longo da dissertação.

Nesta subsecção serão apresentados maioritariamente trabalhos que abordam a temática de presença de água no planeta Terra e os diversos métodos para a sua obtenção, desde a simples captura de água fresca proveniente de nascentes e rios, a dessalinização de água salgada dos mares e oceanos e, o principal tema da dissertação, a obtenção de água através de ar atmosférico.

1.3.1. Técnicas de produção de água

Este subcapítulo aborda as diferentes técnicas que existem para a obtenção de água limpa que posteriormente pode ser tratada de forma a ser própria para consumo humano. São abordadas algumas das técnicas mais básicas para obter água potável, como a recolha direta de fontes,

nascentes e rios, bem como técnicas que requerem o tratamento de fontes de água não potável, como é o caso da dessalinização. São também abordadas as técnicas de maior foco da dissertação, que são as técnicas para obter água a partir da humidade que existe no ar presente na nossa atmosfera, referindo as diversas técnicas usadas atualmente, como a captura de nevoeiro e orvalho, e também a condensação do vapor de água que existe na atmosfera, havendo para tal duas técnicas principais que são a refrigeração por compressão de vapor ou o arrefecimento termoelétrico.

1.3.1.1. Produção de água a partir de fontes de água potável

Neste subcapítulo são abordadas as técnicas usadas para obtenção de água a partir de fontes potáveis. Este é o método mais comum, visto que a água potável pode ser imediatamente usada para consumo humano, sendo as principais fontes os rios e as nascentes, mas também as águas subterrâneas que por vezes podem servir de fonte de água potável para zonas onde as anteriores não existem, através de poços.

De acordo com o Relatório de Desenvolvimento Hídrico das Nações Unidas desenvolvido em 2003, disponível em United Nations, (2003), cerca de 97% da água do nosso planeta está contida em oceanos e mares, sendo os restantes 3% água doce. Destes 3%, 77% está contida em glaciares e icebergs e 23% em águas subterrâneas, que podem funcionar, em alguns casos como fontes de água potável. Os rios, lagos e nascentes representam apenas 1% da água doce do nosso planeta. Na totalidade, segundo o relatório referido, apenas 1,7% de toda a água, que corresponde a cerca de 24 milhões de km^3, representa a água pronta a consumir pelo ser humano.

De acordo com o Relatório de Desenvolvimento Hídrico das Nações Unidas desenvolvido em 2023, disponível em United Nations, (2023), o consumo de água tem aumentado 1% todos os anos nos últimos 40 anos, especialmente nos países mais pobres e nos países em desenvolvimento, sendo o aumento da população, o aumento sócio económico e a mudança nos padrões de consumo fatores que contribuíram para este aumento. Este aumento foi mais significativo na América do Norte e na Ásia Central. Apesar de ser difícil prever o aumento, em Burek et al. 2016, é referido que o aumento anual de 1% se deve manter, atingindo assim um total de 20% a 30% no ano de 2050.

Reportado por Ritchie & Roser, (2017), foi estimado que o volume global de água fresca disponível e renovável era de 37000 km^3 por ano em 2015, dependendo a disponibilidade da região e clima. Em 2017, de acordo com o estudo feito em United Nations, (2021), foram consumidos 3800 km^3 de água proveniente das fontes de água potável, ou seja, tantos dos rios e nascentes disponíveis à superfície, como das fontes de água subterrâneas. Com o aumento do consumo este valor irá

claramente aumentar, levando a que o consumo das águas subterrâneas, aumente entre 100 km^3 a 200 km^3 por ano.

Sendo as poucas fontes de água potável disponíveis à superfície as nascentes e os rios, e as águas subterrâneas, estas não serão suficientes para o futuro, levando a que seja necessário desenvolver diferentes técnicas de produção de água. Muitos países optam pela dessalinização, mas outras técnicas têm de ser utilizadas em certas regiões, pois nem todas as regiões têm acesso a zonas costeiras.

1.3.1.2. Dessalinização

Neste subcapítulo são abordadas as técnicas usadas para obtenção de água a partir de fontes não potáveis. Em certas zonas as fontes de água existente podem não ser potáveis, devido à inexistência de fontes potáveis, ou porque estas podem ter sido contaminadas. De certo modo, estas técnicas são formas de tornar a água impotável em água potável, pronta para consumo humano.

A dessalinização é o processo mais comum para o tratamento de água impotável, visto que este processo é usado para tornar a água dos oceanos e mares potável, água esta que ocupa quase 98% de toda a água no planeta. Segundo Harandi *et al.*, (2017), existem dois tipos principais de técnicas de dessalinização, sendo eles a dessalinização à base de processos térmicos e a dessalinização á base do uso de membranas.

Destes dois métodos, aquele que foi usado inicialmente, devido à sua simplicidade em relação ao outro, foi o método com base em aquecimento da água salgada, que ao evaporar deixa como resíduo o sal e, usando um processo para captar o vapor de água que resulta do aquecimento da água, obtém-se água relativamente limpa e livre de sal.

Este método é usado em regiões cuja água apresenta um elevado nível de sal e que o custo de energia é baixo, principalmente nas regiões do Médio Oriente e das Caraíbas, existindo algumas técnicas diferentes como destilação por compressão de vapor, destilação de efeito múltiplo (Multi-effect distillation, MED) e a destilação parcial em múltiplas etapas (multi-flash distillation, MSF), referido por Xu *et al.*, (2013).

Este são os métodos mais comuns usados pelo Homem, na produção de água potável a partir de água salgada, mas a própria Natureza tem um processo de dessalinização presente no ciclo de vida da água. A energia solar atua como fonte de calor na água dos oceanos e mares, provocando a sua evaporação. A água evaporada vai eventualmente condensar e criar chuva. Contudo, a água

presente na chuva não é limpa, apesar de ser livre de sal. Para este processo ser considerado uma forma de obter água potável, seria necessário que houvesse posteriormente mais um processo de tratamento da água da chuva, fazendo com que este processo não seja ótimo, disponível em Narayan *et al.*, (2010).

De acordo com o estudo de Pagaime, (2011), a destilação parcial em múltiplas etapas envolve a destilação da água salgada através de um processo de evaporação parcial dividido em múltiplas fases, utilizando permutadores de calor de contracorrente. Neste processo, a condensação ocorre quando o vapor é conduzido por tubos até à água contida na caldeira, onde esta é submetida ao aquecimento, através do calor do vapor.

A destilação de efeito múltiplo é feita por diferentes etapas. Inicialmente, a água é aquecida por vapor que circula através de um conjunto de tubos imersos na água salgada proveniente de uma fonte externa. A etapa seguinte atua como um permutador de calor de efeito duplo. O vapor produzido na primeira fase é utilizado para evaporar a água salgada na segunda fase, e, por sua vez, a água presente na segunda fase é utilizada para condensar o vapor proveniente da primeira fase. Da mesma forma, o vapor gerado na segunda fase é direcionado para a fase seguinte.

O método de dessalinização por compressão do vapor de água também utiliza calor, que resulta da compressão do vapor. A compressão do vapor de água possibilita o incremento da pressão e da temperatura. A aplicação do calor latente durante a fase de condensação possibilita a geração de vapor suplementar.

Apesar destes métodos serem os métodos principais usados nas zonas do Médio Oriente, como referido acima, os processos que usam membranas, como a osmose reversa, têm vindo a crescer desde os anos 60, referido por Subramani & Jacangelo, (2015).

Estes processos têm vindo a crescer como solução para os processos térmicos de dessalinização. Mencionados anteriormente, os processos térmicos têm um elevado custo, associado à energia necessária para que ocorra a evaporação de água, referido no estudo de Subramani *et al.*, (2011). Não só os custos são maiores, mas estes processos também têm uma elevada produção de gases de efeito estufa prejudiciais para o ambiente, associada aos elevados custos de energia, que têm por muita vez como fonte principal os combustíveis fósseis, referido pelos autores Raluy, Serra & Uche, (2005).

As técnicas principais que usam membranas são a osmose inversa e a eletrodiálise. A osmose inversa baseia-se no uso de uma membrana semipermeável que deixa passar a água, deixando para trás o sal, produzindo assim água dessalinizada. De forma a que este processo ocorra é

necessário que seja aplicada uma força na água contra a membrana, criando assim pressão suficiente para que a água consiga passar através da membrana, Stover (2007). De acordo com Nair & Kumar, (2013), a osmose inversa é o método mais comum de dessalinização da água salgada, correspondendo a 61%, seguido da destilação parcial em múltiplas etapas, que corresponde a 26% e da destilação de efeito múltiplo que corresponde a 8%.

A eletrodiálise é um processo que ajuda a remover iões á água, de forma a produzir água potável ou tratar águas residuais antes de serem despejadas para o ambiente, mencionado por Strathmann, (2010). Os sistemas de eletrodiálise são compostos por um conjunto de membranas seletivas que permitem apenas a passagem de iões específicos, seja positivamente carregado (catiões) ou negativamente carregados (aniões). Estas membranas são dispostas numa sequência alternada, começando com uma membrana de troca catiónica, seguida por uma membrana de troca aniónica, e assim sucessivamente. Entre as membranas de troca iónica, são posicionados um cátodo e um ânodo. Quando uma corrente elétrica é aplicada ao sistema, os iões são movidos em direção às membranas com cargas opostas. Os catiões são atraídos para a membrana de troca catiónica, que possui carga negativa, e são impedidos de passar para a próxima membrana de troca aniónica, que possui carga positiva. O mesmo ocorre com os aniões, que são direcionados para a membrana de troca aniónica carregada positivamente e rejeitados pela membrana de troca catiónica carregada negativamente. O processo de eletrodiálise é eficaz na remoção de iões indesejados da água, contribuindo para a purificação de água potável ou para a redução da carga iônica em águas residuais, o que pode minimizar o impacto ambiental.

Apesar dos processos de dessalinização através de membranas apresentarem algumas vantagens em relação aos processos térmicos, têm sido desenvolvidas técnicas que juntam ambos os processos, entre as quais, a destilação por membrana, a humidificação-desumidificação, a dessalinização por adsorção e a pervaporação, afirmado por Subramani & Jacangelo, (2015).

No processo de destilação por membrana com a ajuda de energia térmica, o vapor de água passa por poros numa membrana hidrofóbica, por meio da diferença de temperatura na membrana. Esta diferença resulta num diferencial na pressão do vapor, o que leva à transferência do vapor para uma superfície de condensação, tal como mencionado em Subramani & Jacangelo, (2015). O desempenho deste processo não depende da salinidade da água, como afirmado por Wang & Chung, (2015). Existem diferentes tipo de materiais para as membranas, como politetrafluoretileno, fluoreto de polivinilideno, polietileno e polipropileno, o que torna esta técnica uma boa alternativa à osmose inversa, visto que é uma técnica que requer menos energia.

O processo de humidificação-desumidificação baseia-se na capacidade do ar de conseguir carregar grandes quantidade de vapor de água a altas temperaturas, referido por Kabeel *et al.*, (2013). Apesar de ser um processo que requer uma elevada quantidade de energia, neste processo existe um ar quente que entra em contacto com a fonte de água a dessalinizar que causa a evaporação desta. O vapor de água mistura-se com o ar quente e é levado até uma zona de condensação onde é recolhida a água dessalinizada.

A técnica de dessalinização por adsorção que usa temperaturas residuais baixas ou o calor da energia solar como fonte de energia térmica e um gel de sílica muito poroso, mencionado em Ng *et al.*, (2013). Neste processo, a evaporação da água acontece num evaporador usando a fonte de energia térmica, seguida de um processo de adsorção/dessorção no gel de sílica no condensador. Isto produz água potável usando energia térmica de baixo custo, especialmente se for usado a energia solar.

Por último, no processo de pervaporação, a separação do sal e da água é feita quando esta entra em contacto com uma membrana. Esta membrana apresenta uma maior afinidade com um dos componentes, proporcionando uma difusão mais rápida através da membrana, e assim, consegue-se separar a mistura, atingindo praticamente a remoção a 100% do sal da água com um consumo energético muito baixo, referido pelos autores Kuznetsov, Toikka & Kuznetsov, (2007).

1.3.1.3. Produção de água através de ar atmosférico

Neste subcapítulo são abordadas as técnicas usadas para obtenção de água a partir de fontes não potáveis. Em certas zonas as fontes de água existente podem não ser potáveis, devido à inexistência de fontes potáveis, ou porque estas podem ter sido contaminadas. Nestes processos a água tem de ser posteriormente tratada através de processos químicos, de forma a torná-la própria para consumo humano.

Algumas das técnicas de produção de água referidas anteriormente requerem o uso de grandes infraestruturas e têm também a necessidade de que haja uma fonte de água presente, seja ele um rio ou o mar. Os processos usados nestas técnicas levam à produção de produtos residuais e desperdícios, o que é mais uma desvantagem para estas técnicas.

As técnicas de produção de água a partir de ar atmosférico são técnicas promissoras para o futuro, pois são técnicas que não requerem uma fonte de água existente, aproveitando a humidade que existe naturalmente na nossa atmosfera, não requerem grandes infraestruturas e o único produto produzido, para além da água, é ar.

A humidade presente no ar é considerada uma fonte renovável de água pois, mesmo que seja extraída para se produzir água, acaba por ser reposta pelo ciclo natural de água. Esta humidade pode existir na forma de nevoeiro ou de orvalho, sendo ambas formas de água líquida, bastando que exista então uma forma de recolha para se produzir água. A formação de orvalho e nevoeiro só acontece sob condições especificas e, portanto, nem todas as zonas do planeta têm a possibilidade de extrair água a partir destas fontes. Outra forma de humidade no ar é na forma de vapor de água, estando esta forma de água presente em, como o nome indica, forma de vapor. É, portanto, necessário que exista condensação deste vapor, para que depois seja possível recolher a água, como a refrigeração ativa ou o arrefecimento termoelétrico através do efeito de Peltier.

Existem diversas técnicas que existem para produção de ar atmosférico, mas, no entanto, não existe uma que seja melhor que as outras, pois cada uma depende das condições psicométricas do ar, como a humidade relativa, a temperatura e o ponto de orvalho. Apesar dos vários estudos e avanços efetuados nos últimos anos, nenhuma das técnicas atualmente disponíveis são consideradas alternativas eficientes a nível energético para a produção de água numa larga escala, como afirmado nos estudos feitos em Tu *et al.*, (2018) e por Salehi *et al.*, (2020).

Todas estas técnicas estão referenciadas neste subcapítulo, sendo também apresentados alguns estudos, artigos e dissertações sobre cada uma das temáticas.

1.3.1.4. Técnicas de condensação de ar

De acordo com McElroy, (2002), a concentração de vapor de água na atmosfera pode variar entre os 0.01%, em condições extremamente frias de -42°C, até 4.24% em condições de 30°C. Esta variação faz com que a humidade relativa do ar seja diferente em localizações diferentes e até em dias diferentes na mesma localização, variando esta entre os 0% e os 100%. Em zonas com muito pouca precipitação, a humidade relativa vai ser muito baixa, enquanto em zonas em que haja muita precipitação ou uma grande massa de água, como zonas costeiras, a humidade relativa do ar vai ser mais elevada.

A produção de água a partir de ar atmosférico é uma tecnologia promissora que tem visto um aumento e progresso na sua investigação e estudo nos últimos anos. Esta tecnologia faz uso da humidade presente no ar para produzir água, que pode vir a ser tratada e usada para consumo humano, através de processos químicos. Apesar deste processo extrair alguma da humidade do ar, esta vai eventualmente ser reposta pelo ciclo natural da água, tornado assim este processo, um processo ambientalmente sustentável. Este fator, juntamente com o facto de não ser preciso uma fonte de água existente, torna este processo muito promissor, sendo assim possível produzir

água em caso de contaminação de uma fonte existente, referido em Mendoza-Escamilla *et al.*, (2019), em emergências, referido em Runze *et al.*, (2020) e especialmente em regiões de pouca precipitação.

Como referido anteriormente, o vapor de água, tal como o nome indica, é água no estado gasoso, e é, portanto, necessário um processo em que o ar é arrefecido para uma temperatura inferior ao seu ponto de orvalho, dew point, para que ocorra condensação, passando assim ao estado líquido, podendo então ser recolhido, como mencionado por Raveesh, Goyal & Tyagi, (2021). Para tal existem duas técnicas principais, sendo elas a refrigeração por compressão de vapor e o arrefecimento termoelétrico, com base em células de Peltier. Estas técnicas produzem água com o custo de usarem energia para o arrefecimento do ar. Estas técnicas não são indicadas para temperaturas baixas, pois a energia necessária para arrefecer o ar será maior. Por outro lado, também não é uma técnica indicada para valores de humidade relativa baixos, pois neste caso será necessário arrefecer uma maior massa de ar para produzir água. O rendimento destes sistemas é avaliado na quantidade de água produzida num determinado intervalo de tempo, em função da energia consumida para tal, ou seja, a sua taxa de produção de água. As condições psicrométricas do ar, como a temperatura, a humidade relativa e o ponto de orvalho, são as principais características que afetam o desempenho desses sistemas, tornando-os altamente dependentes das condições ambientais em que operam, sendo a quantidade de ar que entra no sistema, também uma condição que afeta o seu desempenho. Como estes sistemas requerem muita energia para o arrefecimento do ar e consequente produção de água, foi sugerido no trabalho de Milani *et al.*, (2011), que estes sistemas fossem acompanhados de uma fonte de energia renovável, de forma a operarem de uma forma mais sustentável, como por exemplo, um painel fotovoltaico.

No estudo efetuado por Gido, Friedler & Broday, (2016a), foi desenvolvido um método para avaliar as condições de operação destes sistemas, introduzindo então o Índice de Colheita de Humidade, através do qual é possível prever se as condições atmosféricas numa dada região são favoráveis para a produção de água com o uso de sistemas de refrigeração. O Índice de Colheita de Humidade pode ser calculado a partir da temperatura de bolbo seco do ar e da temperatura do condensado produzido pelo sistema. Além da introdução do Índice de Colheita de Humidade, foi também desenvolvido um modelo matemático que permitia fazer o estudo económico para as condições em que o sistema operava, sendo assim possível determinar qual a melhor altura para usar o sistema de refrigeração, e qual a melhor altura para optar por outras formas de produção de água.

Os sistemas de refrigeração por compressão de vapor para a produção de água, como os desumidificadores, têm o mesmo princípio de funcionamento que os outros sistemas de refrigeração, como os frigoríficos ou congeladores e também que os sistemas de ar-condicionado, portanto já existe muita pesquisa feita sobre o funcionamento dos princípios básicos de funcionamento. De forma a produzirem água, estes sistemas absorvem o ar através da ajuda de uma ventoinha. Quando dentro do sistema, o ar é arrefecido até uma temperatura igual ou inferior ao seu ponto de orvalho, ocorrendo assim condensação. Após condensar, o ar desta vez mais seco, sai de volta para a atmosfera através do sistema de ventilação, enquanto que o condensado é recolhido, geralmente num depósito incorporado no próprio sistema. A produção de água nestes sistemas depende da sua capacidade de arrefecimento do ar, da quantidade de ar que entra no sistema e, como também mencionado antes, das condições psicrométricas do ar. O lado negativo destes sistemas é a necessidade de uma grande quantidade de energia para operar e uma faixa muito baixa de condições psicrométricas para operação ideal, como observado por Peeters *et al.*, (2020).

O seu desempenho pode ser melhorado através de um pré-arrefecimento do ar antes de entrar no evaporador, reduzindo assim a quantidade de energia necessária para o arrefecimento, conforme testado no estudo de Radermacher & Fawzi, (2004), ou usando uma unidade de condicionamento de forma a melhorar as condições psicométricas do ar à entrada do evaporador, conforme testado no estudo de Patel *et al.*, (2020). Neste último foi estudado um sistema de desumidificação, usando uma unidade de ar condicionado, que permitiu testar o sistema em várias condições diferentes, baseando estas condições nas condições anuais da região da India. O sistema usado no estudo está representado na figura 1. Durante os testes, o sistema foi testado para condições de temperatura altas, médias e frias e condições de humidade relativa altas, médias e baixas também, concluindo-se no final que o sistema produziu entre 0,28 L/h com um consumo de 4,71 kWh/L, para condições de 40°C e 27% HR, até 1,78 L/h com um consumo de 0,75 kWh/l, para condições de 35°C e 95% HR. Concluíram neste estudo que o sistema não só produzia mais, como também gastava menos, para condições húmidas e quentes.

Figura 1 - Instalação experimental usada no estudo referido em Patel et al., (2020).

No estudo de Bagheri, (2018) foi testado o rendimento de três desumidificadores comerciais de pequena escala, que poderiam ser usados como uma fonte extra de água para residências. Os desumidificadores foram testados para várias condições usando uma câmara climática, de forma a manter as condições estáveis durante os ensaios. Para condições de 30°C e 62% HR, os desumidificadores produziram, em média 0,65 L/h de condensado com um consumo de 1.02 kWh/L. Para condições de 6°C e 80% HR, produziam apenas, em média, 0,05 L/h com um consumo de 6,23 kWh/L, chegando à mesma conclusão de que para condições de temperatura altas e humidades altas, os desumidificadores não só produziam mais condensado, como também gastavam menos.

Num estudo com objetivos semelhantes ao referido anteriormente, efetuado por Faraz Ahmad *et al.*, (2022) foi testado um desumidificador também comercialmente disponível, o Drinkable Air C-8, apresentado na figura 2. O sistema foi testado durante um ano inteiro na região de Sharjah, nos Emirados Árabes Unidos. Este sistema funcionou melhor durante o mês de fevereiro, para o qual as condições médias foram de 22°C e 60% HR. Em média, ao longo do de todo o ano, este sistema produziu 0,36 L/h, com um consumo de 2,25 kWh/l, resultando num custo de produção de água de 0,18$/L.

Figura 2 - Desumidificador Drinkable Air C-8, retirado de Faraz Ahmad et al., (2022).

A maioria dos sistemas de desumidificação para produção de água ainda não são economicamente viáveis pois têm um grande consumo de energia para a quantidade de água produzida. Uma maneira de contornar este problema é o uso de energia renováveis como fonte de energia para os sistemas. No estudo apresentado por Ferwati, (2019) foi desenvolvido um protótipo independente capaz de produzir água a partir do ar atmosférico. O protótipo projetado era composto por 2 desumidificadores, painéis solares para fornecer a energia necessária para o seu funcionamento, uma bateria para armazenar energia para operações noturnas e uma unidade de armazenamento de água, tudo compactado num cubo de 1mx1mx1m. Este protótipo funcionava com energia solar e poderia ser instalado no telhado de uma casa ou numa área externa com exposição ao sol, como um jardim, de forma a funcionar como uma fonte adicional de água para o domicílio. É um protótipo promissor que pode estar disponível comercialmente, mas nenhum estudo prático foi para já feito com ele.

A portabilidade e compactibilidade destes sistemas tornam-nos uma ferramenta muito útil para a produção de água em certas emergências, como resgates marítimos. No estudo apresentado por Runze *et al.*, (2020) foi desenvolvido e testado um sistema portátil de desumidificação, com um painel fotovoltaico incorporado, projetado para produzir água em caso de resgate marítimo. O sistema foi projetado para funcionar especialmente em alto mar, mas pode funcionar em qualquer lugar com ar húmido. O ar marítimo tem um conteúdo de água mais alto, o que é realmente bom para a produção de água. O sistema funcionou com o sistema de compressão de vapor para produzir água, mas também tinha um modelo de purificação para que a água produzida fosse segura para consumo humano e um módulo de flutuabilidade, para que pudesse flutuar na água. Durante os testes, as condições foram definidas como 27 °C e 92% de humidade

relativa, com o volume de ar de entrada fixo a 600 m3/h. O sistema produziu 0,46 L/h de água limpa e segura para consumo humano.

Os sistemas AVAC também seguem o princípio da refrigeração por compressão de vapor, mas nestes sistemas, a produção de condensado é muitas vezes descartada, já que não é o objetivo principal desses sistemas. No entanto, este condensado pode ser recolhido para tratamento posterior, tornando-o assim adequado para consumo humano. Embora o objetivo principal não seja a produção de água, estes sistemas podem ser otimizados para tal, reduzindo o risco de contaminação do condensado no sistema e incluindo um sistema de armazenamento. Em Magrini *et al.*, (2015) foram conduzidos vários testes numa unidade de ar condicionado instalada no telhado de um hotel em Abu Dhabi. Estes testes compararam a produção de água de um sistema de ar condicionada normal e um melhorado, que tinha como objetivo produzir e armazenar mais condensado que o sistema normal. Para as condições de 35°C de temperatura e 60% de humidade relativa, o sistema normal produziu 77400L de condensado por dia, com um custo de 38000 kWh. Quanto ao sistema melhorado, produziu 84600L por dia, com um custo de 42000 kWh. Para estes valores, o sistema normal gastava 0,491 kWh por litro de condensado produzido, enquanto que o sistema melhorado gastava 0,496 kWh por litro de condensado produzido. Apesar de produzir mais condensado, o sistema melhorado também consumia mais energia e, portanto, uma análise econômica foi feita no mesmo estudo, concluindo-se que o sistema melhorado era mais viável, visto que, apesar de gastar mais energia para produzir um litro de condensado, a poupança de água que vinha do uso do sistema melhorado, era maior que a diferença no custo de energia.

Num estudo conduzido por Cattani, Magrini & Cattani, (2018), foi realizado um estudo muito semelhante ao mencionado anteriormente, de 6 a 27 de novembro de 2015, num hotel no México. As condições médias foram de 27,3 °C para a temperatura do ar, com uma humidade relativa de 86%. Os ventiladores do sistema testado foram dimensionados para que a entrada média de ar fosse de cerca de 8000 m^3/h. Ao mesmo tempo que o estude real era realizado, também foi realizada uma simulação em computador para comparar resultados reais e simulados. Os resultados reais comparados com os simulados eram muito semelhantes, com um erro de 2% a 5% para a produção de água. Durante os dias em que foi testado, o sistema produziu um máximo de 80 L/h, com um consumo de 0,35 kWh/L, enquanto para o mínimo era de cerca de 40 L/h com um consumo de 0,8 kWh/L. O teste real foi só realizado durante o mês de novembro, mas a simulação foi estendida aos restantes meses do ano, com a média sendo de 1600L/dia com um consumo de 800 kWh/dia. De forma a testar a viabilidade económica do sistema, foi feito um estudo económico, tendo em conta, não só o custo energético, mas também a quantidade de água que poderia ser economizada com o uso deste sistema, obtendo uma média diária, para o

mês de novembro em que o estudo foi realizado, de 7700 USD poupados. Para o ano inteiro, incluindo o custo de manutenção do sistema, era esperado uma poupança de mais de 80000 dólares.

O arrefecimento termoelétrico é outra técnica de condensação de ar, que pode ser usada para a produção de água, sendo baseado no efeito de Peltier. O efeito Peltier converte energia elétrica num gradiente de temperatura, usando duas superfícies diferentes, compostas por semicondutores, uma carregada positivamente e outra negativamente. Esta diferença nos semicondutores das superfícies permite a transferência de calor de um lado para o outro, quando os semicondutores são alimentados por corrente contínua, criando uma grande diferença de temperatura entre as duas superfícies. Alguns dos sistemas utilizados com base neste efeito permitem uma diferença de temperatura de até 70°C, com a superfície quente tendo uma temperatura de 50°C e a superfície fria tendo uma temperatura de -20°C. Quando estes sistemas são usados para arrefecimento de ar e produção de água, o ar entra no sistema, os módulos Peltier absorvem parte do calor do ar e, assim, arrefecem-no. Quando o ar arrefece o suficiente para atingir seu ponto de orvalho, o vapor de água começa a condensar e a água é posteriormente recolhida, como reportado por Joshi *et al.*, (2017). Neste estudo, foi testado um sistema termoelétrico, ilustrado na figura 3, lado a lado com um esquema da instalação, para produzir água. Neste estudo, foi possível alcançar uma produção máxima de água de 240mL num período de 10 horas.

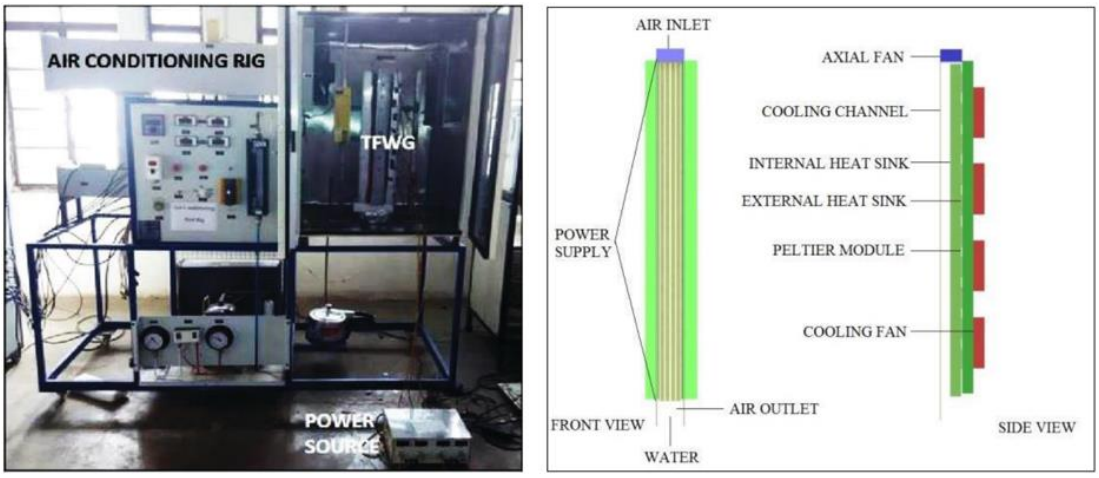

Figura 3 - Instalação e esquema do sistema termoelétrico referido em Joshi et al., (2017)

Se compararmos estes sistemas aos sistemas de refrigeração por compressão de vapor mencionados anteriormente, o seu desempenho é mais fraco, já que estes sistemas têm uma

capacidade de arrefecimento menor, mas têm a vantagem de serem mais compactos, portáteis, silenciosos e, em geral, mais sustentáveis, sem a necessidade do uso de fluidos refrigerantes. À medida que melhores materiais termoelétricos e projetos de sistemas são desenvolvidos, o desempenho dos sistemas termoelétricos para produção de água pode aumentar, especialmente se forem combinados com uma fonte sustentável de energia, como um painel fotovoltaico, como observado por Twaha *et al.*, (2016).

No estudo de Milani *et al.*, (2011) foi notado que 95% dos custos desses sistemas provinham do consumo de energia, enquanto apenas 5% vinham do custo de instalação inicial, após um estudo para testar a viabilidade de sistemas de refrigeração termoelétrica. Devido ao alto custo de consumo de energia, foi proposto que estes sistemas funcionassem com uma fonte de energia sustentável para combater, não apenas o alto custo de consumo de energia, mas também o baixo rendimento térmico.

Em He *et al.*, (2019), foi conduzido um estudo comparando um novo projeto com um design melhorado para um sistema de refrigeração termoelétrica com o design normal. A principal diferença no novo modelo foi que, em vez do ar que saia do sistema ser descartado, este ar era usado para arrefecer o lado quente do sistema, levando a uma melhor gestão térmica. Além disso, a superfície fria também foi revestida com uma substância hidrofóbica, o dióxido de silício, para ajudar na condensação neste lado. Ambos os modelos são mostrados na figura 4, sendo o modelo (a) o sistema convencional e o modelo (b) o sistema melhorado. Após o estudo e a comparação de ambos os sistemas, foi concluído que o novo sistema era capaz de produzir 67% mais água do que o sistema convencional.

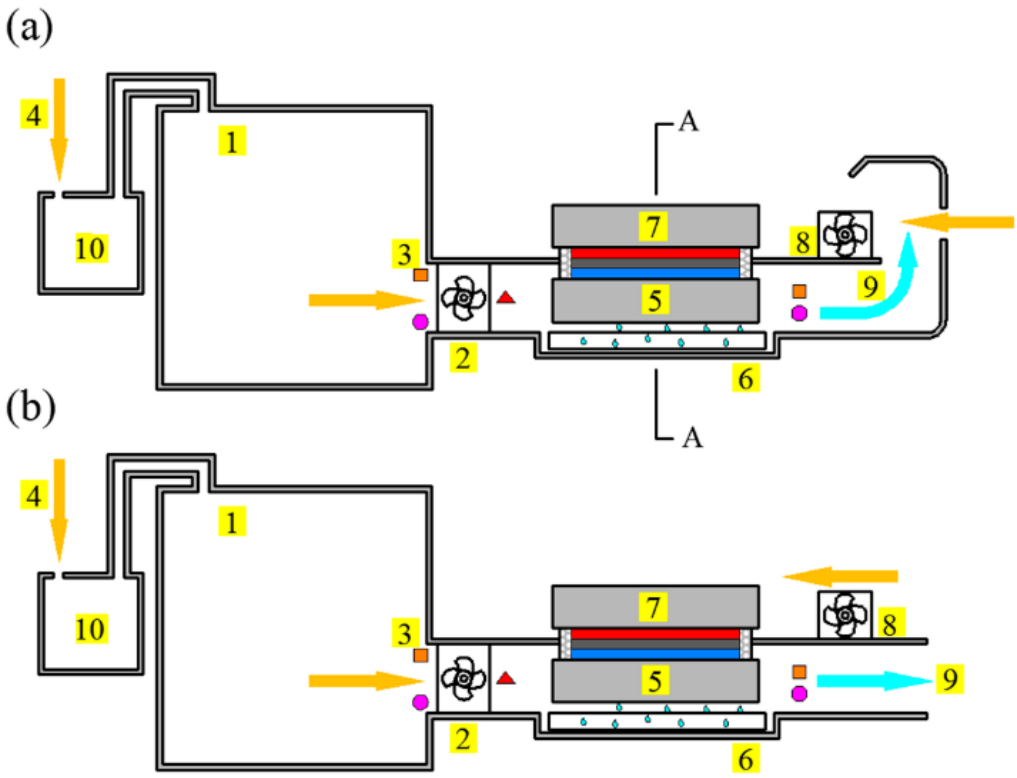

Figura 4 - Modelos usado no estudo referido em He et al., (2019).

Nos trabalhos de Shourideh *et al.*, (2018) e de Liu *et al.*, (2017) foi conduzido um estudo para testar a influência das condições psicrométricas do ar na produção de água num sistema de refrigeração termoelétrico. Ambos os estudos chegaram à mesma conclusão, de que com um aumento na temperatura e humidade relativa, a produção de água também aumentou. No entanto, ao contrário do que acontece em sistemas de refrigeração por compressão de vapor, com um aumento do volume de ar na entrada, estes sistemas produziram menos água.

Nos estudos dos autores Kadhim, Abbas & Kadhim, (2020) foi desenvolvido um sistema de refrigeração termoelétrico alimentado por um painel fotovoltaico, seguindo o esquema da figura 5, conforme sugerido no trabalho de Milani *et al.*, (2011). Durante o estudo, todas as condições de entrada de ar foram controladas e o melhor desempenho foi obtido para uma velocidade do ar de 1m/s, com uma humidade relativa entre 65% e 75%, e uma temperatura entre 24 °C e 31 °C, com uma produção de 20 mL/h.

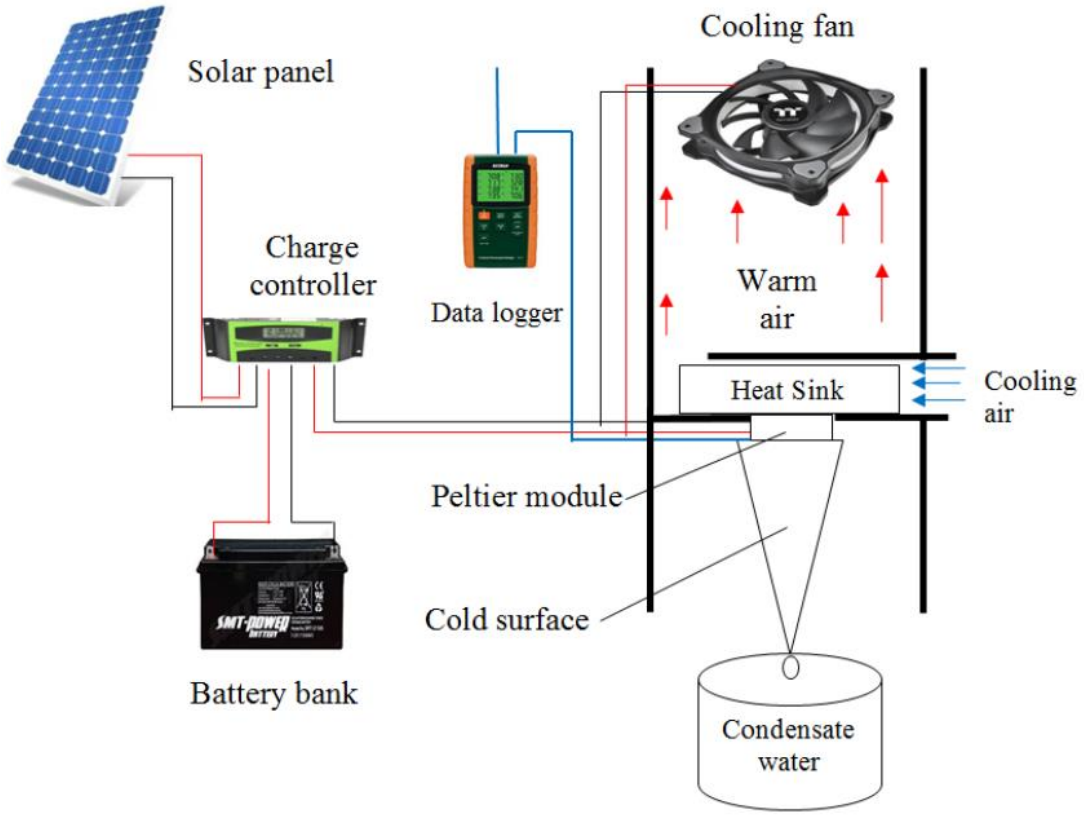

Figura 5 - Esquema da instalação usada em Kadhim, Abbas & Kadhim, (2020).

Em Eslami, Tajeddini & Etaati, (2018) foi feito um estudo para testar a melhor maneira de otimizar o desempenho energético destes sistemas controlando as condições psicrométricas do ar de entrada. Como concluído e também mencionado em estudos anteriores, este estudo também concluiu que, para esses sistemas, a velocidade e o volume de ar devem ser reduzidos, especialmente para temperaturas mais altas. Os sistemas utilizados neste estudo foram capazes de produzir 26mL de água, sob as condições de 75% de humidade relativa e 45°C, com um consumo de 20W, com a velocidade ideal para o ar de entrada.

1.3.1.5. Técnicas de colheita de nevoeiro e orvalho

A humidade presente no ar atmosférico pode ser também extraída através de meios passivos, através de dois métodos: recolha de orvalho ou recolha de nevoeiro.

O nevoeiro, por outro lado, é constituído por minúsculas partículas de água que por vezes se formam devido à condensação na atmosfera. Mencionado pelos autores Jarimi, Powell & Riffat, (2020), a produção de água através da recolha de nevoeiro, para a qual são usadas malhas que

permitem a captura das partículas minúsculas de água, e o seu o crescimento por coalescência e por fim a recolha através da gravidade.

O orvalho, por outro lado, é formado através da condensação do vapor de água presente na atmosfera numa superfície. Para que isto aconteça, é necessário que a superfície esteja à temperatura do ponto de orvalho (ou inferior), para que se possa dar a condensação do vapor de água. Isto é alcançado do arrefecimento passivo radiante da superfície, havendo uma dissipação de calor da superfície para a atmosfera. No trabalho de (Dong *et al.*, 2020) são mencionadas as várias aplicações do arrefecimento passivo radiante, incluindo o seu uso para a produção de água através de orvalho.

Estas técnicas não requerem o uso de uma fonte de energia exterior e o seu rendimento pode ser avaliado em termos de quantidade de água produzida em função da área usada para a sua produção, num determinado intervalo de tempo.

A produção de água através do nevoeiro é um processo simples, barato e sustentável. Baseia-se na captura do nevoeiro, que consiste em minúsculas gotas de água que se podem formar na atmosfera, quando este entra em contacto com uma espécie de rede que é capaz de capturar estas gotas. Apesar da sua simplicidade, esta técnica não pode ser usada em qualquer lugar, pois para a formação de nevoeiro são necessárias condições especiais. Em locais onde a formação de nevoeiro é comum, esta técnica já está a ser implementada. Afirmado por Fessehaye *et al.*, (2014), em algumas regiões pode-se produzir até 12L/m^2 num período de 24 horas. Neste estudo foram feitos testes em várias cidades nas quais ocorria o fenómeno de nevoeiro, sendo produzido na Serra da Malagueta, Cabo Verde, um total de 12L/m2 por dia, havendo formação de nevoeiro nos 365 dias. Por outro lado, na região de Falda Verde no Chile, apesar de também ter havido nevoeiro nos 365 dias do ano, apenas se conseguia produzir 1,5 L/m2 por dia. A quantidade de água colhida com estes processos é dependente de várias condições, como a temperatura, a quantidade de água no nevoeiro, o vento, o local e até as propriedades do material usado para a colheita, sendo que este último é um dos principais focos para a pesquisa sobre esta técnica de produção de água.

Os sistemas normalmente mais usados para a colheita de nevoeiro são feitas de raschel, com as malhas a terem tamanhos entre 1m2 e 40m2. Este tipo de tecido não é muito resistente e não aguenta se a velocidade do vento for muito alta, para além do facto de que não é uma superfície com muita aderência, pelo que não é ideal para a colheita da água. No estudo de Park *et al.*, (2013) é demonstrado que uma otimização no uso da malha de raschel poderia levar ao aumento da colheita de água. No seu estudo, melhoraram a rapidez da colheita das gotas de água, usando

um revestimento hidrofóbico na superfície da malha. Para além disso reduziram também os espaços vazios existentes na malha convencional, de forma a ser possível aumentara quantidade de nevoeiro que batia na superfície da malha. Conforme apresentado em Shi *et al.*, (2018) foi desenvolvido uma nova geometria para a malha, baseada no instrumento musical harpa. Esta nova malha era composta por fios muito finos de metal, todos na vertical. Nesta nova malha, não havia qualquer obstrução na colheita das gotas e não havia perda de gotas minúsculas nos espaços vazios, dois problemas que poderiam acontecer na malha convencional, resultando assim numa eficácia 3 vezes maior que com o uso da malha convencional.

Muitas das inspirações para a criação de novas geometrias para as malhas são baseadas biologicamente, especialmente baseadas em espécies que se adaptaram em regiões áridas e quentes. Um exemplo desta inovação está presente no trabalho de Park *et al.*, (2019) e de Wen *et al.*, (2019) que basearam a sua inspiração no escaravelho. Outra inspiração que serviu de base também e que já foi testada foi a do cato. Nos trabalhos de Ju *et al.*, (2014) e Cao *et al.*, (2014), a construção de novas malhas com base nos picos dos catos foi contruída, facilitando assim a colheita das gotas de água que foram o nevoeiro.

Outro ponto de investigação é a permeabilidade da superfície da malha. No estudo de Knapczyk-Korczak *et al.*, (2021) foi desenvolvido um processo no qual depositavam nano fibras PA6 hidrofílicas na malha de raschel. Este processo fez com que a superfície de captura da malha aumentasse, juntamente com uma maior rapidez na colheita das gotas de água, resultando assim num aumento da produção de água em 300%. No trabalho de Rajaram *et al.*, (2016) foi implementado, não só uma alteração na geometria da malha, mas também na sua permeabilidade. Neste estudo, foi reduzido o tamanho dos espaços vazios, semelhantemente ao que aconteceu nos estudos de Park *et al.*, (2013), referidos anteriormente, e também foi adicionado um revestimento hidrofóbico ao material da malha, havendo assim uma possibilidade de produzir mais 50% de água.

No estudo de Damak & Varanasi, (2018) foi introduzido um conceito novo e interessante que envolvia usar uma carga elétrica nas gotas de água, de forma a contrariar a força aerodinâmica. Esta força foi um dos fatores que afetava por vezes a eficácia dos coletores de nevoeiro, pois esta força fazia muita vez com que as gotas de água se desviassem da malha. Através da injeção da carga elétrica nas gotas e do uso de um campo magnético de forma a controlar a sua trajetória, era possível negar a força aerodinâmica. O estudo de feito em Cruzat & Jerez-Hanckes, (2018) foi semelhante, no qual foi usado um campo electroestático com o mesmo conceito do estudo de Damak & Varanasi, (2018), que resultou num aumento da colheita de água em 60%.

A formação de orvalho depende, não só das condições psicométricas do ar, como a temperatura e a humidade relativa, mas também de outros fatores como as propriedades do material onde se vai depositar. A capacidade de arrefecimento para os condensadores usados para este processo é limitada, resultando numa quantidade de água produzida relativamente baixa, quando comparamos este valor com os valores obtidos para os processos de refrigeração ativa, como mencionado em Khalil *et al.*, (2016). A produção de água nos condensadores, depende também da sua estrutura. Em Beysens *et al.*, (2013) foi feito um estudo, testando várias geometrias possíveis para o condensador. No seu estudo concluíram que o uso de uma estrutura oca ajudava na produção de uma maior quantidade de água, visto que nesta estrutura havia um melhor arrefecimento e menor interação do vento, quando comparado com a estrutura plana. No trabalho de Royon, (2016) foi feito um estudo no qual implementaram várias fendas minúsculas, de forma a aumentar a produção de água. Estas fendas ajudavam na coalescência das gotas, resultando numa maior produção de água do que em superfícies totalmente lisas.

A produção de água nestes processos enfrenta um grande desafio que é a operação durante o dia, pois as temperaturas são mais elevadas, sendo então necessária uma maior quantidade de energia para o arrefecimento. Nos estudos feitos por Raman *et al.*, (2014), foi demonstrado pela primeira vez como poderia haver arrefecimento radiante durante o dia, através do uso de um refletor de fotões. Este refletor foi contruído em camadas e feito de dióxido de háfnio (HfO_2) e dióxido de silício (SiO_2) que permitia que houvesse uma redução de temperatura rondando os 5°C. Em (Chen *et al.*, 2016), foi desenvolvido um sistema mais complexo, mas que permitia reduzir a temperatura até 42°C em 24 horas. Isto foi alcançado usando um sistema de camadas constituído por nitreto de silício (Si_3N_4), silício (Si) e alumínio (Al), revestido em volta por uma camara de vácuo de forma a reduzir as perdas térmicas e proteger o sistema da radiação solar. Na figura 6, encontra-se uma representação esquemática da instalação usada, com o uso de também outras fontes de sombra. Outros estudos foram feitos, como, por exemplo, os estudos feitos por Zhou *et al.*, (2021), onde foi usado um método semelhante ao usado no estudo de Chen, mas desta vez as camadas eram revestidas por dimetil polissiloxano (PDMS), prata (Ag) e alumínio (Al), resultando assim num aumento da produção de água pelo dobro.

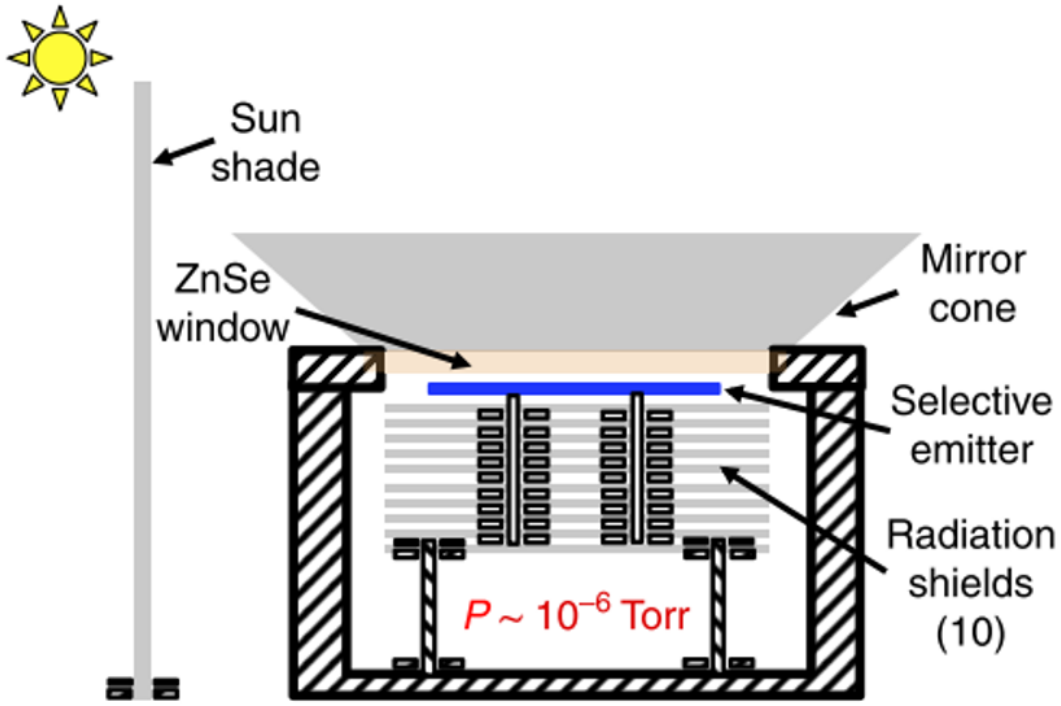

Figura 6 - Esquema da instalação usada em Chen et al, (2016).

A formação de orvalho ocorre maioritariamente durante a noite e pode, em certas regiões mais húmidas, ser uma das principais fontes para essa região. No estado de Gujarate, na India, existe uma instalação para a colheita de orvalho e produção de água, capaz de produzir entre os 1500L a 3200L, de acordo com as simulações feitas no trabalho de Sharan *et al.*, (2017).

1.4. Objetivos e contribuição da dissertação

A escassez de água a nível mundial é um dos maiores problemas da atualidade e novas formas mais sustentáveis para a produção de água limpa têm de ser encontradas e aperfeiçoadas. Se este problema não for resolvido, a vida neste planeta como a conhecemos pode mudar, pois esta escassez afeta toda a biodiversidade.

Esta dissertação foca-se no uso de técnicas de compressão de vapor para a produção de água através do ar atmosférico, técnica esta que pode ser aperfeiçoada e usada em regiões em que a escassez de água é grande, regiões estas onde é necessário procurar novas fontes de água limpa.

Estas técnicas apresentam uma fonte sustentável de água limpa que pode ser tratada para consumo humano. Na presente dissertação, o objetivo é testar um desumidificador comercial,

cujo principal objetivo seria a produção de água numa pequena escala, e testar a possibilidade de tornar este sistema energeticamente independente, juntado a este desumidificador, um sistema fotovoltaico, como fonte de energia. Para tal o desumidificador foi testado em diferentes condições de humidade relativa e de temperatura, de forma a ser possível perceber qual a quantidade de água que consegue produzir para diversas condições e localizações e qual a quantidade de energia necessária para o fazer, de forma a ser possível projetar o sistema fotovoltaico, dependendo das necessidades energéticas do desumidificador.

1.5. Visão geral e organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos e seus subcapítulos, sendo o capítulo 1 o capítulo de introdução onde é abordado o tema principal da dissertação.

No capítulo 2 é feita uma abordagem teórica sobre vários temas que coincidem com o tema da tese, como a produção de água a partir de diversas fontes, sejam elas de água potável, como rios ou nascentes, ou de água não potável, como mares, e também a produção de água através de ar atmosférico, foco principal desta dissertação. É também feito uma abordagem teórica ao tema de psicrometria, onde serão abordadas algumas noções mais básicas sobre as condições psicométricas do ar e também o processo de arrefecimento e condensação deste e de refrigeração por compressão de vapor, que é no fundo a técnica principal para a produção de água desta dissertação, abordando, não só alguns temas base, mas também os diversos ciclos de refrigeração e também os diversos sistemas de desumidificação e condensação existentes. Por último neste capítulo, será feita uma abordagem à modulação fotovoltaica, referenciando alguns conceitos base sobre o efeito fotovoltaico e dando enfase à modulação fotovoltaica de sistemas.

No capítulo 3 é apresentado todo o estudo experimental efetuado no desumidificador, referenciando a preparação da instalação experimental e equipamentos usados para o estudo, e o método de recolha de dados. Os ensaios efetuados e os seus resultados, bem como uma comparação entres todos os ensaios efetuados e as conclusões, são apresentados também a discussão destes resultados.

No capítulo 4, são apresentados os resultados dos ensaios e é feita uma análise destes, sendo feitas comparações entre eles, apresentado algumas notas conclusivas com base em gráficos e tabelas. É também feito o estudo energético do desumidificador, apresentando uma comparação do desempenho do desumidificador em localizações diferentes, como Lisboa, Pretoria e Riyadh.

No capítulo 5, último desta dissertação, é apresentada uma nota conclusiva sobre o estudo feito e a dissertação no geral, tal como possíveis estudos futuros dentro da mesma área e tema.

2. Fundamentos Teóricos

Neste capítulo serão abordados os diversos conceitos teóricos que servem de base para a presente dissertação.

Primeiramente, será abordada a temática da psicrometria, abordando as noções mais básicas de psicrometria e mencionando também os conceitos teóricos por detrás da condensação, processo fundamental para a obtenção de água a partir de ar atmosférico.

De seguida será abordado a temática de refrigeração por compressão de vapor, abordando também as principais noções básicas e mencionando os ciclos de refrigeração, fundamentais no processo usado para a obtenção de água nos testes efetuados no desumidificador.

Por último, é abordado a temática da energia fotovoltaica, que, sendo uma fonte de energia renovável, servirá de possível solução para resolver o problema do consumo elevado de energia dos desumidificadores.

2.1. Psicrometria

"A psicrometria é o estudo das transferências de massa e de energia associadas a processos envolvendo o ar húmido em condições ambientais. Em engenharia a psicrometria aplica-se a problemas de condicionamento de ar, com grande relevância para o conforto térmico em habitações e em ambiente fabril, e no armazenamento de produtos perecíveis ou outros que requeiram condições ambientais especiais.", retirado de Oliveira, (2012).

Neste subcapítulo será abordado a temática da psicrometria, e, associado ao tema geral da tese, será também abordado a temática da condensação de vapor.

2.1.1. Noções Básicas

O ar presente na atmosfera é constituído na sua maioria por azoto, cerca de 78% e oxigénio, cerca de 21%. Presente nos restantes 1%, encontram-se outros gases, como o dióxido de carbono e o vapor de água. A quantidade de vapor de água contida na atmosfera depende de várias condições, podendo existir uma quantidade elevada de vapor de água, por exemplo em regiões mais costeiras devido à evaporação da água dos mares e oceanos, ou uma

quantidade mais baixa, como em regiões mais desertas devido á falta de presença de grandes fontes de água.

De seguida serão apresentadas algumas noções base sobre a temática da psicrometria, como o gráfico psicrométrico e conceitos importantes para a compreensão do processo de condensação de vapor de água que acontece no processo de refrigeração por compressão, como 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.

2.1.1.1. Gráfico Psicrométrico

O gráfico psicrométrico permite, a partir das duas propriedades mais importantes do ar atmosférico, que são a temperatura de bolbo seco, mais conhecida por temperatura ambiente, e a humidade absoluta, calcular as restantes propriedades, como a humidade relativa, e a temperatura de ponto de orvalho. Segundo Cengel & Boles, (2015), este gráfico foi originalmente criado por um engenheiro alemão no século XX, e está representado na figura 7.

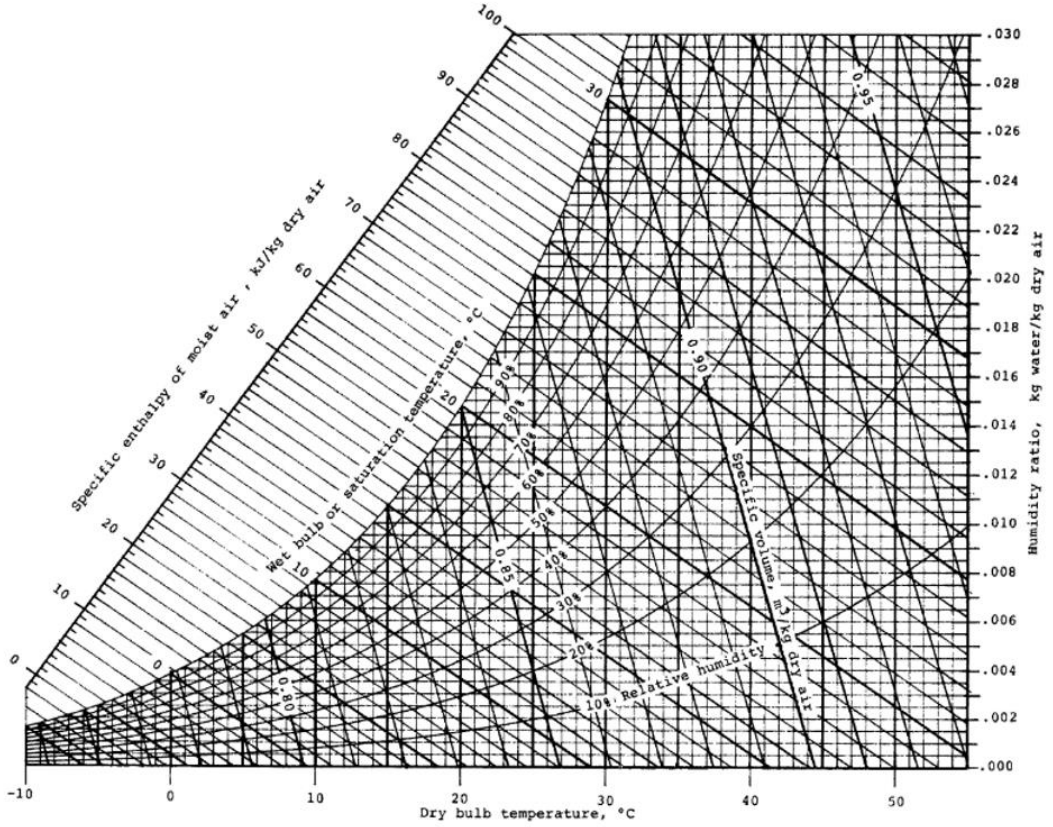

Figura 7 – Gráficos psicrométrico, retirado de Oliveira, (2012).

De forma a interpretar este gráfico, precisamos de inicialmente conhecer tanto a temperatura de bolbo seco do ar, como a sua humidade absoluta. O gráfico apresenta dois eixos, como qualquer outro gráfico, e um conjunto de curvas e linhas características. O eixo horizontal representa a temperatura de bolbo seco, em graus Celsius (°C), e o eixo vertical representa a humidade absoluta, em quilograma de água por quilograma de ar (kg/kg). Em algumas variações deste gráfico, no eixo vertical pode vir também representado, juntamente com a humidade absoluta, outras características do ar, como a temperatura de ponto de orvalho ou a pressão de vapor. As curvas apresentadas no gráfico, que começam no topo e acabam no lado esquerdo, representam a humidade relativa, expressa em percentagem (%). As restantes linhas podem ser confusas de perceber, mas estão sucintamente explicadas no esquema da Figura 8, desenvolvido em (Beck, 2021). A interpretação gráfica pode ser confusa, mas conhecendo cada uma das linhas e cruzando os dados conhecidos, podemos conhecer qualquer uma das caraterísticas do ar.

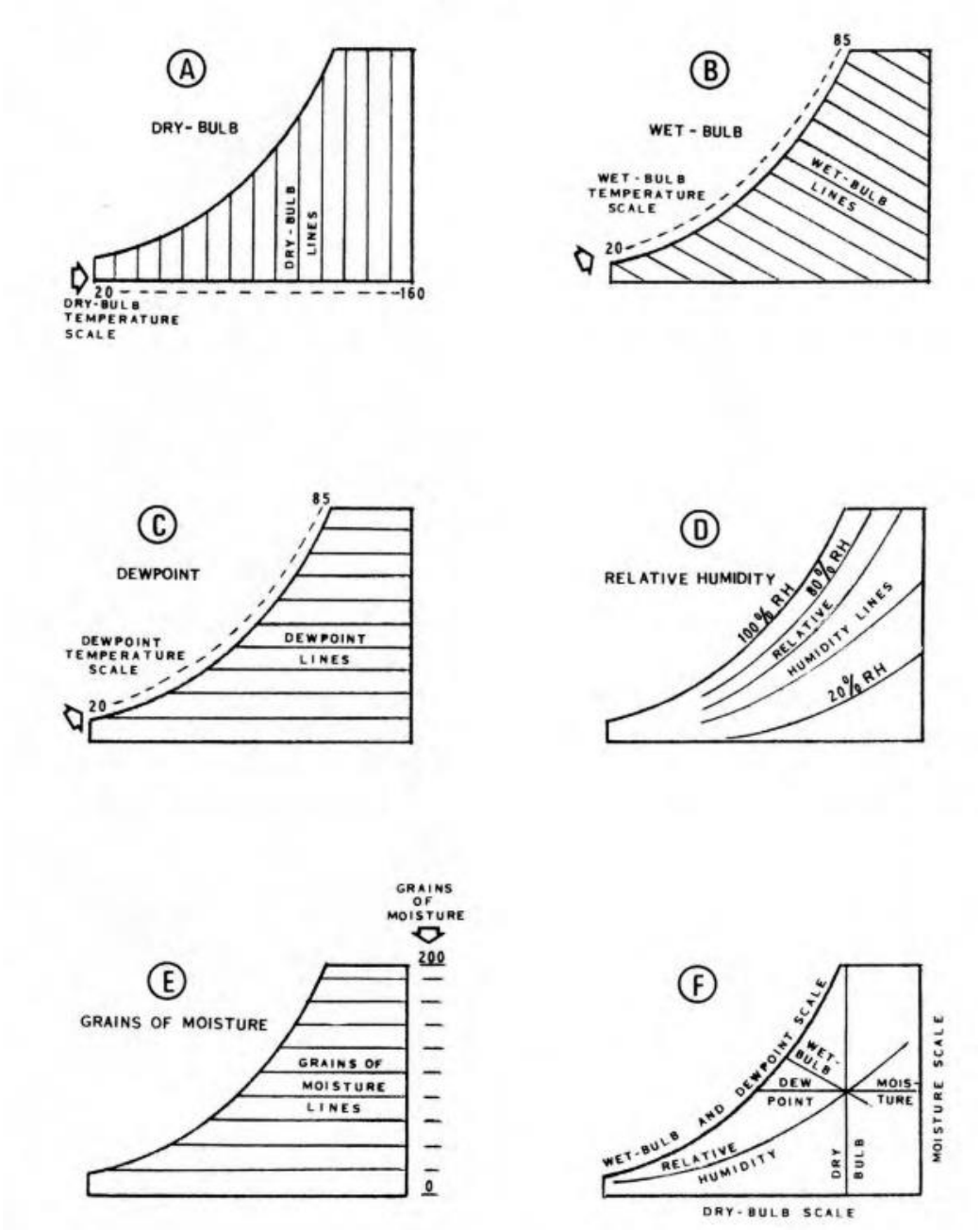

Figura 8 - Esquema de como ler o gráfico psicrométrico, retirado de Beck, (2021)

2.1.1.2. Conceitos Básicos

De forma a melhor compreender o mecanismo de refrigeração por compressão de vapor, é necessário primeiro conhecer os conceitos básicos aplicados.

Humidade Absoluta (ω): Existem duas formas de quantificar a quantidade vapor de água presente no ar, sendo elas a humidade absoluta e a humidade relativa. A humidade absoluta, como referido anteriormente, pode ser representada pela quantidade de massa de vapor de água por quantidade de mistura de ar (kg/kg) e é representado pela letra ω, podendo também ter o nome de humidade especifica. A humidade absoluta varia entre 0, valor que indica que o ar não tem qualquer tipo de humidade, podendo ser denominado ar seco, e 1, valor que indica que o ar está saturado. Caso o valor da humidade absoluta seja 1 e o ar esteja saturado, se for introduzida humidade no ar, esta irá condensar;

Humidade Relativa (φ): A humidade relativa é representada pela relação entre a quantidade de vapor de água contida no ar e a quantidade máxima de vapor de água que o ar consegue conter. Este é considerado um indicador de conforto humano e representa-se em percentagem (%) e representa-se pela letra φ. A quantidade máxima que o ar é capaz de conter depende da temperatura. Mesmo que a humidade absoluta se mantenha, se a temperatura alterar, a humidade relativa irá também alterar;

Temperatura de ponto de orvalho (Tdp): O fenómeno conhecido por orvalho ocorre quando o excesso de humidade no ar condensa sobre uma superfície fria, (Cengel & Boles, 2015). Com a diminuição da temperatura do ar durante a noite, a quantidade de vapor de água que o ar consegue reter diminui, fazendo com que a humidade relativa deste aumente, até atingir o ponto de saturação. Quanto este ponto é atingido, a humidade em excesso começa a condensar, dado então origem a gotículas de água ao qual se dá o nome de orvalho. Este fenómeno é mais comum no verão, pois a diminuição da temperatura é mais acentuada do dia para a noite. Desta forma podemos definir a temperatura de ponto de orvalho, como a temperatura a partir da qual a condensação se inicia com o arrefecimento do ar a pressão constante, ou, de outra forma, a temperatura de saturação do ar a pressão constante;

Temperatura de bolbo seco (T): Como referido anteriormente, a temperatura de bolbo seco não é nada mais que a temperatura ambiente do ar.

Temperatura de Bolbo húmido (Twb): De forma a determinar a temperatura de bolbo húmido do ar, podemos fazer um processo muito simples. Basta apenas usar um termómetro,

cuja ponta esteja coberta com um papel molhado, saturado com água. A temperatura que o termómetro medir é a temperatura de bolbo húmido.

Pressão de vapor (Pv): Este conceito representa a pressão que o vapor exerce na mistura se se encontrar a temperaturas e volumes iguais ao da mistura;

Entalpia (h): A entalpia pode ser definida como a energia máxima de um sistema termodinâmico, podendo o sistema considerado ser o ar, (Oliveira, 2012). A entalpia do ar depende a temperatura, da quantidade absoluta de vapor de água e da pressão total. Se o vapor de água foi considerado um gás perfeito, a sua entalpia depende apenas da sua temperatura, podendo ser então considerada igual à entalpia do vapor saturado à mesma temperatura.

2.1.2. Condensação

Um processo fundamental para se conseguir obter água através do ar atmosférico é a condensação, processo através do qual uma substância, neste caso a água, passa do seu estado gasoso para o seu estado líquido.

Este processo acontece com a redução da temperatura da substância até esta atingir a sua temperatura de condensação, sendo realizada a temperatura constante. Contudo, a mudança de fase não é instantânea, havendo então uma altura em que a substância se encontra tanto em estado gasoso como líquido.

No diagrama da figura 9, retirado de Oliveira, (2012),está representado a mudança de fase que ocorre quando uma substância passa do estado líquido para o gasoso (ou vice-versa). A linha de saturação, curva em forma de sino, separa o estado líquido do gasoso, lado esquerdo, do estado gasoso, lado direito, havendo uma coexistência de ambos, representada no meio, durante a mudança de fase.

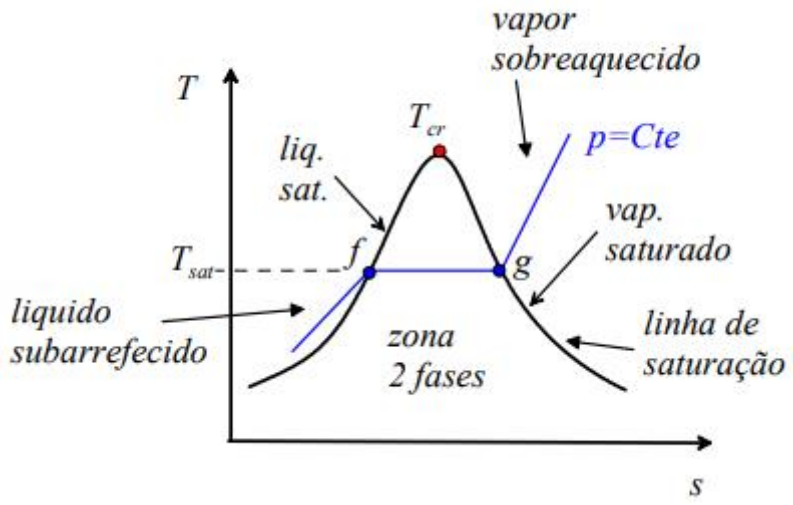

Figura 9 - Representação da linha de saturação e a mudança de fase de liquido para gasoso da água, retirado de Oliveira, (2012).

Em termos de energia, para que ocorra evaporação de um litro de água, são necessários cerca de 640 Wh, considerado esta energia o calor latente. Por outro lado, para condensar um litro de vapor de água, é necessário o mesmo valor de energia. No processo de evaporação, esta energia é usada para quebrar as ligações entre as moléculas, fazendo com que se separem, enquanto que no processo de condensação, a energia em vez de ser absorvida pelo ar, é libertada, de forma que as moléculas ficam sem energia para resistir às forças entre si e unem-se.

A condensação do vapor de água pode ocorrer naturalmente devido a um arrefecimento da temperatura, atingindo esta o ponto de orvalho, referido anteriormente, ou então quando o ar fica saturado, altura em que a humidade em excesso não tem alternativa senão condensar. Por outro lado, esta condensação pode ocorrer de forma forçada, ao arrefecer superfícies abaixo da temperatura do ponto de orvalho do ar, ou através da compressão do ar.

2.2. Refrigeração por Compressão de Vapor

Uma das principais aplicações da termodinâmica envolve o campo da refrigeração. Os dispositivos que são responsáveis pela refrigeração são conhecidos como bombas de calor ou máquinas frigoríficas, e o processo que eles realizam é chamado de ciclo de refrigeração. Existem vários métodos disponíveis para realizar a refrigeração, mas o método mais comum

é a refrigeração por compressão de vapor. Nesse processo, um fluido refrigerante é utilizado e passa alternadamente pelos estágios de vaporização, condensação, sendo também comprimido enquanto está na fase de vapor.

Nesta seção, abordaremos a refrigeração por compressão de vapor, explicando os seus princípios básicos, o ciclo termodinâmico, a composição dos sistemas de desumidificação e os sistemas de condensação, particularmente projetados para a produção de água potável.

2.2.1. Noções Base

A termodinâmica encontra uma aplicação significativa no campo da refrigeração, que envolve o uso de máquinas como bombas de calor ou máquinas frigoríficas, com o respetivo ciclo conhecido como ciclo de refrigeração. Entre os vários métodos de refrigeração, o método mais comummente utilizado é a refrigeração por compressão de vapor. Este processo requer o uso de um fluido refrigerante que é alternadamente vaporizado e condensado e comprimido quando em fase vapor. Esta seção fornecerá uma visão geral da refrigeração por compressão de vapor, incluindo seus conceitos básicos, ciclo termodinâmico, componentes do sistema como desumidificação e condensação, e suas aplicações na produção de água potável.

O calor naturalmente flui de regiões de temperatura mais alta para regiões de temperatura mais baixa. No entanto, o processo reverso de transferir calor de uma região de temperatura mais baixa para uma região de temperatura mais alta requer o desenvolvimento de equipamentos específicos para esse propósito. Ciclos de refrigeração, como o ciclo de refrigeração por compressão de vapor, funcionam de maneira oposta aos ciclos de potência, pois requerem que trabalho seja fornecido a eles em vez de produzirem trabalho. É por isso que a representação de um ciclo de refrigeração, por exemplo, em um diagrama T-s, tem uma direção anti-horário, oposta à dos ciclos de potência.

De acordo com Oliveira, (2012), os principais equipamentos que dependem da compressão de vapor são as bombas de calor e as máquinas de refrigeração, ambos podendo ser tratados como dispositivos similares, com seu único fator distintivo sendo sua finalidade pretendida. O objetivo das máquinas de refrigeração é manter uma baixa temperatura dentro de um espaço refrigerado, removendo o calor de seu interior. A descarga de calor em altas temperaturas para o ambiente é meramente uma operação necessária, não um objetivo. Em contraste, o objetivo de uma bomba de calor é manter um espaço aquecido, o que pode ser alcançado absorvendo calor de uma fonte de baixa temperatura, como água fria ou ar do lado de fora.

A representação da máquina de refrigeração e da bomba de calor, bem como as trocas de calor existentes, podem ser observadas na 10. Na figura 10, Q_F (representada por q_e, calor de evaporação, em termos de balanço energético) representa o calor removido de um espaço refrigerado, no caso da máquina de refrigeração, ou do ambiente, no caso da bomba de calor, a uma temperatura reduzida T_F. Q_Q (representada por q_c, calor de condensação, em termos de balanço energético) é o calor rejeitado para o ambiente ou para o espaço aquecido, dependendo do objetivo do equipamento, com T_Q sendo a temperatura do calor rejeitado. representa o trabalho necessário para realizar as transferências de calor desejadas em ambos os equipamentos.

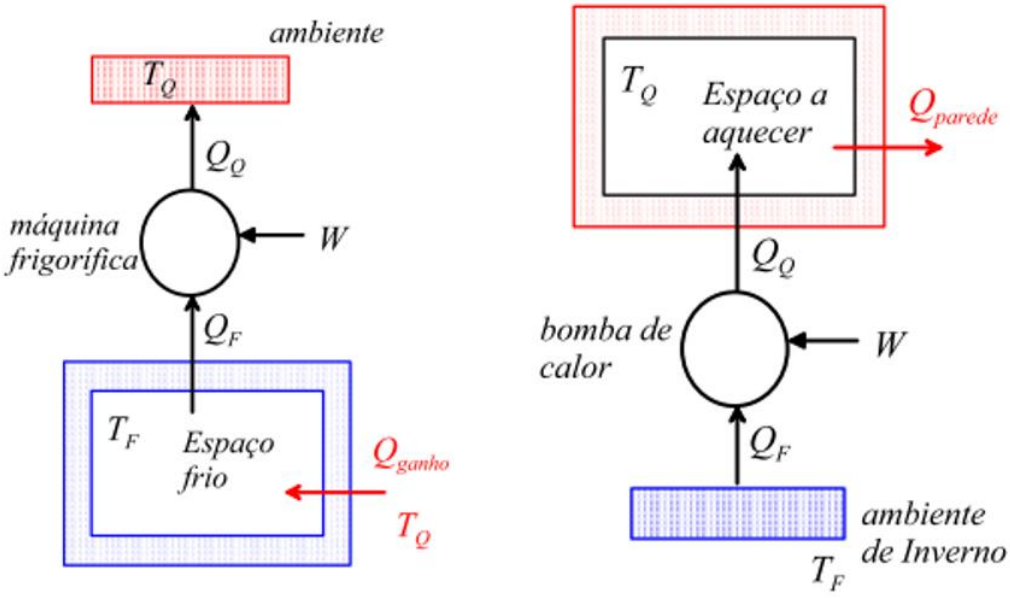

Figura 10 – Esquemas da máquina frigorifica e bomba de calor, retirados de Oliveira, (2012).

O desempenho desses dispositivos é definido pelo coeficiente de desempenho, comumente referido como COP (equações 1 e 2). O coeficiente de desempenho tanto para a máquina de refrigeração quanto para a bomba de calor pode ser determinado da mesma maneira, diferindo apenas no efeito desejado, conforme mostrado nas equações a seguir.

$$COP_{MF} = \frac{Q_f}{W_{net,in}} \qquad \text{(Equação 1)}$$

$$COP_{BC} = \frac{Q_Q}{W_{net,in}} \quad \text{(Equação 2)}$$

O COP (coeficiente de performance) é utilizado para definir o desempenho de equipamentos de refrigeração e bombas de calor, e pode ser calculado usando as equações 1 e 2. COP_{MF} e COP_{BC} são os valores de COP para a máquina de refrigeração e bomba de calor, respetivamente. O trabalho necessário para as transferências de calor necessárias para alcançar o objetivo de cada equipamento, $W_{net,in}$, pode ser calculado subtraindo-se o calor removido do calor rejeitado, conforme mostrado na equação 3.

$$W_{net,in} = Q_Q - Q_f \quad \text{(Equação 3)}$$

Os coeficientes de desempenho de ambas as máquinas podem exceder 1, mas para valores fixos de Q_F e Q_Q, os coeficientes de desempenho podem ser obtidos usando a equação 4.

$$COP_{BC} = COP_{MF} + 1 \quad \text{(Equação 4)}$$

A relação implica que o coeficiente de performance da bomba de calor será superior a um, desde que o coeficiente de performance da máquina de refrigeração seja positivo. No pior dos casos, a bomba de calor funcionará como um simples aquecedor resistivo, fornecendo tanta energia quanto consome, com um COP igual a 1.

Uma vez que as bombas de calor consomem menos energia primária do que os sistemas de aquecimento convencionais, são uma tecnologia importante para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. As máquinas de refrigeração e as bombas de calor podem ser facilmente caracterizadas pelo uso de apenas um compressor.

Segundo Ferreira, (2016), um sistema termodinâmico refere-se a uma quantidade fixa de matéria com identidade constante, na qual nenhuma massa entra ou sai do sistema. Consequentemente, pode-se afirmar que, para um volume de controlo que envolve um sistema termodinâmico, a massa total que entra e sai do volume é igual a:

$$\sum m_e = \sum m_s \quad \text{(Equação 5)}$$

Conforme afirmado pelo mesmo autor, Ferreira, (2016), de acordo com a primeira lei da termodinâmica, o princípio da conservação de energia garante que a soma das energias que entram em um volume de controle é igual à soma das energias que saem dele;

$$\sum E_e = \sum E_s \qquad \text{(Equação 6)}$$

A segunda lei da termodinâmica estabelece que a direção dos processos termodinâmicos é determinada pela presença de irreversibilidades na natureza. Isso significa que os processos termodinâmicos só podem ocorrer em uma direção e nunca na direção oposta, tornando a existência de sistemas reversíveis e ideais impossíveis na natureza. Como mencionado em Ferreira, (2016), a manifestação quantitativa dessa lei para um sistema fechado é a entropia (S), conforme mostrado na Equação 7:

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T} \qquad \text{(Equação 7)}$$

Num sistema isolado, a entropia só pode aumentar, o que é por vezes referido como a lei do aumento da entropia, de acordo com a Equação 7. Se considerarmos o Universo como um sistema isolado, a segunda lei da termodinâmica estabelece que a entropia do Universo irá, inevitavelmente, aumentar ao longo do tempo. No entanto, do ponto de vista termodinâmico, é sempre possível criar um sistema isolado combinando o sistema em si com todos os sistemas vizinhos, como explicado em Oliveira, (2012).

Os diagramas temperatura e entropia (T-s) e pressão e entalpia (P-h) são geralmente utilizados na engenharia para analisar sistemas de fluidos. Estes diagramas mostram curvas características que ilustram o comportamento dos fluidos em termos de temperatura, pressão, entropia e entalpia. As figuras 11 e 12 ilustram as curvas típicas de cada diagrama, bem como os pontos chave que os engenheiros precisam avaliar ao usar esses diagramas (T-s e P-h, respetivamente).

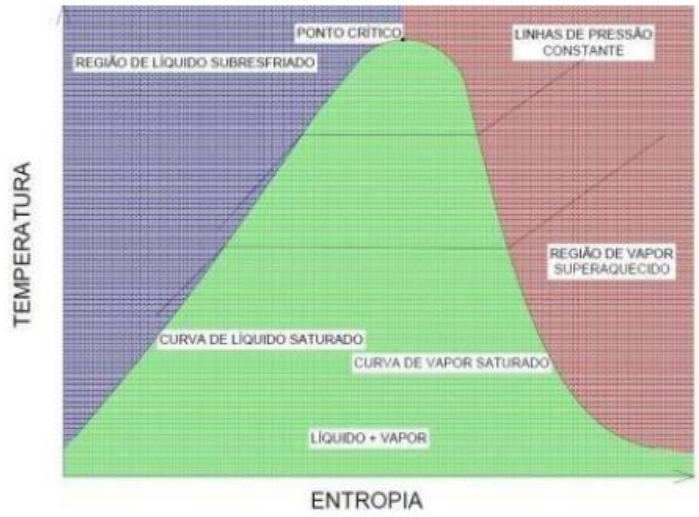

Figura 11 - Diagrama de temperatura e entropia (T-s), retirado de Ferreira, (2016).

Figura 12 - Diagrama de pressão e entalpia (P-h), retirado de Ferreira, (2016).

2.2.2. Ciclos de refrigeração

2.2.2.1. Ciclo de refrigeração

Ao contrário dos ciclos de potência que produzem trabalho, os ciclos de refrigeração, ou ciclos frigoríficos, recebem trabalho, percorrendo o diagrama T-s no sentido anti-horário. Estes ciclos recebem trabalho para transferir calor de uma fonte fria para um fonte quente, podendo ser designados de ciclos de frio, explicado por Oliveira, (2012). No esquema seguinte estão representadas as transferências energéticas que ocorrem num ciclo frigorifico. De forma simples, o ciclo recebe trabalho, representado por W, e transfere calor de uma fonte fria a uma temperatura T_F para uma fonte quente à temperatura T_Q. Estas fontes são consideradas reservatórios de energia térmica, ou seja, a sua temperatura mantém-se constante, independentemente dos processos que ocorrem durante o ciclo.

Os processos dos ciclos frigoríficos e dos ciclos de potência são muito semelhantes: A entrada e saída de calor são feitas a pressão constante e o trabalho fornecido de forma adiabática. Dentro do ciclo frigorífico circula um fluido a uma temperatura baixa, próxima da temperatura desejada para o espaço frio, no processo de evaporação, e a uma temperatura próxima da atmosférica na condensação. Este fluido deve ser muito volátil, ou seja, tenha muita facilidade em passar do estado líquido para o gasoso, de forma a que, para pressões próximas da pressão atmosférica, evapore a temperaturas muito baixas, perto da temperatura que se pretende manter a camara. Esta evaporação do fluido permite que ocorra um efeito de refrigeração quando absorve o calor da camara.

2.2.2.2. Componentes de um sistema frigorifico

O ciclo frigorifico é composto por um evaporador, onde ocorre evaporação a uma pressão constante com a entrada de calor, por um condensador onde ocorre condensação a pressão constante, com a saída de calor, um compressor onde ocorre compressão adiabática de um vapor sobreaquecido, com a entrada de trabalho e por uma válvula de laminagem, onde ocorre expansão, com uma diminuição de temperatura.

O evaporador é um permutador de calor que promove na transferência de calor entre o fluido e o meio que se pretende arrefecer, de acordo com Nunes, (2008). A sua função nos sistemas em que é aplicado, como sistemas de arrefecimento, refrigeração, congelamento ou ar condicionado, é retirar energia térmica do local que ser quer arrefecer. O fluido refrigerante que circula no sistema entra no evaporador sob a forma de liquido-vapor e sai no estado de vapor saturado ou sobreaquecido.

Existem então dois tipos de evaporadores: Os evaporadores secos, usados para arrefecimento de ambientes fechado, em sistema de ar-condicionado. Apresentam um coeficiente global de transferência baixo que resulta da dificuldade em manter a superfície dos tubos molhada pelo fluido em expansão e da superfície necessária para promover o sobreaquecimento, como explicado por Stoecker & Jabardo, (2002). Normalmente o fluido usado nestes evaporadores são os fluidos halogenados, como por exemplo os HFCs (hidrofluorcarbonetos). Existem também os evaporadores inundados, usados no arrefecimento de água, tanto potável como a que é usada em processos industriais, como a que é usada em sistema de ar-condicionado e no leite após o processo de pasteurização, mencionado por Duarte, (2013). Este evaporador consegue usar de forma eficaz toda a superfície de transferência de calor, pois nestes evaporadores o líquido está em contacto com toda a superfície dos tubos. Ao contrário dos evaporadores secos, estes evaporadores apresentam um coeficiente global de transferência de calor elevado.

O condensador é também um permutador de calor, utilizado no processo de arrefecimento, condensação e subarrefecimento do fluido refrigerante que vem do compressor a elevada pressão e temperatura. O fluido refrigerante entra no condensador no estado de vapor sobreaquecido e sai deste na forma de líquido saturado. A característica mais importante na escolha de um condensador é a sua capacidade de transferência de calor, mencionado por Duarte, (2013). Existem então três tipos de condensador: Os condensadores arrefecidos a ar são utilizados como parte integrante de unidades produzidas em fábricas de pequena e média capacidade. Os condensadores arrefecidos a água são mais eficientes, especialmente quando lidamos com temperaturas ambientes mais elevadas, e por ultimo, os condensadores que operam através do efeito evaporativo, que apresentam um consumo menor, visto que não necessitam de uma bomba com uma capacidade tão grande como os referidos anteriormente, apesar de necessitarem de estar perto do compressor, de forma a evitar grandes linhas de descarga, ou seja, a ligação entre o condensador e o compressor tem que ser diferente.

O compressor, cuja função principal é aumentar a pressão do fluido refrigerante e promover a movimentação deste dentro do circuito, existindo, dentro dos tipos mais usados, os compressores do tipo alternativo, parafuso e scroll, conforme afirmado por Nunes, (2008). De forma a realizarem a compressão do fluido, os compressores possuem um órgão mecânico responsável pela redução do volume da camara de compressão. Os compressores podem ser divididos de acordo com a configuração geométrica do motor, órgão mecânico responsável pela compressão, em herméticos, semi-herméticos e abertos. Podem também ser divididos

segundo o seu funcionamento em dinâmicos e volumétricos, podendo estes últimos por sua vez ser divididos em alternativos, rotativos, de parafuso e espiral. A diferença entre os compressores está na forma de instalação do conjunto motor-compressor, do acesso ao interior do compressor e no sistema de vedação do óleo de lubrificação, mencionado no trabalho de Nunes, (2008).

Por último, o dispositivo de expansão, é utilizado para reduzir o fluido de refrigeração da pressão de condensação, para a pressão de evaporação. Existem vários tipos de dispositivos de expansão, sendo os mais usados os de tubo capilar, os de válvula de expansão termostática, os de válvula de expansão a pressão constante e os de válvula de boia, como afirmado por Duarte, (2013).

2.2.2.3. Ciclo de refrigeração ideal e real

O ciclo ideal para o ciclo frigorifico seria o ciclo de Carnot invertido, representado na figura 13, no qual a compressão, processo 1-2 é isentrópica, a condensação, processo 2-3 é isobárica e isotérmica, a expansão, processo 3-4 é isentrópica e a evaporação, processo 4-1, é isobárica e isotérmica. Apesar deste ciclo ser considerado, do ponto de vista teórico, o ciclo ideal para ciclos frigoríficos, na prática apresenta inviabilidades, como a dificuldade de parar a evaporação no ponto 1 de forma a que a entropia seja igual à do ponto 2, à impossibilidade de construir um compressor que funcione com uma mistura de vapor-liquido que possuía uma taxa de liquido elevada o suficiente e devido também à impossibilidade de construir uma turbina a funcionar com uma mistura de liquido com bolhas de vapor.

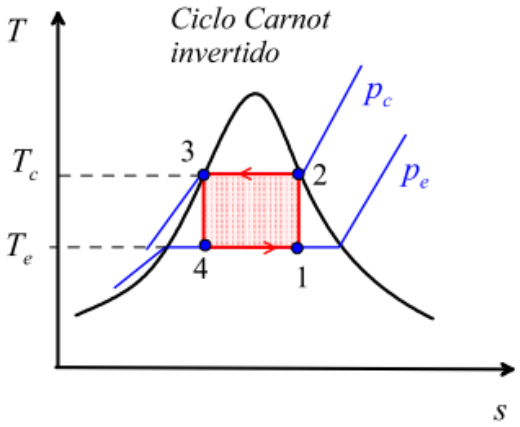

Figura 13 - Diagrama T-s do ciclo de Carnot ideal invertido, retirado de Oliveira, (2012).

De forma a solucionar os problemas apresentados pelo ciclo de Carnot invertido, efetua-se uma evaporação até ao estado de vapor saturado, comprimindo o vapor sobreaquecido no compressor, usando para a expansão uma válvula de laminagem em vez de uma turbina, podendo então sete ser considerado um ciclo ideal. As figuras 14 e 15 mostram um esquema de uma instalação e o diagrama T-s para um ciclo frigorífico ideal, não sendo consideradas quaisquer perdas no compressor (compressão isentrópica) ou no condensador e evaporador, decorrendo estes dois processos a pressão constante.

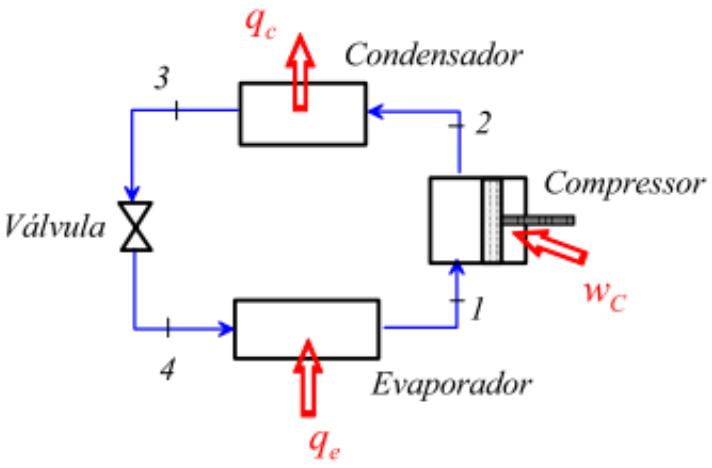

Figura 14 - Esquema de uma instalação do ciclo de refrigeração simples por compressão, retirado de (Oliveira, 2012).

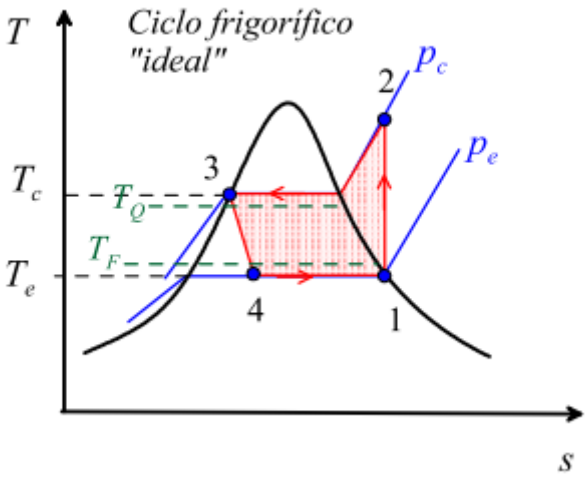

Figura 15 - Diagrama T-s para um ciclo de refrigeração simples ideal, retirado de (Oliveira, 2012).

Tal como afirmado por Oliveira, (2012), no ciclo frigorifico ideal, o processo de refrigeração começa com a compressão do fluido refrigerante em estado gasoso no compressor, ocorrendo este processo entre o ponto 1, no qual o fluido se encontra à pressão de evaporação, p_e, e o ponto 2, no qual o fluido se encontra no estado de vapor sobreaquecido à pressão de condensação, p_c. Este processo de compressão é considerado adiabático e

reversível. No processo de condensação, que ocorre, tal como o nome indica, no condensador, o fluido refrigerante arrefece a pressão constante, p_c, desde o ponto 2, no qual o fluido se encontra na forma de vapor sobreaquecido, até ao ponto 3, onde o fluido se encontra no estado liquido saturado, ocorrendo este processo através da transferência de calor com outro fluido, normalmente o ar atmosférico que se encontra a uma temperatura menor que a temperatura de condensação, T_c. Desde o ponto 3, no qual o fluido se encontra à pressão de condensação, até ao ponto 4, no qual o fluido se encontra à pressão de evaporação, dá-se o processo de expansão, processo considerado isentálpico que promovo o arrefecimento do fluido de trabalho desde a temperatura de condensação até à de evaporação. Por último, no evaporador, o fluido refrigerante absorve calor do ar atmosférico, evaporando, atingindo de novo o estado inicial do ciclo, no ponto 1.

De forma a fazer os cálculos do ciclo, é necessário calcular as entalpias de cada ponto, sabendo a priori ou as temperaturas de evaporação e condensação, T_e e T_c respetivamente, ou as pressões de evaporação e condensação, p_e e p_c respetivamente. Desta forma, sabemos que as entalpias e entropias dos pontos 1 e 3 são dadas pelas Tabelas de Termodinâmica, de tal forma que $h_1=h_g\ (p_e)$, $h_3=h_f\ (p_c)$ e $s_1=s_g\ (p_e)$. Pelas tabelas de sobreaquecimento sabemos que $p_2=p_c$, e pelo gráfico, que $s_2=s_1$, se considerarmos compressão isentrópica. Para o ponto 4, temos que $h_4=h_3$, expressão que provém do balanço energético da válvula. Apresentando as equações de balanço energético para cada um dos componentes do ciclo, temos que:

- Para o compressor, $w_c=h_2-h_1$, em que w_c representa o trabalho fornecido ao compressor, em kJ/kg;

- Para o condensador, $q_c=h_2-h_3$, em que qc representa o calor de condensação que é absorvido pelo ar atmosférico, em kJ/kg;

- Para a válvula de expansão, $h_4=h_3$, em kJ/kg;

- Para o evaporador, $q_e=h_1-h_4$, em que qe representa o calor de evaporação que é absorvido pelo fluido de trabalho, em kJ/kg;

Após o cálculo do balanço energético é possível calcular os parâmetros de desempenho, sendo o coeficiente de desempenho, representado por COP_{MF}, equivalente ao quociente de q_e por w_c e a capacidade de arrefecimento, representada por Q_F, equivalente ao produto de m_{fr} por q_e.

No entanto, o ciclo ideal não é o que acontece na prática, pois existem várias irreversibilidades que baixam o desempenho do ciclo, entre as quais a compressão não ser isentrópica (existe aumento de entropia), a perda de carga que ocorre nos permutadores de calor (a condensação e evaporação não ocorrem a pressão constante) e o aquecimento nos tubos que ligam os diversos componentes do sistema (a temperatura à entrada do compressor acaba por ser superior à temperatura de evaporação), tendo de haver então a distinção entre ciclo ideal e ciclo real.

O ciclo de refrigeração real não pode ser representado da mesma forma que o ciclo de refrigeração ideal no diagrama T-s, sendo uma possível representação a da figura 16, sendo que a diferença está na localização do ponto 2 e ponto 3, devido ao aumento da entropia no processo de compressão e da diminuição de temperatura no processo de condensação.

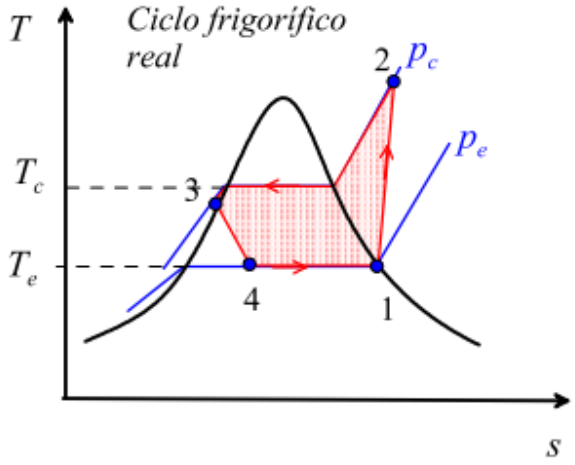

Figura 16 - Diagrama T-s para um ciclo de refrigeração simples real, retirado de Oliveira, (2012).

De acordo comos autores Cengel & Boles, (2015), existe outra forma de representar um ciclo de refrigeração real num diagrama T-s, representada na figura 17. Nesta representação, o autor usa 8 pontos em vez de apenas 4 usado no gráfico para o ciclo real apresentado anteriormente, representando as alterações que ocorrem devido às irreversibilidades mencionadas acima.

As diferenças entre o ciclo ideal e o ciclo real ocorrem, pois, os processos não podem ser considerados perfeitos, podendo haver então perdas de carga ou transferências de energia com o exterior.

Ainda segundo os mesmo autores, Cengel & Boles, (2015), a primeira diferença é devido ao estado do refrigerante à entrada de compressor, visto que este não entrar no estado de vapor saturado. Para que isto ocorra, é necessário que haja um aquecimento de forma a garantir a total evaporação do fluido refrigerante, o que leva à diferença de entropia e temperatura entre os pontos 8 e 1. Este aquecimento leva a um aquecimento das tubagens que ligam o evaporador e o compressor, que por sua vez leva à diminuição de pressão, resultando numa diferença de entropia entre os pontos 7 e 8. Por outro lado, a compressão não pode ser considerada reversível, adiabática ou isentrópica, devido à existência de atrito e de transferências de calor, fazendo com que a entropia entre os pontos 1 e 2, dependendo de qual deste fatores seja o mais determinante, aumente ou diminua, daí no gráfico apresentado aparecer um ponto 2, para o caso do aumento de entropia, e um ponto 2' para o caso da diminuição de entropia, sendo este último o melhor caso, visto que a necessidade energética do compressor será menor. As restantes diferenças nos pontos ocorrem devido às quedas de pressão ao longo dos vários componentes e tubagens, havendo, portanto, diferenças na entropia e pressão entre os pontos 3 e 4, (ou 2' e 4), 4 e 5, 2 e 3 e 5 e 6.

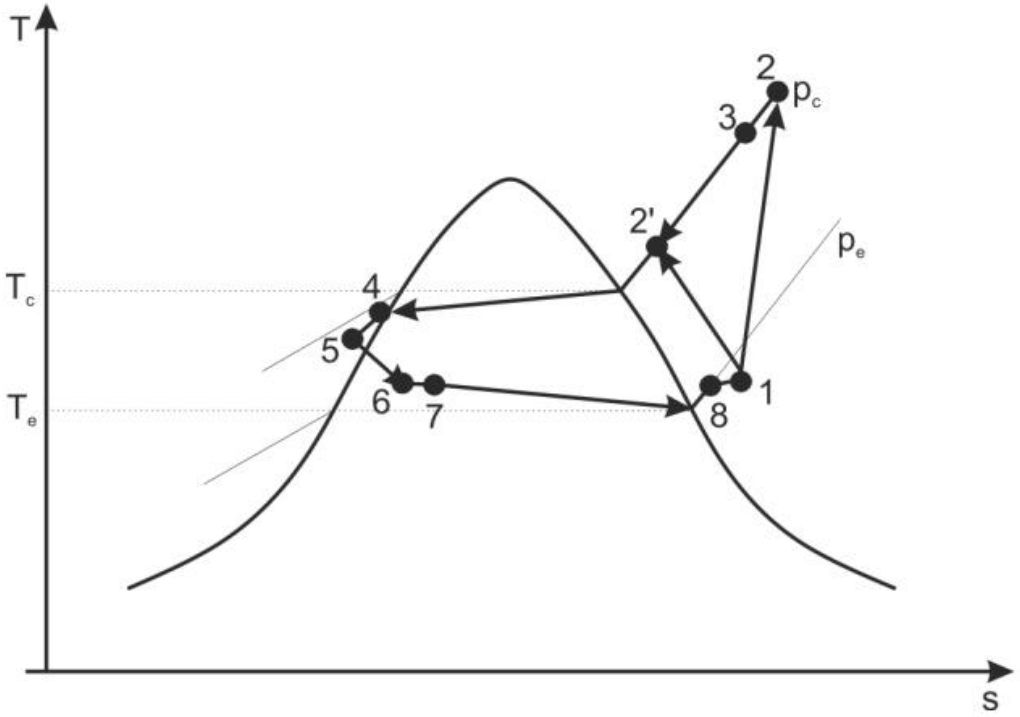

Figura 17 - Diagrama T-s para o ciclo de refrigeração real, retirado de Cengel & Boles, (2015).

2.3. Energia Fotovoltaica

A processo fotovoltaico é o processo que transforma a radiação solar em energia elétrica. A radiação solar é a forma de energia mais abundante no nosso planeta, podendo ser aproveitada de diversas formas e para diversos fins, como visto em capítulos anteriores, podendo ser uma das fontes de energia para a produção de água potável através da dessalinização. Esta energia está disponível de forma gratuita todos os dias, variando a sua intensidade com certos fatores como altura do ano, localização, condições climatéricas, etc...

O termo fotovoltaico tem origem na junção das palavras gregas *photos* que significa luz, com a palavra *volt*, unidade de tensão elétrica. A produção de energia de energia elétrica através da radiação solar ocorre através do efeito fotovoltaico, descoberto por Edmond Becquerel em 1839, afirmado por Boyle, (2004). Após esta descoberta, o efeito fotovoltaico começou a ser objeto de estudo por vários cientistas que foram, ao longo do tempo aperfeiçoando a capacidade de produzir eletricidade através da radiação do Sol.

Na década de 50 começaram-se a desenvolver as células fotovoltaicas modernas, quando u grupo de cientistas, Chapin, Fuller e Pearson, testavam os efeitos da luz em semicondutores, testando, anos mais tarde, os mesmos efeitos em silicone, conseguindo desenvolver protótipos de células fotovoltaicas que tinham a capacidade de produzir eletricidade com um rendimento de 6%. Em 1958, um transmissor de rádio num satélite dos Estados Unidos foi alimentado somente à base de células solares, marcando a primeira demonstração do potencial desta tecnologia, a partir do qual começou a haver um rápido progresso no aumento do rendimento e redução no custo das células solares, sendo atualmente, uma técnica de produção de energia usada em muitas localizações do mundo.

2.3.1. Células Solares e o Efeito Fotovoltaico

As células solares são uma juncão de duas camadas finas semicondutores de materiais diferentes, uma delas funcionando como a camada positiva (camada *p* – positiva) e a outra a camada negativa (camada *n* – negativa). A maioria das camadas são feitas de silicone, apesar de existirem outros materiais possíveis para a sua construção.

Sendo as células fotovoltaicas criadas a partir de silicone, que é o segundo elemento mais abundante na crosta terreste, e não incluindo nenhuma parte móvel, as células podem, em teoria, operar durante tempo infinito sem se desgastarem, reportado por Boyle, (2004).

As camadas de silicone são denominadas de positiva e negativa, devido ao seu carregamento. À camada positiva são adicionadas, geralmente, impurezas de boro, tornando-a assim, positivamente carregada, ou seja, com falta de eletrões, enquanto que à camada negativa são adicionadas, geralmente, impurezas de fósforo, tornando-a assim negativamente carregada, ou seja, com eletrões a mais, referido por Boyle, (2004).

Juntando os dois semicondutores forma-se a Junção P-N, que cria um campo elétrico, fazendo com que os eletrões em excesso na camada n, se movimentem em direção à camada p, que tem insuficiência destes. No entanto, para que este movimento de eletrões ocorra é necessário energia para quebrar as ligações atómicas.

A radiação solar é composta por fotões que, ao entrarem em contacto com os eletrões, transferem alguma da sua energia, permitindo assim que as ligações atómicas quebrem, levando ao movimento livre de eletrões entre as camadas. Desta forma, os eletrões em excesso da camada n, são atraídos para os "buracos" que existem na camada p, devido à falta de eletrões, e movem-se da camada p, para a camada n. Este movimento de eletrões é essencialmente uma corrente elétrica.

Para ser possível aproveitar esta corrente, basta apenas ligar a junção P-N a um condutor elétrico, e, eventualmente, os eletrões vão circular pelo condutor, criando assim eletricidade. De forma a produzir eletricidade, é também necessário que a junção P-N crie, para além da corrente elétrica, uma tensão elétrica, que é criada pelo próprio campo elétrico da junção. Assim, através deste feito denominado de efeito fotovoltaico, é possível criar energia elétrica a partir da radiação solar.

2.3.2. Sistemas Fotovoltaicos

Cada uma das células solares modernas cria apenas, em média 1,5 watts, pelo que, de forma a produzir mais eletricidade, estas são ligadas, formando os módulos fotovoltaicos retangulares. Uma pequena quantia destes módulos pode ser suficiente para alimentar habitações pequenas, mas para gerar ainda mais eletricidade para produção em grande escala, este são por sua vez agrupados criando assim sistemas fotovoltaicos, tal como afirmado pelo autor Boyle, (2004).

Desta forma, é possível gerar eletricidade a grandes ou pequenas escalas, havendo cada vez mais um aumento na quantidade de edifícios, quer sejam individuais ou domésticos, que optam pela instalação de sistema fotovoltaicos, de forma a reduzir em parte, ou em alguns casos por completo, a sua dependência da energia da rede. No entanto existem também instalações de ainda maiores dimensões, chegando a atingir os vários Megawatts, ligadas à rede, destinadas à produção de eletricidade, formando assim às infraestruturas que têm o nome de centrais fotovoltaicas.

Os sistemas fotovoltaicos são extremamente úteis quando ligados à rede, para reduzir custos de eletricidade, mas também podem ser usados de forma a tornarem independentes pequenos eletrodomésticos, ou alimentarem zonas sem acesso à rede elétrica, especialmente em países e zonas mais pobres, servindo de fontes de alimentação ou funcionando como forma de carregar baterias para garantir a continuação de funcionamento de muitos aparelhos.

2.3.2.1. Sistemas Ligados à rede

Na maioria dos países desenvolvidos, em que a rede elétrica é de fácil acesso, em edifícios que tenham sistemas fotovoltaicos instalados, estes funcionam como fonte principal de eletricidade, enquanto que a rede funciona como uma bateria. Em alturas em que a produção fotovoltaica é maior que o consumo, como em dias com muito sol, a rede tem a capacidade de absorver a energia produzida em excesso, de forma a poder ser utilizada por

outros utilizadores. Em altura em que a produção fotovoltaica é menor que o consumo, como em dias muito enevoados ou durante a noite em que não há produção fotovoltaica, a rede funciona como fonte de eletricidade de reserva, garantindo que não há falhas de energia.

Os sistemas fotovoltaicos apresentam a inconveniência de produzir eletricidade em corrente continua, enquanto que a corrente que é consumida nas residências é corrente alternada. Para transformar a corrente continua produzida pelos painéis em corrente alternada, é necessário ligar o sistema fotovoltaico a um inversor de corrente, que tem a capacidade de transformar a corrente continua em corrente alternada, permitindo assim que a eletricidade possa ser usada.

A instalação de sistemas fotovoltaicos em edifícios industriais pode ajudar na redução de custos de empresas. A maioria destes edifícios é apenas ocupado durante as horas de expediente, apresentando consumos elevados durante o dia, e praticamente nenhum consumo durante a noite. Estes consumos ligam bem com a produção fotovoltaica, pois é apenas durante o dia que o sistema produz energia. Quando o edifício não consome energia, o sistema também não produz, levando a que não haja produção em excesso de eletricidade. No caso de haver excesso de produção de eletricidade, esta pode ser vendida à rede que, apesar ser a um preço relativamente inferior àquele de compra, leva a que, caso haja produção extra, a empresa consiga ainda fazer lucro de eletricidade que seria desperdiçada.

Este tipo de instalações, apesar de serem em maior escala que os sistemas de habitações, têm o mesmo objetivo, que é o de produção de energia para autoconsumo. No entanto, existem instalações com o objetivo de produção fotovoltaica para a rede. Este tipo de instalações, por vezes atingindo os vários Megawatts, funcionam como fonte de eletricidade para diversas regiões em todo o mundo.

Estas instalações aproveitam o facto de que a compra do material em larga escala é reduzido, sendo instaladas em localizações em que o aproveitamento da radiação solar será maior. No entanto, como estão dependentes da rede para fazer a distribuição da eletricidade, existem várias perdas no transporte de energia. Estas instalações são também de enormes dimensões, precisando para tal, de terrenos de enormes dimensões também, podendo serem aproveitados terrenos de baixo custo. A instalação destas centrais fotovoltaicas é mais atrativa em regiões cuja radiação solar é maior, como por exemplo Sudoeste da Europa (Portugal, Espanha) e Norte de África, sendo não tão economicamente viável em países cuja radiação solar é mais baixa, como por exemplo, no Norte da Europa.

2.3.2.2. Sistemas Fotovoltaicos Autónomos

Anteriormente foram mencionados os sistemas fotovoltaicos ligados à rede, que funcionam como fonte de habitações, edifícios industriais, comerciais, ou como centrais de produção de eletricidade. No entanto, pode haver sistemas fotovoltaicos autónomos, de pequenas dimensões, cujo principal objetivo é apenas produzir energia para alimentar pequenos subsistemas.

Estes sistemas autónomos foram a origem dos sistemas de maiores dimensões, tendo sido desenvolvidos no início dos anos 70 de forma a dar eletricidade remota a alguns aparelhos, especialmente para países em desenvolvimento. Estes sistemas apresentam algumas vantagens, como o baixo custo de operação e manutenção, e um investimento inicial mais baixo.

Os sistemas autónomos não se encontram ligados à rede e podem ou não apresentar bateria, sendo de muito menores dimensões e estando geralmente ligados diretamente a um motor que apresenta a mesma tensão e corrente que os painéis que o alimentam. De uma forma muito simples, se existe energia solar, o aparelho que está ligado funciona., se não houver energia solar, o aparelho não funciona. Estes sistemas estão muita vez ligados a bateria para que exista uma fonte de energia alternativa para as alturas em que não existe Sol para produzir eletricidade.

Os sistemas autónomos são constituídos pelos painéis, responsáveis pela produção de eletricidade, por um sistema de balanço composto pelos cabos, proteções dos aparelhos, inversores, etc… e, caso exista, um sistema de armazenamento de energia, geralmente baterias.

Estes sistemas são os mais adequados para os sistemas elétricos de zonas remotas de países em desenvolvimento, cujo acesso à rede elétrica publica não é fácil, proporcionando assim uma fonte de energia mais barata e mais fiável. Este tipo de sistemas é a solução ótima para o objeto em estudo nesta dissertação, sendo o sistema a adotar para tornar o desumidificador energeticamente autónomo para a produção de água.

3. Instalação experimental

Nos capítulos anteriores foram abordados os temas teóricos que são tratados nesta dissertação. Apesar das diferentes técnicas e métodos de produção de água disponíveis, foi escolhido como instrumento de estudo desta dissertação um equipamento de desumidificação por compressão de vapor de nível comercial, capaz de produzir água através da condensação de ar atmosférico.

Como visto anteriormente, existem diversas formas de obter água potável, quer seja a partir de fontes potáveis ou não potáveis. Obter água potável através de processos de compressão de vapor é um processo que não requer infraestruturas grandes nem cria desperdícios, pelo que poderá ser uma solução para a obtenção de água num futuro relativamente próximo, daí ter sido escolhido como objeto de estudo um desumidificador comercial capaz de produzir água usando este processo. Este desumidificador poderá ser uma solução para a produção de água potável numa pequena escala, pois não tem a capacidade de produzir água a uma escala industrial.

Neste capítulo será abordado a instalação experimental e todos os instrumentos que foram usados para testar a capacidade de produção de água do instrumento escolhido sob diversas condições, incluindo a descrição da unidade de produção de água, o sistema de ar condicionado que controla as condições do ar e desumidificar e a camara climática usada para isolar o desumidificador.

3.1. Introdução

Neste subcapítulo serão referidos todos os instrumentos usados durante o estudo experimental, de forma a dar uma melhor perceção da instalação que foi usada. Serão descritos o desumidificador usado, a unidade de ar condicionado, a camara climática e os equipamentos de medição usados.

3.1.1. Equipamento de desumidificação por compressão de vapor

Para o estudo experimental foi escolhido o desumidificador da empresa Trotec, modelo TTK 140 S, apresentado na figura 18, retirada do website da própria empresa.

Este sistema utiliza o princípio de compressão de vapor de forma a condensar o vapor de água presente no ar atmosférico, de modo a atingir o seu propósito, que é a desumidificação. Este processo começa pela entrada do ar no desumidificador, auxiliado por um ventilador. O ar húmido passa então pelo evaporador e depois pelo condensador, voltando a sair do desumidificador, desta vez mais quente e mais seco. Este processo foi descrito no capítulo anterior, mas de forma resumida, o ar é arrefecido até à sua temperatura de ponto de orvalho, no evaporador que se encontra a uma temperatura baixa. Ao arrefecer, o vapor de água condensa e é recolhido, enquanto que o restante ar continua até ao compressor, onde é aquecido e sai de novo para o exterior.

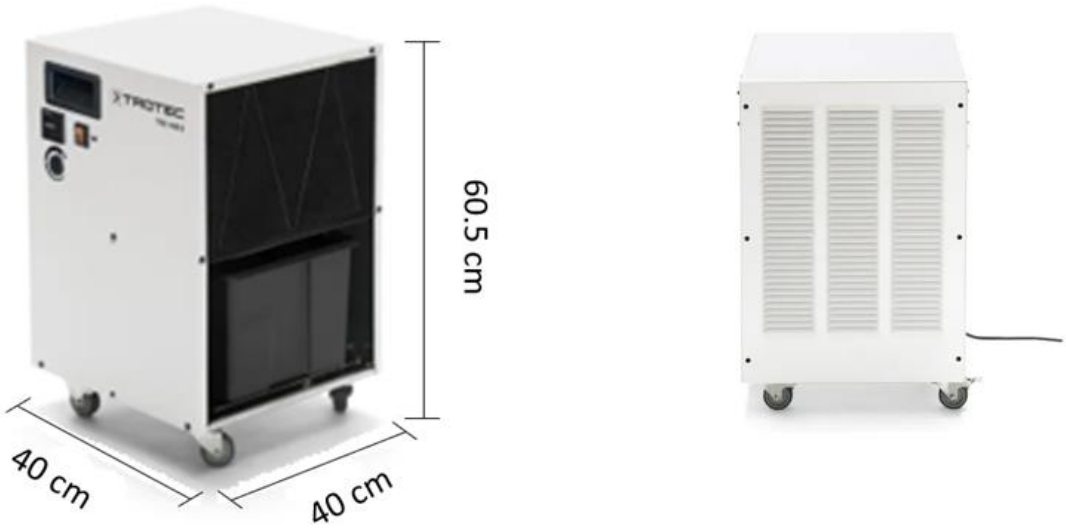

Figura 18 - Desumidificador TTK 140S, Trotec

De acordo com o fabricante, para uma temperatura média de 30°C e humidade relativa de 80%, o desumidificador produz 35 litros de água por dia, com um desempenho máximo de 40 litros por dia para condições ótimas, podendo funcionar com temperaturas entre os 5°C e os 32°C, e humidades relativas entre os 50% e os 90%, apesar de alguns ensaios efetuados serem com temperaturas e/ou humidades relativas fora desta gama.

Na tabela 1 encontram-se as especificações do equipamento, referida anteriormente, e mais algumas. A tabela e os valores foram retirados do *website* do fornecedor.

Tabela 1 - Especificações do desumidificador

Parâmetro	Valor
Capacidade de desumidificação (30°C & 80% HR)	35 L/dia
Máxima capacidade de desumidificação	40 L/dia
Fluxo de ar máximo	580 m^3/h
Condições ambientes de utilização (Temperatura)	5°C a 32°C
Condições ambientes de utilização (Humidade Relativa)	50% HR a 90% HR
Ligação á rede	220V/240V, 50Hz
Corrente nominal absorvida	2.7 A
Potência absorvida	0.6 kW
Fusível Recomendado	10 A
Refrigerante	R290
Carga de refrigerante	150 g
Reservatório de água	6 L
Dimensões	400x400x605

3.1.2. Unidade de ar condicionado

Como referido anteriormente, as condições do ar foram estabelecidas com a ajudar de uma unidade de ar condicionado que insuflava ar para dentro de uma camara climática. Para tal efeito, a camara climática usada foi a Air Conditioning Laboratory Unit A573, do fabricante P.A. Hilton Ltd, representada na figura 19.

Através da ajuda desta unidade de ar condicionado, era possível manter a temperatura e humidade da camara climática nos valores pretendidos para o estudo. Para tal, a unidade possui vários parâmetros, capazes de regular estas condições. Para a temperatura do ar, a unidade possui 4 resistências de 1 kW cada, de forma a ajustar melhor as temperaturas. Estas resistências dividem-se em dois, uma para pré aquecimento e outra para pós aquecimento, tendo sido apenas usado as resistências de pré aquecimento. Destas duas resistências, uma delas era regulada por um controlador de temperatura que ajustava automaticamente, de forma a manter a temperatura do ar a insuflar fixa. O controlador de temperatura usado foi o Digi-Sense Temperature Controller, modelo 89000-15 fabricado pela Antylia Scientific, representado na figura 21.

Figura 19 - Unidade de ar condicionado usada

Para regular a humidade relativa, inicialmente foram testados vários sistemas para aumentar a humidade do ar, incluindo um sistema de calha que humidificava um cartão tipo colmeia, pelo qual o ar passava antes de entrar na unidade de ar condicionado. No entanto, para testar humidades relativas elevadas, este sistema revelou-se não ser suficiente e, portanto, foi adotado o uso da caldeira equipada na unidade de ar condicionado, representada na figura 22. Esta estava cheia de água e possuía 3 resistências, uma de 1 kW fixo, uma de 2 kW fixo e uma de 2 kW reguláveis, de forma a ser possível controlar qual a quantidade de vapor produzido com o objetivo de aumentar a humidade relativa do ar. A figura 20 representa o esquema da unidade utilizada neste estudo.

A insuflação do ar até à camara climática era feita através de tubos de alumínio, totalmente isolados com lã de vidro, de forma a não haver interferência das condições exteriores. A unidade de ar condicionado possuía ainda um sistema de arrefecimento, mas este não foi usado, pois não foram testados neste estudo temperaturas baixas.

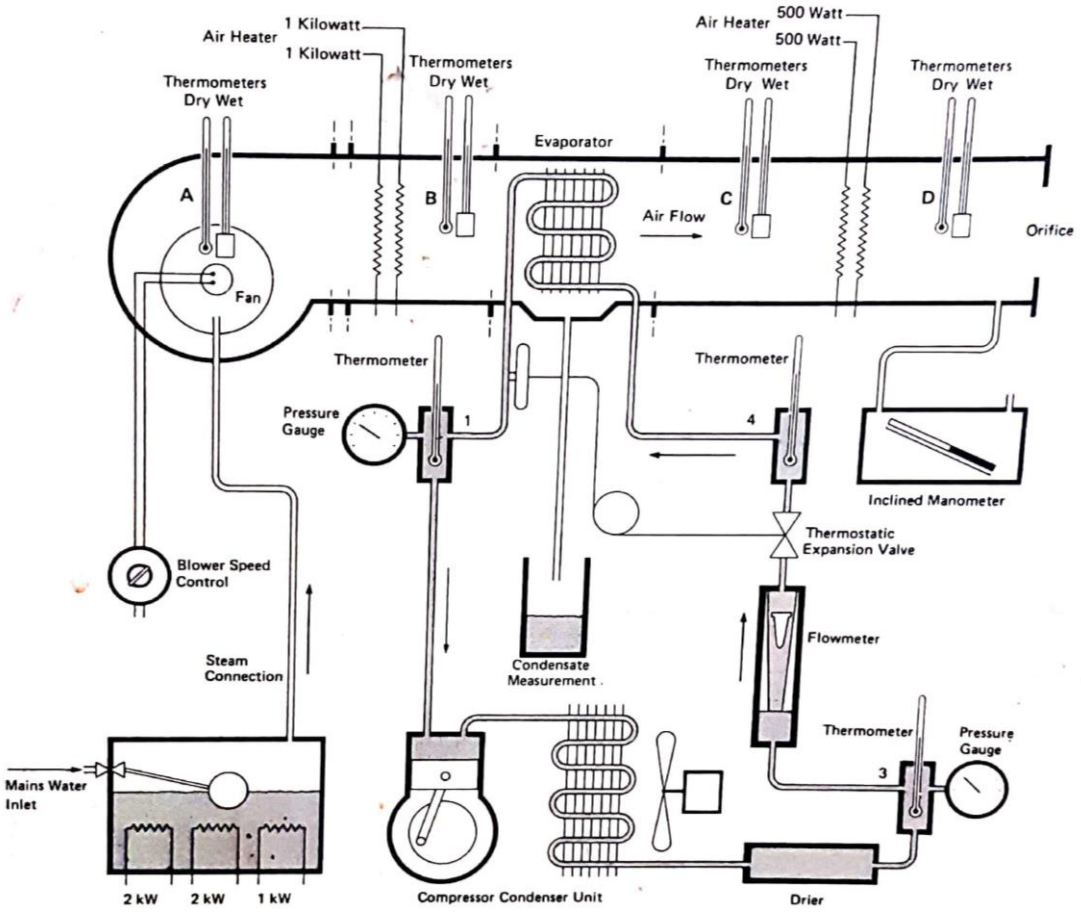

Figura 20 - Esquema da unidade de ar condicionado

Figura 21 - Controlador de Temperatura

Figura 22 - Caldeira e sistema de humidificação da unidade de ar condicionado

3.1.3. Câmara Climática

De forma a isolar o desumidificador de condições externas que não podiam ser controladas, foi utilizada uma camara climática, ilustrada na figura 23. A camara originalmente era formada por 2 camaras que, quando juntas, formam uma camara completamente fechada. Contudo, para este ensaio foi apenas usada uma das partes, fechada com um material na entrada.

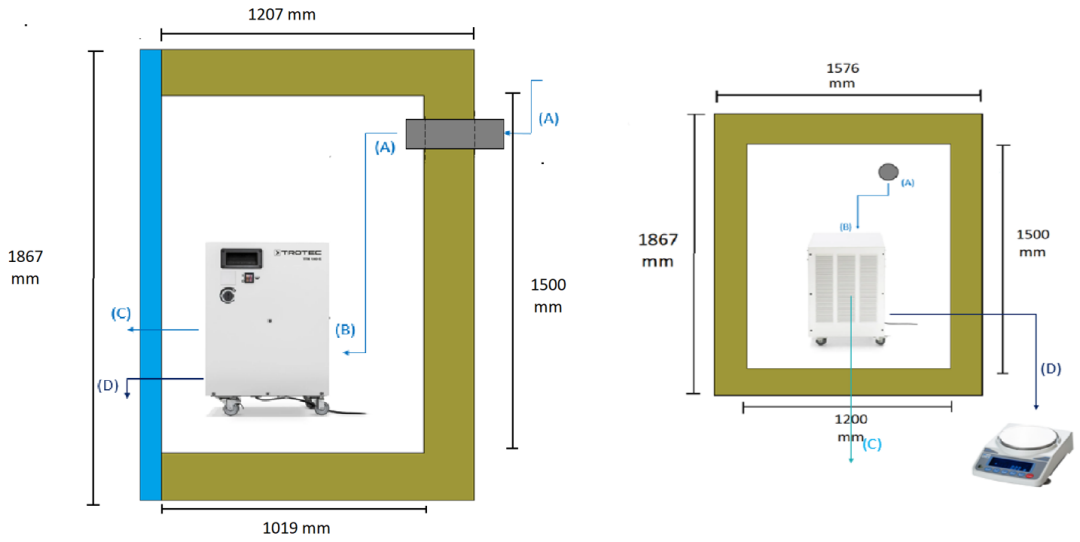

Figura 23 - Dimensões da câmara climática usada

A camara foi construída com placas de MDF hidrófugo e de poliestireno extrudido, de espessuras 19 e 50 mm respetivamente. Na parte traseira encontram-se dois furos, um deles destinado à entrada do tubo para insuflação, o outro destinado para um tubo para escoar o ar da camara. A "porta" da camara, recortada em *roofmate*, possui vários orifícios, destinados à ventilação do desumidificador, à entrada dos higrómetros que irão medir as condições dentro da camara, e à saída de tubos do desumidificador, sendo eles o cabo que ligam o desumidificador à eletricidade e um tubo destinado ao escoamento da água produzida até uma balança para efeitos de medição da quantidade de água produzida.

Na figura 24 está representado o esquema que explica o processo pelo qual o ar passa durante todo o processo de condensação. Inicialmente, o ar presente na atmosfera, (1) é humidificado com a ajuda do vapor produzido na caldeira e entra dentro da unidade de ar condicionado (2). Aqui, são estabelecidas as condições psicrométricas de cada ensaio, regulando as resistências de forma a manter uma temperatura e humidade relativa estáveis. O ar segue de seguida para a camara climática, (3) na qual se encontra a unidade de

desumidificação. Com a ajuda do ventilador incorporado no desumidificador, o ar entra dentro deste, (4). Dentro do desumidificador, ocorre todo o processo de condensação explicado nos capítulos anteriores, do qual surgem dois produtos: o ar seco que escapa de novo para a atmosfera através das grelhas de ventilação do desumidificador, (5), e a água resultante da condensação que escorre por um tubo que liga o desumidificador à balança, (6), responsável pela medição da quantidade de água produzida.

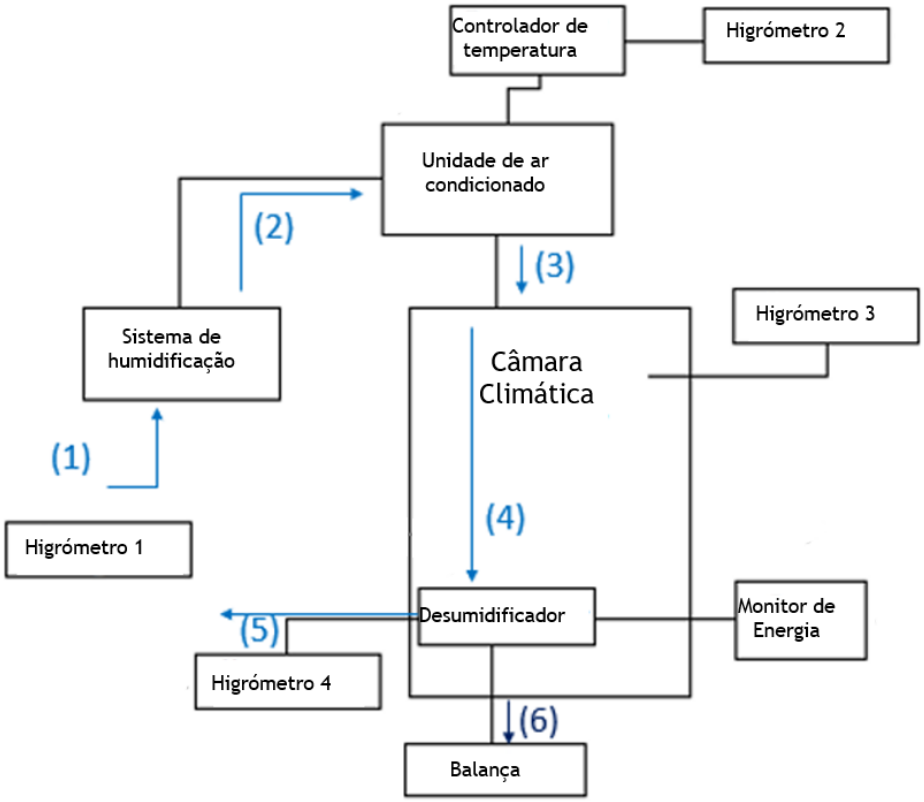

Figura 24 - Esquema da instalação experimental

3.1.4. Ensaios e Equipamentos de medição

De forma a conseguir obter resultados coerentes e fazer um estudo preciso do funcionamento do desumidificador, todos os ensaios seguiram o mesmo formato, de forma a ser possível replicar cada um deles e mudar apenas as condições sob as quais cada ensaio ocorria.

Para assegurar uma temperatura estável dentro da camara climática, para além do uso do controlador de temperatura, o ensaio começava apenas quando as condições na camara

eram estáveis, havendo sempre um período de climatização entre o processo de ligar os equipamentos todos e o início das medições das condições, garantindo assim que as condições seriam estáveis durante o ensaio.

Cada um dos ensaios tinha a duração de 5 horas, com medições efetuadas da energia gasta e água produzida, de quinze em quinze minutos, levando então a um total de vinte valores para cada ensaio. A duração dos ensaios permitiu a obtenção de uma boa gama de valores para comparação entre cada um.

Durante cada um dos ensaios foram efetuadas diversas medições a diferentes parâmetros. Um dos focos principais da dissertação é o desempenho energético do desumidificador, portanto, de forma a perceber avaliar este, foi medida a energia consumida pelo desumidificador durante o ensaio. Para este efeito foi usado um kit medidor de consumo energético, produzido pela Efergy, que consistia num transmissor de energia ligado à fonte de alimentação do desumidificador e num monitor que apresentava o consumo de energia instantânea, comunicando este dois via Bluetooth. Tanto o monitor como o transmissor encontram-se na representados na figura 25.

Juntamente com o desempenho energético do desumidificador, o objetivo desta dissertação é também avaliar a capacidade de produção de água, sendo esta medida, usando uma balança, produzido pela empresa A&D Ltd., modelo FZ-300i, representada na Figura 26. Tanto o valor de água produzida, como o valor de consumo de energia instantânea eram medidos de quinze em quinze minutos.

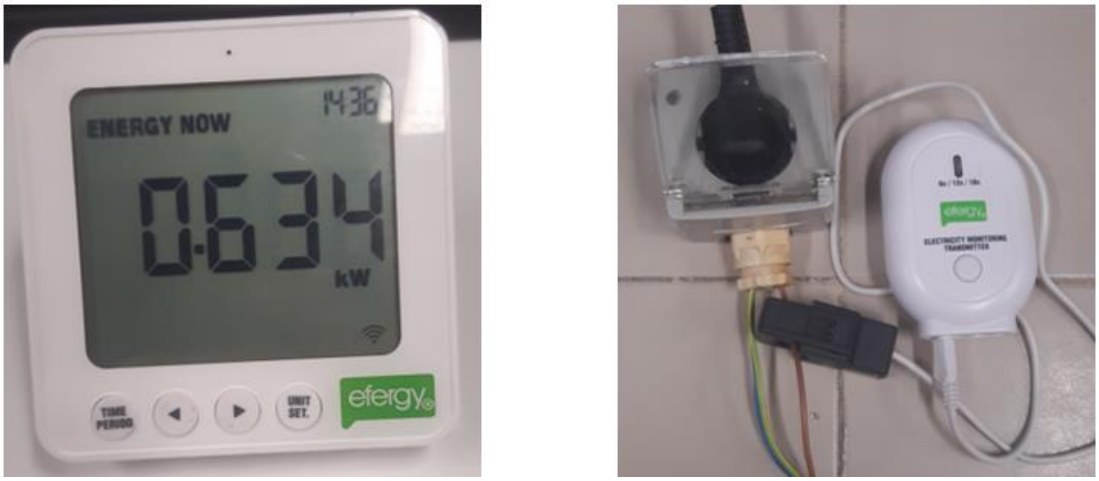

Figura 25 - Transmissor e monitor de energia

Figura 26 - Balança usada durante os ensaios

De forma a testar diversas condições de funcionamento do desumidificador, foram medidas também as condições psicrométricas do ar, em instantes diferentes, usando higrómetros. Foram usados dois tipos de higrómetros, dois deles fabricados pela Lascar Electronics,

modelo Easy-Log USB versão 6.1.0.0, usados para medir as condições no interior da câmara e à saída das grelhas de ventilação do desumidificador, medindo valores de 5 em 5 minutos durante todo o ensaio, representados na figura 27. Os dados eram retirados ligando os higrómetros a um computador e usando um software, fornecido pelo fabricante, capaz de ler e extrair os dados obtidos. O primeiro higrómetro da figura 27 encontra-se ligado a um tubo de plástico que facilitava a colocação do higrómetro dentro da camara través de um orifício da dimensão do tubo, sendo assim possível medir as condições dentro da camara.

Os outros dois higrómetros, fabricados pela Rotronic, representados figura 28, eram mais precisos, fazendo medições de trinta em trinta segundos, medindo as condições de insuflação do ar e as condições atmosféricas. Na figura 28, o segundo higrómetro não está visível pois encontrava-se dentro da unidade de ar condicionado, de forma a medir as condições do ar à saída desta, condições que eram as de insuflação. Estes higrómetros estavam ligados a um outro aparelho, o Rotronic HydroLog, representado na figura 29, responsável pelo armazenamento dos dados, que eram depois retirados através de um software, fornecido pelo fabricante, para um computador.

Como para qualquer instrumento de medição, existem erros e incertezas nas medições. Na tabela 2 são apresentados as precisões e alcances de todos os equipamentos de medição usados durante os ensaios.

Figura 27 - Higrómetros da Lascar Eletronics

Figura 28 - Higrómetros da Rotronic

Figura 29 - Rotronic HydroLog

Tabela 2 - Alcance e precisão dos aparelhos de medição

Aparelho	Parâmetros	Alcance	Precisão
Higrómetro 1 e 2	Temperatura	-10°C to 50°C	± 0.3K
Rotronic HydroLog	Humidade Relativa	0% to 100%	± 0.8%
Higrómetro 3 e 4	Temperatura	0°C to 50°C	± 0.5°C
Easy Log	Humidade Relativa	20% to 80%	± 0.5 %
Balança A&D FZ300i	Peso	0g to 3200g	± 0.02g
Efergy E2	Voltagem Corrente Frequência	110V to 400V 50mA to 95A 433 MHz	>90%

3.1.5. Estudo de Localizações

Para além do estudo do desempenho energético e capacidade de produção de água do desumidificador, esta dissertação aborda a capacidade de produção de água em localizações diferentes, apresentando assim uma vista mais prática do funcionamento deste desumidificador como fonte de água. Desta forma, são apresentadas três localizações diferentes, sendo elas Lisboa, Pretoria e Riyadh, todas elas com condições diferentes. Estas localizações foram escolhidas com base em estudos prévios realizados em regiões

semelhantes, com o objetivo de simular as mesmas condições obtidas nos estudos efetuados por Gido, Friedler & Broday, (2016b) e por Lebre *et al.*, 2021).

As três cidades em estudo estão todas localizadas no Hemisfério Norte, portanto a 15 de janeiro e 15 de julho encontram-se no inverno e no verão respetivamente, sendo estes dois dias, os dias considerados base para as estações. As figuras 30 e 31, ilustram a humidade relativa e a temperatura para 15 de janeiro enquanto que as figuras 32 e 33 ilustram a humidade relativa e a temperatura para 15 de julho. Pela análise das quatro figuras, é possível concluir que, para 15 de janeiro, a localização mais quente é Pretoria enquanto que a mais fria é Lisboa, e que a mais húmida é Lisboa enquanto que a mais seca é Riyadh. Para 15 de julho, a cidade mais quente é Riyadh, enquanto que Pretoria é a mais fria, mantendo-se Lisboa e Riyadh como as cidades mais húmidas e secas respetivamente.

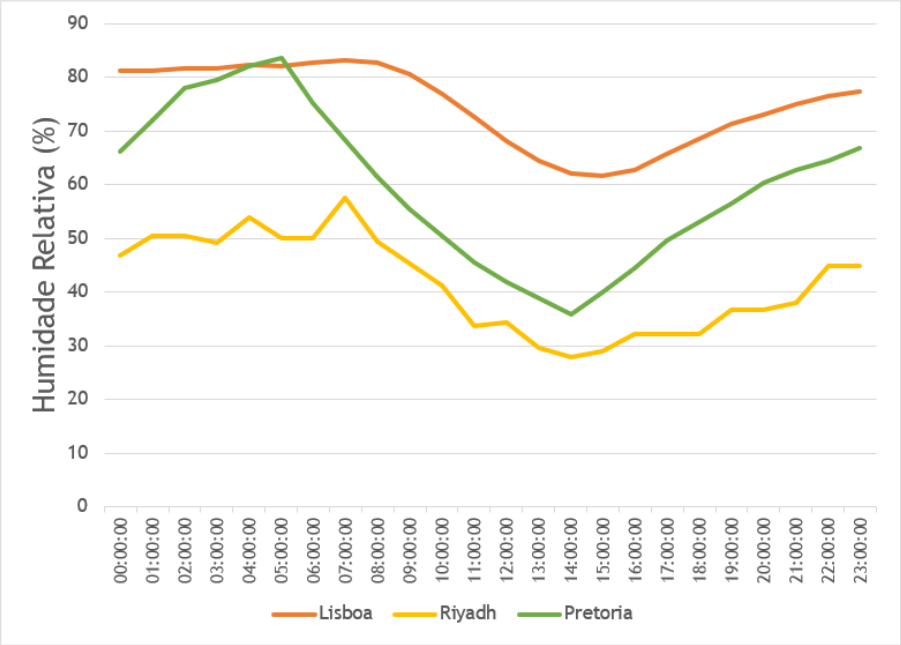

Figura 30 - Humidade Relativa para 15 de janeiro

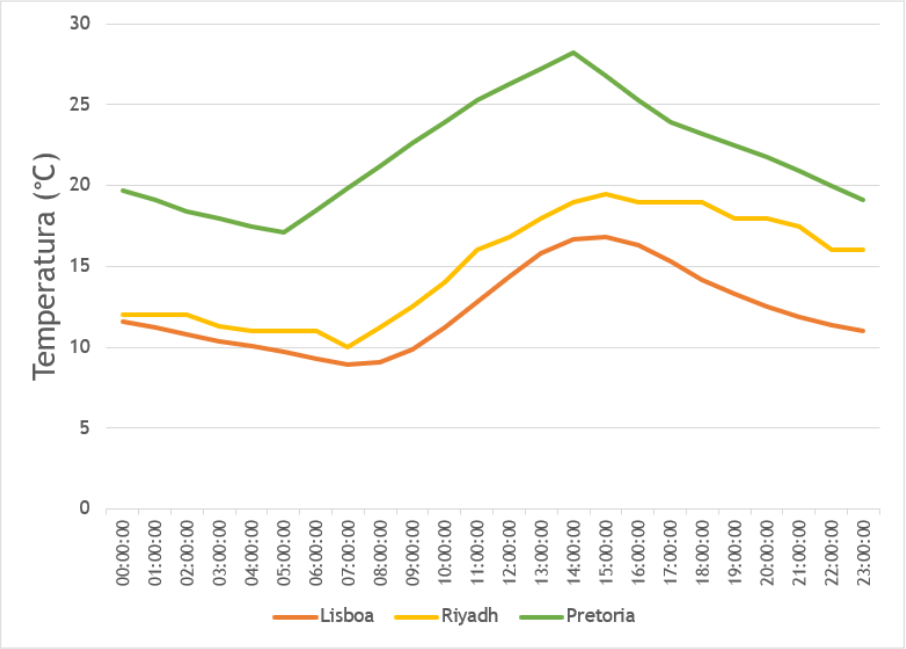

Figura 31 - Temperatura para 15 de janeiro

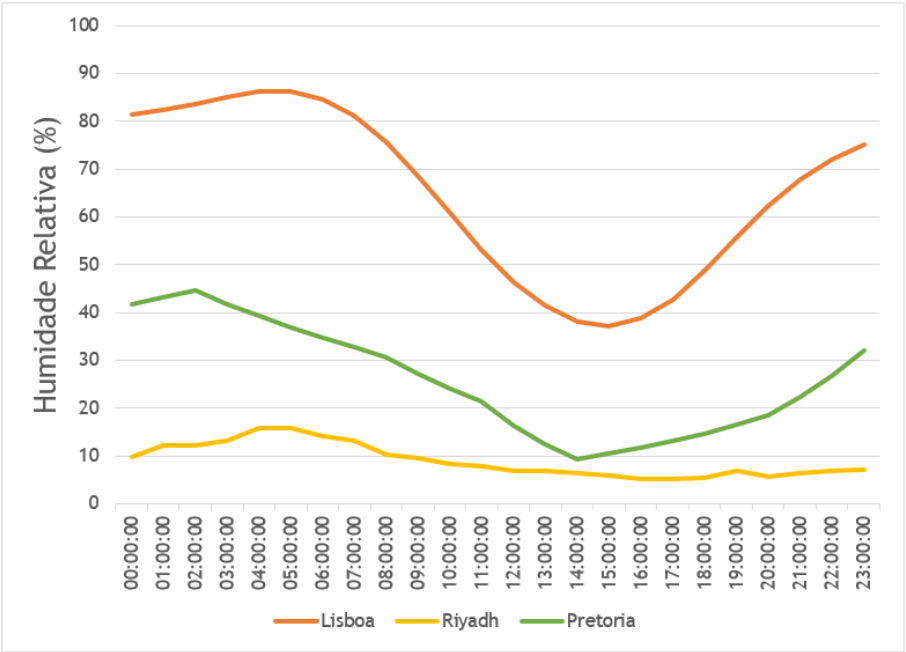

Figura 32 - Humidade Relativa para 15 de julho

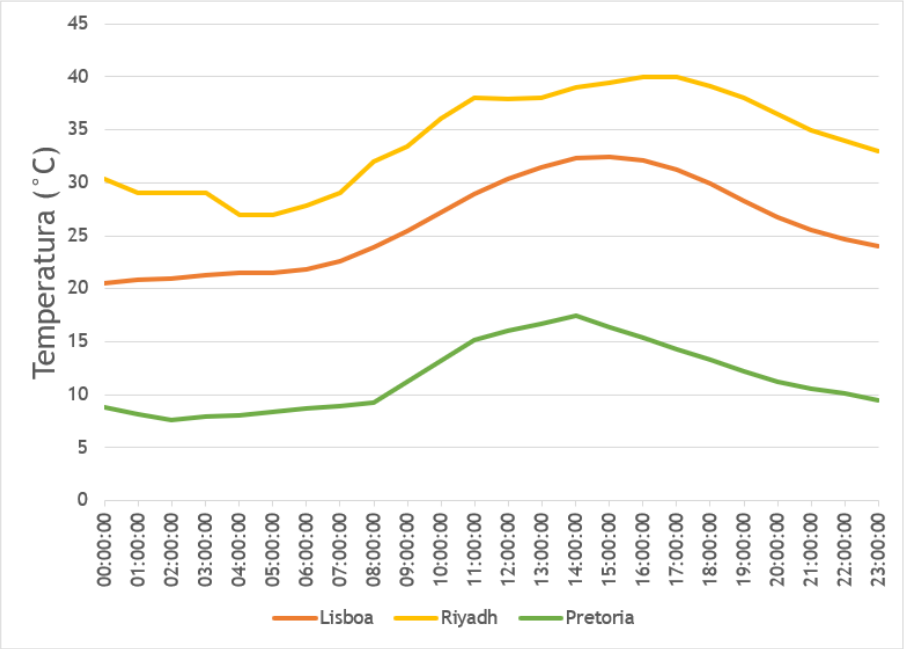

Figura 33 . Temperatura para 15 de julho

3.1.6. Estudo Fotovoltaico

Como mencionado anteriormente, o estudo incide em três cidades diferentes, todas elas com condições diferentes de humidade e temperatura. Não só estas condições diferem, mas a radiação solar também varia entre elas. É necessário avaliar esta condição também, pois, sendo um dos objetivos a avaliação da possibilidade de juntar o desumidificador com um painel, funcionando este como fonte de energia independente, a produção de energia do painel está diretamente relacionada com a radiação solar em cada localização. Usando o website do PVGIS, é possível retirar a informação mostradas figura 34 e na figura 35, representado estas a radiação solar para cada uma das cidades ao longo do dia 15 de janeiro e 15 julho, respetivamente.

De forma a avaliar qual o clima , e, por sua vez, a cidade, mais adequado para uma produção mais eficiente de água usando o desumidificador em estudo, foi avaliado a área mínima necessária para produzir 1 litro de água por dia. Para tal procurou-se um módulo fotovoltaico atualmente disponível no mercado, tendo sido selecionado o módulo HTM 550H5-72 da Haitai Solar, cujas especificações estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Especificações do módulo HTM 550H5-72 da Haitai Solar

Parâmetros	Valor
Potência Pico (W)	550
Tensão de Curto Circuito (V)	49.83
Corrente de Curto Circuito (A)	13.80
Tensão Pico (Vmp/V)	41.31
Corrente Pico (A)	13.32
Eficiência do Módulo (%)	21.29
Temperatura de Operação	-40° C até +85° C
Tensão Máxima do Sistema	1000/1500V
Tipo de Célula	182 X 91mm Mono
Número de Células Fotovoltaicas	144 (6x24)
Dimensões do módulo	2278 X 1134 X 35 mm
Peso	28 kg

Para iniciar este cálculo, multiplicamos a radiação diária média do local, representada na equação 8 por $I_{méd}$ expressa em kWh/m^2, conforme dado pelo PVGIS, pela potência pico do painel, representado na equação 8 por P_p (550 Wp para o modelo escolhido) e por 0,8, valor definido para o rendimento do sistema. Usando o exemplo de janeiro para a cidade de Lisboa, temos, para a energia produzia representada por E_{prod} :

$$E_{prod} = I_{méd} * P_p * 0{,}8 = 3{,}81 * 0{,}55 * 0{,}8 = 1.68\ kWh \qquad \text{(Equação 8)}$$

Ao dividir o valor obtido na da energia produzida por 1 painel, pelo valor da energia necessária para produzir 1 litro de água, representado por E_{nec} na Equação 9, expresso também em kWh, é possível determinar o número necessário de painéis fotovoltaicos, para produzir 1 litro de água por dia, representado na Equação 9 por N_{MFV}, que não tem unidade definida, pois é apenas expresso por um numero, referente ao número mínimo de painéis necessários para produzir 1 litro de água por dia. Mantendo o exemplo anterior, temos que o número mínimo de painéis fotovoltaicos para produzir 1 litro de água por dia em janeiro, para Lisboa é dado por:

$$N_{MFV} = \frac{E_{nec}}{E_{prod}} = \frac{1{,}97}{1{,}68} = 1{,}17\ painéis \qquad \text{(Equação 9)}$$

Este valor obtido, ao ser multiplicado pelo valor da área do painel fotovoltaico, representado na EQUAÇÃO 10 por , A_{MFV}, que tem o valor de, aproximadamente, 2,58 m^2, resulta na área total de painel fotovoltaico necessário para produzir 1 litro de água num período de 24

horas, representada na Equação 10 por A_{nec}, expressa em m^2. Mantendo o exemplo anterior, temos que, para Lisboa no mês de janeiro, a área mínima para produzir 1 litro de água por dia é dada por:

$$A_{nec} = N_{MFV} * A_{MFV} = 1.17 * 2.58 = 3.02\ m^2 \quad \text{(Equação 10)}$$

Os cálculos foram realizados usando os valores médios de radiação para cada mês em todas as três localizações e os resultados apresentados no capítulo seguinte.

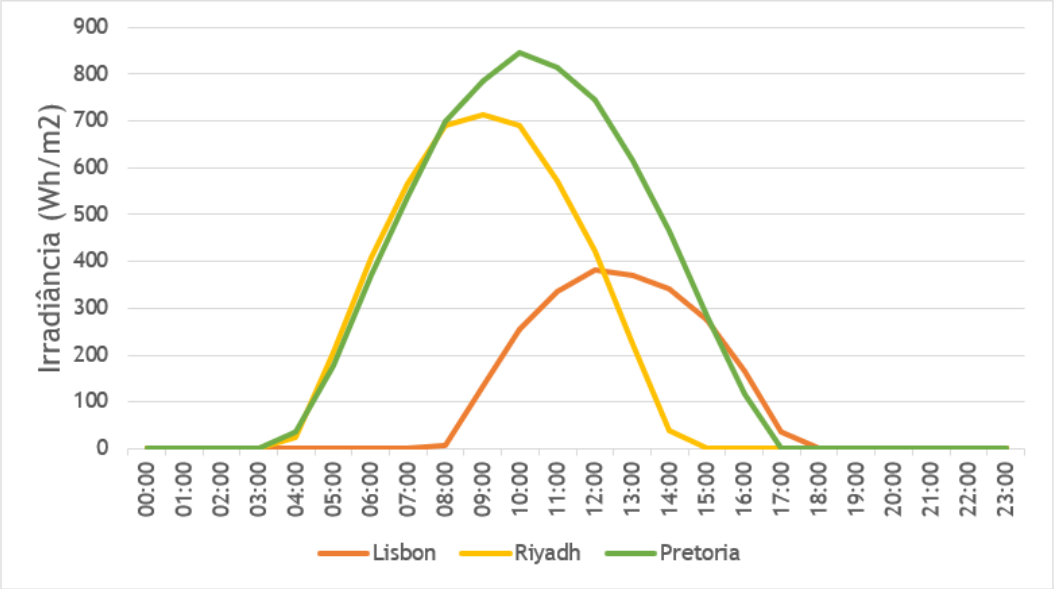

Figura 34 - Irradiância média para 15 de janeiro

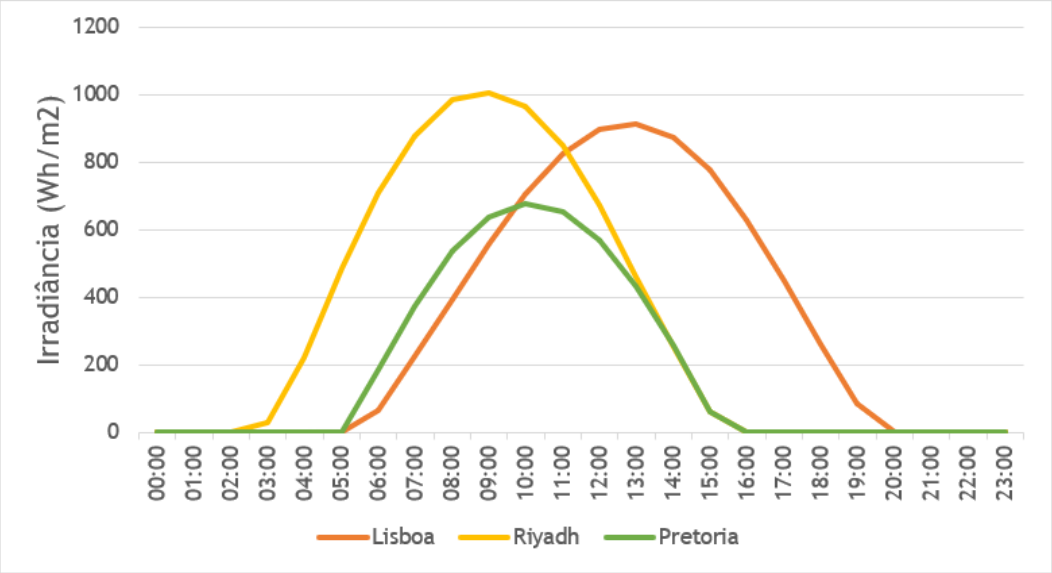

Figura 35 - Irrandiancia média para 15 de julho

4. Análise e discussão de resultados

Para ser possível avaliar o desempenho do desumidificador em estudo, é necessário recolher valores que descrevam, da melhor forma possível, o desempenho deste sob diversas condições de operação, sendo as principais variáveis a levar em conta a humidade relativa e a temperatura.

No capítulo seguinte é descrito o processo experimental efetuado para todos os ensaios, tendo sido seguido sempre o mesmo modelo, de forma a ser possível replicar o método de ensaio para ensaio, assegurando assim que as varáveis que se alteravam de ensaio para ensaio eram apenas a humidade relativa e a temperatura sob as quais o desumidificador operava.

São também apresentados os resultados dos ensaios, juntamente com a análise destes, usando por base, maioritariamente gráficos e tabelas.

4.1. Procedimento experimental

De forma a replicar os ensaios o mais precisamente possível, foram todos efetuados segundo o mesmo modelo.

Inicialmente, eram ligados todos os aparelhos de controlo de temperatura e humidade relativa, sendo ligadas as resistências da caldeira para produzir vapor, as resistências da máquina de ar condicionado e o controlador de temperatura para controlar a temperatura de insuflação e também o desumidificador. Eram também ligados todos os aparelhos de medição, apesar dos valores não serem registados até às condições dentro da camara serem estáveis.

Durante a primeira hora do ensaio, os valores registados pelos higrómetros e pelo medidor de energia não eram ainda apontados, visto que as condições não eram sempre estáveis. O desumidificador durante esta hora, para valores mais elevados de temperatura e/ou humidade também era capaz de produzir alguma água, mas, tal como as outras medições, ainda não era registada.

A primeira hora do ensaio tinha como objetivo regular as resistências de forma a manter as condições de insuflação do ar fossem constantes. Os valores usados para a humidade relativa foram de 40%, 50%, 60% e 70%, enquanto que a temperatura variou entre 22 °C, 25 °C, 27 °C, 30 °C, 32 °C, e 35 °C. De acordo com o fabricante, a faixa de temperatura para operação ideal é de 5 °C a 32 °C, enquanto a faixa de umidade relativa do ar é de 50% a 90%. Apesar de alguns testes terem sido realizados em condições fora desta gama de valores, como nos testes 1 a 5 mostrados no próximo subcapítulo, o desumidificador ainda produziu água.

Os ensaios decorriam durante cinco horas, de forma a ser possível registar um número de valores que fosse possível comparar, e ser possível registar um longo período, durante o qual as condições do ar dentro da camara não variassem muito.

4.2. Ensaios realizados

Como referido anteriormente, o objetivo principal deste estudo foi avaliar o desempenho de produção de água do desumidificador Trotec TTK 140S sob condições variáveis e determinar sua compatibilidade com um sistema fotovoltaico como fonte de energia independente. Este estudo envolveu investigar a quantidade de água produzida dentro de um determinado período, e o consumo de energia correspondente. A tabela 4 apresenta os resultados dos testes obtidos com o desumidificador em condições climáticas variáveis.

Com base nos resultados apresentados na tabela 4, foram construídos gráficos com a produção de água para a mesma temperatura e humidades relativas diferentes, para a mesma humidade relativa e temperaturas diferentes. Foram construídos o mesmo tipo de gráficos também para o consumo de energia e para o consumo específico de energia, de forma a uma mais fácil compreensão da influência das condições no desempenho do desumidificador. A figura 36 representa os gráficos construídos para a produção de água para valores de humidade relativa iguais e temperaturas diferentes, a figura 37 representa os gráficos construídos para a produção de água para valores de temperaturas iguais e humidades relativas diferentes, a figura 38 representa os gráficos construídos para o consumo de energia e consumo específico de energia para valores de humidade relativa iguais e temperaturas diferentes e, por último, a figura 39 representa os gráficos construídos para o consumo de energia e o consumo específico de energia para valores de temperaturas iguais e humidades relativas diferentes.

Tabela 4 - Resultado dos ensaios

Número do Ensaio	Temperatura (°C)	Humidade Relativa (%)	Produção de água (L/h)	Consumo de Energia (kWh)	Consumo Específico de Energia (Wh/L)
1	35	40	0,41	3,41	1,78
2	35	50	0,6	3,5	1,17
3	35	60	0,86	3,6	0,84
4	35	70	1,01	3,68	0,73
5	32	40	0,29	3,33	2,31
6	32	50	0,51	3,44	1,34
7	32	60	0,76	3,49	0,91
8	32	70	0,97	3,64	0,75
9	30	40	0,28	3,29	2,34
10	30	50	0,5	3,36	1,34
11	30	60	0,75	3,43	0,92
12	30	70	0,91	3,51	0,77
13	27	40	0,24	3,24	2,73
14	27	50	0,48	3,27	1,36
15	27	60	0,69	3,35	0,96
16	27	70	0,85	3,37	0,79
17	25	40	0,23	3,23	2,79
18	25	50	0,38	3,29	1,71
19	25	60	0,57	3,25	1,15
20	25	70	0,71	3,29	0,93
21	22	40	0,14	3,11	4,40
22	22	50	0,3	3,22	2,14
23	22	60	0,43	3,24	1,51
24	22	70	0,58	3,27	1,13

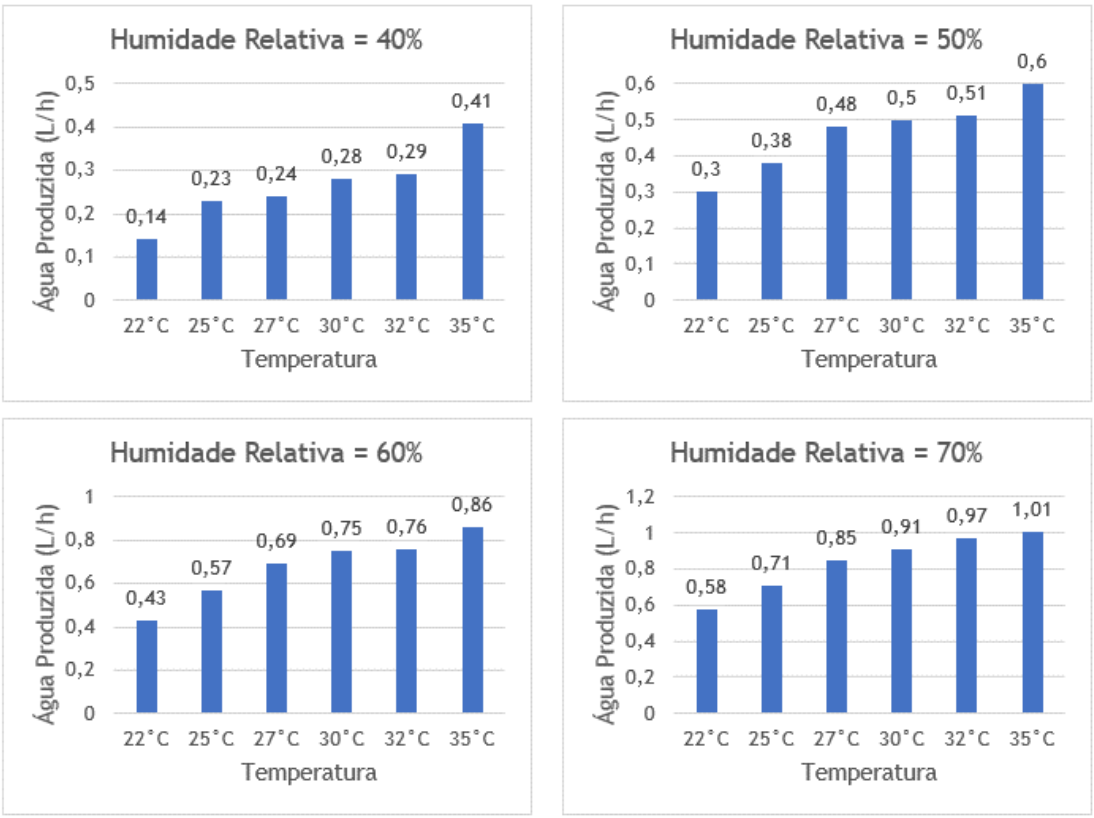

Figura 36 - Produção de água para o mesmo valor de humidade relativa e temperaturas diferentes

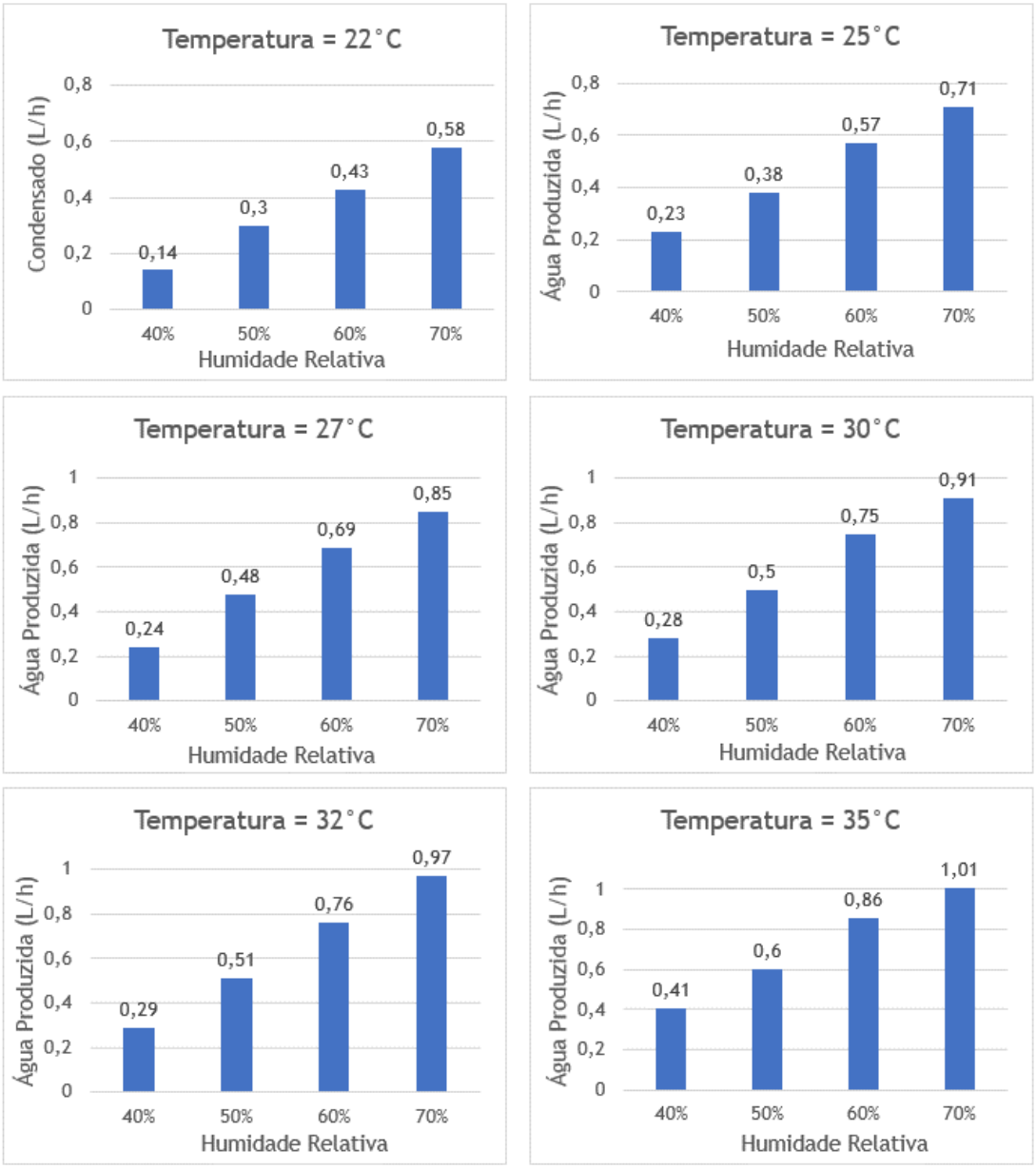

Figura 37 - Produção de água para o mesmo valor de temperatura e humidades relativas diferentes

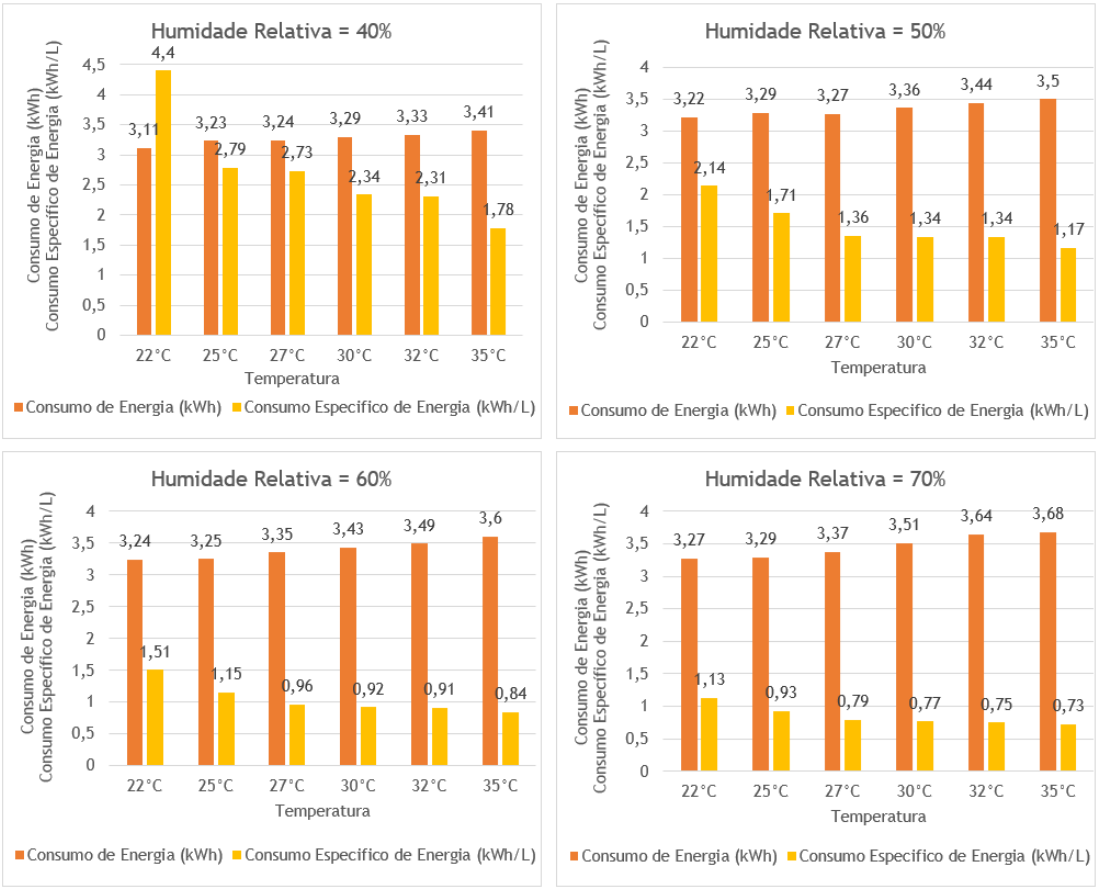

Figura 38 - Consumo de energia no periodo completo do ensaio e Consumo Específico de energia para o mesmo valor de humidade relativa e temperaturas diferentes

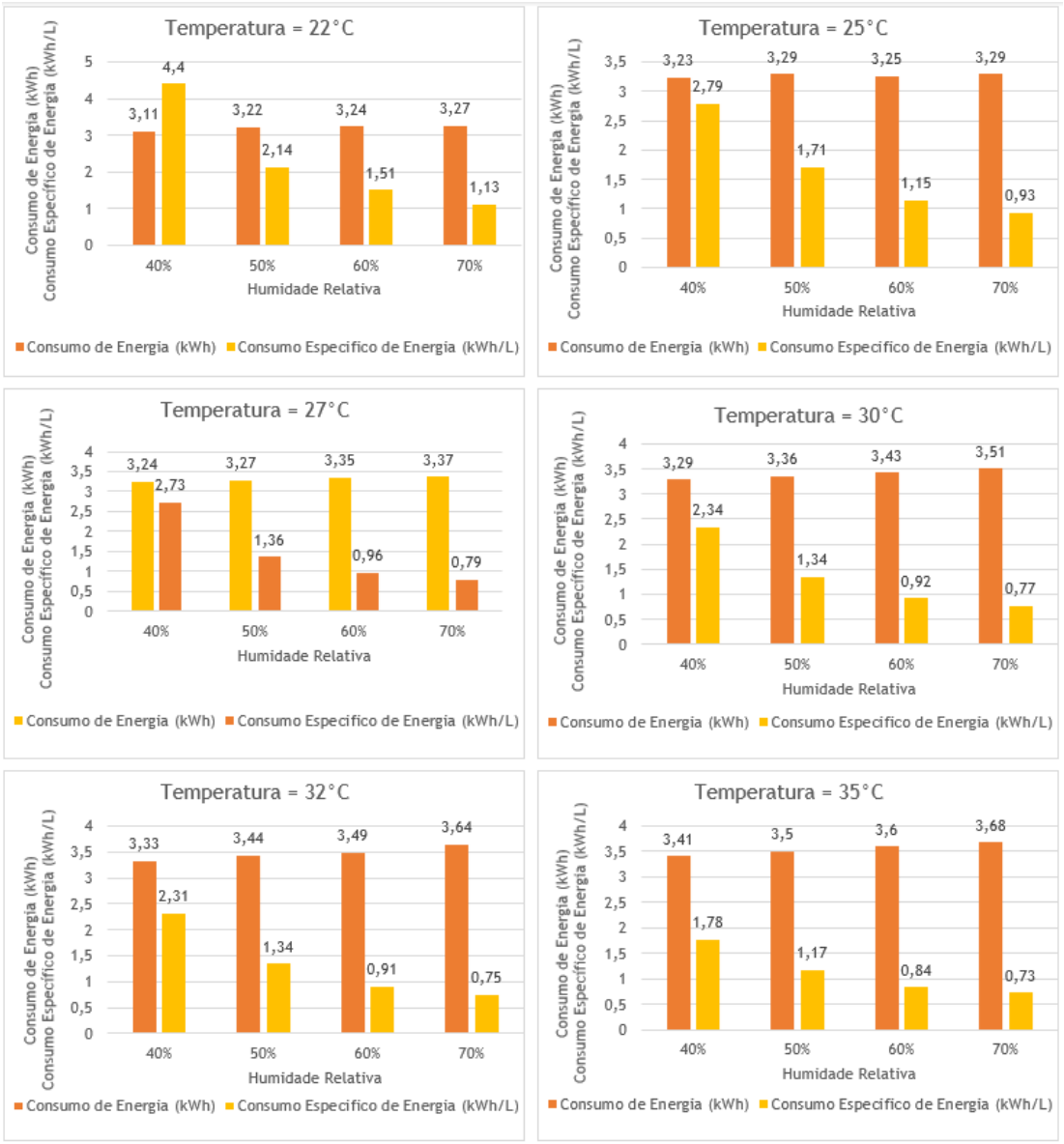

Figura 39 - Consumo de energia no periodo completo do ensaio e Consumo Específico de energia para o mesmo valor de temperatura e humidades relativas diferentes

4.3. Análise de Resultados Experimentais

Neste subcapítulo serão analisados os resultados experimentais com base nos gráficos anteriores e nos resultados da tabela 4. Para uma melhor perceção do funcionamento do desumidificador, foram também construídas curvas de funcionamento que representam a quantidade de água produzida e a quantidade de energia gasta consoante a temperatura e humidade relativa durante a operação.

Esta curva ajudará na previsão da quantidade de água e quantidade de energia consumida pelo desumidificador numa determinada zona, caso sejam conhecidas as condições atmosféricas médias dessa zona. Estas curvas serão importantes na avaliação de qual das cidades mencionadas anteriormente será a melhor localização para a produção de água usando este desumidificador.

4.3.1. Produção de água

Ao comparar as quantidades de água produzida pelo sistema à mesma humidade relativa, como mostrado nos gráficos da figura 36, pode ser observado que, para valores de temperatura mais elevados, a produção de água aumenta. Isto acontece devido ao facto de que, para o mesmo valor de humidade relativa, o conteúdo de vapor de água no ar aumenta com o aumento do valor da temperatura. Analisando os gráficos um a um, podemos concluir que, para 40%, a produção de água aumentou 193%, quando é feita a comparação entre os 22 °C e 35 °C. Da mesma forma, para 50%, a produção de água aumentou 100%, para 60% aumentou 100%, e, por último, para 70% aumentou 74%.

Ao comparar as quantidades de água produzida pelo sistema à mesma temperatura, como mostrado nos gráficos da figura 37, pode ser observado que, para valores de humidade relativa mais elevados, a produção de água aumenta. Isto acontece devido ao facto de que, para a mesma temperatura, o conteúdo de vapor de água no ar aumenta com o aumento do valor da humidade relativa. Analisando os gráficos um a um, podemos concluir que, para 22 °C, a produção de água aumentou 314%, quando é feita a comparação entre 40% e 70% de humidade relativa. Da mesma forma, para 25 °C, a produção de água aumentou 209%, para 27 °C aumentou 254%, para 30 °C aumentou 225%, para 32 °C aumentou 234% e, por último, para 35 °C aumentou 146%.

4.3.2. Consumo de Energia e Consumo Específico de Energia

Para determinar as condições ideais de funcionamento para o desumidificador em estudo, é insuficiente comparar o consumo específico de energia, visto que este pode variar tanto com a temperatura como com a humidade relativa. Portanto, é necessário comparar tanto o consumo de energia como o consumo específico de energia, especificamente a quantidade de energia necessária para produzir um litro de produção de água.

Analisando os resultados de consumo de energia para a mesma humidade relativa, representado nos gráficos da figura 38, o sistema exigiu mais energia à medida que a temperatura aumentou, embora a diferença não tenha sido muito significativa. O consumo

de energia aumentou apenas 13% para a humidade relativa de 70% quando a temperatura variou de 22 °C para 35 °C. O aumento no consumo de energia também foi igualmente baixo para os outros valores de humidade relativa, com um aumento de 11% para 60% de humidade relativa, 9% para 50% de humidade relativa e, por último, 10% para 40% de humidade relativa.

Apesar do aumento no consumo de energia, o aumento na produção de água foi significativamente maior, resultando assim num menor consumo específico de energia para valores de temperatura mais elevados à mesma temperatura. Por exemplo, para 70% de humidade relativa, o consumo específico de energia diminuiu 54% quando a temperatura subiu de 22 °C para 35 °C. A diminuição foi ainda mais significativa para os outros valores de humidade relativa, com uma redução de 80% para o valor de 60% de humidade relativa, 83% para o valor de 50% de humidade relativa e 147% para o valor de 40% de humidade relativa.

Assim, a redução no consumo específico de energia resultou numa diminuição no custo de energia por litro de água produzida, e a viabilidade econômica do desumidificador como fonte de produção de água aumentou com o aumento da temperatura.

Analisando os resultados de consumo de energia para a mesma temperatura, representado nos gráficos da figura 39, o sistema exigiu mais energia à medida que a humidade relativa aumentou, embora, tal como visto anteriormente a diferença não tenha sido significativa. Comparando os gráficos um a um, quando a humidade relativa aumentou de 40% para 70%, para 22 °C, o consumo de energia aumentou apenas 5%. Para as restantes temperaturas, o aumento no consumo de energia foi igualmente baixo, aumentando 2% a 25 °C, 4% a 27 °C, 7% a 30 °C, 9% a 32 °C e, finalmente, 8% a 35 °C.

Tal como anteriormente, apesar do aumento no consumo de energia, o aumento na produção de água foi significativamente maior, resultando assim num menor consumo específico de energia para valores de humidade relativa mais elevados à mesma temperatura. Por exemplo, a 22 °C, o consumo específico de energia diminuiu em 289% quando a humidade relativa aumentou de 40% para 70%. Para as restantes temperaturas, o consumo específico de energia diminuiu em 200% a 25 °C, 246% a 27 °C, 204% a 30 °C, 208% a 32 °C e, finalmente, em 144% a 35 °C.

Para ambos os casos, a redução do consumo específico de energia leva a uma diminuição no custo de energia necessário para produzir um litro de água, ou seja, a viabilidade económica de utilizar o desumidificador para a produção de água aumenta.

4.3.3. Comparação com trabalhos anteriores

De forma a analisar o desempenho do desumidificador, é interessante fazer uma comparação entre os resultados obtidos neste estudo e os resultados obtidos em estudos anteriores, mencionados no capítulo 1.3.

Nos estudos realizados por Bagheri, (2018), o desumidificador foi capaz de produzir 0,65 L/h com um consumo de 1,02 kWh/L, para condições de 30 °C e 62% de humidade relativa. Para condições semelhantes, o desumidificador testado produziu mais água, atingindo os 0,75 L/h, com um consumo menor, sendo a média de consumo 0,92 kWh/L.

No trabalho feito por Faraz Ahmad *et al.*, (2022), foi reportado que o desumidificador foi capaz de produzir 0,36 L/h com um consumo de 2,25 kWh/L, para condições de 22 °C e 60% de humidade relativa. Para condições semelhantes, o desumidificador testado produziu mais água, atingindo os 0,43 L/h, com um consumo menor, sendo a média de consumo 1,51 kWh/L.

Nos estudos realizados por Runze *et al.*, (2020), o desumidificador foi capaz de produzir 0,46 L/h, para condições de 27 °C e 92% de humidade relativa. Nos estudos efetuados em laboratório, não foram atingidos estes valores de humidade relativa. No entanto, analisando o valor mais elevado de humidade relativa, 70% e para 27 °C, o desumidificador em estudo foi capaz de produzir 0,85 L/h e, portanto, para 92% de humidade relativa iria ser capaz de produzir mais do que o desumidificador testado no estudo referido.

Comparando aos desumidificadores usados nestes três trabalhos, o desumidificador testado nesta dissertação, produz mais água e consome menos energia, podendo ser considerado uma melhor fonte de produção de água através de ar atmosférico.

De outra forma, podemos comparar o desumidificador em estudo de pequena escala, com o sistema de produção em larga escala testado no trabalho de Magrini *et al.*, (2015). Neste estudo em que foram testados dois sistemas de AVAC de grande escala, para uma temperatura de 35 °C e humidade relativa de 60%, o sistema produziram 3225 L/h e 3525 L/h. Sendo estes dois sistemas de larga escala, iriam sempre produzir uma quantidade de água muito maior à quantidade produzida pelo desumidificador testado neste estudo, mas

também com um consumo muito superior. No entanto, é possível fazer uma comparação entre os valores do consumo específico de energia, pois estes relacionam a quantidade de água produzida e o consumo de energia. Neste estudo, os sistemas testados tiveram um consumo específico de energia de 0,491 kWh/L e de 0,496 kWh/L, para as condições acima referidas. Nestas condições, o desumidificador em estudo apresenta um consumo específico de energia de 0,84 kWh/L, sendo este valor quase o dobro do registado no estudo referido, o que significa que este desumidificador é muito menos eficaz que ambos os sistemas referidos.

4.3.4. Curvas de Funcionamento para Produção de água e Consumo de Energia

Com base nos resultados obtidos experimentalmente, é possível criar uma curva de funcionamento para caraterizar o desumidificador, através da qual é possível obter informações sobre o desempenho do desumidificador com base nas alterações dos valores de humidade relativa e temperatura.

De forma a compreender melhor de que forma a humidade relativa e a temperatura afetam o desempenho do desumidificador, foram construídas duas curvas, sendo possível então obter informações sobre as alterações à produção de água e ao consumo de energia. As figuras 40 e 41 representam as curvas de funcionamento para a produção de água e para o consumo de energia, respetivamente

Pela análise da figura 40, é possível confirmar que, para temperaturas mais elevadas e humidades relativas mais elevadas, o desumidificador produz mais água, conforme seria esperado. Esta relação permite concluir que o processo de produção de água no desumidificador é mais eficaz para estas condições.

Com base na análise da curva da figura 41, é possível concluir que, para valores elevados de temperatura e humidade relativa, o desumidificador necessita de mais energia para funcionar, apesar de não ser um aumento muito grande nesta necessidade.

Em resumo, tanto a produção de água como o consumo de energia revelam um aumento para valores mais elevados de temperatura e humidade relativa, o que destaca a importância e a influência das condições climatéricas de operação para o desumidificador.

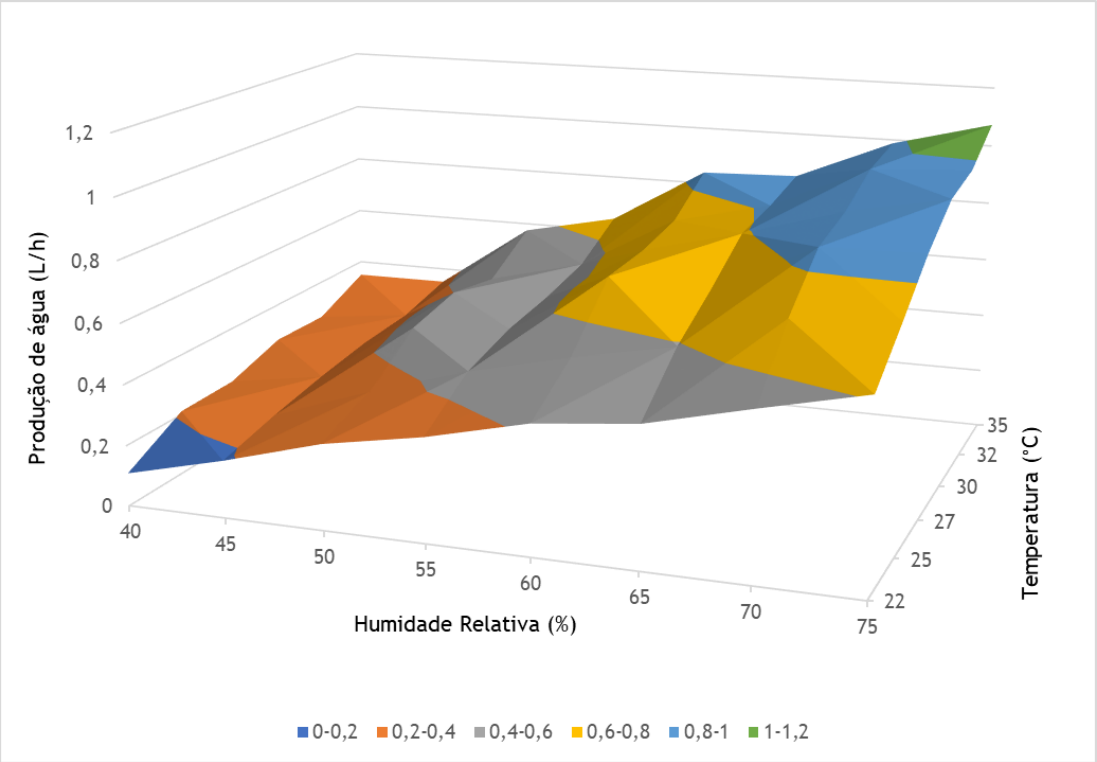

Figura 40 - Curva de funcionamento para a produção de água

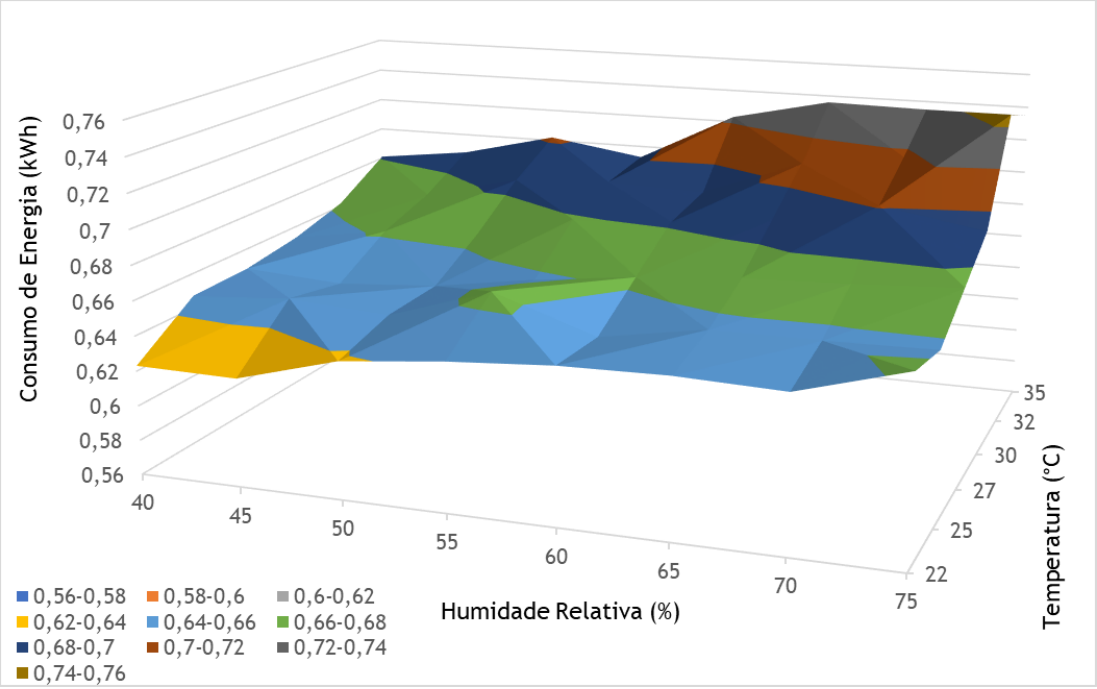

Figura 41 - Curva de funcionamento para o consumo de energia

4.3.5. Estudo das Localizações

Como mencionado anteriormente, para um caso de estudo mais realista, foram selecionadas três regiões para testar, teoricamente, qual seria o desempenho do desumidificador em estudo nestas regiões, sendo as cidades escolhidas Lisboa, Pretoria e Riyadh. É de notar que as condições durante um ano atingiram temperaturas e humidades relativas que não se encontram dentro da gama de valores de funcionamento ótimo do desumidificador.

Os resultados da tabela 4 foram usados para fazer interpolações para os valores médios de humidade relativa e temperatura de cada mês do ano, para cada uma das localizações. Para valores fora da gama testada, ou seja, valores fora dos 22 °C a 35 °C e fora dos 40% a 70% de humidade relativa, foram feitas extrapolações, que podem não ser tão precisas quanto as interpolações. Tanto para as interpolações como para as extrapolações, os valores foram calculados usando o *software* Wolfram Mathematica, versão 13.1.

Para as condições de temperatura e humidade relativa foram usados os valores médios do dia 15 cada mês para cada uma das cidades.

As figuras 42 e 43 fornecem uma representação visual da produção de água e do consumo específico de energia previstos para as três cidades ao longo de um ano, respetivamente.

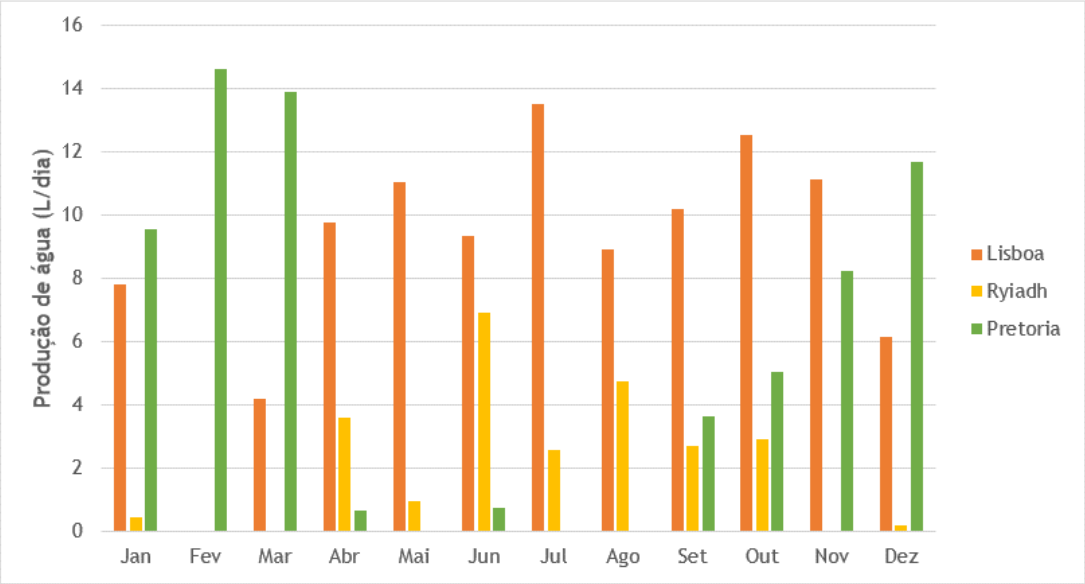

Figura 42 - Produção média de água para as três cidades escolhidas

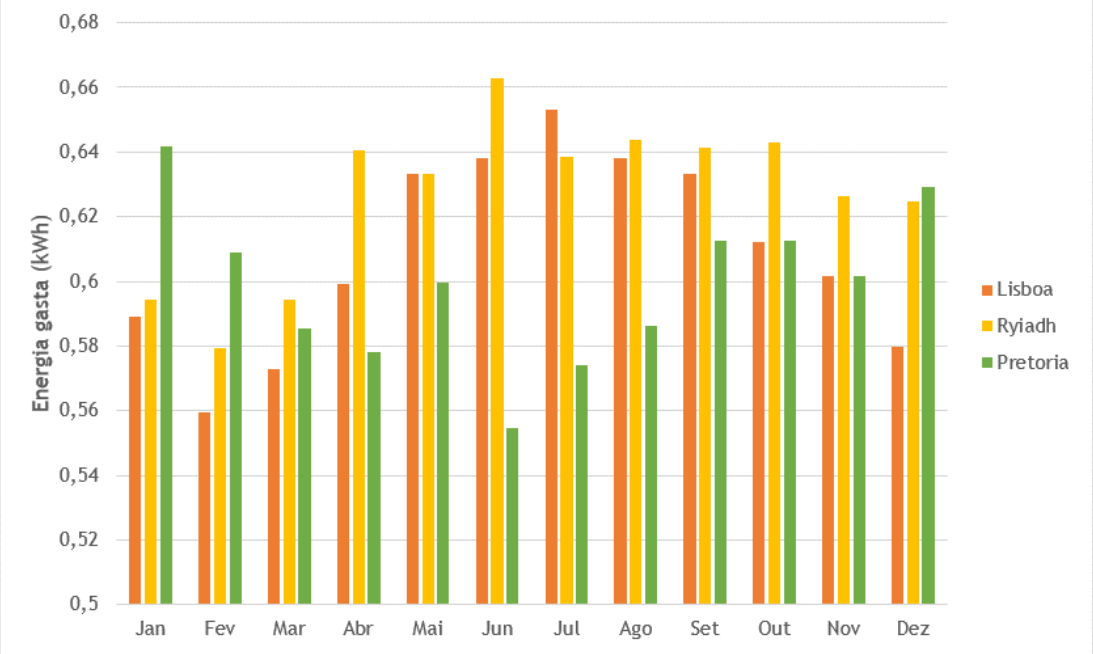

Figura 43 - Consumo de energia médio para as três cidades escolhidas

Pela análise da figura 43, é possível concluir que o consumo de energia não sofre grandes alterações durante o ano todos e não há grande variação de cidade para cidade. Contudo,

pela análise da figura 42, o mesmo não se pode concluir para a produção de água, havendo flutuações na produção ao longo do ano todo, e algumas alterações comparando os valores de cada cidade.

De forma a melhor perceber as diferenças de produção de água para cada cidade e para cada mês, foi elaborada a tabela 5, através da qual é possível perceber que das três cidades, Lisboa é aquela com melhores condições para a produção de água, enquanto que a cidade que apresenta piores condições é Riyadh.

Tabela 5 - Produção total de água por mês e para o ano (apresentado em litros [L])

	Lisboa	Riyadh	Pretoria
Janeiro	241,79	13,56	295,80
Fevereiro	0,00	0,00	409,39
Março	130,21	0,00	431,35
Abril	293,67	108,29	20,50
Maio	342,14	29,70	0,00
Junho	280,06	207,08	22,76
Julho	419,08	80,60	0,00
Agosto	276,34	147,12	0,00
Setembro	305,80	81,42	109,00
Outubro	388,97	90,32	157,06
Novembro	333,67	0,00	247,79
Dezembro	190,33	5,54	362,29
TOTAL	3202,05	763,63	2055,94

Com os valores da tabela 5, seguindo o processo mencionado no subcapítulo 3.1.6, é possível calcular a área mínima necessária para a produção de 1 litro de água por dia. Com o cálculo deste valor é possível avaliar qual a área mínima de painel fotovoltaico necessária para atingir o valor necessário para produzir um certo valor de água, neste caso um litro, mas pode-se avaliar para o consumo diário de uma pessoa ou de uma família. A figura 44 representa os valores mínimos de área de painel fotovoltaico para produzir pelo menos 1 litro de água por dia, por cada mês para as três cidades escolhidas.

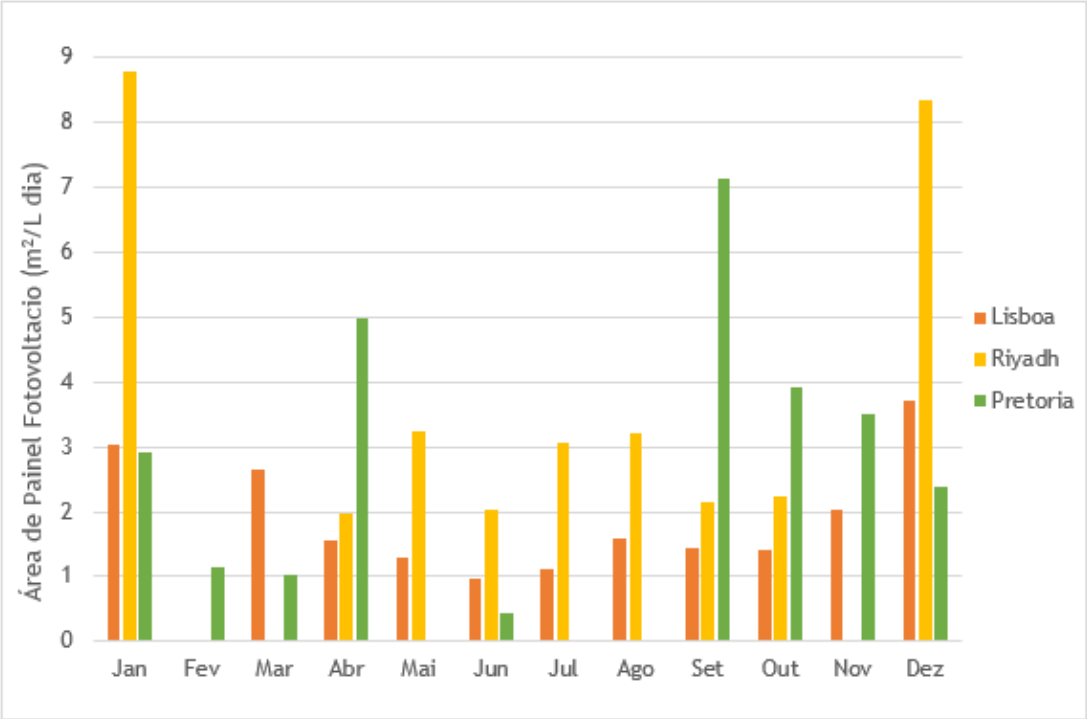

Figura 44 - Área mínima para produzir 1 litro de água por dia para as três cidades

Pela análise da figura 44, é possível concluir que a cidade que requer uma maior área de painel fotovoltaico é Riyadh, seguida de Pretoria e a que necessita uma menor área é Lisboa. Para certos meses este valor não é mostrado, pois para estes meses, de acordo com os cálculos para a produção média e pela análise da tabela 5, para certos meses não houve produção de água. Para estes casos, como não há produção de água, não existe um valor possível para a área mínima de painel fotovoltaico para atingir o valor de 1 litro de água produzida por dia.

O valor da área mínima do painel está diretamente relacionado com o desempenho do desumidificador para as diferentes condições atmosféricas. Quando é feita a comparação dos resultados da produção de água com o valor mínimo de área de painel fotovoltaico, pode-se afirmar que, no geral, quanto melhor for o desempenho do desumidificador na produção de água, menor será a área mínima do painel, e, por outro lado, quanto pior for o desempenho do desumidificador na produção de água, maior será a área mínima do painel necessária.

Isto ocorre devido ao facto de o consumo energético do desumidificador não depender muito das condições climatéricas e manter, mais ou menos, sempre o mesmo consumo. Portanto,

quanto mais água produzir, mais rápido atingirá o valor mínimo pretendido, neste caso 1 litro, gastando assim menos energia, pois está menos tempo em operação.

No entanto, visto que a fonte de energia depende da radiação solar, o desempenho não é o único fator que tem peso na área mínima necessária para a produção. As condições climatéricas podem ser as ótimas para a produção de água, mas, caso não haja radiação suficiente para alimentar o desumidificador, não irá haver produção de água.

5. Conclusão

Neste capítulo será feita a conclusão da dissertação, na qual será feita uma recapitulação de todas a dissertação, focando principalmente nos resultados laboratoriais, sendo posteriormente apresentados algumas sugestões para trabalhos futuros que possam dar continuidade à dissertação.

Em termos gerais, o uso de sistemas de desumidificação para a produção de água apresenta tanto vantagens como desvantagens. A principal vantagem é a capacidade de produzir água sem a necessidade de uma fonte existente. Estes processos são também ambientalmente económicos, não deixando quaisquer resíduos. No entanto, estes sistemas ainda apresentam a grande desvantagem de apresentarem um elevado consumo energético.

No entanto, em termos económicos, para o uso deste sistema é necessário a sua aquisição. Este sistema encontra-se disponível no *website* do fornecedor por um preço que, apesar de ser mais baixo que os de escala industrial, ainda é elevado, apresentando um valor de 854,85 euros (preço consultado dia 7 de setembro de 2023, sem descontos). Este valor, juntamente com o preço da energia necessária para a sua operação tornam esta solução cara. O valor da energia de consumo pode ser retirado usando a solução apresentada e acoplando um painel fotovoltaico, mas, este também não é barato.

Este método de obtenção de água é uma opção ambientalmente viável, no entanto, ainda são necessárias melhorias no que conta especialmente ao investimento inicial necessário e ao consumo de energia por parte dos sistemas de desumidificação

5.1. Recapitulação

No que diz respeito à análise de localização, conforme apresentado na tabela 5, Lisboa é a cidade com a maior produção de água durante um ano. Analisando o gráfico da figura 44, se considerarmos os meses em que é possível ter produção de água, excluindo assim fevereiro, Lisboa exigia, em média, 1,89 m^2 de área de painéis fotovoltaicos.

No entanto, a média não é o valor a ser considerado, uma vez que, ao considerar a média de 1,89 m^2, então, nos meses em que a área mínima necessária era maior, como janeiro, por exemplo, o desumidificador não seria capaz de obter energia suficiente para produzir 1

litro de água por dia. Portanto, o valor considerado tem de ser o mais alto, que, para Lisboa é de 3,72 m^2 para dezembro. Avaliando então o valor mais alto, este continuou a ser o valor mais baixo entre as três cidades, seguido por 7,14 m^2 para Pretória no mês de abril e 8,80 m^2 para Riyadh no mês de janeiro. Ao analisar esses dados, é fácil concluir que a melhor cidade para o desumidificador funcionar é Lisboa, uma vez que é não apenas a cidade onde ele produziria a maior quantidade de água, mas também a cidade que requer a menor área de módulo PV, seguida por Pretória, e a pior das três é Riyadh.

No geral, os resultados dos testes laboratoriais forneceram valiosas informações sobre as técnicas de produção de água atmosférica utilizando o processo de refrigeração por compressão de vapor. Pela análise dos resultados é possível confirmar a suposição inicial de que para temperaturas mais elevadas e níveis de humidade relativa mais elevados, o desumidificador tem uma maior produção de água.

No entanto, é importante considerar também o consumo de energia. Portanto, é necessário uma análise que compare a influência das condições tanto na produção de água como no consumo de energia. É, portanto, necessário comparar o consumo específico de energia, que representa a quantidade de energia necessária para produzir um litro de água. Através da análise deste valor, é possível concluir que o aumento no consumo de energia não é um fator muito importante. Isto deve-se ao elevado aumento na produção de água associado a temperaturas mais elevadas e níveis de humidade relativa mais altos, enquanto que o aumento do consumo de energia é relativamente baixo. Estes dois fatores levam a que o consumo específico de energia diminua, levando a concluir assim que é necessário menos energia para produzir um litro de água a temperaturas e humidades mais elevadas.

5.2. Sugestão para trabalho futuro

Este estudo deixa em aberto várias opções para um trabalho contínuo sobre a temática apresentada. A água produzida pelo desumidificador não foi testada quanto à sua potabilidade, portanto, não é possível saber se a água era segura para consumo humano ou não. No entanto, existem testes químicos que podem ser feitos para avaliar a sua potabilidade e, no caso em que estes testes não estejam disponíveis, existem processos de mineralização e filtração que podem ser realizados para tornar esta água própria para consumo humano. Uma sugestão seria incluir um sistema de filtração no desumidificador, de forma a torná-lo totalmente funcional para a produção de água potável para consumo humano.

Embora o uso do desumidificador para produção de água seja uma solução promissora para a escassez de água, é apenas uma boa solução para uma produção em pequena escala. Este desumidificador tem uma produção de água limitada, mesmo em condições climáticas perfeitas. Assim, provavelmente não é uma solução boa e viável para produção em grande escala, havendo a possibilidade de testar desumidificadores de escala industrial, que serão capazes de produzir maiores quantidades de água.

Por fim, as localizações do estudo foram determinadas com cálculos e foram principalmente teóricas. No entanto, este desumidificador poderia ser testado nas localizações mencionadas, e uma comparação entre os estudos teóricos e práticos pode ser realizada. Além disso, a implementação dos módulos fotovoltaicos não foi testada, portanto, esta pode ser outra possibilidade para um teste futuro, de forma a avaliar compatibilidade do módulo escolhido, ou qualquer outro, com o desumidificador.

Referências bibliográficas

Al-Aloosy, M. (2021) *AGSIW | Iraq's Water Crisis: An Existential But Unheeded Threat*. Available at: https://agsiw.org/iraqs-water-crisis-an-existential-but-unheeded-threat/.

Bagheri, F. (2018) 'Performance investigation of atmospheric water harvesting systems', *Water Resources and Industry*, 20, pp. 23–28.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.wri.2018.08.001.

Beck, J.M. (2021) 'How a Psychrometric Chart is Used to Determine Air Properties', (April).
Available at: https://scholarsjunction.msstate.edu/seedtechpapers.

Beysens, D., Broggini, F., Milimouk-Melnytchouk, I., Ouazzani, J. and Tixier, N. (2013) 'New architectural forms to enhance dew collection', *Chemical Engineering Transactions*, 34, pp. 79–84.
Available at: https://doi.org/10.3303/CET1334014.

Boyle, G. (2004) 'Renewable energy: Power for a sustainable future', *Energy Exploration and Exploitation*, pp. 603–626.
Available at: https://doi.org/10.1260/0144598011492723.

Cao, M., Ju, J., Li, K., Dou, S., Liu, K. and Jiang, L., (2014) 'Facile and large-scale fabrication of a cactus-inspired continuous fog collector', *Advanced Functional Materials*, 24(21), pp. 3235–3240.
Available at: https://doi.org/10.1002/adfm.201303661.

Cattani, L., Magrini, A. and Cattani, P. (2018) 'Water extraction from air by refrigeration-experimental results from an integrated system application', *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(11).
Available at: https://doi.org/10.3390/app8112262.

Cengel, Y.A. and Boles, M.A., (2015) 'Thermodynamics : An Engineering Approach', 8th Edition, pp. 1–59.

Chen, Z., Zhu, L., Raman, A. and Fan, S., (2016) 'Radiative cooling to deep sub-freezing temperatures through a 24-h day-night cycle', *Nature Communications*, 7, pp. 1–5. Available at: https://doi.org/10.1038/ncomms13729.

Cruzat, D. and Jerez-Hanckes, C. (2018) 'Electrostatic fog water collection', *Journal of Electrostatics*, 96(May), pp. 128–133.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.elstat.2018.10.009.

Damak, M. and Varanasi, K.K. (2018) 'Electrostatically driven fog collection using space charge injection', *Applied Sciences and Engineering*, pp. 1–9.
Available at: http://advances.sciencemag.org/.

Dong, M., Zhang, Z., Shi, Y., Zhao, X., Fan, S. and Chen, Z., (2020) 'Fundamental Limits of the Dew-Harvesting Technology', *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 24(1), pp. 43–52.
Available at: https://doi.org/10.1080/15567265.2020.1722300.

Duarte, M.V. (2013) 'Estudo da bomba de calor - Fluidos de trabalho e eficiência energética'.

Ercin, A.E. and Hoekstra, A.Y. (2014) 'Water footprint scenarios for 2050: A global analysis', *Environment International*, 64, pp. 71–82.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.11.019.

Eslami, M., Tajeddini, F. and Etaati, N. (2018) 'Thermal analysis and optimization of a system for water harvesting from humid air using thermoelectric coolers', *Energy Conversion and Management*, 174(April), pp. 417–429.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.045.

Faeth, P., Sovacool, B. K., Thorkildsen, Z., Rao, A., Eidsness, J., Johnson, K., Thompson, B., Imperiale, S. and Gilbert, A., (2014) 'A Clash of Competing Necessities: Water Adequacy and Electric Reliability in China, India, France, and Texas', (July).

Faraz Ahmad, F., Ghenai, C., Al Bardan, M., Bourgon, M. and Shanableh, A., (2022) 'Performance analysis of atmospheric water generator under hot and humid climate conditions: Drinkable water production and system energy consumption', *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100270.

Ferreira, N.P. (2016) 'Estudo Comparativo Entre Os Coeficientes De Performance Dos Ciclos Frigoríficos Convencional E De Cascata Amônia / Amônia Do Processo De De Cascata Amônia / Amônia Do Processo De'.

Ferwati, M.S. (2019) 'Water harvesting cube', *SN Applied Sciences*, 1(7).
Available at: https://doi.org/10.1007/s42452-019-0730-y.

Fessehaye, M., Abdul-Wahab, S. A., Savage, M. J., Kohler, T., Gherezghiher, T. and Hurni, H., (2014) 'Fog-water collection for community use', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, pp. 52–62.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.063.

Gido, B., Friedler, E. and Broday, D.M. (2016) 'Assessment of atmospheric moisture harvesting by direct cooling', *Atmospheric Research*, 182, pp. 156–162.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.029.

Guppy, L., Anderson, K. and Nagabhatla, N., (2017) Global Water Crisis - The Facts', (January 2020).
Available at: https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14415.02720.

Harandi, H. B., Rahnama, M., Javaran, E. J. and Asadi, A., (2017) 'Performance optimization of a multi stage flash desalination unit with thermal vapor compression using genetic algorithm', *Applied Thermal Engineering*, 123, pp. 1106–1119.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.170.

He, W., Yu, P., Hu, Z., Lv, S., Qin, M. and Yu, C., (2019) 'Experimental study and performance analysis of a portable atmospheric water generator', *Energies*, 13(1), pp. 1–14.
Available at: https://doi.org/10.3390/en13010073.

Jarimi, H., Powell, R. and Riffat, S. (2020) 'Review of sustainable methods for atmospheric water harvesting', *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 15(2), pp. 253–276.
Available at: https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz072.

Joshi, V. P., Joshi, V. S., Kothari, H. A., Mahajan, M. D., Chaudhari, M. B. and Sant, K. D., (2017) 'Experimental Investigations on a Portable Fresh Water Generator Using a Thermoelectric Cooler', *Energy Procedia*, 109(November 2016), pp. 161–166.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.085.

Ju, J., Yao, X., Yang, S., Wang, L., Sun, R., He, Y. and Jiang, L., (2014) 'Cactus stem inspired cone-arrayed surfaces for efficient fog collection', *Advanced Functional Materials*, 24(44), pp. 6933–6938.
Available at: https://doi.org/10.1002/adfm.201402229.

Kabeel, A. E., Hamed, M. H., Omara, Z. M. and Sharshir, S. W., (2013) 'Water Desalination Using a Technique — A Detailed Review', *Natural Resources*, 4, pp. 286–305.

Kadhim, T.J., Abbas, A.K. and Kadhim, H.J. (2020) 'Experimental study of atmospheric water collection powered by solar energy using the Peltier effect', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 671(1).
Available at: https://doi.org/10.1088/1757-899X/671/1/012155.

Khalil, B., Adamowski, J., Shabbir, A., Jang, C., Rojas, M., Reilly, K. and Ozga-Zielinski, B., (2016) 'A review: dew water collection from radiative passive collectors to recent developments of active collectors', *Sustainable Water Resources Management*, 2(1), pp. 71–86.
Available at: https://doi.org/10.1007/s40899-015-0038-z.

Knapczyk-Korczak, J., Zhu, J., Ura, D. P., Szewczyk, P. K., Gruszczyński, A., Benker, L., Agarwal, S. and Stachewicz, U., (2021) 'Enhanced Water Harvesting System and Mechanical Performance from Janus Fibers with Polystyrene and Cellulose Acetate', *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 9(1), pp. 180–188.
Available at: https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c06480.

Kuznetsov, V.M., Toikka, A.M. and Kuznetsov, Y.P. (2007) 'Pervaporation selectivity as a function of pressure and sorption properties of a polymeric film membrane', *Russian Journal of Applied Chemistry*, 80(6), pp. 904–908.
Available at: https://doi.org/10.1134/S1070427207060109.

Lebre, B., Silva, P. D., Pires, L. C. and Gaspar, P. D., (2021) 'Computational modeling of the thermal behavior of a greenhouse', *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(24).
Available at: https://doi.org/10.3390/app112411816.

Liu, S., He, W., Hu, D., Lv, S., Chen, D., Wu, X., Xu, F. and Li, S., (2017) 'Experimental analysis of a portable atmospheric water generator by thermoelectric cooling method', *Energy Procedia*, 142, pp. 1609–1614.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.538.

Luo, T. (2017) 'Droughts and Blackouts: How Water Shortages Cost India Enough Energy to Power Sri Lanka'.
Available at: https://www.wri.org/insights/droughts-and-blackouts-how-water-shortages-cost-india-enough-energy-power-sri-lanka

Maddocks, A., Young, R.S. and Reig, P. (2015) 'Ranking the World's Most Water - Stressed Countries in 2040 (World Resources Institute)', *World Resources Insititute*, p. 8.
Available at: https://www.wri.org/blog/2015/08/ranking-world-s-most-water-stressed-countries-2040.

Magrini, A., Cattani, L., Cartesegna, M. and Magnani, L. (2015) 'Integrated Systems for Air Conditioning and Production of Drinking Water-Preliminary Considerations', in *Energy Procedia*. Elsevier Ltd, pp. 1659–1665.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.406.

McElroy, M.B. (2002) *The atmospheric environment : effects of human activity*.

Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. (2016) 'Sustainability: Four billion people facing severe water scarcity', *Science Advances*, 2(2), p. 6.
Available at: https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323.

Mendoza-Escamilla, J. A., Hernandez-Rangel, F. J., Cruz-Alcántar, P., Saavedra-Leos, M. Z., Morales-Morales, J., Figueroa-Diaz, R. A., Valencia-Castillo, C. M. and Martinez-Lopez, F. J., (2019) 'A feasibility study on the use of an atmospheric water generator (AWG) for the harvesting of fresh water in a semi-arid region affected by mining pollution', *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(16).
Available at: https://doi.org/10.3390/app9163278.

Milani, D., Abbas, A., Vassallo, A., Chiesa, M. and Bakri, D. A., (2011) 'Evaluation of using thermoelectric coolers in a dehumidification system to generate freshwater from ambient air', *Chemical Engineering Science*, 66(12), pp. 2491–2501.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.02.018.

Mishra, V., Thirumalai, K., Jain, S. and Aadhar, S., (2021) 'Unprecedented drought in South India and recent water scarcity', *Environmental Research Letters*, 16(5).
Available at: https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf289.

Nair, M. and Kumar, D. (2013) 'Water desalination and challenges: The Middle East perspective: A review', *Desalination and Water Treatment*, 51(10–12), pp. 2030–2040. Available at: https://doi.org/10.1080/19443994.2013.734483.

Narayan, G. P., Sharqawy, M. H., Summers, E. K., Lienhard, J. H., Zubair, S. M. and Antar, M. A., (2010) 'The potential of solar-driven humidification-dehumidification desalination for small-scale decentralized water production', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(4), pp. 1187–1201.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.014.

Ng, K. C., Thu, K., Kim, Y., Chakraborty, A. and Amy, G., (2013) 'Adsorption desalination: An emerging low-cost thermal desalination method', *Desalination*, 308, pp. 161–179.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.07.030.

Nunes, J. (2008) *Avaliação do desempenho dos sistemas de refrigeração nas indústrias agroalimentares da Beira Interior*.

Oliveira, P.P. de (2012) *Fundamentos de Termodinâmica Aplicada - Análise Energética e Exergética*. 1ª Edição. Lidel.

Pagaime, L. (2011) 'Dimensionar uma instalação de dessalinização de água por destilação a baixa temperatura', p. 147.

Park, J. H., Wang, J. J. Tafti, N. and Delaune, R. D. (2019) 'Removal of Eriochrome Black T by sulfate radical generated from Fe-impregnated biochar/persulfate in Fenton-like reaction', *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 71, pp. 201–209.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.11.026.

Park, K. C., Chhatre, S. S., Srinivasan, S., Cohen, R. E. and McKinley, G. H. (2013) 'Optimal design of permeable fiber network structures for fog harvesting', *Langmuir*, 29(43), pp. 13269–13277.
Available at: https://doi.org/10.1021/la402409f.

Patel, J. Patel, K., Mudgal, A., Panchal, H. and Sadasivuni, K., K., (2020) 'Experimental investigations of atmospheric water extraction device under different climatic conditions', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 38(February), p. 100677.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100677.

Peeters, R., Vanderschaeghe, H., Rongé, J. and Martens, J. A. (2020) 'Energy performance and climate dependency of technologies for fresh water production from atmospheric water vapour', *Environmental Science: Water Research and Technology*. Royal Society of Chemistry, pp. 2016–2034.
Available at: https://doi.org/10.1039/d0ew00128g.

Radermacher, R.K. and Fawzi, H. (2004) 'Device for collecting water from air'.

Rajaram, M., Heng, X., Oza, M. and Luo, C., (2016) 'Enhancement of fog-collection efficiency of a Raschel mesh using surface coatings and local geometric changes', *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 508, pp. 218–229.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.08.034.

Raluy, R.G., Serra, L. and Uche, J. (2005) 'Life cycle assessment of desalination technologies integrated with renewable energies', *Desalination*, 183(1–3), pp. 81–93. Available at: https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.023.

Raman, A. P., Anoma, M. A., Zhu, L., Rephaeli, E. and Fan, S., (2014) 'Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight', *Nature*, 515(7528), pp. 540–544.
Available at: https://doi.org/10.1038/nature13883.

Raveesh, G., Goyal, R. and Tyagi, S.K. (2021) 'Advances in atmospheric water generation technologies', *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114226.

Ritchie, H. and Roser, M. (2017) 'Water Use and Stress', *Our World in Data*.
Available at: https://doi.org/10.4060/CB6241EN.

Royon, L. (2016) 'Micro grooved surface improve dew collection', *Heat Transfer Engineering*, pp. 845–849.

Runze, D., Qingfen, M., Hui, L., Gaoping, W., Wei, Y., Guangfu, C. and Yifan, C., (2020) 'Experimental investigations on a portable atmospheric water generator for maritime rescue', *Journal of Water Reuse and Desalination*, 10(1), pp. 30–44.
Available at: https://doi.org/10.2166/WRD.2020.048.

Salehi, A. A., Ghannadi-Maragheh, M., Torab-Mostaedi, M., Torkaman, R. and Asadollahzadeh, M., (2020) 'A review on the water-energy nexus for drinking water production from humid air', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120 (November 2019), p. 109627. Available at: https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109627.

Savenije, H.H.G. (2000) 'Water scarcity indicators; the deception of the numbers', *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(3), pp. 199–204. Available at: https://doi.org/10.1016/S1464-1909(00)00004-6.

Sharan, G., Roy, A. K., Royon, L., Mongruel, A. and Beysens, D., (2017) 'Dew plant for bottling water', *Journal of Cleaner Production*, 155, pp. 83–92.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.079.

Shi, W., Anderson, M. J., Tulkoff, J. B. Kennedy, B. S. and Boreyko, J. B., (2018) 'Fog Harvesting with Harps', *ACS Applied Materials and Interfaces*, 10(14), pp. 11979–11986.
Available at: https://doi.org/10.1021/acsami.7b17488.

Shourideh, A. H., Ajram, W. B., Lami, A. J., Haggag, S. and Mansouri, A., (2018) 'A comprehensive study of an atmospheric water generator using Peltier effect', *Thermal Science and Engineering Progress*, 6(September 2017), pp. 14–26.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.02.015.

Stoecker, W. and Jabardo, J. S. (2002) 'Refrigeração Industrial', p. 384.

Strathmann, H. (2010) 'Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications', *Desalination*, 264(3), pp. 268–288.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.04.069.

Subramani, A., Badruzzaman, M., Oppenheimer, J. and Jacangelo, J. G. (2011) 'Energy minimization strategies and renewable energy utilization for desalination: A review', *Water Research*, 45(5), pp. 1907–1920.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.12.032.

Subramani, A. and Jacangelo, J.G. (2015) 'Emerging desalination technologies for water treatment: A critical review', *Water Research*, 75, pp. 164–187.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.032.

Tu, Y., Wang, R., Zhang, Y. and Wang, J., (2018) 'Progress and Expectation of Atmospheric Water Harvesting', *Joule*, 2(8), pp. 1452–1475.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.07.015.

Twaha, S., Zhu, J., Yan, Y. and Li, B., (2016) 'A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, pp. 698–726.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.034.

United Nations (2003) 'UN World Water Development Report 2003', *UN Water*, (March), p. 123.
Available at: https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2003.

United Nations (2021) *The United Nations World Water Development Report 2021*, *Water Politics*.
Available at: https://doi.org/10.4324/9780429453571-2.

United Nations (2023) *The United Nations World Water Development Report 2023*. Available at: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821057-4.00003-3.

United Nations Department of Economic and Social Affairs, P.D. (2022). W.P.P. 2022: S. of R. (2022) *World Population Prospects 2022*, *United Nation*.
Available at: www.un.org/development/ desa/pd/.

Wang, P. and Chung, T.S. (2015) 'Recent advances in membrane distillation processes: Membrane development, configuration design and application exploring', *Journal of Membrane Science*, 474, pp. 39–56.
Available at: https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.09.016.

Wen, C., Guo, H., Bai, H., Xu, T., Liu, M., Yang, J., Zhu, Y., Zhao, W., Zhang, J., Cao, M. and Zhang, L., (2019) 'Beetle-Inspired Hierarchical Antibacterial Interface for Reliable Fog Harvesting', *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11(37), pp. 34330–34337.
Available at: https://doi.org/10.1021/acsami.9b11862.

WHO/UNICEF, (2021) *Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene*.
Available at: http://apps.who.int/bookorders.

Worldometer, *Population of Southern Asia*.
Available at: https://www.worldometers.info/world-population/southern-asia-population/

Xu, P., Cath, T. Y., Robertson, A. P., Reinhard, M., Leckie, J. O. and Drewes, J. E. (2013) 'Critical review of desalination concentrate management, treatment and beneficial use', *Environmental Engineering Science*, 30(8), pp. 502–514.
Available at: https://doi.org/10.1089/ees.2012.0348.

Zhou, M., Song, H., Xu, X., Shahsafi, A., Qu, Y., Xia, Z., Ma, Z., Kats, M. A., Zhu, J., Ooi, B. S., Gan, Q. and Yu, Z. (2021) 'Vapor condensation with daytime radiative cooling', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(14).
Available at: https://doi.org/10.1073/pnas.2019292118.