

**Ferramenta computacional de apoio à
decisão na seleção de refrigerantes
alternativos e/ou sustentáveis**
Versão final após defesa

Guilherme Alexandre Lopes de Jesus

Dissertação de Mestrado
Engenharia e Gestão Industrial
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Dinis Gaspar

dezembro 2022

Declaração de Integridade

Eu, Guilherme Alexandre Lopes de Jesus que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M10705 de Engenharia e Gestão Industrial 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 referência de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 30/11 /2022

Guilherme Alexandre Lopes de Jesus

Agradecimentos

Esta dissertação encerra um capítulo importante da minha vida que são os anos de estudante, e neste preciso momento, penso e lembro-me de todos aqueles que me ajudaram a entrar, percorrer e completar este trajeto incrível que seria impossível sem a ajuda e disponibilidade dos mesmos.

Começo primeiramente por agradecer ao meu orientador e Professor Doutor Pedro Dinis Gaspar pela ajuda, compreensão, motivação e pelo seu tempo disponibilizado.

Não poderia deixar de agradecer a todos os meus amigos pelo apoio constante e incentivo ao longo da elaboração desta dissertação, sendo eles uma prova viva de que não há nada melhor do que um amigo.

Por último e não menos importante, quero agradecer do fundo do coração aos meus pais, Paulo e Anabela por toda a disponibilidade, dedicação, amizade amor demonstrados, à minha avó Alzira que desempenhou o mesmo papel com igual intensidade. Esta tese é no fundo dedicada ao meu falecido avô Jorge, que apesar de distante encontra-se sempre presente na minha vida e certamente estará orgulhoso de todo o meu caminho percorrido e radiante pelo facto de ter crescido como pessoa e como futuro profissional.

Resumo

Nos últimos anos tem-se verificado um aumento das preocupações relacionadas com as consequências do efeito de estufa, do aumento da temperatura global do planeta e alterações climáticas. A utilização de equipamentos de refrigeração por compressão de vapor, nas suas múltiplas aplicações, tem um importante contributo no impacte ambiental. Os fluidos refrigerantes empregues nesses sistemas apresentam características que os tornam nocivos para o ambiente. Em particular, os HFCs (hidrofluorocarbonetos) contribuem para a destruição da camada de ozono e para o aumento do efeito de estufa. O fenómeno do efeito de estufa leva ao aumento da temperatura média anual terrestre e, conseqüentemente, provoca graves desequilíbrios climáticos. A fim de abrandar a emissão de gases com efeito de estufa foram elaborados protocolos, acordos internacionais e emitidas legislações culminando com a proibição e definição de prazos para a eliminação gradual de vários refrigerantes, no sentido de os substituir por outros que apelem à sustentabilidade com o mínimo impacte ambiental. Num futuro próximo, o setor da refrigeração terá de substituir alguns refrigerantes com efeito prejudicial para o meio ambiente por outros designados de alternativos e/ou sustentáveis com impacte ambiental mínimo ou nulo. Esta dissertação reside no levantamento de dados e informações referentes aos refrigerantes halogenados e às consequências da sua utilização; nas medidas impostas para eliminação gradual de todos os refrigerantes que apresentem um impacte ambiental considerável e na procura e análise da gama de refrigerantes alternativos e/ou sustentáveis. Assim, procura-se dar apoio à tomada de decisão com que as empresas se irão deparar, que consiste na necessidade de substituir os refrigerantes que num futuro próximo serão abolidos pela legislação. Para tal, é desenvolvida uma ferramenta computacional de apoio à decisão na seleção de refrigerantes com reduzido impacte ambiental, assegurando desempenho térmico e eficiência energética similar, tendo em consideração o custo da renovação da instalação e do próprio refrigerante e o nível de segurança associado. Este sistema de apoio à decisão (SAD) baseia-se numa função objetivo que incorpora as condições e propriedades referentes aos refrigerantes alternativos. Através das respostas inseridas pelos utilizadores na ferramenta, serão fornecidas recomendações viáveis para o processo de substituição por refrigerantes mais sustentáveis. Este processo encontra-se dependente de restrições, sendo necessário analisar todos os requisitos que envolvem a gama de refrigerantes sustentáveis que constituam uma possibilidade futura para o utilizador. O SAD foi aplicado no setor agroindustrial em três casos de estudo. Os resultados permitiram não só mostrar a consistência da ferramenta, como a sua flexibilidade, objetividade e simplicidade. A sua utilização permite às empresas optar por fluidos refrigerantes com reduzido impacte ambiental, seja reduzidos ou nulos, o potencial de depleção de ozono e impacto no aquecimento global, contribuindo assim para a sustentabilidade ambiental do planeta.

Palavras-Chave

Ferramenta computacional, HFCs, Impacte ambiental, Refrigerantes alternativos, Refrigerantes sustentáveis, Sustentabilidade

Abstract

Over the last few years there has been an increase in concerns regarding the consequences of the greenhouse effect, the rise in the planet's global temperature and climate change. The use of refrigeration equipment by vapour compression, in its many applications, has made an important contribution to the aforementioned environmental impact. Indeed, the refrigerants used in these systems have characteristics that make them harmful to the environment. In particular, HFCs (hydrofluorocarbons) contribute to the destruction of the ozone layer and to the increase of the greenhouse effect. The greenhouse effect leads to an increase in the earth's annual average temperature and consequently causes serious climatic imbalances. In order to slow down the emission of greenhouse gases, protocols, international agreements and legislation were drawn up, culminating in the prohibition and definition of deadlines for the gradual elimination of various refrigerants, in order to replace them with others that appeal to sustainability with minimal environmental impact. In the near future, the refrigeration sector will have to replace some refrigerants with harmful effects on the environment by others called alternative and/or sustainable with minimal or zero environmental impact. This dissertation resides in the survey of data and information regarding halogenated refrigerants and the consequences of their use; in the measures imposed for the gradual elimination of all refrigerants that have a considered environmental impact and, finally, in the attempt to analyze the range of alternative and/or sustainable refrigerants. Thus, the main problem exposed in this dissertation is answered by a support to the decision making with which companies will be faced, which is the need to replace their refrigerants that in a near future will be phase-out by legislation. For this purpose, a decision-making support computational tool is developed for the selection of refrigerants with reduced environmental impact, ensuring similar thermal performance and energy efficiency, taking into account the renovation cost of the installation and of the refrigerant itself and the associated safety level. This decision support system (DSS) is uses an objective function that includes the conditions and properties concerning alternative refrigerants. Through the answers entered into the tool, feasible recommendations will be provided for the process of replacing refrigerants by others that appeal to sustainability. This process is dependent on restrictions, and it is necessary to analyze all the requirements involving the range of sustainable refrigerants that are a possibility for the future use. The DSS was applied in the agrofood sector in three case studies. The results showed not only the DSS's consistency, but also its flexibility, objectivity and simplicity. Its use allows companies to choose refrigerants with reduced environmental impact, either reduced or zero potential ozone depletion and global warming impact, thus contributing to the environmental sustainability of the planet.

Keywords

Computational tool, HFCs, Environmental Impact, Alternative refrigerants, Sustainable refrigerants, Sustainability

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Nomenclatura	xiii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. O problema em estudo e a sua relevância	3
1.3. Objetivos e contribuição da dissertação	3
1.4. Metodologias	4
1.5. Visão Geral e organização da dissertação	4
2. Estado da Arte	7
2.1. Contextualização Histórica	7
2.2. Ciclos de refrigeração	11
2.2.1. Ciclo frigorífico Simples	13
2.2.2. Sistemas de refrigeração em cascata	20
2.2.3. Parâmetros associados aos ciclos de refrigeração	21
2.3. Evolução dos refrigerantes	23
2.4. Impacte ambiental	25
2.5. Estratégias de Substituição	27
2.5.1. Aplicação dos protocolos impostos pela União Europeia	29
2.5.2. Caso Português	33
2.6. Propriedades dos Refrigerantes Alternativos	37
2.6.1. Hidrofluorofelinas (HFO): R1234yf e R1234ze	39
2.6.2. R717 – Amoníaco (NH ₃)	40
2.6.3. Hidrocarbonetos (HC): Propano (R290) e Propileno (R1270)	40
2.6.4. R744 – Dióxido de Carbono (CO ₂)	41
2.7. Sustentabilidade	43
2.7.1. O que deve ser sustentado?	43
2.8. Sistemas de apoio à Decisão	44
2.8.1. Nota introdutória	44
2.8.2. Modelo do Sistema de Apoio à Decisão	45
3. Materiais e Métodos	51
3.1. Materiais	51
3.1.1. Atualidade dos refrigerantes halogenados pela União Europeia	51

3.1.2. Refrigerantes Alternativos	52
3.2 Métodos	62
3.2.1. Ferramenta de Apoio à Decisão	62
4. Casos Práticos	71
4.1. Caso Prático 1	71
4.2. Caso Prático 2	73
4.3. Caso Prático 3	76
5. Conclusões.....	79
5.1. Conclusões gerais	79
5.2. Conclusões específicas	80
5.3. Sugestões de trabalho futuro	81
6. Referências Bibliográficas	83

Lista de Figuras

Figura 1: Frigorífico doméstico em madeira criado no século XIX (Melo, 2011).....	7
Figura 2: Máquinas de Gelo criadas por Gorrie e Perkins (Lopes, 2019).....	8
Figura 3: Exposição de um refrigerador elétrico antigo (Lopes, 2019).	8
Figura 4: Experiência de um ciclo ideal realizado por Carnot (Passos, 2003)	9
Figura 5: Representação no diagrama P-h do Ciclo inverso da máquina de Carnot e das transformações que o constituem (Mollier) (Ferraz, 2008).....	11
Figura 6: Diagrama de temperatura e entropia (T-s) (Ferreira,2016).	13
Figura 7: Diagrama de pressão e entalpia (P-h) (Ferreira,2016).	13
Figura 8: a) Compressor hermético, b) compressor semi-hermético, c) Compressor aberto (Dias, 2012).....	16
Figura 9: Representação do ciclo frigorífico simples e da sua evolução termodinâmica no diagrama pressão- entalpia (Pirani, 2013).	17
Figura 10: Estado do fluido entre o compressor	18
Figura 11: Estado do fluido entre o condensador (Lopes, 2019)	19
Figura 12: Estado do fluido entre os dispositivos de expansão. Fonte: (Lopes, 2019).....	19
Figura 13: Estado do fluido entre o evaporador. Fonte: (Lopes, 2019).	19
Figura 14: Esquema e diagrama T-s de um sistema de 2 estágios (Perestrelo, 2017).....	21
Figura 15: Rendimento Volumétrico. Fonte: (Dossat, 1997).....	23
Figura 16: Ilustração das camadas da atmosfera terrestre (ATM Revolucion, 2009).....	26
Figura 17: Plano de eliminação progressiva dos refrigerantes halogenados de acordo com o Protocolo de Montreal (Harby, 2017).....	28
Figura 18: Protocolos e as suas alterações subsequentes destinadas a retardar a acumulação de cloro estratosférico e bromo (Harby, 2017).....	28
Figura 19: Produção de Refrigerantes Halogenados (Harby,2017).....	29
Figura 20: Redução de emissões de GEE em Portugal durante 1990 e 2012 (APA, 2021).....	34
Figura 21: Emissões dos sectores não-CELE face às metas estabelecidas no âmbito da Partilha de Esforços Comunitária (APA,2021).....	35
Figura 22: – Evolução das emissões nacionais de Gases com Efeito de Estufa (GEEs) (APA,2021).....	36
Figura 23: Diagrama P-h do dióxido de carbono com as diferentes zonas de funcionamento (Saldanha,2019).....	42
Figura 24: Características típicas do SAD (Costa, 2012)	45
Figura 25: Comparação dos refrigerantes alternativos (Gaspar & Aguiar, 2020).	46
Figura 26: Desenvolvimento da base de dados através da ferramenta ComBase Growth Model (Pina, 2021).....	48
Figura 27: Componente Motor de Pesquisa do SAD (Pina, 2021)	48
Figura 28: Interface do utilizador (Pina, 2021).....	48
Figura 29: Layout da Ferramenta de Apoio à Decisão.....	63
Figura 30: Demonstração das Dropboxes na ferramenta.	63

Figura 31: Preenchimento dos parâmetros das restrições no caso do R-449.....	72
Figura 32: Solução do caso prático 1 utilizando temperaturas médias.	72
Figura 33: Solução para o caso prático 1 utilizando baixas temperaturas.....	73
Figura 34: Preocupações da empresa na substituição do R-422	73
Figura 35: Árvore de Decisão para as possibilidades de substituição do refrigerante R-422	75
Figura 36: Respostas da empresa para a substituição do R-32	76

Lista de Tabelas

Tabela 1: Etapas do ciclo ideal apresentado por Carnot (Passos,2003).	10
Tabela 2: Classificação dos compressores (Perestrelo,2017).	16
Tabela 3: Vantagens e desvantagens do uso de válvulas de expansão termostática (Perestrelo,2017).	17
Tabela 4: Evolução histórica dos refrigerantes tendo em conta o seu impacto ambiental (Saldanha,2019).....	23
Tabela 5: Efeito dos refrigerantes ao nível ambiental (Proklina GT,2010).	24
Tabela 6: Refrigerantes a ser descontinuados com base no Regulamento N° 517/ 2014 (UE,2014).....	31
Tabela 7: Estado dos refrigerantes halogenados após o cumprimento do Regulamento N° 517/ 2014. (UE,2014).....	32
Tabela 8: Requisitos e propriedades dos refrigerantes (Saldanha, 2019).	38
Tabela 9: Aplicações dos refrigerantes alternativos.....	53
Tabela 10: Condições de operação dos refrigerantes alternativos.....	60
Tabela 11: Propriedades Termodinâmicas dos refrigerantes alternativos	61
Tabela 12: Escala definida para os coeficientes da Função Objetivo.....	65
Tabela 13: Escala definida para as propriedades da Função Objetivo	66

Nomenclatura

Geral:

Q_F	Potência de arrefecimento (W)
Q_H	Capacidade de rejeição do calor (W)
Q_L	Capacidade de refrigeração (W)
W_C	Potência de compressão (W)
P_0	Pressão de evaporação (Pa)
P_c	Pressão de condensação (Pa)
Q_F	Fluxo de calor que entra no ciclo (W)
Q_Q	Fluxo de calor que sai do ciclo (W)
Q_{in}	Fluxo de calor que entra no ciclo (W)
Q_{out}	Fluxo de calor que sai do ciclo (W)
T_1	Temperatura da fonte fria (K)
T_2	Temperatura da fonte quente (K)
W_{net}	Potência útil (W)
m	Caudal (kg/s)
ΔP_d	Diferenças de pressão nas tubagens do condensador
ΔP_s	Diferenças de pressão no escoamento do fluido
COP	Coefficiente do desempenho
h_1	Entalpia do fluido frigorigéneo à entrada do compressor (kJ/kg)
h_2	Entalpia do fluido frigorigéneo à saída do compressor (kJ/kg)
h_3	Entalpia do fluido frigorigéneo à saída do compressor (kJ/kg)
h_4	Entalpia do fluido frigorigéneo à entrada do compressor (kJ/kg)
s_1	Entropia do fluido frigorigéneo à entrada do compressor
s_2	Entropia do fluido frigorigéneo à saída do compressor
T	Temperatura (K)
W	Fluxo de trabalho que entra ou sai do sistema (W)

Simbologia grega:

ε_{carnot}	Eficiência frigorífica de Carnot
ε	Eficiência frigorífica

Acrónimos:

AFEAS	Estudo Alternativo de Aceitação Ambiental de Fluorocarbonetos
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
APREN	Associação Portuguesa de Energias Renováveis
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineering</i>
CELE	Comércio Europeu de Licenças de Emissão de GEE
CFC	Clorofluorocarboneto
GEE	Gases com efeito de estufa
HC	Hidrocarbonetos
HCFC	Hidroclorofluorocarboneto
HFC	Hidrofluorocarboneto
HFO	Hidrofluorofenolinas
IA	Instituto do Ambiente
IIR	Instituto internacional de refrigeração
IPCC	<i>International Panel on Climate Change</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
PNAC	Programa Nacional para as Alterações Climáticas
PNALE	Plano Nacional de Atribuição de Licenças de Emissão
PNUA	Programa das Nações Unidas
RSC	Responsabilidade Social Corporativa
SIDS	Sistema de Indicadores de Desenvolvimento Sustentável
UE	União Europeia
UV	Radiação Ultravioleta
VCRS	Sistema de refrigeração por compressão de vapor

1. Introdução

O primeiro capítulo da presente tese inicia-se com uma perspectiva geral sobre o tema em estudo, onde são definidos os refrigerantes, os sistemas que os utilizam e de que forma são utilizados a nível industrial.

É descrita a importância e a relevância do tema em estudo, abordando numa perspectiva geral a utilização dos refrigerantes a nível mundial, a evolução dos mesmos bem como a necessidade da eliminação da parte de alguns, cujas substâncias químicas afetam o nosso planeta e desgastam a nossa camada do ozono cada vez mais, abrindo a necessidade de os substituir por outros que apelem à sustentabilidade.

Por último expõem-se os objetivos e contribuições desta dissertação, assim como as metodologias utilizadas e a visão geral da organização da mesma.

1.1. Enquadramento

Os refrigerantes são substâncias ou misturas de substâncias (fluidos por norma), que são usados em sistemas de refrigeração e aparelhos de ar condicionado como fluidos mediadores, responsáveis pela realização de transferências de calor, passando por uma transição de fases reversível, ou seja, do estado líquido para o estado gasoso e vice-versa (Gaspar & Aguiar, 2020).

Os equipamentos de aquecimento e arrefecimento envolvidos em diferentes ambientes utilizam a eletricidade como uma importante fonte de energia proveniente dos combustíveis fósseis, causando subsequentemente muitos problemas ambientais à escala mundial. Esta grande dependência da energia convencional para o funcionamento de diferentes equipamentos de arrefecimento também conduz a um aumento exponencial dos preços dessas fontes de energia (Gupta *et al.*, 2016).

A refrigeração desempenha um papel fundamental no desenvolvimento sustentável, uma vez que tem muitas aplicações em diferentes áreas no nosso quotidiano. Os frigoríficos e sistemas de ar condicionado mais utilizados empregam o sistema tradicional de refrigeração por compressão de vapor (VCRS). Porém, o consumo de energia deste tipo de equipamentos é muito elevado e as suas substâncias de trabalho (refrigerantes) criam problemas ambientais que têm de ser resolvidos urgentemente (Verde *et al.*, 2016).

Os VCRS são responsáveis por cerca de 30% do consumo total de energia ao nível mundial e esta quantidade pode aumentar quando ocorrem avarias no sistema, tais como fugas de refrigerantes. No entanto, devido ao seu elevado coeficiente de desempenho (COP – *Coefficient of Performance*), a utilização de VCRS continuará a expandir-se mundialmente (sobretudo nos países em desenvolvimento) (Harby, 2017).

Os fluidos clorofluorcarboneto (CFC), hidroclorofluorcarboneto (HCFC) e hidrofluorcarboneto (HFC) são substâncias quimicamente sintéticas, geralmente utilizadas como fluidos de trabalho devido às suas excelentes propriedades termodinâmicas e químicas. Apesar das vantagens referidas anteriormente, os CFC e os HCFCs contêm cloro que reage com o ozono e destrói gradualmente a camada de ozono atmosférico (Harby, 2017).

Em 1974, os cientistas Rowland e Molina publicaram um artigo que descreve a diminuição da espessura da camada de ozono, particularmente, sobre o continente da Antártida. No seguimento da apresentação deste estudo, a “Convenção de Viena para a proteção da camada de Ozono” foi organizada para tomar fortes medidas no que toca à proteção da camada de ozono servindo de base para o “Protocolo de Montreal” (Norman, 2022).

A indústria agroalimentar Portuguesa é essencialmente composta por micro, pequenas e médias empresas (Ascensão, 2016). Este setor é altamente fragmentado devido à grande variedade de produtos e processos de produção, mas dada a sua heterogeneidade, é um setor com enorme potencial para aumentar a sua eficiência energética devido a atrasos na implementação de medidas de eficiência energética e fontes de energia renováveis, mau uso e desperdício de energia causado pela grande diversidade de processos (Cardoso *et al.*, 2016).

As questões ambientais do aquecimento global, atualmente estão a obrigar os proprietários de supermercados a adotar tecnologias alternativas que ofereçam uma carga de arrefecimento mais baixa, com conseqüente redução de consumo energético e um impacto ambiental inferior. No sentido de responder com eficiência ao problema, os refrigerantes naturais estão a receber cada vez mais atenção pela sua utilização em sistemas de refrigeração de supermercados, especialmente, a utilização de R744, dióxido de carbono, no circuito de baixa temperatura dos sistemas em cascata que se está a tornar uma alternativa comercialmente (Rocha, 2022).

O aumento da procura energética, bem como o aumento dos preços, fizeram soar o alarme para a comunidade científica, bem como para os decisores políticos procurarem outras fontes de energia mais baratas e disponíveis, de modo que o uso convencional de energia possa ser verificado. (Gupta *et al.*, 2016).

A otimização de qualquer processo termodinâmico poderia ser uma melhor opção do ponto de vista da conservação da energia. Existem muitos parâmetros que podem afetar o desempenho dos equipamentos de arrefecimento e um estudo completo baseado na segunda lei da termodinâmica corresponde a metodologia padrão para otimizar o design dos sistemas para um melhor desempenho. No entanto, os equipamentos de arrefecimento explorados pelas energias renováveis também precisam de ser avaliados em termos económicos, a fim de compreender a viabilidade e a viabilidade desses sistemas, uma vez que esta metodologia confere maior flexibilidade na realização de um sistema mais eficiente (Gupta *et al.*, 2016).

1.2 O problema em estudo e a sua relevância

A utilização de refrigerantes como os CFCs, HCFCs e HFCs implica impactos ambientais prejudiciais significativos, tais como o esgotamento da camada de ozono estratosférico e o aquecimento global na medida em que contribuíram com cerca de 70% dos produtos químicos com potencial de depleção da camada do ozono (ODP – *Ozone Depletion Potential*) presentes na atmosfera fabricados pelo Homem (UNEP, 2003). Devido ao ODP e potencial de aumento do aquecimento global (GWP – *Global Warming Potential*), vários refrigerantes foram já proibidos ou estabelecidos prazos para a sua eliminação, nomeadamente os CFC que foram proibidos no Protocolo de Montreal (1987) (Gaspar & Aguiar, 2020).

Com o aumento do consumo de produtos congelados e *fast food*, os sistemas de refrigeração têm tido um aumento considerável no que toca ao seu consumo. Pratos congelados que podem ser facilmente regenerados e consumidos são a grande aposta do momento e para além disso, o aumento da temperatura mundial tem consequentemente disparado o mercado de ar condicionado, como são mais conhecidos (Lopes, 2019).

Tendo em conta essa crescente adesão aos sistemas de refrigeração, têm vindo a ser realizadas convenções, assinados protocolos com o objetivo de eliminar progressivamente os refrigerantes com impacto ambiental negativo. A autorização e a solução provisória de utilização do HFC (até 2040), também alternativas aos CFC, foram também dadas ao abrigo do Protocolo de Quioto. À medida que o prazo se aproxima, a procura de refrigerantes alternativos amigos do ambiente tornou-se um desafio para os investigadores que trabalham nesta área. Os refrigerantes naturais são uma das alternativas mais desejáveis, uma vez que possuem inerentemente zero depleção da camada do ozono (ODP), bem como uma contribuição para o aumento do aquecimento global (GWP) negligenciável (Singh *et al.*, 2021).

No cenário atual, todos os sistemas de refrigeração devem também ser analisados, atribuindo importância às questões económicas e ambientais, para além dos aspetos termodinâmicos. Para proteger o ambiente de uma maior degradação, os refrigerantes utilizados em qualquer sistema devem ter zero ODP e GWP muito baixos procurando obter sustentabilidade nos processos (Roy & Mandal, 2020).

1.3. Objetivos e contribuição da dissertação

O principal objetivo desta dissertação reside no desenvolvimento de uma ferramenta computacional de apoio à decisão na seleção de refrigerantes com reduzido impacto ambiental, assegurando desempenho térmico e eficiência energética similar, tendo em consideração o custo da renovação da instalação. Essa ferramenta deverá ser dotada de capacidades tais como a facilidade no acesso, bem como na compreensão e análise e interpretação dos resultados. Após o levantamento das mais diversas características associadas aos refrigerantes alternativos sustentáveis, é aplicada nas empresas conferindo-lhes a melhor solução possível para o seu caso na substituição pelo refrigerante.

Com o aumento da procura de sistemas de arrefecimento eficientes, económicos e seguros para a indústria de alimentos refrigerados/congelados em rápido crescimento, a otimização de sistemas de refrigeração de baixa temperatura utilizando refrigerantes amigos do ambiente tornou-se hoje num dos objetivos mais importantes a atingir (Draft, 2021).

1.4. Metodologias

Relativamente à forma como foi obtida toda a informação, a investigação está associada a uma investigação científica com objetivo de obter (descobrir) novos conhecimentos porque no fundo, contribui para um trabalho científico que culmina com a dissertação da tese de mestrado e para além disso segue um método científico.

Esta investigação caracteriza-se por ser do tipo dedutivo, uma vez que o trabalho científico final correspondente à ferramenta de apoio à decisão final irá ser obtida a partir de testes e hipóteses, comprovando verdades induzidas (Covas, 2021).

Para além disso, toda a pesquisa científica é realizada de forma quantitativa, uma vez que o objetivo do trabalho reside no desenvolvimento de uma ferramenta computacional de apoio à decisão na seleção de refrigerantes com reduzido impacte ambiental, assegurando desempenho térmico e eficiência energética similar, tendo em consideração o custo da renovação da instalação, para ajudar as empresas a optarem pelos melhores refrigerantes dependendo dos seus interesses e necessidades. O método pelo qual os dados foram recolhidos neste estudo insere-se essencialmente no método descritivo (Diana, 2020). Esta procura pela informação culmina com o ganho de conhecimento traduzindo-se maioritariamente em dados quantitativos, mas em também dados qualitativos (mas em menor quantidade) (Covas, 2021).

1.5. Visão Geral e organização da dissertação

O trabalho científico encontra-se dividido em diversos capítulos, iniciando-se no Capítulo 1 com a contextualização do tema.

De seguida, no Capítulo 2 é apresentado o estado da arte que abordará todos os aspetos relacionados tanto com os refrigerantes que vão ser abolidos como aqueles que irão começar a tornar-se a solução mais sustentável para as empresas. Neste mesmo capítulo está representado o estudo sobre todas as características termodinâmicas que serão importantes para a realização da ferramenta de apoio à decisão.

Posteriormente, no Capítulo 3 apresenta-se a recolha de dados de certas empresas ao nível nacional nas quais terá de ser aplicada a tal ferramenta informando a empresa de qual será o refrigerante mais sustentável para o seu caso tendo em conta os seus objetivos, necessidades e valores.

No seguimento deste contexto, no Capítulo 4, verifica-se a consolidação e aplicação da ferramenta computacional através de três casos práticos nos quais são detalhados todos os passos realizados pelo utilizador e a explicação pormenorizada dos mesmos.

Por último, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões gerais e específicas, que resumem os resultados da dissertação, culminado com as perspetivas futuras de melhoria da ferramenta no sentido de otimizar o sistema de apoio à decisão, de forma a fundamentar com mais detalhe e precisão as recomendações providenciadas às empresas do setor.

2. Estado da Arte

O capítulo que se segue irá abordar os conceitos teóricos associados ao sistema de refrigeração iniciando-se com a sua evolução histórica desde o século 19 até o nosso quotidiano. Posteriormente é analisada a evolução, eliminação e seleção dos refrigerantes tendo por base a procura pela sustentabilidade abordando fatores como a taxa de depleção da camada do ozono e o contributo para o aquecimento global do planeta. É detalhado também o funcionamento do próprio sistema em si juntamente com a pormenorização dos diversos componentes associados bem como as suas funções

2.1.Contextualização Histórica

Conhece-se por refrigeração todo o processo associado à remoção de calor de um determinado produto ou ambiente, através da redução de temperatura do meio (Lopes, 2019). Em 1862, James Harrison (1816-1893) apresentou o primeiro frigorífico doméstico, construído em madeira, como mostra a Figura 1. Estes frigoríficos domésticos eram constituídos por uma caixa de madeira isolada termicamente, onde se colocavam blocos de gelo. Estes sistemas tinham várias limitações, como por exemplo a necessidade de reposição de gelo e de drenagem assim como as taxas de arrefecimento variáveis (Melo, 2011).



Figura 1: Frigorífico doméstico em madeira criado no século XIX (Melo, 2011).

Nessa época ainda não era possível o armazenamento em grandes quantidades, e por isso mesmo, o Homem começou a fazer o transporte recorrendo ao gelo natural, apesar da dificuldade existente na obtenção do mesmo e o facto de este mesmo estar sujeito a um derretimento natural.

Graças ao estudo de vários cientistas foi possível encontrar uma solução para esse problema que culminou com a máquina de gelo presente na Figura 2 criada por John Gorrie e Jacob Perkins (Lopes, 2019).

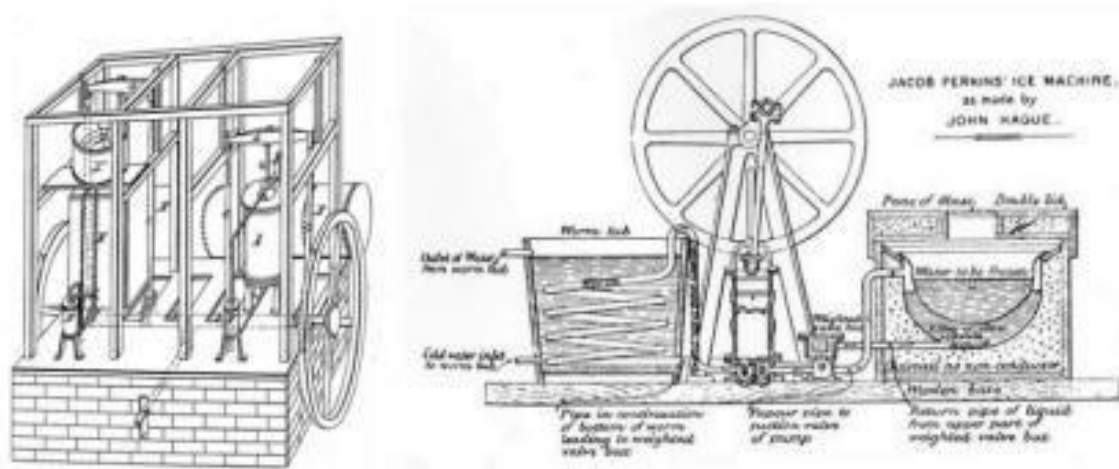


Figura 2: Máquinas de Gelo criadas por Gorrie e Perkins (Lopes, 2019).

Com o avançar do tempo, os sistemas de refrigeração estiveram sujeitos a diversos processos de melhoramento e após a invenção dos motores foram desenvolvidos os primeiros refrigeradores para uso doméstico, sendo posteriormente vendidos na segunda década do século XX (Lopes, 2019).



Figura 3: Exposição de um refrigerador elétrico antigo (Lopes, 2019).

No ano 1824, Carnot, físico-matemático e engenheiro mecânico francês, descreve um ciclo ideal para um sistema constituído por um gás, contido num cilindro equipado com um êmbolo livre, sem atrito. Na Figura 4 está representado o esquema semelhante ao apresentado por Carnot, no qual, os corpos A e B representam reservatórios térmicos cujas temperaturas T_A e T_B são

constantes e T_A é maior do que T_B . São indicadas quatro posições para o êmbolo. Com o êmbolo, inicialmente na posição c-d, o sistema é colocado em contato com o reservatório A. Por sua vez na Tabela 1, são apresentadas as diferentes etapas do ciclo térmico idealizado por Carnot (1824) (Passos, 2003).

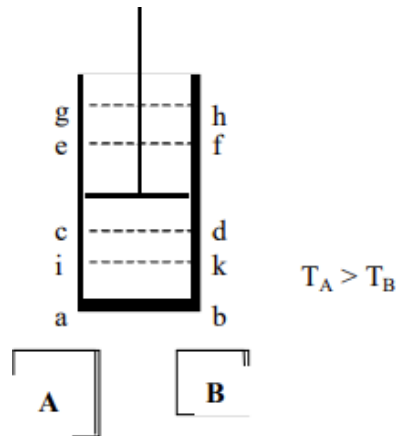


Figura 4: Experiência de um ciclo ideal realizado por Carnot (Passos, 2003).

Carnot apresenta de forma clara que o modelo de ciclo por ele idealizado não permite grandes diferenças de temperatura entre o corpo A e o sistema ar, durante as etapas 1, 2 e 6, assim como entre o corpo B e o ar, durante a etapa 4. Matematicamente, tem-se (Passos, 2003):

$$T_{w_1} = T_A - dT \quad (1)$$

$$T_{w_4} = T_A + dT \quad (2)$$

As equações 1 e 2 tornam o ciclo quase reversível e permitem obter as mesmas quantidades de potência motriz, em cada temperatura, quando se opera no sentido inverso, comprimindo o ar, da posição e-f para i-k, ou expandindo o ar da posição c-d para g-h. Desta forma, desprezando-se qualquer atrito entre o pistão e as paredes do cilindro, a quase reversibilidade é alcançada ao ser abolida qualquer transferência de calor através de diferenças finitas de temperatura e qualquer aumento ou diminuição de temperatura do ar que exija contato térmico ou transferência de calor entre o fluido de trabalho e o meio, ou vice-versa (Passos, 2003).

Tabela 1: Etapas do ciclo ideal apresentado por Carnot (Passos,2003).

Etapa	Posição do Pistão	Descrição	Característica
1	c-d	O sistema (gás) ocupa o volume abcd e é colocado em contato com o reservatório A, à temperatura T_A , e mantido à temperatura $T_A - dT$.	Estado inicial do ciclo
2	e-f	A temperatura do ar é mantida à $T_A - dT$, enquanto o pistão se desloca, gradualmente, entre c-d e e-f.	Estado inicial do ciclo
3	g-h	É desfeito o contato térmico entre o sistema e o reservatório A, ou qualquer outro corpo capaz de fornecer calor. A expansão do ar, entre e-f e g-h, acarreta uma diminuição da sua temperatura, até $T_B + dT$.	Expansão adiabática do ar
4	c-d	O sistema ar é colocado em contato com o corpo B, sendo comprimido entre as posições g-h e c-d, enquanto a temperatura do ar é mantida à $T_B + dT$.	Compressão isotérmica do ar
5	i-k	É desfeito o contato térmico entre o sistema e o reservatório B. A compressão adiabática do gás, entre c-d e i-k, acarreta um aumento da sua temperatura de $T_B + dT$ para $T_A - dT$.	Compressão adiabática do ar
6	e-f	O sistema é colocado, novamente, em contato com o corpo A e o pistão vai da posição i-k para a posição e-f., sem modificar a sua temperatura $T_{ar} = T_A - dT$.	Expansão isotérmica do ar
7		Continuação do novo ciclo, seguindo as etapas 3, 4, 5, 6 e 7	

O ciclo de Carnot representa o limite máximo de eficiência de operação de um ciclo entre dois níveis de temperatura, portanto qualquer ciclo real, nos mesmos níveis, deve apresentar eficiência inferior ou igual à do ciclo de Carnot (Grings, 2014).

Este ciclo admite uma compressão adiabática e reversível (isentropica), uma cedência de calor a temperatura constante (isotérmica), expansão adiabática e reversível (isentropica), e finalmente uma expansão a temperatura constante (isotérmica), respetivamente.

O ciclo pressupõe que a compressão e a expansão adiabática se realizam em sistemas isolados, sem trocas de calor com o meio exterior, sem atritos nem perdas de energia e a compressão e expansão isotérmica admitindo a existência de uma fonte fria e quente de dimensões infinitas para que o calor possa ser extraído e cedido, respetivamente, sem provocar alteração no valor das temperaturas da fonte fria (T_1) e da fonte quente (T_2). A Figura 5 apresenta o esquema do Ciclo inverso da máquina de Carnot (Ferraz, 2008).

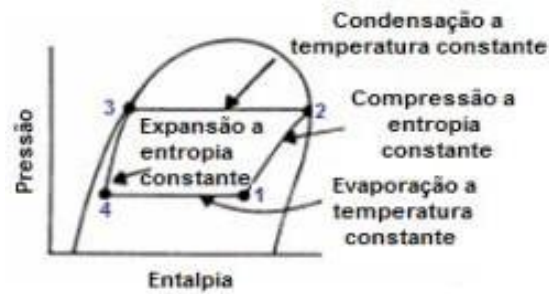


Figura 5: Representação no diagrama P-h do Ciclo inverso da máquina de Carnot e das transformações que o constituem (Mollier) (Ferraz, 2008).

2.2.Ciclos de refrigeração

A Termodinâmica é uma das ciências pilar de um curso de Engenharia Mecânica, eletromecânica ou áreas afins na qual são analisados ao detalhe ciclos de produção de trabalho, ciclos frigoríficos, cogeração, etc. (Oliveira, 2012).

Um sistema termodinâmico é definido como a quantidade de matéria de massa e identidade fixas, ou seja, não existe entrada nem saída de massa do sistema em questão. Assim, para um volume de controlo ao redor de um sistema termodinâmico é possível dizer que o somatório das massas que entram no volume de controle é exatamente igual ao somatório das massas que saem do mesmo (Ferreira,2016):

$$\sum m_e = \sum m_s \quad (3)$$

O princípio da conservação da energia, enunciado pela primeira Lei da termodinâmica, permite aferir que, para um volume de controle, a somatória das energias que entram é igual à somatória das energias que saem (Ferreira,2016):

$$\sum E_e = \sum E_s \quad (4)$$

A segunda Lei da termodinâmica enuncia o sentido dos processos termodinâmicos baseado no princípio das irreversibilidades presentes na natureza. Enuncia que processos termodinâmicos ocorrem num determinado sentido e nunca no sentido oposto, o que torna impossível a existência de sistemas reversíveis e ideais na natureza. Esta lei para um sistema fechado manifesta-se quantitativamente através da entropia (S) como mostra a Equação 5 (Ferreira,2016):

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T} \quad (5)$$

No fundo, num sistema isolado a entropia só pode crescer, por isso a equação 5 é por vezes referida como lei do aumento da entropia. Se o Universo (físico) for um sistema isolado, então a 2ª Lei estabelece que a entropia do universo seja um sistema isolado. Já do ponto de vista termodinâmico, é sempre possível criar um sistema isolado, juntando o sistema propriamente dito a todos os sistemas vizinhos (Oliveira, 2012).

Os diagramas de temperatura e entropia ($T-s$) e de pressão e entalpia ($P-h$) são geralmente utilizados na engenharia para análises de fluidos que operam em sistemas. As Figura 6 e Figura 7 mostram as curvas características de cada diagrama, bem como os pontos principais a serem avaliados ao trabalhar-se com tais diagramas ($T-s$ e $P-h$, respetivamente).

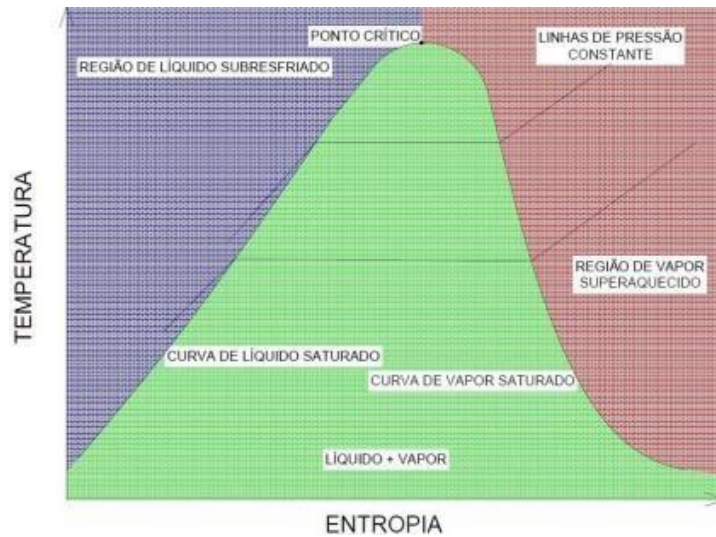


Figura 6: Diagrama de temperatura e entropia ($T-s$) (Ferreira,2016).



Figura 7: Diagrama de pressão e entalpia ($P-h$) (Ferreira,2016).

2.2.1. Ciclo frigorífico Simples

Os ciclos frigoríficos têm um funcionamento inverso ao dos ciclos de potência, ou seja, em vez de produzirem, recebem trabalho. O sentido em que o ciclo é percorrido é anti-horário e enquanto os ciclos de vapor de turbina de gás definem-se como ciclos de potência, estes ciclos em concreto podem genericamente ser designados como ciclos de frio, pois recebem trabalho para transferir calor de uma fonte fria para uma fonte quente. O ciclo recebe o trabalho W para transferir calor de uma fonte fria, à temperatura T_F , para uma fonte quente, à temperatura T_Q . Tanto a fonte fria como a fonte quente são tratadas como reservatórios de energia térmica, a sua temperatura mantém-se constante independentemente dos processos dentro do ciclo. O calor

que entra no ciclo, transferido do TER frio, designa-se por Q_F , ou Q_{in} , e por sua vez, o calor transferido do ciclo para o TER quente é o Q_Q , ou Q_{out} (Oliveira, 2012).

Os elementos principais que compõem o ciclo frigorífico são (Oliveira, 2012):

- Evaporador: evaporação a pressão constante, com entrada de calor;
- Condensador: condensação a pressão constante, com saída de calor;
- Compressor: compressão adiabática de vapor sobreaquecido, entrada de trabalho;
- Dispositivo de expansão: expansão com diminuição de temperatura (efeito de arrefecimento irreversível).

Relativamente ao fluido que circula nestes ciclos, este deve ser muito volátil (facilidade em passar do estado líquido para o gasoso), para que nas pressões próximas da pressão atmosférica, evapora a temperaturas muito baixas, da ordem da temperatura que se pretende manter na câmara fria. Por sua vez, é essa evaporação que, ao absorver calor da câmara fria, permite a produção de um efeito de refrigeração (Oliveira, 2012).

2.2.1.1. Evaporador

O evaporador é um permutador de calor que promove a transferência de calor entre o fluido e o meio que se pretende arrefecer (Ferraz, 2008).

É utilizado com frequência em aplicações de refrigeração, arrefecimento, congelação ou ar-condicionado, com o intuito de retirar energia térmica de um determinado local a refrigerar. O fluido refrigerante entra no evaporador sob a forma de uma mistura líquido-vapor e abandona-o no estado de vapor saturado ou sobreaquecido. Os evaporadores podem subdividir-se em duas categorias, dependendo do estado do meio a refrigerar (Duarte, 2013):

- evaporadores secos (ou de expansão direta): são utilizados no arrefecimento de ambientes fechados (ar), por exemplo, os sistemas de ar-condicionado. A principal desvantagem dos evaporadores “secos” ou de expansão, está relacionada com o seu baixo coeficiente global de transferência de calor, que resulta da dificuldade em manter a superfície dos tubos molhada pelo fluido em expansão e da superfície necessária para promover o sobreaquecimento (Stoecker, 1998). Os fluidos halogenados, como o caso dos HFCs, são normalmente empregados neste tipo de evaporadores, especialmente em instalações de capacidades médias (Guerra, 2014).
- os evaporadores inundados: utilizados no arrefecimento de: água potável, água utilizada em processos industriais, leite após o processo de pasteurização e água utilizada em sistemas de ar-condicionado (Duarte, 2013). Este tipo de evaporador usa de forma efetiva toda a sua superfície de transferência de calor, porque existe líquido em contacto com toda a superfície dos tubos. Assim, resultam elevados coeficientes globais de transferência de calor (Silva, 2005).

2.2.1.2 Condensador

O condensador é um permutador de calor que é utilizado para arrefecimento, condensação e subarrefecimento do fluido refrigerante proveniente do compressor e que se encontra a elevada pressão e temperatura. O fluido refrigerante entra no condensador no estado de vapor sobreaquecido e abandona-o, normalmente, sob a forma de líquido saturado. A capacidade de transferência de calor é considerada a característica mais importante durante a escolha do tipo de condensador a utilizar (Duarte, 2013). Podem distinguir-se três tipos de condensadores:

- Condensadores arrefecidos a ar: são normalmente utilizados como parte integrante de unidades produzidas em fábricas (unidades condensadoras) de pequena ou média capacidade (Duarte, 2013);
- Condensadores arrefecidos a água: operam de forma mais eficiente que os condensadores arrefecidos a ar, sobretudo em condições de elevada temperatura ambiente. Por sua vez, nos condensadores a água multitubulares, o próprio condensador poder ser usado como reservatório para armazenamento do refrigerante condensado (Gas Natural Fenosa, 2014);
- Condensadores que operam através do efeito evaporativo: os condensadores evaporativos apresentam a vantagem de necessitarem de uma bomba de menor capacidade que a requerida pelos condensadores arrefecidos a água, o que representa um menor consumo de energia. Contudo, os condensadores evaporativos devem localizar-se próximos dos compressores, para se evitar longas linhas de descarga (ligação entre o compressor e o condensador).

2.2.1.3. Compressor

A função primordial do compressor é a de aumentar a pressão do fluido refrigerante e promover a movimentação desse fluido dentro do circuito frigorífico. Existem vários tipos de compressores usados na refrigeração, mas os mais aplicados na indústria, em particular nas agroalimentares são os compressores do tipo: alternativo, parafuso e *scroll* (Ferraz, 2008).

Estes compressores realizam a compressão do vapor de fluido refrigerante mediante a redução interna do volume de uma câmara de compressão, provocado por um órgão mecânico. Todos os compressores que integram as categorias anteriores, são constituídos por um motor, órgão responsável pela movimentação dos componentes do compressor e pelo compressor propriamente dito e encontram-se disponíveis com três configurações geométricas distintas (Ferraz, 2008) expostas na Figura 8:

- Herméticos;
- Semi-herméticos;
- Abertos.

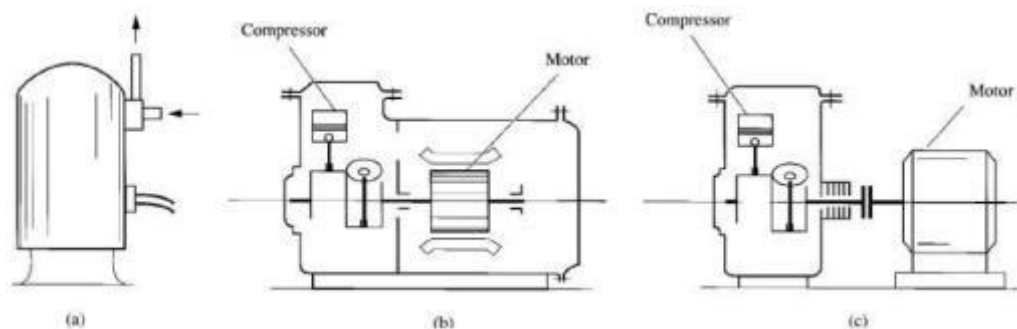


Figura 8: a) Compressor hermético, b) compressor semi-hermético, c) Compressor aberto (Dias, 2012).

Os compressores podem também ser classificados segundo o seu funcionamento (volumétricos ou dinâmicos) e segundo a sua construção (abertos, semi-herméticos e herméticos). Os compressores volumétricos podem ainda ser divididos em: alternativos, rotativos, de parafuso e espiral.

A classificação dos compressores resume-se na Tabela 2 (Perestrelo, 2017):

Tabela 2: Classificação dos compressores (Perestrelo,2017).

Funcionamento				Construção	
Volumétricos				Dinâmicos	Abertos
				Centrífugos	Semi-Herméticos
Alternativos	Rotativos	Parafuso	Espiral	Axiais	Herméticos

A diferença entre estas configurações está na forma de instalação do conjunto motor-compressor, do acesso ao interior do compressor e no sistema de vedação do óleo de lubrificação (Ferraz, 2008).

2.2.1.4. Dispositivo de expansão

São utilizados para reduzir a pressão de condensação (alta pressão) até à pressão de evaporação (baixa pressão), através do estrangulamento do fluido refrigerante. Este equipamento é desenhado para regular o caudal de fluido refrigerante que entra no evaporador, dependendo o caudal da quantidade de calor a ser removida do espaço a refrigerar. Os tipos de dispositivos de expansão mais utilizados são: a válvula de expansão termostática, a válvula de expansão a pressão constante, a válvula de boia e o tubo capilar (Duarte, 2013). As válvulas de expansão termostática regulam o caudal de fluido refrigerante líquido que chega ao evaporador através da monitorização do sobreaquecimento, apresentando certas vantagens assim como determinadas desvantagens de acordo com a Tabela 3 (Perestrelo, 2017).

Tabela 3: Vantagens e desvantagens do uso de válvulas de expansão termostática (Perestrelo,2017).

Vantagens	Desvantagens
São facilmente reguláveis para exigências de cargas constantes;	Têm um custo mais elevado do que os capilares;
Permitem a regulação do sobreaquecimento;	Necessitam de manutenção devido à presença de partes móveis;
Possuem equalização das pressões do sistema;	Exigem a montagem de depósito de líquido;
Reduzem as possibilidades de golpe de líquido no compressor.	Só operam com o fluido identificado e encerrado no bolbo;
	Exigem limites apertados na carga de fluido

Relativamente ao fluxo do processo, o ciclo de refrigeração é um processo no qual ocorrem transferências de calor ocorrendo mudanças de fase por parte do líquido frigorígeno do estado líquido para o estado gasoso e vice-versa. O procedimento no seu todo divide-se essencialmente em 4 etapas descritas pelos pontos apresentados na Figura 9.

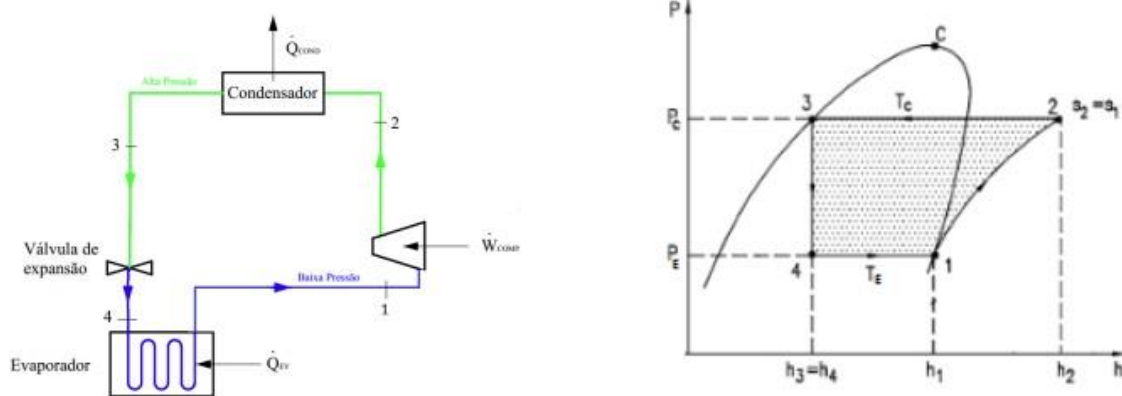


Figura 9: Representação do ciclo frigorífico simples e da sua evolução termodinâmica no diagrama pressão- entalpia (Pirani, 2013).

Os processos considerados são os seguintes:

- Compressão (1-2)

O fluido entra no compressor no estado de vapor saturado, onde é comprimido, da pressão de evaporação P_0 até à pressão de condensação P_c como se pode verificar na Figura 10. Nesta fase, o vapor saturado apresenta as condições necessárias de temperatura e pressão para ser

condensado através de água ou ar. No ciclo teórico, a compressão é considerada adiabática reversível, ou seja, isentrópica, desprezando-se as perdas (Ramos,2016). A potência de compressão (W_c) é totalmente transferida para o fluido refrigerante e pode ser quantificada pelo produto entre o seu caudal (\dot{m}) e a variação de entalpia no compressor (h_1 e h_2), expressando-se pela Equação 6 (Ramos, 2016).

$$W_c = \dot{m} \times (h_2 - h_1) \quad (6)$$

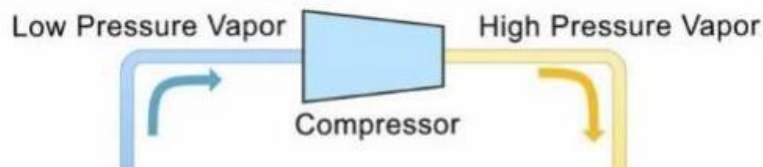


Figura 10: Estado do fluido entre o compressor.

- Condensação (2-3)

O vapor sobreaquecido segue para o condensador onde é arrefecido e condensado atingindo o estado líquido saturado, ocorrendo a perda de calor sensível para a envolvente e de calor latente por condensação como se pode verificar na Figura 11. Neste processo, a pressão é constante, pelo que a condensação é isobárica e ocorre uma diminuição da entalpia. A capacidade de rejeição de calor (Q_H) pode ser quantificada pelo produto entre o caudal do refrigerante e a variação de entalpia no condensador (h_2 e h_3), expressando-se através da Equação 7 (Ramos, 2016).

$$Q_H = \dot{m} \times (h_2 - h_3) \quad (7)$$

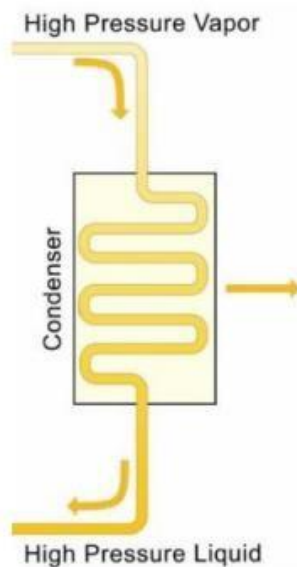


Figura 11: Estado do fluido entre o condensador (Lopes, 2019).

- Expansão (3-4)

O fluido segue para o dispositivo de expansão onde é submetido a uma queda brusca de pressão e temperatura, passando a coexistir nos estados líquido e gasoso como se pode verificar na Figura 12. A expansão é irreversível e isentálpica ($h_3 = h_4$), desde a pressão de condensação (P_c) até à pressão de evaporação (P_0), desprezando-se as variações de energia potencial e cinética (Ramos, 2016).



Figura 12: Estado do fluido entre os dispositivos de expansão. Fonte: (Lopes, 2019).

- Evaporação (4-1)

O fluido que se encontra numa mistura predominantemente líquida é conduzido pelas serpentinas do evaporador, onde absorve o calor do meio a ser refrigerado e, num processo de aquecimento isobárico, evapora e causa o efeito frigorífico pretendido como se pode verificar na Figura 13. O gás refrigerante torna a entrar no compressor, completando o ciclo termodinâmico ideal. A capacidade de refrigeração (Q_L) exprime-se através da Equação 8 (Ramos, 2016).

$$Q_L = \dot{m} \times (h_1 - h_4) \quad (8)$$

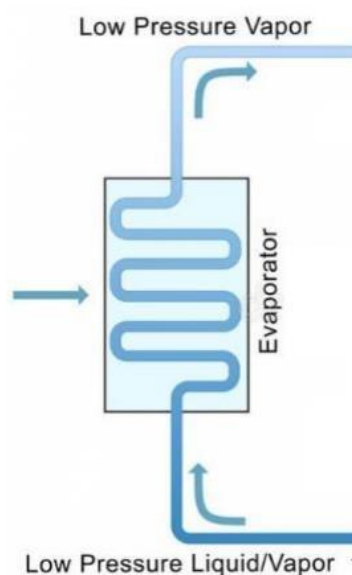


Figura 13: Estado do fluido entre o evaporador. Fonte: (Lopes, 2019).

2.2.2.Sistemas de refrigeração em cascata

O recente relatório do Instituto Internacional de Refrigeração (IIR) mostra que cerca de 17% do consumo total de energia mundial está a ser utilizado no sector da refrigeração. Existem muitas aplicações de refrigeração nas indústrias de gelo, indústrias químicas e indústrias de alimentos congelados, onde o aumento da temperatura pode ser bastante elevado, quer devido à exigência de temperaturas de evaporação muito baixas, quer devido às temperaturas muito elevadas nas regiões climáticas mais quentes. Nestas situações, a utilização de um sistema simples de refrigeração por vapor de uma só fase não é desejável, uma vez que conduz a uma diminuição do efeito de arrefecimento, a um aumento da potência do compressor e ao desgaste do compressor. Um dos métodos para ultrapassar o problema do elevador a alta temperatura é a utilização do sistema de refrigeração em cascata (Roy & Mandal, 2020).

Os sistemas de refrigeração em cascata em duas fases são adequados para aplicações industriais, especialmente na indústria de refrigeração de supermercados. Nestes sistemas, duas unidades de estágio único são acopladas termicamente através de condensadores em cascata. O circuito de alta temperatura de um sistema de refrigeração em cascata pode normalmente ser carregado com amoníaco (R717), propano (R290), propileno (R1270), etanol ou R404A, enquanto o dióxido de carbono (R744) pode ser utilizado no circuito de baixa temperatura do sistema de refrigeração (Rocha,2022).

O amoníaco, é um refrigerante naturalmente disponível com poucas restrições de aplicação, tais como toxicidade e inflamabilidade. A desvantagem do propileno, do propano e do etanol é a sua elevada inflamabilidade. As pressões de evaporação e de condensação do etanol também são muito baixas em relação à pressão ambiente, o que leva a fugas de ar no sistema. No entanto, o risco associado a refrigerantes tóxicos e inflamáveis pode ser altamente minimizado, limitando o circuito de alta temperatura à área da sala de máquinas ou ao telhado de um supermercado. O dióxido de carbono tem a desvantagem de atingir uma alta pressão a baixas temperaturas, o que traduz numa constante remodelação de tubos e acessórios. Sendo assim, acaba por ser eficiente a utilização do R744 para aplicações de baixa temperatura (Massucheto,2018).

Para aplicações em que a diferença entre a temperatura de condensação e a temperatura de evaporação é muito acentuada, o rendimento dos sistemas de refrigeração de uma etapa é consequentemente baixo, devendo-se essencialmente ao aumento do trabalho de compressão causado pelas elevadas razões de pressão e à presença de grandes quantidades de vapor saturado à entrada do evaporador (Silva, 2011). Este vapor não contribui para o efeito frigorífico e tem de ser na mesma comprimido para pressões elevadas. Além disso, o vapor aumenta a resistência à transferência de calor no evaporador. Nestes casos recorre-se a sistemas multi-estágios ou a sistemas em cascata. Existem várias soluções para a construção de sistemas multi-estágios, mas em todos a ideia passa principalmente por comprimir o vapor em várias etapas até à pressão final, arrefecendo-o entre as mesmas e admitir no evaporador fluido com o menor título possível. Na Figura 14 é apresentada uma possível solução (Rocha,2022).

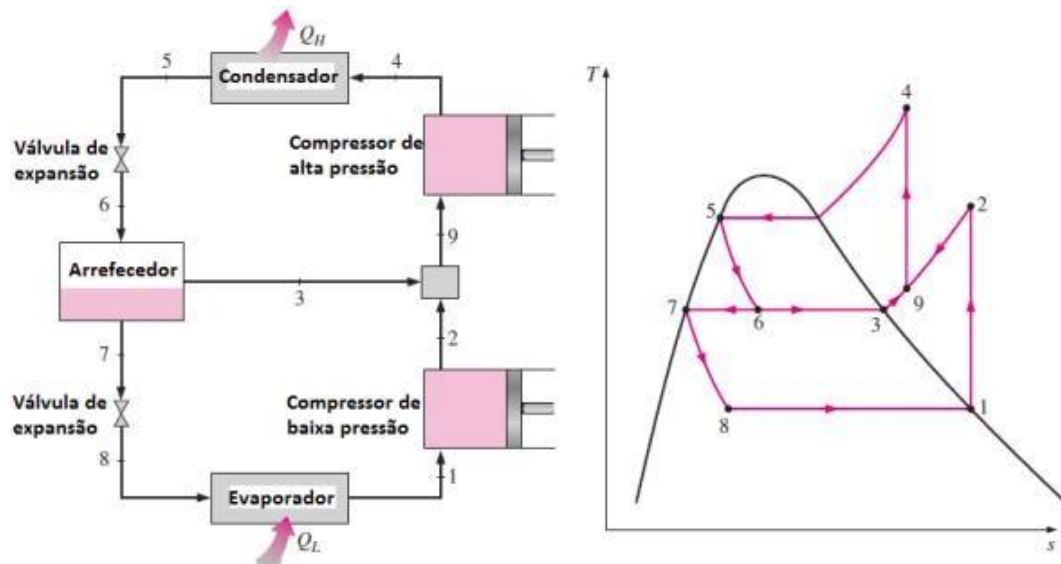


Figura 14: Esquema e diagrama T - s de um sistema de 2 estágios (Perestrelo, 2017).

No sistema da Figura 14, o líquido proveniente do condensador é laminado até à pressão intermédia e segue para o arrefecedor que contém vapor húmido. O vapor presente no arrefecedor é misturado com o vapor sobreaquecido proveniente do compressor de baixa pressão, arrefecendo-o e seguindo para a admissão do compressor de alta pressão.

O líquido que está no arrefecedor passa por uma válvula de expansão e em seguida entra no evaporador, retirando calor do espaço a refrigerar. Os sistemas em cascata são constituídos basicamente por dois ciclos de compressão de vapor simples, em que o condensador do ciclo que opera a mais baixas temperaturas é simultaneamente o evaporador do ciclo que opera a mais altas temperaturas. Por norma, os refrigerantes de cada ciclo são diferentes, tendo o fluido do ciclo a mais baixas temperaturas um ponto de ebulição inferior. Uma aplicação deste tipo de sistemas emprega amoníaco no ciclo a altas temperaturas e dióxido de carbono no ciclo a baixas temperaturas (NH_3/CO_2). Este sistema apresenta menor carga de amoníaco e terá um maior rendimento na obtenção de capacidade frigorífica a baixas temperaturas do que um sistema de duas etapas normal, utilizando o amoníaco (Perestrelo, 2017).

2.2.3. Parâmetros associados aos ciclos de refrigeração

2.2.3.1. Parâmetro de desempenho

O desempenho do ciclo é avaliado através de um coeficiente designado por COP que no fundo traduz-se num rendimento que se define como sendo o *output* do ciclo a dividir pelo respetivo *input* (sabendo que W é o mesmo que W_{net}) (Oliveira, 2012).

$$COP = \frac{Q_F}{W_{net}} = \frac{Q_F}{Q_Q - Q_F} \quad (9)$$

A fim de obter a caracterização do tamanho e dimensão da central de refrigeração, usa-se o conceito de capacidade de arrefecimento, ou seja, no fundo corresponde à potência calorífica extraída do espaço frio e absorvida pelo refrigerante durante a evaporação (Oliveira, 2012):

$$Q_F = \dot{m}_{fr} \times q_e [kW] \quad (10)$$

A eficiência de um sistema é tanto maior quanto maior for o efeito refrigerante de um sistema e menor for o trabalho fornecido ao fluido. No caso do ciclo de refrigeração de Carnot ou ciclo Teórico, o coeficiente de eficiência pode ser escrito como (Mesquita, 2009):

$$COP = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad (11)$$

Por vezes aplica-se um recuperador de calor entre o gerador e o absorvedor, aumentando assim o COP do sistema. Com o objetivo de aumentar o COP do ciclo de absorção, utiliza-se um ciclo que acaba por ser dois ciclos (*Multiple-Effect Systems*). Existe um segundo par gerador/absorvedor que é alimentado pela fonte térmica e o calor rejeitado no condensador deste é transmitido para o segundo gerador do sistema. Otimizar um ciclo tendo em conta apenas o COP pode não ser suficiente. Para este ser máximo, em termos termodinâmicos, a carga tinha de ser nula (Amorim, 2010).

2.2.3.2. Parâmetro do Rendimento Volumétrico

O rendimento volumétrico de um compressor alternativo é a razão entre o volume de fluido admitido num ciclo e o seu deslocamento volumétrico M . O seu valor é função da sua geometria e do fluido refrigerante utilizado. Além disso, o rendimento volumétrico não é um valor constante, mas varia com as condições de funcionamento do sistema (Mesquita, 2009). O rendimento volumétrico é afetado negativamente pelo aquecimento e aumento de pressão do gás na linha de aspiração até entrar no cilindro. A transferência de calor das partes quentes do compressor para o gás ao longo da conduta reduz a massa específica do gás aspirado, diminuindo, assim, o caudal volumétrico que circula. As fugas internas devido às folgas entre cilindros e os êmbolos são outra fonte de ineficiência volumétrica. A fórmula de Rapin permite calcular o rendimento volumétrico do fluido é a seguinte (Dossat, 1997):

$$\eta_v = 1 - 0,05 \times \frac{P_2}{P_1} \quad (12)$$

A Figura 15 apresenta a curva típica da relação entre a razão de pressões e a eficiência volumétrica na compressão de um halogéneo e, tal como indica a Equação 18, pode-se afirmar que com o aumento da razão de pressões, o rendimento volumétrico diminui.

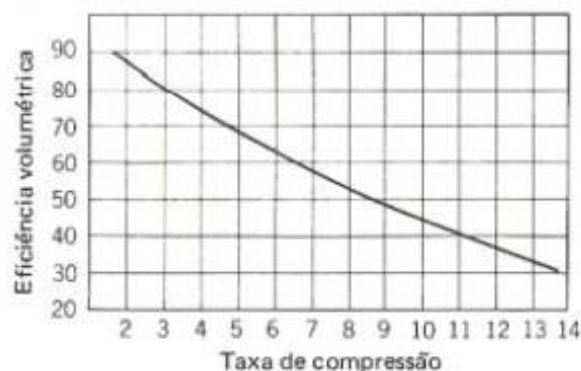


Figura 15: Rendimento Volumétrico. Fonte: (Dossat, 1997)

O rendimento volumétrico não pode ser aplicado diretamente para determinar o desempenho total do ciclo, porque quanto menor for significará que houve menos potência fornecida ao compressor, no entanto, por unidade de massa debitada o consumo de energia seja maior.

Deste modo, para o mesmo caudal mássico, com menor eficiência volumétrica, o compressor terá maiores dimensões e potência no consumo elétrico, devido à maior inércia e perdas mecânicas. Em sistemas com vários andares, entre os estágios intermédios o gás é arrefecido, de forma a reduzir o seu volume específico e trabalho necessário para o mover num diferencial de pressão.

2.3. Evolução dos refrigerantes

A Tabela 4 mostra, por ordem cronológica, as medidas tomadas nos eventos até à data realizados, demonstrando também o conjunto de restrições impostas à utilização de diversos fluidos frigorígenos (Saldanha, 2019).

Tabela 4: Evolução histórica dos refrigerantes tendo em conta o seu impacto ambiental (Saldanha, 2019).

Ano	Evento	Medida
1985	Convenção de Viena	Reconhecimento das diversas consequências da utilização dos CFCs e demonstração de grande preocupação por parte de grandes empresas
1987	Protocolo de Montreal	Regulação da produção e do consumo de “substâncias destruidoras da camada de ozono”, incidindo, especialmente, nos gases CFC, gases com grande capacidade destruidora da camada de ozono e, além disso, grande potencial de aquecimento global
1990	Emenda de Londres	Definição do <i>phase-out</i> de todos os gases refrigerantes baseados em CFC, halon e tetracloro de carbono, em países desenvolvidos e em desenvolvimento.
1992	UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (Copenhaga)	Inclusão dos HCFC na lista de “gases destruidores de ozono” em processo de <i>phase-out</i> , neste caso, só para países desenvolvidos, recorrendo a refrigerantes comumente utilizados como o R22 e o R123

1997	Protocolo de Quioto	O <i>phase-out</i> dos HCFC é alargado a todos os países e calendarizou-se o <i>phase-out</i> dos brometos de metilo para 2005 e 2015, em países desenvolvidos e países em desenvolvimento, respetivamente
1999	Emenda de Pequim	Controlo mais restrito à produção e comercialização dos gases HCFC
2007	Aceleração da inutilização dos HCFC (Protocolo de Montreal)	-----
2015	Acordo de Paris sobre as alterações climáticas	-----
2016	Emenda de Kigali ao Protocolo de Montreal	Definição do <i>phase-down</i> dos gases hidrofluorcarbonetos (HFC) devido ao seu valor elevado de GWP

Os refrigerantes halogenados, tais como CFCs, HCFCs e HFCs, são componentes químicos obtidos a partir de hidrocarbonetos metano e etano, substituindo os átomos de cloro e flúor no lugar do hidrogénio. Se os átomos de hidrogénio forem substituídos por um halocarboneto, é totalmente halogenado. Quando os refrigerantes halogenados são expelidos de um equipamento durante o funcionamento normal ou por acidente, participam também na desagregação da camada de ozono e consequente aumento do aquecimento global (Harby, 2017).

Embora a fuga seja por norma em quantidades reduzidas, é uma importante fonte de emissões de gases com efeito de estufa (GEE) devido ao elevado GWP destes refrigerantes. Além disso, o refrigerante libertado de um equipamento conduz a uma carga de sistema insuficiente e afeta negativamente o desempenho do equipamento, resultando num elevado consumo de energia. A Tabela 5 representa o efeito dos refrigerantes ao nível ambiental, e a partir da análise da mesma, conclui-se que os CFC e os HCFCs mostram uma elevada contribuição para a redução da camada de ozono e para o efeito de estufa (Verde, 2016).

Tabela 5: Efeito dos refrigerantes ao nível ambiental (Proklina GT,2010).

Grupo de Refrigerantes	Exemplos de refrigerantes	ODP	GWP	Tempo de vida na atmosfera	Inflamabilidade
CFCs	R11, R12, R115	0.6-1	4750-14,400	45-1700	Não
HCFCs	R22, R141b, R124	0.02-0.11	400-1800	1-20	Não
HFCs	R407C, R32, R124a	0	140-11.700	1-300	Não

HFOs	R1234yf, R123ze, R1234yz	0	<0-12	-	Sim
Naturais	R744, R717, HC(290,R600,R600a)	0	0	-	Sim

Por outro lado, os HFCs não contêm cloro ou bromo, mas são gases com efeito de estufa que afetam a temperatura global da superfície da Terra. Em suma, todos estes refrigerantes contribuem significativamente para o impacto ambiental e as alterações climáticas. Para satisfazer eficazmente as questões ambientais globais, todos estes refrigerantes têm de ser substituídos por outros com ODP e GWP reduzidos (Gaspar & Aguiar, 2020).

Além disso, o desempenho dos permutadores de calor deve ser melhorado para minimizar o GWP indireto causado pela eletricidade gerada pela combustão de combustíveis fósseis. Uma das alternativas é substituir estes refrigerantes halogenados pela utilização de refrigerantes naturais, como por exemplo os hidrocarbonetos (HCs) (Gaspar & Aguiar, 2020).

Estes HCs são naturais, baratos, e podem abranger quase todas as aplicações de refrigeração existentes. Além disso, apresentam zero ODP e um GWP muito baixo, são bons condutores de calor, mais eficientes que os refrigerantes halogenados e apresentam um impacto ambiental mínimo quando comparados como mostra a Tabela 5 (Proklina GT,2010).

Os hidrocarbonetos podem ser utilizados nas seguintes formas:

- componentes individuais (puros);
- misturas de diferentes hidrocarbonetos (misturas de HC);
- componentes de misturas que contenham refrigerantes de halocarboneto (misturas HC/HFC).

2.4. Impacte ambiental

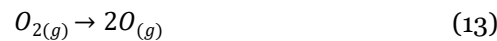
Os refrigerantes halogenados utilizados nos sistemas de arrefecimento atualmente causam uma ameaça ao ambiente quando expelidos para a atmosfera por causa do seu ODP e GWP (Verde *et al.*,2017).

O primeiro impacto ambiental crucial que atingiu as indústrias baseadas em refrigeração é o ODP, devido a produtos químicos artificiais na atmosfera. Os refrigerantes à base de cloro são estáveis o suficiente para alcançar a estratosfera, onde os átomos de cloro agem como um catalisador para destruir a camada estratosférica de ozono, que protege a superfície da Terra da radiação Ultravioleta (UV) , alterando o equilíbrio dinâmico da formação e consumo do ozono, provocando a sua destruição (ATM, 2009). Cerca de 90% do ozono existe na estratosfera entre 10 e 50 km acima da superfície terrestre como mostra a Figura 16 (Paul *et al.*, 2013).



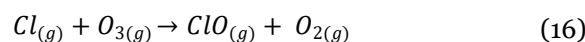
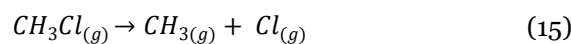
Figura 16: Ilustração das camadas da atmosfera terrestre (ATM Revolucion, 2009).

A molécula de ozono é formada quando a radiação solar incide sobre ela e a decompõe em moléculas de oxigénio, e por sua vez, esse oxigénio livre reage com o gás oxigénio e forma o ozono (O_3) como mostram as seguintes equações (Fogaça, 2021):

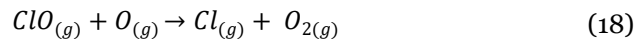
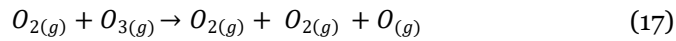


A camada do ozono apresenta uma importância extrema no que toca à proteção da vida no planeta, uma vez que atua como se fosse uma espécie de “manto protetor” que retém grande parte dos raios UV provenientes do Sol e para além disso também impede que a maior parte desta atinja a superfície terrestre (Fogaça, 2021).

A molécula de ozono contém três átomos de oxigénio (O_3) e é instável em relação ao oxigénio (O_2). A redução da camada de ozono tem sido provocada devido à presença de cloro e bromo na camada da estratosfera como resultado da migração do cloro que contém substâncias químicas (Ramos, 2013).



Depois destas reações químicas, obtêm-se moléculas de oxigénio e de monóxido de cloro, e o facto de já existirem previamente moléculas de oxigénio na estratosfera, esta continuará a reagir com o ozono degradando-o consecutivamente, culminando com a formação de mais e mais moléculas de oxigénio. Para além disso, o monóxido de cloro formado reage facilmente com radicais livres de oxigénio, libertando mais e mais átomos de cloro e consequentemente oxigénio (Fogaça, 2021).



O ODP de uma substância é a quantidade relativa de degradação que pode causar à camada de ozono em comparação com a influência do CFC-11, ao qual é atribuído um valor de referência de ODP=1. A principal fonte de aquecimento global deve-se ao aumento do volume de dióxido de carbono (CO_2), gás com efeito de estufa, na atmosfera. O GWP é uma medida da quantidade de GEE presos no ambiente atmosférico em comparação com o efeito de um quilograma de CO_2 (Ramos, 2013).

2.5. Estratégias de Substituição

A Figura 17 mostra o plano de eliminação faseada dos CFC e dos HCFC nos países desenvolvidos e em desenvolvimento e utiliza as limitações dos HFC na União Europeia (UE). Como resultado do protocolo de Montreal, a produção de CFC foi completamente eliminada nos países desenvolvidos em 1996 e em 2010 nos países em desenvolvimento, e os CFCs são então substituídos por refrigerantes HCFCs menos nocivos. Prevê-se que os HCFCs sejam eliminados na sua totalidade até ao final de 2030 nos países desenvolvidos e em 2040 nos países em desenvolvimento (Verde *et al.*, 2016).

Os países desenvolvidos começaram então a utilizar HFCs, que não têm impacto na camada de ozono, mas ainda têm GWP elevado. As propostas de diminuição dos HFC estão também a ser discutidas no âmbito do Protocolo de Montreal (Gaspar & Aguiar, 2020).

Os países têm sido, em geral, agressivos e eficazes na aplicação de protocolos e nas suas alterações subsequentes para retardar e inverter a acumulação de cloro estratosférico e bromo provenientes de ODS (Ioan, 2014).

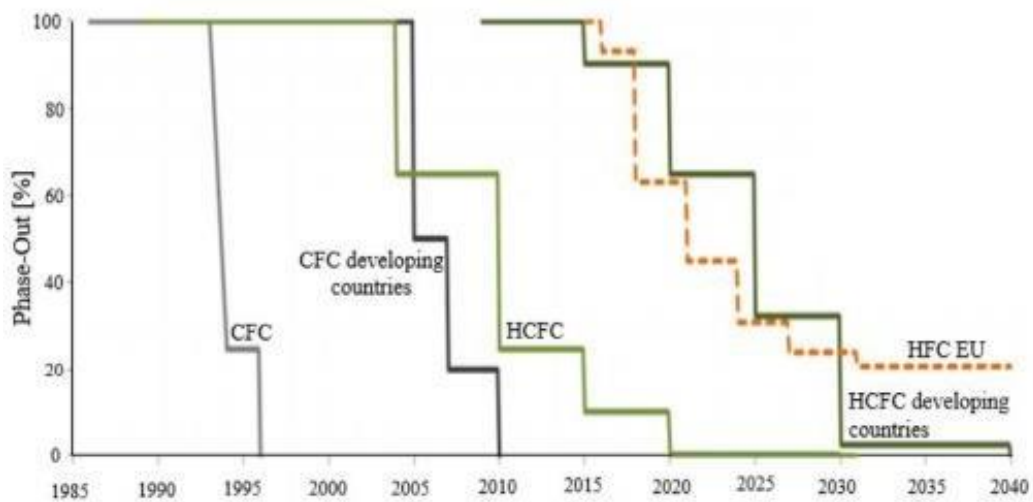


Figura 17: Plano de eliminação progressiva dos refrigerantes halogenados de acordo com o Protocolo de Montreal (Harby, 2017).

Foram acordadas determinadas alterações e certos ajustamentos nas cimeiras de Londres (1990), Copenhaga (1992), Montréal (1997) e de Pequim (1999) , como se pode verificar pela Figura 18. Estes protocolos e modificações encurtaram os calendários para eliminar progressivamente o consumo de substâncias classificadas para o ozono (Ioan,2014).

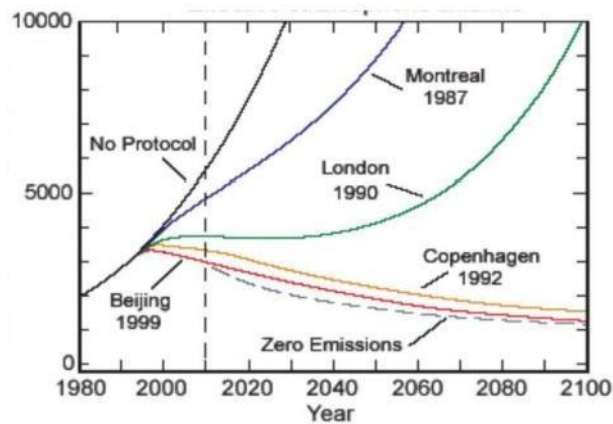


Figura 18: Protocolos e as suas alterações subsequentes destinadas a retardar a acumulação de cloro estratosférico e bromo (Harby, 2017).

A produção de CFC e HCFCs reportada ao Estudo Alternativo de Aceitação Ambiental de Fluorocarbonos (AFEAS) reduziu drasticamente nos últimos anos. A Figura 19 mostra a produção de refrigerantes halogenados de 1980 a 2006. Pode observar-se que os HCFCs aumentaram rapidamente após a sua introdução para substituir os CFC, mas, no entanto, diminuíram significativamente desde 2004. O aumento da produção de HFC é pequeno em comparação com o desativação/desmantelamento de sistemas com CFC e HCFC. Os HFC ou as suas misturas trouxeram benefícios ambientais viáveis quando utilizados como alternativa aos

CFCs ou HCFCs, mas é necessário tomar em atenção o aumento das concentrações de GWP elevados (Proklina GT,2010).

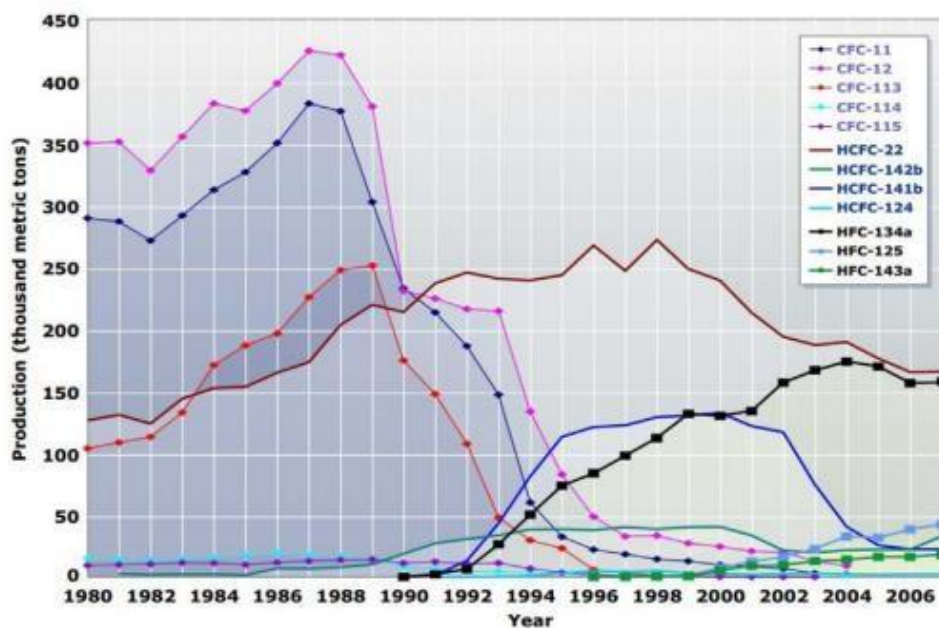


Figura 19: Produção de Refrigerantes Halogenados (Harby,2017).

2.5.1. Aplicação dos protocolos impostos pela União Europeia

No avançar dos anos foram emitidos protocolos nomeadamente nos anos 2006, 2009 e 2014 nos quais apesar dos artigos mudarem ligeiramente, o âmbito é o mesmo. Têm todos sem exceção o objetivo de eliminar progressivamente os refrigerantes com efeito prejudicial para a camada do ozono. O Regulamento N° 842/2006 do Parlamento Europeu e do Conselho de 17 de maio de 2006 foi publicado com o objetivo de “*conter, prevenir e reduzir assim as emissões de gases fluorados com efeito de estufa abrangidos pelo Protocolo de Quioto. Aplica-se aos gases fluorados com efeito de estufa constantes...*” (EU,2006).

O Regulamento N° 1005/2009 do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Setembro de 2009 foi emitido sobretudo para ser aplicado sobre as substâncias que empobrecem a camada do ozono, cujo âmbito está relacionado com o estabelecimento de “regras relativas à produção, importação, exportação, colocação no mercado, utilização, recuperação, reciclagem, valorização e destruição de substâncias que empobrecem a camada de ozono, à comunicação de informações sobre estas substâncias e à importação, exportação, colocação no mercado e utilização de produtos e equipamentos que as contenham ou delas dependam” (UE,2009).

O regulamento N° 517/ 2014 e atual do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Abril e 2014 foi publicado com o intuito de continuar a proteger o ambiente mediante a redução de emissões de gases fluorados com efeito de estufa e para tal (UE ,2014):

- Estabelece regras em matéria de confinamento, utilização, recuperação e destruição de gases fluorados com efeito de estufa e em matéria de medidas auxiliares conexas;
- Impõe condições à colocação no mercado de produtos e equipamentos específicos que contenham, ou cujo funcionamento dependa de gases fluorados com efeito de estufa;
- Impõe condições às utilizações específicas de gases fluorados com efeito de estufa;
- Estabelece limites quantitativos à colocação de hidrofluorcarbonetos no mercado.

Os refrigerantes sobre os quais atuaram (procuraram eliminar tendo em conta o seu carácter destrutivo da camada do ozono e contributo para o aquecimento global) os artigos presentes no regulamento estão então descritos na Tabela 6 juntamente com a sua fórmula química e o seu Potencial de aquecimento global devidamente calculado.

Tabela 6: Refrigerantes a ser descontinuados com base no Regulamento N° 517/ 2014 (UE,2014).

Gás fluorado com efeito de estufa	Fórmula Química	Potencial de aquecimento global (PAG)
Hexafluoreto de enxofre	SF6	22 800
Hidrofluorocarbonetos (HFC):		
HFC-23	CHF3	14800
HFC-32	CH2F2	675
HFC-41	CH3F	92
HFC-43-10mee	C5H2F10	1 500
HFC-125	C2HF5	3500
HFC-134	C2H2F4	1 100
HFC-134a	CH2FCF3	1 430
HFC-143	C2H3F3	330
HFC-143a	C2H3F3	4 300
HFC-152	CH2FCH2F	53
HFC-152a	C2H4F2	124
HFC-161	CH3CH2F	12
HFC-227ea	C3HF7	3 220
HFC-236cb	CH2FCF2CF3	1 340
HFC-236ea	CHF2CHFCF3	1 370
HFC-236fa	C3H2F6	9 810
HFC-245ca	C3H3F5	693
HFC-245fa	CHF2CH2CF3	1 030
HFC-365mfc	CF3CH2CF2CH3	794
HFC-43-10 mee	CF3CHFCHFCF2CF3	1 640
Perfluorocarbonetos (PFC):		
Tetrafluorometano	CF4	7 390
Hexafluoroetano	C2F6	12 200
Octafluoropropano	C3F8	8 830
Decafluorobutano	C4F10	8 860
Dodecafluoropentano	C5F12	9 160
Tetradecafluorohexano	C6F14	9 300
Octafluorociclobutano	c-C4F8	10 300

Após a emissão deste regulamento, o cumprimento de toda a legislação por parte da União Europeia levou a que muitos dos refrigerantes identificados primeiramente no ano 2006 e mencionados na tabela referente ao regulamento 517/2014 foram sendo eliminados do mercado ao contrário de outros que (atualmente também já se encontram descontinuados) como mostra a Tabela 7.

Tabela 7: Estado dos refrigerantes halogenados após o cumprimento do Regulamento N° 517/2014. (UE,2014).

Refrigerante	Grupo	Estado do refrigerante
SF6	SF6	Eliminado
HFC-23	HFCs	Eliminado
HFC-32	HFCs	Eliminado
HFC-41	HFCs	Eliminado
HFC-125	HFCs	Eliminado
HFC-134	HFCs	Eliminado
HFC-134a	HFCs	Eliminado
HFC-134	HFCs	Eliminado
HFC-143a	HFCs	Eliminado
HFC-152	HFCs	Ativo
HFC-152a	HFCs	Eliminado
HFC-161	HFCs	Ativo
HFC-227ea	HFCs	Eliminado
HFC-236cb	HFCs	Eliminado
HFC-236ea	HFCs	Eliminado
HFC-236fa	HFCs	Eliminado
HFC-245ca	HFCs	Eliminado
HFC-245fa	HFCs	Eliminado
HFC-365mfc	HFCs	Eliminado
HFC-43-10mee	HFCs	Eliminado
Tetrafluorometano	PFCs	Eliminado
Hexafluoroetano	PFCs	Eliminado
Octafluoropropano	PFCs	Eliminado
Decafluorobutano	PFCs	Eliminado
Dodecafluoropentano	PFCs	Eliminado
Tetradecafluorohexano	PFCs	Eliminado
Octafluorociclobutano	PFCs	Eliminado

O PAG total de uma preparação é uma média ponderada, obtida da soma das frações do peso de cada substância multiplicada pelos respectivos PAG.

$$\begin{aligned} & \Sigma(\text{Substância } X\% \times \text{PAG}) + (\text{Substância } Y\% \times \text{PAG}) \\ & + \dots (\text{Substância } N\% \times \text{PAG}) \end{aligned} \quad (19)$$

Aplicando a fórmula num exemplo com uma mistura teórica de gases que contém 23 % de HFC-32, 25 % de HFC-125 e 52 % de HFC-134^a:

$$\Sigma(23\% \times 550) + (25\% \times 3400) + (52\% \times 1300) = 1652,5 \quad (20)$$

Desde o primeiro regulamento estabelecido tendo em conta as medidas estabelecidas, a produção de refrigerantes halogenados foi diminuindo progressivamente. No ano 2007 após a emissão do primeiro regulamento verificava-se a produção de 58098 toneladas de gases fluorados que foi decrescendo até assumir o valor de de 58098 para 17 219 toneladas (EEA,2020). No que toca ao equivalente de CO₂ verificou-se conseqüentemente uma grande redução passando de 175.0 no ano de 2007 para 85.6 Milhões de toneladas no ano de 2020 (EEA,2021)

2.5.2. Caso Português

O cumprimento dos objetivos nacionais em matéria de alterações climáticas baseia-se nos seguintes instrumentos fundamentais (APA, 2021):

- Plano Nacional de Atribuição de Licenças de Emissão (PNALE) que define, as condições a que ficam sujeitas, as instalações abrangidas pelo comércio europeu de licenças de emissão de GEE (CELE);
- Programa Nacional para Alterações Climáticas (PNAC) que avalia o estado do cumprimento do Protocolo de Quioto e define políticas e medidas internas que visam atenuar as emissões de GEE;
- Fundo Português de Carbono que é um instrumento financeiro que apoia projetos que ajudam o cumprimento das metas do Protocolo de Quioto em Portugal.

O PNAC tem a função de avaliar o estado de cumprimento do Protocolo de Quioto em Portugal e define um conjunto de políticas e medidas internas que visam a redução de emissões de GEE por parte de diversos sectores de atividade (APA, 2021).

É necessário considerar o cenário de referência baseado no histórico, com a evolução previsível das emissões de GEE, na situação de não concretização de novos projetos. A determinação desse cenário deverá ser coerente com o Inventário Nacional de Emissões e a metodologia usada deverá ser justificada. Na implementação de projetos que visam reduzir as emissões é importante averiguar três situações (Martins *et al.*, 2011):

- Cada projeto deve demonstrar o seu impacto na redução de emissões de GEE. Ou seja, o projeto tem de conduzir a uma redução diferente da prevista para o cenário de referência, a qual não teria lugar sem ele.
- O projeto decorre do simples cumprimento de obrigações legais ou regulamentares;
- Tem de ser demonstrado que o apoio financeiro contribui significativamente para o êxito do projeto.

Os projetos podem abranger as áreas dos transportes, eficiência energética, gestão de resíduos e efluentes, processos industriais, uso do solo, alteração do uso do solo e florestas, ou outros

desde que identificados no inventário Nacional de emissões como fontes de GEE e que cumpram os critérios de elegibilidade previstos.

Alguns desses projetos podem ser (Martins, 2010):

- Substituição de combustíveis, designadamente de carvão ou fuel para gás natural;
- Redução de emissões de HFCs em sistemas de refrigeração e aquecimento;
- Recuperação e tratamento de biogás, sem aproveitamento elétrico, do tratamento de efluentes ou de resíduos;
- Florestação e reflorestação;
- Redução de emissões de N₂O em instalações industriais.

Período 2008-2012

A União Europeia comprometeu-se, como um todo, a reduzir em 8% as suas emissões face ao ano base (1990). Esta quantidade foi repartida por todos os Estados membros, com compromisso comunitário de partilha de responsabilidades. Portugal assinou o Protocolo a 31 de maio de 1998, e ratificou-o a 31 de março de 2002, assumindo o compromisso de limitar o aumento das suas emissões de GEE em não mais que 27% no período de 2008-2012 (APA, 2021). Para este período de referência, as indústrias, automóveis, aterros sanitários, campos agrícolas e outras atividades no País não podiam lançar mais do que 382 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera, na soma dos cinco anos entre 2008 e 2012. Os valores ficaram, porém, em 381 milhões de toneladas (Santos, 2010). Subtraindo daí o CO₂ que foi absorvido pelas florestas e o efeito das transformações do uso do solo, as contas são ainda mais favoráveis: 283 milhões de toneladas, tal como exposto na Figura 20. De acordo com os últimos dados, o aumento ficou-se pelos 19%, sem contar o efeito das florestas (Garcia, 2014).

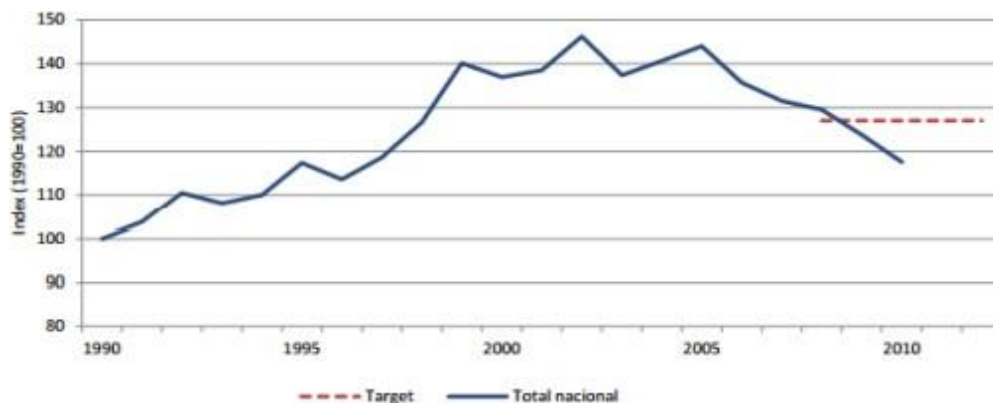


Figura 20: Redução de emissões de GEE em Portugal durante 1990 e 2012 (APA, 2021).

Período 2013-2020

A UE já assumiu o objetivo de diminuir em 80% as suas emissões de carbono até 2050, e está agora a discutir uma redução de 40% já para 2030. Em Portugal, 73% das emissões de GEE dizem respeito ao sector da energia. Até 2020, o país ficou com a missão de garantir que 31% de toda a energia utilizada seja de fonte renovável. A meta para o novo o período do Protocolo de Quioto em Portugal é a redução das suas emissões em, pelo menos, 20% (Lusa, 2013).

Em termos nacionais, as metas para 2020 estabelecidas reafirmadas no âmbito do PNEC apontam para níveis de redução das emissões nacionais de GEE de -18% a -23% face aos níveis de 2005 (68-72 Mt CO₂e). Portugal comprometeu-se em 2016 a assegurar a neutralidade das suas emissões até ao final de 2050, traçando uma visão clara relativamente à descarbonização profunda da economia nacional. No âmbito do Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC 2050) foi estabelecida a trajetória de redução de emissões até 2050, passando por objetivos de redução de emissões de GEE de -45% a -55% em 2030, -65% a -75% em 2040 e -85% a -90% em 2050 face aos níveis de 2005. De acordo com a mais recente atualização do Inventário Nacional de Emissões de 2021 (relativo ao ano 2019), as emissões registadas em 2019 confirmam uma trajetória de cumprimento das metas nacionais no âmbito do Acordo da Partilha de Esforços Europeu de redução de emissões para 2020 e 2030. As emissões totais, representando uma redução de cerca de 26% face aos níveis de 2005, respeitam também o intervalo da meta PNAC de 2020 como se verifica na Figura 21 (Garrana, 2011).

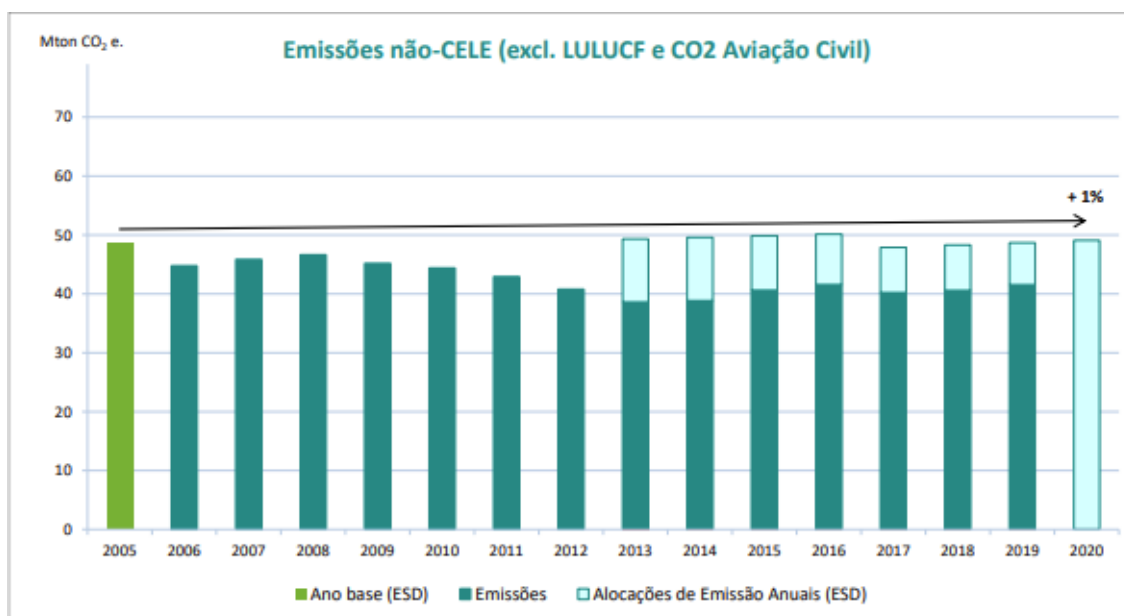


Figura 21: Emissões dos sectores não-CELE face às metas estabelecidas no âmbito da Partilha de Esforços Comunitária (APA,2021).

No que toca à evolução das emissões de gases com efeito de estufa em Portugal, e de acordo com a mais recente atualização do Inventário Nacional de Emissões de 2021 (relativo ao ano 2019),

as emissões de GEE, sem contabilização das emissões de alteração do uso do solo e florestas (LULUCF), são estimadas em cerca de 63,6 Mt CO₂e, representando um aumento de cerca de 8,1% face a 1990 e um decréscimo de 5,4% relativamente a 2018 através da análise da Figura 22. Considerando o setor LULUCF, o total de emissões em 2019 é estimado em 55,8 MtCO₂e, correspondendo a um decréscimo de 7,2% em relação a 1990 e a uma redução de 7,9% face a 2018 (APA,2021).

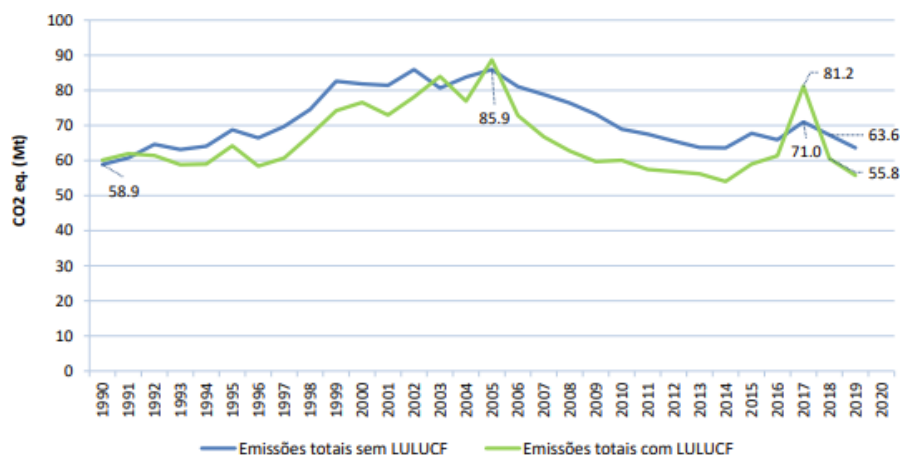


Figura 22: – Evolução das emissões nacionais de Gases com Efeito de Estufa (GEEs) (APA,2021).

Após o rápido crescimento verificado durante a década de 90, as emissões nacionais registaram um abrandamento no início dos anos 2000, verificando-se posteriormente, em especial após 2005, um decréscimo das emissões nacionais. Estas tendências refletem em grande medida a evolução da economia portuguesa que se caracterizou por um forte crescimento associado ao aumento da procura de energia e da mobilidade na década de 1990, seguindo-se uma situação de estagnação e recessão verificada com especial incidência no período 2009-2013. Nos anos seguintes houve uma inversão daquela tendência. Em 2019, o PIB registou uma variação positiva de 2,2%, abrandando face ao ano anterior em que cresceu 2,8%, mas mantendo um crescimento verificado desde 2014. As emissões totais em 2019 diminuíram 5,4% em relação a 2018, sendo essa redução maioritariamente associada ao setor das “indústrias de energia”, que registaram uma queda acentuada de 27,2% em relação a 2018, em resultado da maior proporção de energia renovável na produção elétrica nacional, associada à substituição do carvão pelo gás natural na produção elétrica de origem térmica, e a um maior recurso à importação de eletricidade (APA,2021).

Tanto em Portugal como em todo o continente europeu está a ser seguido um roteiro de transição para uma economia hipocarbónica competitiva em 2050 onde foi delineada uma via economicamente vantajosa para conseguir efetuar as reduções necessárias das emissões na União até 2050. As emissões não constituídas por emissões de CO₂, incluindo os gases

fluorados com efeito de estufa, mas não as emissões de origem agrícola, deverão sofrer uma redução de 72 % a 73 % até 2030 e de 70 % a 78 % até 2050, em comparação com os níveis de 1990. Com base na plena aplicação da legislação vigente da União, prevê-se que as emissões em 2030 sejam de 104 Mt de equivalente de CO₂, o que exige um decréscimo suplementar de aproximadamente 70 Mt de equivalente de CO₂. O Parlamento Europeu decretou então na mesma resolução a necessidade de optar então pelos refrigerantes alternativos eliminando progressivamente os hidrofluorcarbonetos à escala internacional seguindo também o protocolo de Montreal (EU,2014).

2.6. Propriedades dos Refrigerantes Alternativos

Os refrigerantes apresentam um papel fundamental no ciclo frigorífico, influenciando o seu funcionamento e todos os equipamentos da instalação, na medida em que possibilitam a absorção do calor que se forma na zona fria, transferindo-o para uma zona quente (ambiente exterior), através de processos de evaporação e condensação (Rodrigues, 2015).

As propriedades termodinâmicas de um refrigerante são essenciais para prever o comportamento de um sistema e o desempenho dos seus componentes. Excelentes propriedades termodinâmicas envolvem um ponto de ebulição um pouco abaixo das temperaturas ambiente, uma temperatura crítica acima da temperatura ambiente, um ponto de ebulição normal elevado, e um calor elevado de vaporização (Harby, 2017).

Não existe um refrigerante que reúna todas as propriedades desejáveis, de modo que, quando se considera um determinado fluido para ser aplicado num determinado tipo de instalação de frio, nem sempre é recomendado para ser utilizado noutra, mesmo que seja equivalente. O fluido de refrigeração perfeito é aquele que reúne o maior número possível de qualidades, relativamente a um determinado fim e objetivo (Boa, 2012).

A Tabela 8 especifica um conjunto de propriedades favoráveis que um refrigerante deve ter para que possa ser utilizado em instalações frigoríficas (Saldanha, 2019).

Tabela 8: Requisitos e propriedades dos refrigerantes (Saldanha, 2019).

Requisito	Propriedade
Química	Estável e inerte
Saúde, segurança e ambiente	Não tóxico
	Não inflamável
	Baixo GWP
Térmica	Calor latente alto
	Ponto crítico e ponto de ebulição apropriados para a aplicação
	Baixo calor específico no estado de vapor sobreaquecido
	Baixa viscosidade
	Condutividade térmica alta
Outros	Solubilidade/miscibilidade com o óleo lubrificante razoável
	Baixo ponto de fusão
	Deteção fácil de fuga
	Baixo custo

É uma lista muito longa de qualidades e nenhum dos refrigerantes pode ser considerado como ideal e adaptável a todas as aplicações. No entanto, é necessário dar especial atenção à seleção do refrigerante mais sustentável para uma determinada aplicação com base numa avaliação global (Bandarra, 2011).

É crucial a sensibilização e consciencialização para a utilização de refrigerantes ecológicos, como hidrocarbonetos (HCs), hidrofluorofenolinas (HFO), R744 (dióxido de carbono) e R717 (amoníaco), como alternativas para que seja possível reduzir o ODP e o GWP, tornando os sistemas de refrigeração que usem estes refrigerantes *futureproof*. Dentro destes refrigerantes, salientam-se os refrigerantes naturais, por causarem menores impactos ambientais e por serem mais adequados dentro da perspetiva de desenvolvimento tecnológico sustentável (Gaspar & Aguiar, 2020).

De acordo com as leis estabelecidas no Parlamento Europeu relativamente às proibições de certos refrigerantes nos próximos anos, já partir do ano 2020 que o R404A deixou de ser utilizado em novas unidades e instalações na União Europeia e, a partir dessa data, as instalações não puderam ser carregadas com mais de 10,2 kg de R404A. Nos últimos anos, surgiu uma gama de misturas de HFCs alternativos a R404A, tais como R407A, R407F, R442A, etc., tudo com nomes comerciais correspondentes. A partir de 2022, o novo Regulamento F-gás proíbe a utilização de HFCs em armários refrigerados e instalações centralizadas de mais de 40 kW (INTARCON, 2021).

2.6.1. Hidrofluorofelinas (HFO): R1234yf e R1234ze

Os HFOs, ou hidrofluorofelinas, são refrigerantes sintéticos não saturados de HFCs, que fazem parte da 4ª geração de gases à base de flúor. Os HFOs possuem características muito boas relativamente aos seus fatores físico-químicos e ambientais tais como (Gaspar & Aguiar, 2020):

- Baixo GWP;
- Zero ODP;
- pouco tempo de vida quando libertados para a atmosfera;
- rápida reatividade com os radicais de hidróxido troposféricos;
- altamente eficientes em termos energéticos;
- Quando comparados com os HFCs:
 - Elevada temperatura crítica;
 - Baixa pressão crítica;
 - Baixa densidade crítica;
 - Pontos de ebulição similares a 1 atmosfera;
 - Baixa temperatura de vaporização a 1 atmosfera.
- Ligeira inflamabilidade;
- formação de ácidos perigosos em altas temperaturas;
- capacidade de refrigeração volumétrica de 20% (R1234yf);
- Ponto de ebulição de -19°C (R1234yf);

R1234yf

O HFO R1234yf é uma alternativa ao R134a, com baixo potencial de aquecimento global e com pressão semelhante, mas com uma eficiência volumétrica e capacidade de refrigeração ligeiramente menores. O GWP do R1234yf (GWP=4) é muito inferior ao do R134a (GWP=1430), e esse é um dos motivos pelos quais foi selecionado pela maior parte do setor automóvel como substituto para o R134a na Europa para ar condicionado automóvel (Danfoss, 2021).

R1234ze

O HFO R1234ze é uma alternativa ao R134a, com baixo potencial de aquecimento global e com pressão semelhante, mas com uma eficiência volumétrica e capacidade de refrigeração reduzidas. Juntamente com o elevado peso molecular, esse é um dos motivos pelos quais o R1234ze(E) está a ser considerado para substituir o R134a em *chillers* centrífugos para grandes sistemas de A/C. (Danfoss, 2021).

O refrigerante mais usado dos dois é o R1234yf, uma vez que se apresenta como substituto mais simples, por ter eficiência semelhante. A nível de capacidade de arrefecimento, o R1234yf fica aquém do R134a, no entanto, esta capacidade pode ser potenciada por meio de modificações a nível de hardware do sistema de refrigeração (Gaspar & Aguiar, 2020).

2.6.2.R717 – Amoníaco (NH₃)

O R717 (amoníaco – NH₃) era preferido para instalações, até o surgimento do *Freon*, fabricado pelas indústrias DuPont, baseado nos “refrigerantes seguros. O amoníaco continuou então a ser o refrigerante dominante para aplicações industriais durante anos (MMA,2011).

O amoníaco, também designado por R717 tem as seguintes características (Gaspar & Aguiar, 2020):

- Inflamável e incolor à pressão atmosférica;
- Curta duração na atmosfera;
- Não forma nenhum produto/subproduto de decomposição com impacto ambiental negativo;
- Refrigerante tóxico e inflamável;
- Facilmente detetável mesmo a baixas concentrações no ar (facilidade na detecção de fugas) – vantagem competitiva face aos demais;
- Custo baixo;
- ODP nulo;
- GWP muito baixo;
- Degrada-se rapidamente na atmosfera;
- Temperatura crítica elevada;
- Calor latente extremamente alto (maior efeito de refrigeração);
- Baixa massa específica;
- Dimensão dos componentes do sistema de refrigeração é menor, ocupando um volume reduzido;
- Incompatível com o cobre, zinco, ligas de cobre, borracha e plástico, sendo por isso o seu uso restrito a sistemas em alumínio, aço de carbono e aço inoxidável.

2.6.3.Hidrocarbonetos (HC): Propano (R290) e Propileno (R1270)

Os hidrocarbonetos são refrigerantes naturais que tem inúmeras vantagens tais como (Gaspar & Aguiar, 2020):

- Zero ODP;
- Baixo GWP;
- Biodegradabilidade;
- Propriedades termodinâmicas de elevada qualidade e boa compatibilidade com outros componentes;
- Não são tóxicos;
- Incolores e inodoros e altamente inflamáveis;
- Pontos de ebulição abaixo dos -40 °C;
- Miscíveis com óleo mineral e outros óleos de refrigeração;

- Boa capacidade de refrigeração;
- Gases bastante versáteis;
- Consumo de energia equivalente aos refrigerantes halogenados;
- Oriundos de combustíveis fósseis tendo por isso, uma boa quota no impacte ambiental.

2.6.4.R744 – Dióxido de Carbono (CO₂)

A aplicação do dióxido de carbono – R744 (CO₂) em sistemas de refrigeração não é recente. O dióxido de carbono foi inicialmente proposto e usado no final do século XIX. Foi usado em máquinas de fabricar gelo e nas embarcações para alimentos congelados e a sua utilização nos sistemas de refrigeração cresceu na metade do século XX. O CO₂ é um refrigerante natural, ou seja, possui uma relação normal de pressão/temperatura (MMA, 2011).

O R744 é utilizado desde os primórdios do ciclo frigorífico de compressão de vapor, juntamente com outros refrigerantes naturais, como o amoníaco e a água, e largamente utilizado até ao aparecimento dos CFCs. O dióxido de carbono é um fluido refrigerante não tóxico, não inflamável e sem perigo para o ambiente, mas em caso de fuga, pode causar algum risco para a saúde humana, isso se a concentração de dióxido de carbono no ar ultrapassar um determinado valor, podendo correr o risco de asfixia.

Na Figura 23, pode-se observar o diagrama pressão-temperatura do dióxido de carbono onde há quatro zonas principais de funcionamento limitadas pelas linhas de líquido e de vapor e pela pressão crítica (Saldanha, 2019):

- Zona de fluido transcrito: refere-se a casos em que a instalação está a trabalhar acima do ponto crítico, isto é, se a temperatura e a pressão de saída do condensador forem superiores a 30,98°C, temperatura crítica e 7,37 MPa, pressão crítica;
- Zona de vapor sobreaquecido: caracterizada pelo facto de o fluido estar completamente sob a forma de vapor, normalmente associada aos graus de sobreaquecimento do fluido à saída do compressor;
- Zona de líquido subarrefecido: de forma inversa à anterior, é caracterizada pelo facto de o fluido estar completamente sob a forma de líquido, normalmente associada ao número de graus de subarrefecimento do fluido à saída do arrefecedor de gás/condensador;
- Zona de vapor húmido: nesta zona o evaporador absorve o calor cedido pela fonte fria, fazendo uso do calor latente do dióxido de carbono (Saldanha,2019).

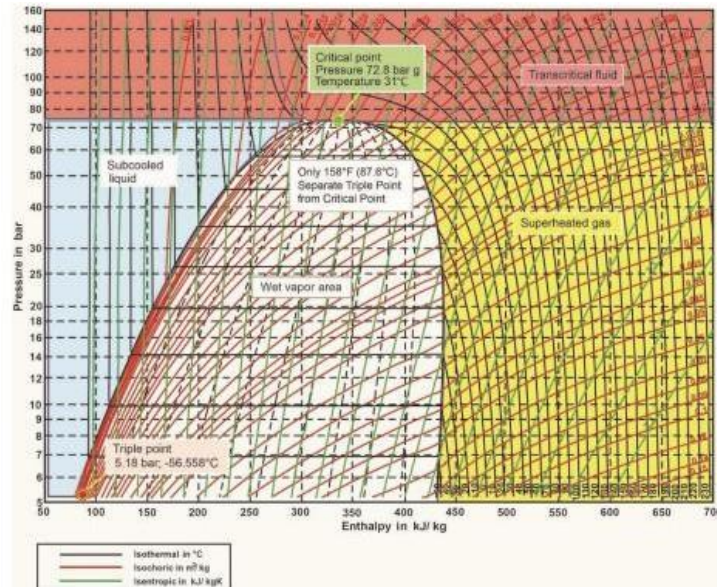


Figura 23: Diagrama P-h do dióxido de carbono com as diferentes zonas de funcionamento (Saldanha,2019).

O CO₂ também conhecido por R744 é há muitos anos utilizado em sistemas AVAC e apresenta as seguintes características (Gaspar & Aguiar, 2020):

- Impacto nulo nas alterações climáticas;
- ODP nulo;
- GWP de 1;
- Não é tóxico, inflamável nem corrosivo;
- Compatível com a maioria dos materiais usados em sistemas de refrigeração;
- Baixo potencial de decomposição dentro do sistema de refrigeração;
- Refrigerante barato e permanente disponível;
- Desempenho competitivo em sistemas de bombas de calor;
- Impacto positivo no deslocamento do compressor e no dimensionamento de permutadores de calor e tubulações, podendo estes ser mais compactos;
- Alta capacidade de refrigeração devido à elevada capacidade de arrefecimento volumétrico;

Este refrigerante pode ter uma boa eficiência, mas esta eficiência encontra-se dependente da temperatura ambiente e do tipo de sistema, ou seja, os sistemas de refrigeração a R744 funcionam tanto melhor, quanto menor for a temperatura ambiente média. As altas pressões de operação do sistema são mais perigosas e aumentam o risco de fuga, sendo também necessários compressores especiais, fazendo dos sistemas R744 mais complexos (Gaspar & Aguiar, 2020).

2.7.Sustentabilidade

A procura pela sustentabilidade diz respeito ao desenvolvimento que procura satisfazer as necessidades das populações atuais, sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades. O conceito de desenvolvimento sustentável tem limites, não absolutos, mas sobretudo impostos pelos estágios atuais da tecnologia e da organização social no que respeita aos seus recursos naturais, e pela capacidade da biosfera absorver os efeitos da ação humana. Estes princípios podem ser enquadrados em praticamente toda a atividade humana, principalmente naquelas que têm impacto direto no ambiente. Dada a influência que o sector da refrigeração tem na economia e no ambiente, é de elevada importância a aplicação dos princípios da sustentabilidade nas atividades com ela relacionadas (Pina, 2021).

2.7.1.O que deve ser sustentado?

A sustentabilidade ambiental procura manter os sistemas globais de suporte de vida (refere-se essencialmente aos sistemas que mantêm a vida humana). As capacidades de origem do ecossistema global fornecem alimentos para matérias-primas, água, ar e energia (Goodland, 2017).

Por sua vez, o uso excessivo de uma determinada capacidade prejudica a sua prestação de serviços de suporte de vida. No caso dos refrigerantes, a acumulação de CFC, como já foi referido anteriormente, está constantemente a prejudicar a capacidade da atmosfera para proteger os seres humanos das radiações ultravioleta nocivas. Proteger a vida humana é a principal razão pela qual os seres humanos antropocêntricos procuram sustentabilidade ambiental (Goodland, 2017).

O rápido esgotamento dos recursos essenciais, aliado à degradação da qualidade do solo e da qualidade atmosférica, mostra que a economia humana já está a infligir graves danos aos ecossistemas de apoio globais, futuras capacidades de carga biofísicas potenciais estão provavelmente a ser reduzidas (Goodland, 2017).

A sustentabilidade baseia-se sobretudo em três vértices:

- Económico: Refere-se à prosperidade em diferentes níveis da sociedade e à eficiência da atividade económica, incluindo a viabilidade das organizações e das suas atividades na geração de riqueza e na promoção de emprego digno (BCSD, 2021);
- Ambiental: Os recursos naturais devem ser conservados e geridos, especialmente os que não são renováveis ou são fundamentais ao suporte de vida. Para tal, devem ser implementadas ações para minimizar os impactos negativos no ar, na água e no solo, preservar assim a biodiversidade, proteger e melhorar a qualidade do ambiente e por último, promover a produção e consumo responsáveis (BCSD, 2021). Exemplo de indicadores usados para medir a sustentabilidade ambiental (PHC, 2017):

- Ciclo de vida do produto;
 - Qualidade do produto;
 - Saúde ambiental;
 - Uso de equipamento;
 - Quantidade de água usada;
 - Quantidade de energia usada;
 - Quantidade de materiais usados e reutilizados/reciclados;
 - Pegada carbónica;
 - Necessidades de transporte (medido em emissões de CO₂).
- Social: Os direitos humanos e a igualdade de oportunidades de todos os indivíduos na sociedade devem ser respeitados. Promover uma sociedade mais justa, com inclusão social e distribuição equitativa dos bens com foco na eliminação da pobreza é imperativo. A diversidade cultural das comunidades locais também deve ser reconhecida e respeitada, evitando toda e qualquer forma de exploração (BCSD, 2021).

2.8. Sistemas de apoio à Decisão

2.8.1. Nota introdutória

Segundo Sprague e Carlson (1982), os Sistemas de apoio à decisão (SADs) podem ser definidos como sistemas computacionais que ajudam os responsáveis pelas tomadas de decisões a enfrentar problemas estruturais através de uma interação indireta com modelos de dados e análises (Ferreira, 2009).

O principal objetivo destes sistemas é consolidar as informações da empresa como um todo dentro de um único sistema, eliminando assim a dificuldade de se obter informações consolidadas e a inconsistência de dados redundantes armazenados em mais de um sistema (Fortulan, 2005).

Isso é possível através de uma interface interativa suportada por um modelo e uma base de dados com o fim de apoiar o utilizador na tomada de decisão de forma de potencializar as suas capacidades (Turban *et al.*, 2007).

As funções e características dos SAD variam significativamente e com diferenças dependendo do domínio onde o sistema é aplicado. As características comuns dos sistemas SAD são (Costa, 2012) as expostas na Figura 24.



Figura 24: Características típicas do SAD (Costa, 2012).

As funções e características destes sistemas variam consoante as diferenças referentes aos domínios onde eles são aplicados, no entanto todos eles têm por base as propriedades mencionadas na Figura 24, uma vez que:

- Lidam com problemas de decisão apoiando indivíduos e grupos de decisão;
- Estão associados a um processo de adaptabilidade e flexibilidade com o fim de realizar as tarefas de apoio à decisão;
- Interatividade e acessibilidade a fim de permitir a interação e utilização simples para os decisores;
- Combinam de um modo geral o uso de técnicas analíticas e modelos com funções de acesso a dados;
- Utilização de bases de conhecimento e inteligência artificial;
- Integração e ligação à *Web*.

2.8.2. Modelo do Sistema de Apoio à Decisão

No âmbito da presente dissertação é desenvolvida uma ferramenta computacional com o intuito de estabelecer não só uma comparação entre os mais diversos refrigerantes alternativos com ODP e GWP, como também será realizada com o objetivo de providenciar à empresa/utilizador a melhor opção suportada com uma base de dados que analise

características uma vez que, como já foi referido anteriormente, certos refrigerantes terão de ser rapidamente substituídos por parte das organizações sem comprometer os seus objetivos e valores. Os fatores a analisar pelo sistema de apoio à decisão terão como inputs os seguintes fatores:

- ODP
- GWP
- Ponto de ebulição
- Pressão crítica
- Calor Latente
- COP
- Segurança
- Disponibilidade
- Custos diretos e indiretos associados

Analisando comparativamente os refrigerantes alternativos mencionados no sub-capítulo 2.6. de forma a organizar os dados recolhidos pode ser obtido algo semelhante à Figura 25 realizada por Gaspar & Aguiar (2020), que após uma metodologia de investigação definida permitiu-lhes concluir que não haver uma solução ideal de refrigerante com ODP nulo e GWP baixo, versátil, eficiente e seguro. É uma área que requer ainda muito desenvolvimento e investigação, no entanto, os refrigerantes naturais são cada vez mais uma solução a ter em conta em substituição dos CFC's, HCFC's e HFC's, uma vez que apresentam ótimas propriedades termodinâmicas, enquanto conferem um ODP e GWP nulo.

Refrigerante	ODP	GWP	Biodegradável	Ponto de ebulição (°C)	Pressão crítica (MPa)	Temperatura crítica (°C)	Calor latente (kJ/kg)	Capacidade	Eficiência	Pressão	Segurança	Disponibilidade			Custo do refrigerante	Custo do sistema	
												Refrigerante	Componentes	Técnicos			
HFO	R1234ze	0	<1	↑	-19	3,6	109	130	→	→	↑	A2L	↓	→	↓	↑	→
	R1234yf	0	4	↑	-29	3,4	95	140	→	→	↑	A2L	↓	→	↓	↑	→
Amoníaco		0	7	↑	-33	11,3	132	1369	→	↑	↑	B2L	↑	↑	↓	↓	↑
HC	Propileno	0	2	↑	-48	4,6	92	342	→	↑	↑	A3	↑	↑	↓	↓	→
	Propano	0	3	↑	-42	4,2	97	428	→	↑	↑	A3	↑	↑	↓	↓	→
CO ₂		0	1	↑	-78	7,4	31	574	↑	↓	↓	A1	↑	↓	↓	↓	↑

Nota: → Semelhante aos HFCs ↓ Inferior aos HFCs ↑ Superior aos HFCs

Figura 25: Comparação dos refrigerantes alternativos (Gaspar & Aguiar, 2020).

Esta conclusão leva à necessidade de realizar um levantamento de informação sobre todas as características pertinentes associadas a cada um dos refrigerantes alternativos para ajudar uma

empresa no processo de decisão. No entanto, o objetivo desta dissertação culminará com a realização de uma ferramenta computacional, que com base em coeficientes definidos pelo próprio utilizador, irá obter a solução ótima tendo em conta parâmetros como a eficiência energética, rentabilidade, custo, impacto ambiental etc.

Para a realização da ferramenta em questão não basta apenas esta comparação, por isso o SAD a ser disponibilizado para as empresas será constituído essencialmente por três partes:

- Base de dados;
- Motor de Pesquisa;
- Interface do Utilizador.

A construção da primeira área funcional do SAD incide sobretudo na recolha e compilação sucessiva de todos os dados referentes aos refrigerantes alternativos. O Motor de Pesquisa é dotado de todos os mecanismos necessários a que o SAD, através dos dados introduzidos na Interface do Utilizador, procure, trate e devolva informação pertinente ao utilizador; por sua vez, a Interface do Utilizador serve como plataforma de comunicação e interação com o utilizador do SAD. Aqui, são inseridos os inputs necessários ao funcionamento do SAD e exibidos os respetivos resultados. No fundo, a ferramenta computacional que terá como objetivo auxiliar a empresa a optar por um refrigerante alternativo que apele à sustentabilidade, terá por base a ferramenta Excel. A opção pela ferramenta Excel deve-se ao simples facto de apesar de ser um software com um elevado número de utilizadores e um excelente compilador de informação no qual podem ser realizadas operações matemáticas, podem ser utilizadas linguagens de programação e utilizada também a lógica matemática que no fundo será fulcral para a elaboração do SAD que seguirá a ideologia de outras já realizadas como por exemplo a ferramenta de apoio à decisão realizada por Pina (2021) destinada à precificação dinâmica de produtos hortícolas em função do decaimento da qualidade microbiológica. A ferramenta resume-se em duas partes: a previsão da vida de prateleira restante de um produto hortícola e o cálculo do preço dinâmico a praticar em cada dia em função da aproximação ao fim do prazo de comercialização. Para tal efeito, recorre a ferramentas específicas para a realização das 3 partes específicas como mostram as Figuras 26, 27 e 28 que se seguem como exemplo.

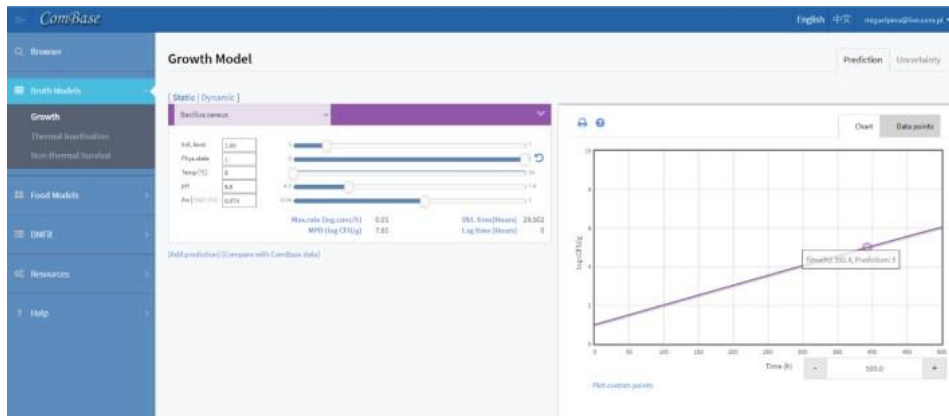


Figura 26: Desenvolvimento da base de dados através da ferramenta *ComBase Growth Model* (Pina, 2021).

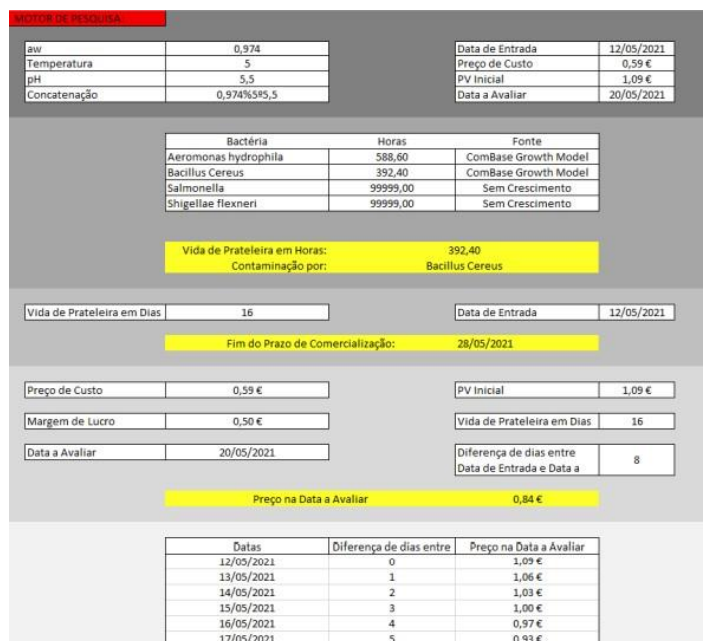


Figura 27: Componente Motor de Pesquisa do SAD (Pina, 2021).

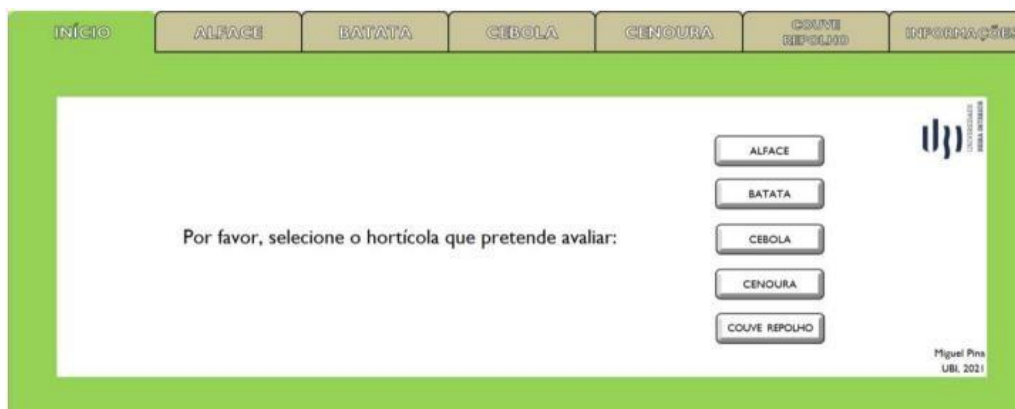


Figura 28: Interface do utilizador (Pina, 2021).

Apesar desta ferramenta abordar competências e parâmetros completamente distintos daqueles que serão abordados nesta dissertação, existem determinados aspectos que irão ser utilizados no sistema de apoio à decisão a apresentar. As 3 partes específicas demonstram determinadas características que representam grandes vantagens tanto para quem as elabora como para o futuro utilizador tais como: simplicidade, organização, e a fácil acessibilidade que serão os três pontos a ter em consideração na realização do SAD.

3. Materiais e Métodos

A fim de ser realizada a ferramenta computacional existe a necessidade prévia de retratar pormenorizadamente os refrigerantes em questão, analisando os que estão abolidos, os que irão ter o mesmo destino num futuro próximo e por último os refrigerantes alternativos com GWP reduzido que apoiem a sustentabilidade, sempre com base na legislação imposta pela Comissão Europeia que ao longo dos anos tem vindo a adotar medidas de forma a eliminar progressivamente a produção e emissão de gases com efeito de estufa de modo a proteger o nosso planeta.

No presente capítulo serão abordados inicialmente os refrigerantes no seu todo indicando os que já foram e os que vão ser proibidos, a sua evolução ao longo dos anos para começar a seleccionar aqueles que serão a opção de escolha para o utilizador no sistema de apoio à decisão. Por sua vez, esses refrigerantes alternativos irão ser analisados com maior detalhe de forma a conferir à empresa a melhor escolha possível com base na maior quantidade de dados pertinentes para a questão. Após esse mesmo detalhe, será posteriormente apresentada a ferramenta que permitirá aos utilizadores (com base nas características previamente obtidas através da pesquisa), definir o seu futuro refrigerante “ideal” a ser utilizado nas suas instalações tendo em conta os seus critérios.

3.1 Materiais

3.1.1. Atualidade dos refrigerantes halogenados pela União Europeia

Em suma, o atual regulamento relativo aos gases fluorados, que é aplicável desde 1 de janeiro de 2015, substitui o regulamento original relativo aos gases fluorados adotado em 2006. Os regulamentos de execução do regulamento inicial permanecem em vigor e continuam a ser aplicáveis até à adoção de novos atos. As medidas estipuladas basearam-se no êxito da eliminação progressiva das substâncias que empobrecem a camada de ozono, que foi alcançada na UE dez anos antes do calendário acordado a nível internacional. Graças ao Regulamento Gases Fluorados, as emissões de gases fluorados da UE serão reduzidas em dois terços até 2030, em comparação com os níveis de 2014.(CE, 2015).

O regulamento da EU foi revisto e no dia 5 de abril de 2022. A Comissão apresentou uma proposta legislativa para atualizar o regulamento n.º 517/2014 na qual se procura (CE, 2015):

- Maior ambição através de um sistema de quotas mais rigoroso para os HFC (redução progressiva do CHF): reduzir a quantidade de HFC colocados no mercado em 98 % até 2050 (em comparação com 2015);
- Assegurar o cumprimento do Protocolo de Montreal procedendo a etapas de redução progressiva também após 2030;

- Melhorar a aplicação facilitando o controlo das importações e exportações por parte das autoridades aduaneiras e de fiscalização;
- Conseguir uma monitorização mais abrangente melhorando os procedimentos de comunicação e verificação dos dados.

Relativamente aos gases fluorados, estes representam atualmente 2,5% das emissões de gases com efeito de estufa. Por sua vez, esta proposta reforçada sobre os gases fluorados, irá permitir a redução do equivalente a 40 milhões de toneladas de emissões de CO₂ até 2030, que futuramente alcançará uma diminuição total equivalente a 310 milhões toneladas de CO₂ até 2050. (CE,2022)

3.1.2. Refrigerantes Alternativos

Segundo o capítulo 2.5.1., muitos refrigerantes foram abolidos e futuramente os que ainda não foram eliminados vão sair eventualmente do mercado de acordo com os regulamentos da UE. No entanto, as empresas que ainda utilizem esses refrigerantes necessitam de alterar num futuro próximo os refrigerantes das suas instalações e processos industriais de forma a dar resposta à sua prosperidade económica. Para tal, terão de recorrer aos gases com GWP baixo ou até mesmo nulo. De acordo com o anexo IV do Regulamento N°517/2014 emitido em 2014 que ainda está em vigor, os refrigerantes alternativos que apelam à sustentabilidade são os demonstrados na Tabela 9. Apesar de ainda existir uma grande variedade de refrigerantes que apelam à proteção da camada do ozono, nem todos têm aplicação direta, na medida em que apenas alguns são utilizados na refrigeração comercial e industrial como verificado na Tabela 9.

Apesar de não existir uma fórmula exata no momento de realizar a escolha de um refrigerante, existem alguns detalhes que devem ser levados em consideração no momento da decisão para que, dessa forma, seja possível adquirir a opção ideal para um determinado caso específico. Sendo assim, no processo de tomada de decisão há que ter em consideração os seguintes fatores (Dufrio, 2021):

- Disponibilidade;
- Custo-benefício;
- Qualidade;
- Segurança.

Com base na Tabela 9, verifica-se que os refrigerantes alternativos recaem sobretudo sobre o etano, propano, propileno, isobutano, etileno, amoníaco, dióxido carbono e o R-1234ze. Uma vez que o objetivo desta dissertação culmina com a elaboração de uma ferramenta de apoio à decisão para o consumidor por um refrigerante que apele à sustentabilidade, os dados técnicos e termodinâmicos devem ser conhecidos, descritos e apresentados. De seguida, será apresentado um resumo das características de cada um destes refrigerantes alternativos.

Tabela 9: Aplicações dos refrigerantes alternativos e/ou sustentáveis.

Substância	Aplicação	GWP
R-170 (Etano)	refrigeração comercial e industrial	6
R-1234ze	refrigeração comercial e industrial	6
R-290 (Propano)	refrigeração comercial e industrial	3
R-600 (Butano)	Isqueiros, produção de borracha sintética, fogões portáteis	4
R-600A (Isobutano)	refrigeração comercial e industrial	3
R-601 (Pentano)	Solvente para reações e aerossóis	5
R-601A (Isopentano)	Vesicante, material químico	5
C₅H₁₀ (Ciclopentano)	Solvente para reações e aerossóis	5
R-610 (Etoxietano)	Fins médicos (anestésico de inalação)	4
R-611 (Formato Metilo)	Formação de ácido fórmico	25
R-702 (Hidrogénio)	Produção de químicos e produtos intermédios	6
R-717 (Amoníaco)	refrigeração comercial e industrial	0
R-744 (Dióxido de Carbono)	refrigeração comercial e industrial	1
R-1150 (Etileno)	refrigeração comercial e industrial	4
R-1270 (Propileno)	refrigeração comercial e industrial	2
E-170 (Éter dimetílico)	Solvente, produtos químicos, domésticos e cosméticos	1
CH₃Cl (Cloro de metilo)	Agente de processo, solvente de produção de vernizes	13
CHCl₃ (Clorofórmio)	Solvente orgânico	31
CH₄ (Metano)	Indústria de petróleo e petroquímica	25
N₂O (Óxido Nitroso)	Anestésico, área médico e odontológica	298

3.1.2.1.R-1234ze

O refrigerante R-1234ze é um HFO que substitui o R-134a nos equipamentos de refrigeração industrial. Como todos os refrigerantes HFO, não danifica a camada de ozono, possui uma ótima estabilidade térmica e química, baixa toxicidade e uma excelente compatibilidade com a maioria dos materiais. O R-1234ze não é inflamável de acordo com ISO standard 34 (ISO 817). No entanto, pode inflamar se for misturado com ar a alta pressão e exposto a fortes fontes de ignição. É miscível com óleos sintéticos poliolésteres (POE) e polialquilenoglicóis (PAG), pelo que se deve utilizar sempre com este tipo de óleos. É utilizado nos refrigeradores, compressores herméticos para refrigeração industrial, máquinas de venda automática, armários refrigerados e câmaras frigoríficas. As embalagens do R-1234ze devem ser armazenadas em local fresco, ventilado e afastados de focos de calor (Martin,2022). Os vapores do R-1234ze são mais pesados

que o ar e podem provocar asfixia, ao reduzir o oxigénio no ar que respira. Deve ser protegido dos raios solares e é de evitar a sua exposição a temperaturas superiores a 50 °C. Uma característica única do R-1234ze é a ausência de inflamabilidade quando misturado com o ar a uma temperatura ambiente abaixo dos 30 °C. Portanto, é considerado não inflamável para manipulação e armazenamento. O fluido é normalmente guardado em embalagens de cilindro (cilindros de embalagem reciclados – 14, 25, 60kg por garrafa) (GASSERVEI, 2022).

Este refrigerante apresenta as seguintes propriedades termodinâmicas (Danfoss, 2021):

- Biodegradável;
- Capacidade de refrigeração: Baixa;
- Custo das instalações: Médio comparativamente aos Hidrocarbonetos e aos refrigerantes naturais (Dióxido de Carbono e Amoníaco);
- Custo do refrigerante: Elevado comparativamente aos Hidrocarbonetos e aos refrigerantes naturais (Dióxido de Carbono e Amoníaco);
- Disponibilidade do refrigerante: Extremamente Reduzida;
- Eficiência energética: Média, semelhante à do R-134a;
- GWP: 6;
- Lubrificantes Compatíveis: POE;
- Nível de Segurança (ASHRAE): A2;
- ODP: 0;
- Peso molecular: Elevado;
- Ponto de ebulição (1atm): -19 °C;
- Pressão Crítica: 3,6 MPa;
- Pressão: Semelhante à do refrigerante R-134a;
- Temperatura Crítica: 109,4 °C.

3.1.2.2.R-170

O refrigerante R-170 (Etano) caracteriza-se por ser um gás inflamável, incolor, inodoro, e explosivo quando exposto ao calor em determinadas circunstâncias. Do ponto de vista ambiental, dos refrigerantes alternativos é o mais ecológico e a maioria dos países europeus estão a usar o Etano nos novos equipamentos e instalações de refrigeração. Apresenta as grandes vantagens de não apresentar restrições no que toca à sua instalação inicial e uso durante a manutenção pós-venda, assim como o facto de ser compatível com fluidos convencionais. É usado principalmente para substituir os refrigerantes R13 e R503 tanto em equipamentos de refrigeração de baixa temperatura como de temperaturas extremamente reduzidas (Zhang & Mohamed, 2015). O fluido é normalmente guardado em embalagens de cilindro reutilizável (cilindros de embalagem reciclados – 15kg por garrafa) e armazenado em

local fresco, seco e ventilado e por sua vez necessita de ser carregado e descarregado de forma leve a fim de evitar danos aos acessórios, como cilindros e válvulas (SIRLOONGGROUP, 2018).

Este refrigerante apresenta as seguintes propriedades termodinâmicas (Danfoss, 2021; Gaspar & Aguiar, 2020):

- Biodegradável;
- Capacidade de refrigeração: Boa;
- Custo da instalação: semelhante ao dos HCFCs ou HFCs mas superior ao dos refrigerantes naturais;
- Custo do refrigerante: Reduzido;
- Disponibilidade do refrigerante: Elevada;
- Eficiência Energética: Elevada;
- GWP: 6;
- Lubrificantes Compatíveis: Mineral/AB/POE;
- Nível de Segurança (ASHRAE): A3;
- ODP: 0;
- Ponto de ebulição (1atm): -89 °C;
- Pressão Crítica: 4,87 MPa;
- Pressão e temperaturas: Semelhantes às de HCFCs ou HFCs;
- Temperatura Crítica: 32,3 °C.

3.1.2.3.R-290

O refrigerante R-290 (propano) é um hidrocarboneto usado em alguns equipamentos de refrigeração, como bombas de calor e equipamentos de refrigeração comercial. É muito importante quando se trabalha com hidrocarbonetos que estes sejam de alta pureza, uma vez que, na presença de outras impurezas, pode ser o suficiente para a degradação dos óleos lubrificantes da instalação e rotura de compressores, etc. O propano usado nas aplicações de refrigeração não é perfumado como o de uso doméstico, traduzindo-se numa desvantagem para este refrigerante porque não é facilmente detetável em caso de fugas. O propano, assim como os restantes refrigerantes do tipo hidrocarbonetos, tem em geral uma miscibilidade muito boa com qualquer tipo de lubrificante. Devido à boa solubilidade que existe entre os óleos minerais e estes refrigerantes, existem sistemas em que pode ser necessário usar óleos de maior viscosidade para compensar esse excesso de solubilidade. O fluido é normalmente guardado em recipientes de cilindro reutilizáveis (cilindros de embalagem reciclados – 0.43, 2, 10, 25 e 400kg por garrafa) (GASSERVEI, 2022).

Este refrigerante apresenta as seguintes propriedades termodinâmicas (Zhang & Mohamed, 2015).

- Biodegradável;
- Capacidade de refrigeração: Boa;

- Custo da instalação: semelhante ao dos HCFCs ou HFCs mas superior ao dos refrigerantes naturais;
- Custo do refrigerante: Reduzido;
- Disponibilidade do refrigerante: Elevada;
- Eficiência Energética: Elevada;
- GWP: 3;
- Lubrificantes Compatíveis: Mineral/AB/POE;
- Nível de Segurança (ASHRAE): A3;
- ODP: 0;
- Ponto de ebulição (1atm): -42 °C;
- Pressão Crítica: 4,30 MPa;
- Pressão e temperaturas: Semelhantes às de HCFCs ou HFCs;
- Temperatura Crítica: 97°C.

3.1.2.4.R-600a

O isobutano ou R-600a, é um hidrocarboneto usado em alguns equipamentos de refrigeração, como frigoríficos domésticos ou pequenos equipamentos de frio comercial. O R-600a tem uma capacidade volumétrica 50% inferior ao R-12 ou ao R-134a, portanto não pode ser considerado um substituto para estes mesmos. O isobutano assim como o propano, quando usado em aplicações de refrigeração não é perfumado como o de uso doméstico (o hidrocarboneto doméstico é perfumado para ser rapidamente detetável em caso de fuga), ou seja, não se deteta facilmente em caso de fugas (Zhang & Mohamed, 2015).

O isobutano, como os restantes refrigerantes do tipo hidrocarbonetos, tem em geral uma miscibilidade muito boa com qualquer tipo de lubrificante, no entanto os lubrificantes que contêm silicone ou silicatos não são recomendados, assim como a borracha EPDM, pelo que as borrachas naturais que também devem ser evitadas. Quase todos os elastômeros e plastômeros que podem ser encontrados nos sistemas de refrigeração são compatíveis com hidrocarbonetos. (GASSERVEI, 2022).

Este refrigerante apresenta as seguintes propriedades termodinâmicas (Linde,2022):

- Biodegradável;
- Capacidade de refrigeração: Boa;
- Custo da instalação: semelhante ao dos HCFCs ou HFCs mas superior ao dos refrigerantes naturais;
- Custo do refrigerante: Reduzido;
- Disponibilidade do refrigerante: Elevada;
- Eficiência Energética: Elevada;
- GWP: 3;
- Lubrificantes Compatíveis: Mineral/AB/POE;

- Nível de Segurança (ASHRAE): A3;
- ODP: 0;
- Ponto de ebulição (1atm): - 12°C;
- Pressão Crítica: 3,60 MPa
- Pressão e temperaturas: Semelhantes às de HCFCs ou HFCs;
- Temperatura Crítica: 135°C.

3.1.2.5.R-717

O refrigerante R-717 caracteriza-se pela sua excelente eficiência, dentro das suas características de aplicação, uma vez que possui uma grande capacidade de efeito frigorífico, tendo em conta o seu elevado valor de vaporização, apesar dos vapores deste fluido possuírem um grande volume específico. Outra vantagem do R-717 em relação aos restantes fluidos alternativos é a sua grande vertente ecológica, visto que não provoca reações quando emitido para a atmosfera não prejudicando assim o meio ambiente, ou seja, não apresenta contribuição direta para a destruição da camada do ozono ou mesmo para o aquecimento global (Silva, 2012).

Este refrigerante apresenta as seguintes propriedades termodinâmicas (Zhang & Mohamed, 2015):

- Biodegradável;
- Capacidade volumétrica: Elevada;
- Eficiência Energética: Elevada;
- Custo das instalações: Elevado devido aos requisitos de tubulações em aço, compressores semi-herméticos e instalação de vários dispositivos de segurança, como detetores de gás;
- Custo do refrigerante: Reduzido;
- Disponibilidade: Em abundância;
- GWP: 0;
- Lubrificantes Compatíveis: Mineral;
- Nível de Segurança (ASHRAE): B2;
- ODP: 0;
- Ponto de ebulição (1atm): - 33°C;
- Pressão Crítica: 11,3 MPa;
- Técnicos: Elevada exigência.
- Temperatura Crítica: 132°C.

3.1.2.6.R-744

O R-744, dióxido de carbono, não é combustível, é quimicamente inativo e mais pesado que o ar. Porém, para os seres humanos, em alta concentração possui um efeito narcótico e asfixiante. O dióxido de carbono está disponível naturalmente em grandes quantidades (Gea, 2020).

O R-744 tem alta capacidade volumétrica de refrigeração, comparada aos refrigerantes sintéticos, e, dependendo das condições de aplicação, chega a ser de 5 a 8 vezes maior que o R22 (clorodifluorometano). Isso significa trabalhar com compressores, componentes e tubulações de tamanhos reduzidos. Possui também ótimas características para transferência de calor, além de ser estável química e termodinamicamente. Possui uma excelente miscibilidade com os óleos lubrificantes, o que facilita sua separação e diminui o arraste para o sistema, aumentando consequentemente a transferência de calor nos evaporadores e condensadores (Neulaender, 2007).

É compatível com a maioria dos materiais usados em sistemas de refrigeração e por ser uma molécula estável tem um baixo potencial de decomposição dentro do sistema de refrigeração. É um refrigerante barato e está permanente disponível. O dióxido de carbono apresenta um desempenho competitivo, em sistemas de bombas de calor, comparativamente aos refrigerantes atualmente em uso. A utilização de dióxido de carbono como refrigerante permite que se continuem a usar lubrificantes HFC (tipo poliéster) (Martin, 2022). Ainda assim, desenvolvimentos tecnológicos têm sido alcançados que melhoram a operação destes sistemas em climas quentes. As altas pressões de operação do sistema são mais perigosas e aumentam o risco de fuga, sendo também necessários compressores especiais, fazendo dos sistemas R-744 mais complexos. Esta complexidade aumenta a probabilidade de falha e consequente pode acrescentar alguma ineficiência ao sistema (Gaspar & Aguiar, 2020).

Este refrigerante apresenta as seguintes propriedades termodinâmicas (Gaspar & Aguiar, 2020):

- Biodegradável;
- Capacidade de arrefecimento: Elevada;
- Capacidade de refrigeração: Elevada;
- Eficiência Energética: Média;
- Capacidade de volumétrico: Elevada;
- Custo das instalações: Elevado devido a pressões mais altas ou maior complexidade;
- Custo do refrigerante: Reduzido;
- Disponibilidade: Em abundância;
- GWP: 1;
- Lubrificantes Compatíveis: POE;
- Nível de Segurança (ASHRAE): A1;
- ODP: 0;
- Ponto de ebulição (1atm): -57 °C;
- Pressão Crítica: 7,40 MPa;

- Temperatura Crítica: 31°C.

3.1.2.7.R-1150

O R-1150, etileno, é um refrigerante de hidrocarbonetos para aplicações que requerem temperaturas de trabalho extremamente baixas. Sendo hidrocarbonetos, tem baixo impacto ambiental tanto ao nível da proteção da camada de ozônio como do efeito de estufa e é classificado como um refrigerante do grupo de segurança A3 (GASSERVEI, 2021). Não apresenta restrições quanto à instalação inicial no equipamento e no uso durante a manutenção pós-venda. O etileno é usado principalmente para substituir o refrigerante R-13, R-503 em equipamentos de refrigeração de temperatura baixa ou em temperaturas extremamente reduzidas, porque uma vez que é inflamável, geralmente é usado apenas em equipamentos de refrigeração de baixa temperatura com menos enchimento de líquido, ou como um tipo de refrigerante misturado a baixa temperatura. Este refrigerante apresenta as seguintes propriedades termodinâmicas (SIRLOONGGROUP, 2018):

- Biodegradável;
- Capacidade de refrigeração: Boa;
- Custo da instalação: semelhante ao dos HCFCs ou HFCs mas superior ao dos refrigerantes naturais;
- Custo do refrigerante: Reduzido;
- Disponibilidade do refrigerante: Elevada;
- Eficiência Energética: Elevada;
- GWP: 0;
- Lubrificantes Compatíveis: Mineral/AB/POE;
- Nível de Segurança (ASHRAE): A3;
- ODP: 4;
- Ponto de ebulição (1atm): -104 °C;
- Pressão Crítica: 5,00 MPa;
- Pressão e temperaturas: Semelhantes às de HCFCs ou HFCs;
- Temperatura Crítica: 9,2 °C.

3.1.2.8.R-1270

O refrigerante R-1270 é um refrigerante simples, também chamado de refrigerante natural, com as vantagens de grande capacidade de refrigeração e alto COP. O refrigerante R-1270 é um gás incolor e inodoro à temperatura ambiente, inflamável e explosivo. Pode ser usado como substituto do R-502 e do R-143a, uma vez que se apresenta compatibilidade com o sistema original e com os lubrificantes. Deve ser transportado em cilindros de aço de 18, 380 kg e armazenados em local fresco, seco e ventilado, evitando sol e chuva (YUEON, 2022).

Este refrigerante apresenta as seguintes propriedades termodinâmicas (YUEON, 2022):

- Biodegradável;
- Capacidade de refrigeração: Boa;
- Custo da instalação: semelhante ao dos HCFCs ou HFCs mas superior ao dos refrigerantes naturais;
- Custo do refrigerante: Reduzido;
- Disponibilidade do refrigerante: Elevada;
- Eficiência Energética: Elevada;
- GWP: 2;
- Lubrificantes Compatíveis: Mineral/AB/POE;
- Nível de Segurança (ASHRAE): A3;
- ODP:0;
- Ponto de ebulição (1atm): -48 °C;
- Pressão Crítica: 4,60 MPa;
- Pressão e temperaturas: Semelhantes às de HCFCs ou HFCs;
- Temperatura Crítica: 91.

Em suma, ao analisar comparativamente os refrigerantes e com base nas propriedades termodinâmicas mencionadas nos capítulos 2.6 e 3.1.2, encontram-se descritas nas Tabelas 10, 11 as características a ter em conta na realização da ferramenta de apoio à decisão a fim de garantir o objetivo pretendido que culmina com a seleção do refrigerante ideal para o utilizador em questão com base nas suas diretrizes económicas, financeira assim como em questões de eficiência energética, capacidades de refrigeração, disponibilidades do refrigerante não esquecendo também o seu contributo para a sustentabilidade.

Tabela 10: Condições de operação dos refrigerantes alternativos e/ou sustentáveis.

Refrigeração				
Refrigerante	Temperaturas Muito Baixas	Temperaturas Baixas	Temperaturas Médias	Temperaturas Altas
R-1234ze			✓	✓
R-170	✓	✓		
R-290		✓	✓	✓
R-600a			✓	✓
R-717		✓	✓	✓
R-744		✓	✓	✓
R-1150	✓	✓		
R-1270		✓	✓	✓

Tabela 11: Propriedades Termodinâmicas dos refrigerantes alternativos e/ou sustentáveis.

	ODP	GWP	GWP (100)	Ponto ebulição 1atm(°C)	Temperatura Crítica (°C)	Pressão Crítica(MPa)	Lubrificantes compatíveis	Toxicidade	Flamabilidade	Segurança	Biodegradável	Custo do refrigerante	Custo das instalações	Capacidade de refrigeração	Eficiência	Disponibilidade
R-1234ze	0	6	6	-19	109,4	3,60	POE	Não	Sim	A2	Sim	Elevado	Médio	Média	Média	Reduzida
R-170	0	6	6	-89	32,3	4,87	Mineral/AB/POE	Não	Sim	A3	Sim	Reduzido	Elevado	Média	Elevada	Elevada
R-290	0	3	3	-42	97,0	4,30	Mineral/AB/POE	Não	Sim	A3	Sim	Reduzido	Elevado	Média	Elevada	Elevada
R-600a	0	3	3	-12	135,0	3,60	Mineral/AB/POE	Não	Sim	A3	Sim	Reduzido	Elevado	Média	Elevada	Elevada
R-717	0	0	0	-33	132,0	11,30	Mineral	Sim	Sim	B2	Sim	Reduzido	Muito elevado	Média	Elevada	Muito elevada
R-744	0	1	1	-57	31,0	7,40	POE	Não	Não	A1	Sim	Reduzido	Muito elevado	Muito elevada	Média	Muito elevada
R-1150	0	4	4	-104	9,2	50,00	Mineral/AB/POE	Não	Sim	A3	Sim	Reduzido	Elevado	Média	Elevada	Elevada
R-1270	0	2	2	-48	91,0	46,00	Mineral/AB/POE	Não	Sim	A3	Sim	Reduzido	Elevado	Média	Elevada	Elevada

Uma vez reunidas as propriedades relativas aos nos refrigerantes prestes a serem aceites pelas empresas (consumidor) ao nível da segurança, qualidade, custo-benefício, disponibilidade, características termodinâmicas assim como o seu contributo para a sustentabilidade, constrói-se então a ferramenta computacional de apoio à decisão que relatará a melhor escolha possível para o utilizador tendo em conta sempre as suas diretrizes e necessidades a fim de maximizar a sua satisfação.

3.2 Métodos

Este subcapítulo aborda a ferramenta de apoio à decisão com base nos dados obtidos anteriormente, relativamente a todos os refrigerantes alternativos que irão constituir a solução “ideal” no que toca à sua substituição em relação aos que futuramente acabarão por ser abolidos, tendo em conta o seu efeito prejudicial para o nosso planeta. Com base nas propriedades termodinâmicas, na sua disponibilidade (em termos de recursos humanos e materiais), segurança (abordando componentes como a toxicidade e a inflamabilidade), o custo/benefício associado e o impacto ambiental dos 8 refrigerantes mencionados, foi elaborado o sistema de apoio à decisão tendo em conta os seguintes aspetos:

- Refrigerantes usados anteriormente uma vez que alguns deles podem ser diretamente substituídos;
- Condições de temperatura no processo de refrigeração;
- Óleos de lubrificação;
- Preferências e preocupações do utilizador.

3.2.1. Ferramenta de Apoio à Decisão

À semelhança do que foi referido no subcapítulo 2.8.2., a ferramenta foi desenvolvida em Excel com o objetivo de a tornar acessível para o utilizador na medida em que todas as operações para o mesmo serão dedutivas e simples e que lhe permitirão chegar à conclusão final em poucos passos e todos eles justificados com base nas suas escolhas, preferências e diretrizes. A Figura 29 resume aquilo que será a ferramenta no ponto de vista do utilizador, onde por sua vez, após preenchimento de todos os campos é fornecida uma recomendação do refrigerante ideal dando 3 opções por ordem decrescente de prioridade. O SAD é então constituído por 3 partes. Na primeira parte é requerida a identificação do utilizador, da empresa e das funções que exerce nesta. A segunda etapa consiste num questionário:

- Usa algum destes refrigerantes antigos?
- Em relação à temperatura de funcionamento, o que pretende?
- Em relação ao óleo de lubrificação, qual deles utiliza?
- Qual é a sua preocupação quanto ao custo/benefício na substituição do refrigerante?
- Qual é a sua preocupação quanto à qualidade de operação na substituição do refrigerante?

- Qual é a sua preocupação quanto à segurança na substituição do refrigerante?
- Qual é a sua preocupação quanto à disponibilidade na substituição do refrigerante?
- Qual é a sua preocupação quanto ao impacto ambiental na substituição do refrigerante?

De

A			B			C			
1	0 - Ferramenta de Apoio à Decisão na Seleção do Refrigerante Sustentável								
2									
3									
4									
5	1 - Identification								
6									
7	Name								
8	Company								
9	Position								
10									
11	2 - Questions								
12									
13	Questions				Your answer				
14	Do you use any of these old refrigerants?								
15	Regarding the operating temperature, what do you want?								
16	Regarding lubrication oil, which one do you use?								
17	How concerned are you about the cost/benefit of replacing the refrigerant?								
18	How concerned are you about the quality of operation when replacing the refrigerant?								
19	How concerned are you about the safety of refrigerant replacement?								
20	How concerned are you about availability when replacing the refrigerant?								
21	How concerned are you about the environmental impact of replacing the refrigerant?								
22									
23	3 - Recommendation								
24									
25									
26									
27									

Figura 29: Layout da Ferramenta de Apoio à Decisão.

forma a tornar simples a resposta às questões impostas pelo programa, nas células onde constam as respostas existem *dropbox's* nas quais estão presentes todas as possibilidades para facilitar o processo de preenchimento, como mostra a Figura 30.

2 - Questions	
Questions	Your answer
14 Do you use any of these old refrigerants?	
15 Regarding the operating temperature, what do you want?	R-22
16 Regarding lubrication oil, which one do you use?	R-134a
17 How concerned are you about the cost/benefit of replacing the refrigerant?	R-13
18 How concerned are you about the quality of operation when replacing the refrigerant?	R-503
19 How concerned are you about the safety of refrigerant replacement?	R-502
20 How concerned are you about availability when replacing the refrigerant?	R-143a
21 How concerned are you about the environmental impact of replacing the refrigerant?	R-404a
	R-12

Figura 30: Demonstração das Dropboxes na ferramenta.

A terceira etapa e última está associada às recomendações fornecidas, com base em todos os dados, nas restrições e condições referentes aos refrigerantes alternativos. O SAD fornece ao utilizador recomendações, colocando por prioridade de utilização três opções de refrigerantes a serem adotados. A resposta é dada com base numa Função Objetivo que analisa as respostas dadas pelo utilizador nas 8 questões, transformando as respostas qualitativas em dados e coeficientes numéricos e que se encontra também dependente de restrições associadas aos refrigerantes antigos (que tornam a resposta quase direta), aos óleos de lubrificação usados e às condições de temperatura no processo de refrigeração.

3.2.1.2. Função Objetivo

A ferramenta de apoio à decisão resume-se à aplicação de uma função que depende de 5 coeficientes (variam consoante as respostas do utilizador às últimas 5 questões), restrições e dados que resultam das propriedades constantes de cada um dos refrigerantes e é dada pela Equação 21. Por sua vez, como esta função é equacionada para cada um dos 8 refrigerantes alternativos e, quanto maior o valor final, melhor o refrigerante para aplicação em causa, tendo em consideração as preferências do utilizador. Por sua vez, os três refrigerantes que apresentarem resultados mais elevados, constituirão a resposta a ser dada ao utilizador por ordem nas recomendações (primeiro, segundo e terceiro lugar).

$$R = (C_1 \times x_1 + C_2 \times x_2 + C_3 \times x_3 + C_4 \times x_4 + C_5 \times x_5) \times y_1 \times y_2 \times y_3 \quad (21)$$

A expressão pode ser dividida em 3 partes nas quais:

- C's – coeficientes;
- X's – propriedades dos refrigerantes;
- Y's – Restrições dos refrigerantes.

Coeficientes

O utilizador quando responde às últimas 5 questões que determinam o valor dos coeficientes C1, C2, C3, C4 e C5 introduz valores qualitativos que correspondem às expressões: “None”; “Reduced”; “Medium”; “High” e “Very High”, ou seja, os coeficientes não correspondem a valores constantes, na medida em que são alterados em função das preferências e preocupações de quem responde ao questionário. Uma vez que estes valores são qualitativos, existe a necessidade de os transformar em dados numéricos de forma a possibilitar a resolução da função objetivo

Esta transformação é baseada no estudo realizado por Fonseca (2017), no qual tem como objetivo a transformação de variáveis dependentes qualitativas em quantitativas com o intuito de culminar com uma conclusão equivalente. Para atingir tal efeito, realiza uma análise sensorial através das respostas dadas pelos consumidores dos mesmos. A investigadora impõe aos consumidores através de uma ferramenta computacional um determinado conjunto de questões das quais retira os dados qualitativos essenciais para a resolução do seu problema.

Após a resolução do seu questionário por parte do utilizador, a investigadora transforma cada uma das respostas de acordo com a escala de 1 a 5 na qual divide as diferentes possibilidades num mesmo intervalo, onde 1 (um) corresponde à pior e 5 (cinco) à melhor sensação expressando as funções resposta de forma gráfica onde estas crescem de forma linear. Quanto maior o valor quantitativo da resposta melhor será o produto no seu caso. Apesar de se tratar de

um estudo num contexto completamente distinto, o procedimento é exatamente o mesmo, uma vez que recorre a um procedimento semelhante com o intuito de solucionar uma função objetivo que de forma transmitir a melhor recomendação para os utilizadores.

À semelhança do estudo apresentado, a ferramenta de apoio à decisão desenvolvida nesta dissertação impõe ao utilizador questões comum conjunto de respostas possíveis (dados qualitativos), que serão transformadas (dados quantitativos) numa escala na qual os valores serão separados por um mesmo intervalo. No seguimento deste contexto, de forma a tornar possível a Equação 21, é atribuída a escala de 0 a 1 como mostra a Tabela 12, a fim de transformar os dados qualitativos em dados quantitativos a fim de serem quantificados os coeficientes relativos ao custo/benefício (C1), qualidade de operação (C2), segurança (C3), disponibilidade (C4) e impacte ambiental (C5). Quanto maior o valor quantitativo associado aos coeficientes maior a preocupação do utilizador relativamente a esse mesmo âmbito.

Tabela 12: Escala definida para os coeficientes da Função Objetivo.

Valor Quantitativo (resposta do utilizador)	Valor Quantitativo (resposta do utilizador)
<i>None</i>	0
<i>Reduced</i>	0,25
<i>Medium</i>	0,5
<i>High</i>	0,75
<i>Very High</i>	1

Propriedades dos refrigerantes

Os dados referentes aos refrigerantes alternativos e que foram usados na ferramenta estão descritos na Tabela 11, na qual são caracterizados qualitativamente. Estas propriedades apresentam-se como valores constantes na função objetivo que multiplicar-se-ão pelos coeficientes anteriormente mencionados. As características dos refrigerantes que servem de análise e que influenciam a função são as seguintes:

- Custo/Benefício tanto do refrigerante como das instalações;
- Qualidade de refrigeração analisando a eficiência e a capacidade da mesma;
- Segurança;
- Disponibilidade em recursos humanos e materiais;
- Impacto ambiental abordando o GWP (100 anos).

À semelhança dos coeficientes, as propriedades a fim de poderem ser usadas na função objetivo, foram transformadas em valores numéricos através de uma escala estabelecida de 0 a 1. No entanto, para as diferentes propriedades foram tidas em conta diferentes escalas. Uma vez que o objetivo da ferramenta é otimizar a função objetivo para se descobrir quais os melhores

refrigerantes, é necessária uma atenção acrescida quando se fala em aspetos como o custo e o impacte ambiental. Nestes casos, quanto maior o seu valor qualitativo (descrito na Tabela 11) menor terá de ser o seu respetivo valor em termos numéricos. Desta forma as escalas foram definidas como mostra a Tabela 13.

Tabela 13: Escala definida para as propriedades da Função Objetivo.

Valor Quantitativo	Valor (Custo/Benefício)	Valor (Qualidade de Operação)	Valor (Segurança)	Valor (Disponibilidade)
Nulo	1-0=1	0	0	0
Reduzido	1-0,25=0,25	0,25	0,25	0,25
Médio	1-0,5=0,5	0,5	0,5	0,5
Elevado	1-0,75=0,75	0,75	0,75	0,75
Muito Elevado	1-1=0	1	1	1

Por último, relativamente à propriedade que aborda o impacte ambiental, apesar de estar descrita na Tabela 11 em termos numéricos, teve direito a uma escala específica, porque como foi indicado anteriormente, quanto maior este fator menor terá de ser o seu valor a utilizar na função objetivo. Assim, desta forma a escala para os dados relativos ao GWP irá ser baseada na Equação 22 na qual o coeficiente x_5 diz respeito ao valor associado ao GWP de cada um dos refrigerantes alternativos.

$$1 - \left(\frac{x_5}{10}\right) \quad (22)$$

Restrições dos refrigerantes

Em último lugar encontram-se as restrições dos refrigerantes que dizem respeito aos seguintes fatores:

- Possibilidade de o refrigerante antigo usado até à data assumir um substituto direto;
- Condições de temperatura usadas no processo de refrigeração;
- Tipo de óleo usado para lubrificação;

No fundo, estes três aspetos são os que irão determinar a resposta final, uma vez que, assim que utilizador responder às primeiras três questões que lhe são impostas, este reduz de imediato a gama de possibilidades para o seu refrigerante de substituição “ideal”.

No que toca à restrição dos refrigerantes antigos, há que ter em conta que os oito refrigerantes alternativos em estudo e alvo de análise nesta ferramenta, podem ser substitutos diretos. Para a

primeira pergunta o utilizador tem ao seu dispor nove possibilidades de resposta, nas quais oito são constituídas por oito refrigerantes que futuramente irão ser abolidos e a restante corresponde ao simples facto de o mesmo não usar nenhum nas suas instalações de refrigeração.

Dependendo das respostas fornecidas à ferramenta, esta direccionará a função objetivo num determinado sentido. Dessa forma, as relações entre as nove respostas possíveis à primeira pergunta e os refrigerantes de substituição são as seguintes:

- R-22 => R-290, R-600a, R-717, R-744;
- R-134a => R-1234ze, R-600a, R-717, R-744;
- R-13 => R-170, R-1150;
- R-503 => R-170, R-1150;
- R-502 => R-1270;
- R-143^a => R-1270;
- R-404^a => R-744;
- R-12 => R-600a;
- None => R-1234ze, R-170, R-290, R-600a, R-717, R-744, R-1150, R-1270.

Mais uma vez as respostas apresentam-se em formato qualitativo, existindo novamente a necessidade de os transformar em dados numéricos. Neste caso não se trata de uma escala, mas sim de um caso onde se aplica as instruções *if* e *else*. A instrução *if* é conhecida como a instrução de tomada de decisão, pois esta é permitida para uma determinada condição ou expressão. O código dentro da instrução *if* é executado se a condição for avaliada como verdadeira. No entanto, o código dentro das chaves é não é considerado se a condição for avaliada como falsa (Rosa,2022). Deste modo, as condições podem assumir dois tipos de valores lógicos, nomeadamente 1 se forem avaliadas como verdadeiras e 0 quando ocorre o oposto.

Relativamente à ferramenta em si e mais concretamente à função objetivo, o utilizador sempre que seleciona uma resposta, esta assumirá o valor lógico de 1, pelo que neste caso será o valor de y_1 da equação 21 que estará a ser quantificado. Por exemplo, o utilizador ao mencionar o facto de utilizar o R-22 nas suas instalações a função objetivo apenas será equacionada para os refrigerantes R-290, R-600a, R-717, e R-744 ($y_1=1$) uma vez que os restantes assumirão o valor nulo automaticamente, encurtando assim a gama de possibilidades para o refrigerante “ideal” a ser recomendado.

Relativamente à restrição das condições de temperatura utilizadas no processo de refrigeração, esta foi estabelecida com base na Tabela 10, pelo que, o utilizador ao responder à segunda questão que lhe é imposta, define com base no seu caso específico a temperatura na qual pretende operar e consequentemente restringe uma determinada gama de refrigerantes alternativos e/ou sustentáveis a poderem ser usados. No seguimento deste contexto e usando novamente o mesmo tipo de programação estabelecida na restrição anterior, assim que o utilizador insira a resposta na dropdown respetiva, a mesma assumirá o valor lógico de 1 na

expressão matemática a ser equacionada, atribuindo deste modo o valor ao parâmetro y_2 da equação 21.

Dependendo das respostas fornecidas à ferramenta, a função objetivo será direcionada num determinado sentido. Por conseguinte, as relações entre as quatro respostas possíveis à segunda pergunta e os refrigerantes de substituição são as seguintes:

- Muito baixas => R-170, R-1150;
- Baixas => R-290, R-717, R-744, R-1270;
- Médias => R-1234ze, R-290, R-600a, R-717, R-744, R-1270;
- Altas => R-1234ze, R-290, R-600a, R-717, R-744, R-1270.

No fundo, se for dado o exemplo do utilizador assumir que opera em condições médias de temperatura de refrigeração, a função objetivo passará a ser equacionada apenas e só para os refrigerantes R-1234ze, R-290, R-600a, R-717, R-744, e R-1270, uma vez que o y_2 será igual 1 e os dos restantes nulo, diminuindo novamente o conjunto de recomendações possíveis.

À semelhança das restrições anteriores, relativamente ao tipo de óleo de lubrificação usado, recorre-se novamente à mesma metodologia dos valores lógicos e assim que o utilizador responder à terceira questão, reduz ainda mais o conjunto de resposta possíveis à função objetivo. Assim que seja preenchida a dropdown respetiva consoante as pretensões por parte do utilizador, a resposta associar-se-á ao valor lógico de 1 quantificando automaticamente o parâmetro y_3 . Dependendo das respostas fornecidas à ferramenta, a função objetivo será direcionada num determinado sentido. Por conseguinte, as relações entre as três respostas possíveis à terceira pergunta e os refrigerantes de substituição são as seguintes:

- Mineral => R-170, R-290, R-600a, R-717, R-1150, R-1270;
- AB => R-170, R-290, R-600a, R-1150, R-1270;
- POE => R-1234ze, R-170, R-290, R-600a, R-744, R-1150, R-1270.

Ou seja, se por acaso o utilizador mostrar a necessidade de usar o óleo Mineral como lubrificante nas suas instalações de refrigeração, só existirá compatibilidade com os refrigerantes

R-170, R-290, R-600a, R-717, R-1150, e R-1270, na medida em que a função objetivo passará apenas e só a ser equacionada para estes, porque o seu valor de y_3 é 1, reduzindo pela terceira vez e última o conjunto de recomendações possíveis para o refrigerante de substituição “ideal”.

Uma vez feita a descrição de todas as componentes da ferramenta e mostrados todos os cálculos que culminam com a recomendação final do refrigerante substituto para a empresa, esta é aplicada em 3 casos práticos para uma melhor perceção da forma como funciona e como auxilia os utilizadores, na medida em que estes acedem à ferramenta, preenchem passo a passo o

questionário, e consoante as suas preferências, valores e necessidades, as respostas finais associadas à resolução da função objetivo irão ser determinadas e apresentadas.

4. Casos Práticos

Com o avançar dos anos, o cumprimento das legislações por parte das empresas no setor da refrigeração industrial levou a que estas (uma vez proibidas de usar determinados de refrigerantes), recorressem à sua substituição por outros com desempenho e eficiências energéticas similares. No entanto, após o contacto com o setor, é possível verificar que este ainda não se encontra consciencializado para o conceito da sustentabilidade e pela adoção dos refrigerantes designados por alternativos e/ou sustentáveis mencionados no capítulo 3 e que num futuro próximo terão de ser a solução das várias empresas nos seus processos de refrigeração.

Um dos setores que comprova esse facto é a indústria agroalimentar Portuguesa, que no ano 2016 encontrava-se limitada a um conjunto de refrigerantes com elevado GWP. Os refrigerantes R-32, R-404a, R-22, R-422, e R-449 representam uma grande quota na distribuição percentual do uso de refrigerantes em Portugal, e por sua vez, encontrar-se-ão descontinuados originando a preocupação pela substituição dos refrigerantes por outros amigos do ambiente (Pavkovic, 2013).

Torna-se crucial então a sensibilização e consciencialização para a utilização de refrigerantes mais ecológicos, a fim de tornar os sistemas de refrigeração que usem estes refrigerantes *futureproof*, devido ao facto de apresentarem um mínimo impacte ambiental e porque se regem pela perspectiva do desenvolvimento e crescimento tecnológico sustentável e eficiente.

De forma a consolidar o que foi apresentado no capítulo 3, foram questionadas empresas do setor, onde foram obtidos 3 casos práticos a serem estudados e aplicados na ferramenta de apoio à decisão, a fim de conferir a melhor recomendação possível para as empresas, transmitindo as melhores soluções tendo em conta a situação com a qual se deparam. Assim, os casos a serem estudados, analisados e aplicados no SAD dizem respeito à procura pelos refrigerantes alternativos que substituirão o R-449, o R-422 e o R-32, com base nas preferências e diretrizes das próprias empresas, que assim que preencheram a ferramenta em Excel, obtiveram as suas respostas e recomendações viáveis.

4.1. Caso Prático 1

Ao contactar a empresa de refrigeração foi obtida a informação de que o refrigerante em uso é o R-449, que se caracteriza por ser uma solução de baixo impacte ambiental e com um GWP reduzido quando comparado com os HFCs. Apresenta um equilíbrio de propriedades termodinâmicas, é utilizado em condições de baixa e média temperatura em aplicações comerciais e industriais e no que ao toca ao óleo de lubrificação utilizado nas instalações, este é miscível com óleos POE (Aldifrio, 2022). Estes dados inerentes ao refrigerante são fulcrais para a obtenção da recomendação proveniente da ferramenta para o utilizador. Primeiramente, a fim

de aglomerar todas as condições possíveis para solucionar o problema, a empresa foi questionada no SAD quanto ao refrigerante usado até à data (neste caso, o R-449), às condições de temperatura (médias) e ao óleo de lubrificação (POE). No seguimento destas primeiras três questões, foram quantificados os parâmetros associados às restrições como mostra a Figura 31.

10	2 - Questions	
12	Questions	Your answer
14	Do you use any of these old refrigerants?	R-449
15	Regarding the operating temperature, what do you want?	Medium
16	Regarding lubrication oil, which one do you use?	POE

Figura 31: Preenchimento dos parâmetros das restrições no caso do R-449

O passo seguinte e último antes de ser solucionada a recomendação, resume-se a cinco questões impostas ao utilizador da ferramenta acerca do seu grau de preocupação por:

- Custo/Benefício;
- Qualidade de operação;
- Segurança;
- Disponibilidade;
- Impacte ambiental.

No seguimento destas questões, que têm novamente por base apenas e só a opinião do utilizador no contexto do processo de refrigeração utilizado na sua empresa, foram obtidas as seguintes respostas nas células respetivas no Excel como mostra a Figura 32. Foram assim quantificados os coeficientes da função objetivo, dando origem à solução única para este caso, substituição pelo R-744 (dióxido de carbono).

17	How concerned are you about the cost/benefit of replacing the refrigerant?	High
18	How concerned are you about the quality of operation when replacing the refrigerant?	Very High
19	How concerned are you about the safety of refrigerant replacement?	Medium
20	How concerned are you about availability when replacing the refrigerant?	Medium
21	How concerned are you about the environmental impact of replacing the refrigerant?	Medium
22		
23	3 - Recommendation	
24		
25	1st	R-744
26		

Figura 32: Solução do caso prático 1 utilizando temperaturas médias.

Segundo os dados recolhidos a esta empresa, constata-se a extrema preocupação pela substituição do seu refrigerante por outro que apresente excelentes propriedades no que toca à capacidade e eficiência na refrigeração e que este não leve a empresa a despender elevado valor monetário na aquisição do refrigerante ou na troca de instalações. Relativamente aos outros fatores, não foram apresentadas grandes preocupações, dando origem à resposta apresentada. No caso da empresa nas suas condições, pretender temperaturas baixas no processo de

refrigeração, com as mesmas respostas aos outros parâmetros a recomendação acabaria por ser a mesma, como demonstra a Figura 33.

2 - Questions	
Questions	Your answer
14 Do you use any of these old refrigerants?	R-449
15 Regarding the operating temperature, what do you want?	Medium
16 Regarding lubrication oil, which one do you use?	POE
17 How concerned are you about the cost/benefit of replacing the refrigerant?	High
18 How concerned are you about the quality of operation when replacing the refrigerant?	Very High
19 How concerned are you about the safety of refrigerant replacement?	Medium
20 How concerned are you about availability when replacing the refrigerant?	Medium
21 How concerned are you about the environmental impact of replacing the refrigerant?	Medium
3 - Recommendation	
1st	R-744

Figura 33: Solução para o caso prático 1 utilizando baixas temperaturas.

Em suma, foi selecionada como recomendação para esta empresa o refrigerante R-744 (Dióxido de Carbono), uma vez que este acaba por ser o seu substituto direto, já que no conjunto das 8 possibilidades ser o único que apresenta propriedades termodinâmicas, condições de temperatura, óleo de lubrificação similares relativamente ao R-449, apesar da potencial necessidade de alterar a instalação de refrigeração (compressor, tubagens,...).

4.2. Caso Prático 2

À semelhança do primeiro caso prático, o procedimento é o mesmo, diferindo apenas no refrigerante usado e a ser alterado pela empresa, designado por R-422. Este caracteriza-se por ser aplicado em condições de baixa, média e alta temperatura em aplicações de refrigeração (industrial, comercial e doméstica) e condicionamento (residencial e comercial). Adicionalmente, apresenta boas compatibilidades tanto com os lubrificantes tradicionais como os da nova geração, sendo por isso miscível com os óleos AB, Mineral e POE (Tazzeti, 2022). Deste modo, ao contrário do primeiro caso prático no qual a recomendação do refrigerante “ideal” foi a mesma para as duas possibilidades existentes, neste segundo caso prático a empresa no seu processo de substituição tem ao seu dispor nove possibilidades distintas, uma vez que pode optar por três condições de temperatura e três tipos de óleo de lubrificação. Neste seguimento, foi igualmente questionado à empresa o seu grau de preocupação no que toca ao custo, qualidade de operação, segurança, disponibilidade e impacte ambiental na substituição do refrigerante, cujas respostas estão demonstradas na Figura 34.

17 How concerned are you about the cost/benefit of replacing the refrigerant?	Very High
18 How concerned are you about the quality of operation when replacing the refrigerant?	Very High
19 How concerned are you about the safety of refrigerant replacement?	Medium
20 How concerned are you about availability when replacing the refrigerant?	Medium
21 How concerned are you about the environmental impact of replacing the refrigerant?	Medium
22	

Figura 34: Preocupações da empresa na substituição do R-422

Posteriormente, foram igualmente preenchidas as dropboxs relativas às condições de temperatura e óleos de lubrificação, e consoante os dados fornecidos pelo utilizador, foram obtidas diferentes recomendações na resolução da função objetivo por parte do SAD. Deste modo, a empresa tem à sua disponibilidade uma gama de soluções possíveis descritas numa árvore de decisão como mostra a Figura 35.

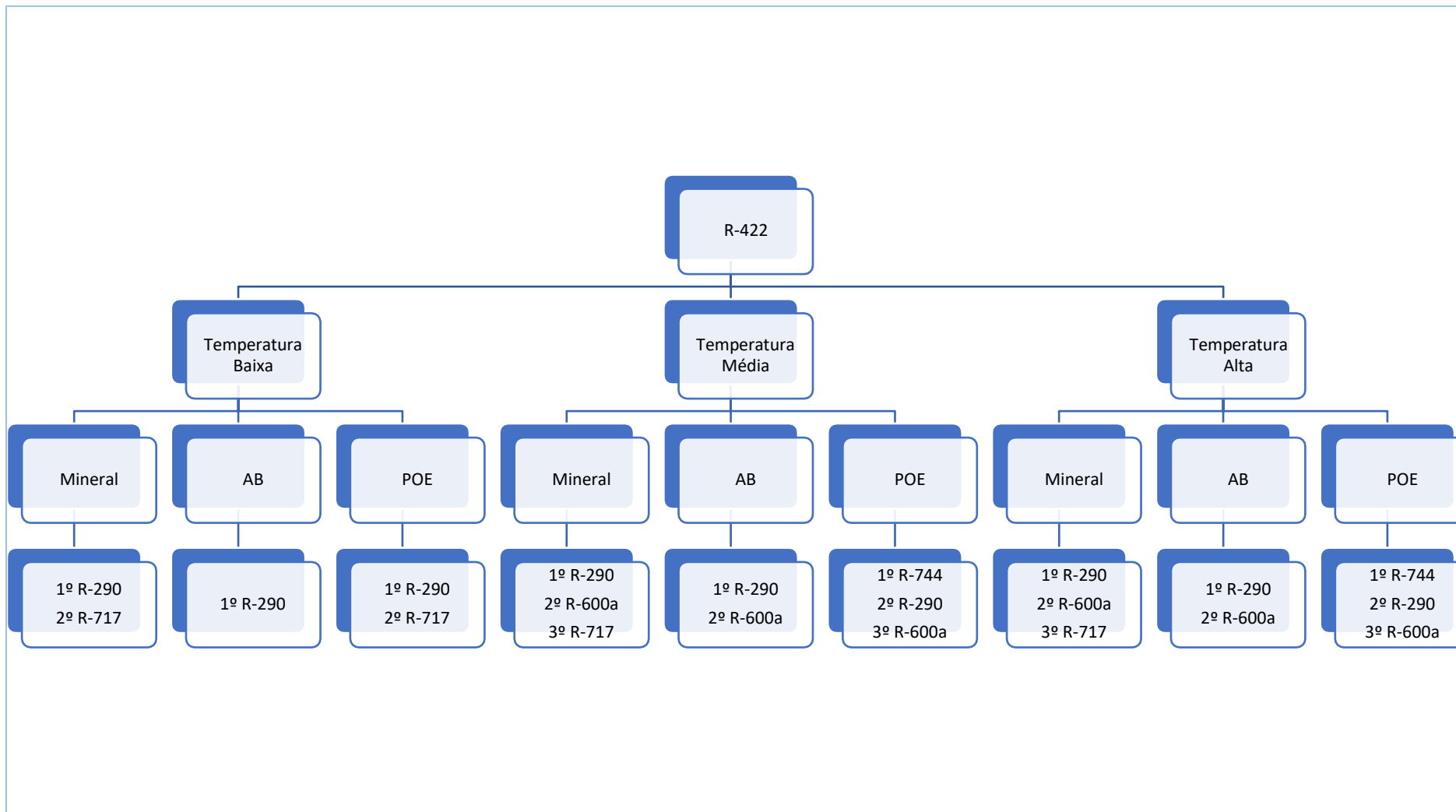


Figura 35: Árvore de Decisão para as possibilidades de substituição do refrigerante R-422.

Dependendo das intenções da empresa relativamente às condições de temperatura e do óleo usado para a lubrificação das instalações, verifica-se a partir da Figura 36 que as recomendações vão variando e, graças à versatilidade da própria ferramenta, esta fornece sempre os três melhores refrigerantes alternativos e/ou sustentáveis para o caso específico em questão, sempre que possível, tendo em conta as diversas restrições apresentadas no subcapítulo 3.2.1.2. Ao analisar os resultados expostos na Figura 35, verifica-se uma tendência para a recomendação do R-290 (propano), independentemente da temperatura de operação e dos óleos de lubrificação.

4.3. Caso Prático 3

Por último, mais uma empresa no setor da refrigeração industrial foi contactada e questionada sobre a substituição dos refrigerantes, ficando mais uma vez registada a falta de consciência do setor sobre o tema. A empresa em questão ainda utiliza o refrigerante R-32, que futuramente será igualmente descontinuado. Caracteriza-se por ser miscível com o lubrificante POE, é utilizado em condições de baixa temperatura e apresenta um GWP relativamente elevado de 550, contribuindo negativamente para a camada do ozono (ACR, 2008). Novamente, foi apresentada a ferramenta computacional, sendo a metodologia exatamente a mesma aos casos anteriores, sendo as respostas às questões impostas pelo SAD as representadas na Figura 36.

2 - Questions	
Questions	Your answer
Do you use any of these old refrigerants?	R-32
Regarding the operating temperature, what do you want?	Low
Regarding lubrication oil, which one do you use?	POE
How concerned are you about the cost/benefit of replacing the refrigerant?	Very High
How concerned are you about the quality of operation when replacing the refrigerant?	Very High
How concerned are you about the safety of refrigerant replacement?	Medium
How concerned are you about availability when replacing the refrigerant?	Medium
How concerned are you about the environmental impact of replacing the refrigerant?	Very High
3 - Recommendation	
1st	R-290

Figura 36: Respostas da empresa para a substituição do R-32.

À semelhança dos casos práticos 1 e 2, esta empresa preocupa-se essencialmente com os custos que acarreta a aquisição do refrigerante e a alteração das instalações, assim como tem o interesse de maximizar a capacidade e eficiência de refrigeração. No entanto, uma vez que ainda utiliza um refrigerante que futuramente será descontinuado, pretende a sua substituição por um que apresente excelentes propriedades termodinâmicas, condições de temperatura e óleo de lubrificação similar e compatível, mas que seja mais ecológico e “amigo” do ambiente. Para esse efeito, nada melhor que o R-290 (propano), porque de acordo com o próprio SAD, este é o substituto direto do R-32, tendo em conta as características de ambos.

De forma conclusiva, a ferramenta foi aplicada com sucesso nos três casos estudados, graças à sua flexibilidade e acessibilidade para o utilizador, e que para além de solucionar os mais diversos problemas com que as empresas se deparam no impasse da substituição, tem a capacidade de aconselhar as mesmas na possibilidade de serem impostas outras condições nas temperaturas e tipos de óleo, procurando sempre a máxima satisfação do utilizador do SAD, conferindo-lhes com clareza e objetividade todas as recomendações possíveis para os futuros refrigerantes “ideais”.

5. Conclusões

5.1. Conclusões gerais

O sector da refrigeração industrial está cada vez mais direcionado para a importância e necessidade de serem aplicados projetos seguros, com dispositivos de segurança adequados, de acordo com a legislação internacional sobre segurança. Atualmente, a utilização de sistemas que contenham HFCs, implica o cumprimento de metas de emissão e regras que, no caso de não serem cumpridas, estão sujeitas a sanções. Essas metas e regras garantem uma atenuação do efeito de estufa, mas não o seu fim.

Com o avançar dos anos e com a implementação de inúmeros protocolos, nomeadamente os de Quioto e Montreal e de acordo com os acordos impostos, os refrigerantes halogenados foram eliminados progressivamente, no sentido de se partir para o conceito da sustentabilidade. Visa a proteção do planeta das emissões poluentes que culminam com a degradação da camada do ozono e para contribua consequentemente para a redução do aquecimento global.

A substituição dos fluidos refrigerantes que se apresentam como os principais agentes poluidores da atmosfera, e que por sua vez contribuem para o processo de destruição da camada de ozono e aumento do efeito de estufa, por outros que aparentem ser menos nocivos para o ambiente requer um alargado estudo de fundo. O estudo realizado nesta dissertação centrou-se, não apenas nas consequências diretas desses refrigerantes sobre o ambiente, como se destacou pela análise do desempenho, energético e exerético, dos refrigerantes em geral. No seguimento deste contexto, a presente dissertação teve também como um dos objetivos, o estudo geral das diversas alternativas de substituição, a curto e longo prazo, para os fluidos refrigerantes mais utilizados.

Para tal efeito, durante o decorrer do trabalho é abordado o aspeto geral da refrigeração, com a apresentação das principais técnicas utilizadas para produzir o frio, dando especial atenção ao ciclo em estudo, o ciclo de refrigeração por compressão de vapor. Para este ciclo termodinâmico, são apresentados os seus princípios gerais de operação, as equações de governo que permitem o balanço energético (de acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica) e exerético (de acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica). Posteriormente são abordadas as características gerais e propriedades dos fluidos refrigerantes, permitindo assim a sua rápida classificação de acordo com o tipo e família de fluido refrigerante. Ainda na temática dos fluidos refrigerantes, são descritos os principais acontecimentos que marcaram a história da evolução dos fluidos refrigerantes, dando principal ênfase à legislação publicada nesta área.

Após a emissão dos regulamentos N° 842/2006, N° 1005/2009, N° 517/2014 emitidos pelo Parlamento Europeu, foram não só assinalados todos os refrigerantes a ser eliminados tendo em

conta o seu teor destrutivo para a camada do ozono, como também foram mencionados os refrigerantes alternativos com ODP nulo e GWP reduzido, apelando por isso à sustentabilidade tão procurada. Por sua vez, o principal objetivo deste trabalho recai essencialmente sobre a implementação destes mesmos refrigerantes nas empresas com base numa ferramenta de apoio à decisão, na medida em que os utilizadores consoante as suas perspetivas, valores e pretensões terão a resposta para a sua futura substituição dos refrigerantes halogenados.

Em suma, a ferramenta computacional envolve uma base de dados em Excel que avalia as propriedades termodinâmicas tanto em propriedades qualitativas e quantitativas associadas a uma função objetivo que depende das restrições de cada um dos refrigerantes alternativos e/ou sustentáveis em análise e das respostas do utilizador às questões que lhe são impostas. Este sistema de apoio à decisão dá extrema importância à opinião do utilizador e ao seu caso em específico para a recomendação do refrigerante “ideal”.

5.2. Conclusões específicas

A execução do SAD depende fundamentalmente de parâmetros constantes e condições específicas relativas a cada um dos refrigerantes alternativos que constituem a possibilidade de resposta para o processo de substituição. A função objetiva programada na ferramenta computacional é equacionada com base nas restrições e propriedades associadas aos 8 fluidos em análise que dependendo dos coeficientes a serem introduzidos pelos utilizadores o sistema de decisão ditará uma ou outra recomendação. Por sua vez estas restrições e propriedades únicas de cada um dos refrigerantes foram obtidas e determinadas com base numa avaliação de dados qualitativos e quantitativos adquiridos previamente, nomeadamente através da comparação destes refrigerantes alternativos com os halogenados já abolidos ou futuramente descontinuados. Esta mesma pesquisa científica encontra-se sustentada pela revisão bibliográfica realizada. De forma a possibilitar a resolução da equação, os dados qualitativos foram transformados em quantitativos através de escalas regulares estabelecidas para todos os casos necessários.

Apesar dos refrigerantes sustentáveis apresentarem ótimas propriedades termodinâmicas, custo reduzido quando comparados aos HCFCs e de se apresentarem no seu todo com ótimas soluções de um ponto de vista geral para qualquer processo de refrigeração industrial, demonstram no entanto determinadas ambiguidades, que só graças ao levantamento e avaliação qualitativa e quantitativa, foi possível diferenciar ao pormenor de forma a conferir de forma fundamentada a melhor solução para o futuro. O desenvolvimento do estudo e da ferramenta induz a uma conclusão específica e não generalizada pelo simples facto de cada um dos refrigerantes de substituição não ser a solução ideal para todos os casos, mas sim para uma determinada situação, porque apesar de todos eles terem excelentes características e propriedades, estão associados a diferentes condições de temperatura no processo de refrigeração, óleos de lubrificação e em muitos dos casos podem ser os refrigerantes de substituição diretos dos

antigos, até então usados não sendo necessárias grandes alterações nas instalações já pré-existentes.

5.3. Sugestões de trabalho futuro

A ferramenta apesar de providenciar a melhor recomendação para o utilizador, dando resposta ao problema inicial com soluções “ideais” para os casos específicos apresentados pelas empresas do setor esta pode ser melhorada e otimizada. O SAD desenvolvido é consistente e flexível em todo o seu processo, transmitindo com clareza e objetividade as respostas, sendo por sua vez de fácil utilização e compreensão para o utilizador. Porém, o sistema de apoio à decisão pode eventualmente potenciar os seus parâmetros tendo em conta os seguintes fatores: Forma; Quantidade; e Qualidade.

Após a transformação dos dados qualitativos em quantitativos através de escalas específicas, estes passaram a ser representados através de valores numéricos discretos. Uma das perspetivas de melhoria para o futuro do SAD recai sobre a implementação de dados contínuos com o intuito de fornecer ainda mais dados a cada um dos refrigerantes, fundamentando consequentemente as respostas e recomendações apresentadas para os refrigerantes sustentáveis a serem opção para as empresas do setor.

Relativamente à quantidade de dados que se encontram ao dispor do sistema de apoio à decisão, para cada um dos refrigerantes, o SAD utiliza três restrições (condição dos refrigerantes anteriormente utilizados, temperatura de operação e tipo de óleo usado para a lubrificação), cinco coeficientes (custo, qualidade operação, segurança, disponibilidade, impacto ambiental) e sete dados constantes associados a estes coeficientes a determinar pelo utilizador. No sentido de aumentar a flexibilidade da ferramenta, de a tornar mais sólida e segura nas respostas que providencia, esta pode apresentar como possibilidade de melhoria o aumento do número de parâmetros a serem utilizados pela função objetivo, nomeadamente as restrições, coeficientes e as propriedades inerentes aos refrigerantes alternativos.

No que toca à qualidade, a demonstração das recomendações para o utilizador pode ser igualmente melhorada. Sempre que o resultados é apresentado, são apenas visualizadas as designações dos refrigerantes sustentáveis a serem recomendados (por ordem). No entanto, esta mesma apresentação pode ser acompanhada de uma descrição detalhada, pormenorizada e concisa do refrigerante em questão. Para esse efeito, poderá ser implementada uma *dropbox* à semelhança das que foram impostas nos locais de reposta do utilizador às diversas questões.

Em suma, a otimização destes três fatores levará ao aumento da consistência, eficácia, e precisão dos resultados da ferramenta de apoio à decisão.

6. Referências Bibliográficas

- ATM Revolution. (2009). Earth The Power of the Planet. Camadas da Atmosfera Terrestre. Recuperado em 25 de maio de 2021 de <https://atm-revolution.blogs.sapo.pt/3418.html>.
- Guerra A. (2014). Apontamentos de Produção de Frio e Refrigeração. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Martins C., Lanzinha J., Nepomuceno M. (2011). Condicionantes e medidas de melhoria na certificação energética de edifícios tradicionais de habitação localizados em centros históricos da Beira Interior . Universidade da Beira Interior.
- Silva, A. (2011). Uso de Fluidos Alternativos em Sistemas de Refrigeração e Ar Condicionado (Artigos Técnicos). Aplicações de Fluidos Naturais na Refrigeração para Supermercados: Sistema Cascata com CO₂/NH₃.
- ACR (2008). Que problema con el refrigerante de los coches. Recuperado em 5 de setembro de 2022 de <https://www.acrlatinoamerica.com/20080325456/noticias/empresas/ique-problema-con-el-refrigerante-de-los-coches.html>
- Agência Portuguesa do Ambiente (2021). Políticas de Mitigação. Recuperado em 13 de novembro de 2021 de <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=81&sub2ref=117>.
- Agência Portuguesa do Ambiente (2021), Protocolo de Quioto. Recuperado em 14 de maio de 2021 de <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=81&sub2ref=119&sub3ref=500>.
- Aldifrio (2022). Gás refrigerante R-449 (Opteon™ XP40) substituto R-404A/R-507. Recuperado em 5 de setembro de 2022 de <https://aldifrio.com/index.php/2018/05/01/novo-refrigerante-concebido-substituir-r-404a-r-507/>
- Amorim R. (2010). Desenvolvimento de um sistema energético sustentável para uma aldeia rural sem recurso a eletricidade localizada em Moçambique. Estudo de alguns ciclos de refrigeração. Recuperado a 6, dezembro,2021.
- Ascensão P. (2016). O COMPETE 2020 alavancou 113 milhões de euros de investimento no setor agro-alimentar, o 2.º maior empregador em Portugal. Recuperado em 23 de maio, 2022 de https://www.compete2020.gov.pt/destaques/detalhe/Setor_agroalimentar_COMPETE2020.
- Boa, J. (2012). Análise Energética de equipamentos de uma fábrica de laticínios. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Eletromecânica. Universidade da Beira Interior.

- Business Council for Sustainable Development. (2021). O que é a Sustentabilidade?. Recuperado em 22 de dezembro de 2021, de <https://bcsdportugal.org/sustentabilidade/>.
- Melo, C. (2011). Uso de Fluidos Alternativos em Sistemas de Refrigeração e Ar Condicionado: Artigos Técnicos,” Uso de Refrigerantes Alternativos em Refrigeração Doméstica e em Equipamentos Compactos de Refrigeração Comercial.
- Cardoso, B.J., Lamas, F.B., Gaspar, A.R. Ribeiro, J.B. (2017). Refrigerants used in the Portuguese food industry: Current status. *International Journal of Refrigeration*, 83, 60 -74.
- CE (2015). EU legislation to control F-gases. F-gas regulation from 2015. Recuperado em 24 de junho de 2022 de https://ec.europa.eu/clima/eu-action/fluorinated-greenhouse-gases/eu-legislation-control-f-gases_pt?etrans=pt.
- CE (2022). Pacto Ecológico: Eliminação progressiva dos gases fluorados com efeito de estufa e das substâncias destruidoras do ozono. Recuperado em 24 de junho de 2022 de https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pt/IP_22_2189.
- Costa, R. (2012). Utilização De Metodologias Multicritério De Apoio À Decisão Como Ferramenta De Suporte Numa Empresa De Serviços Energéticos. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Covas, F. (2021). Métodos de Investigação. Apontamentos da Unidade Curricular de Metodologias de Investigação em Engenharia e Gestão Industrial. Universidade da Beira Interior, Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial, Covilhã, Portugal.
- Santos, E. (2010). Portugal’s Kyoto Monitoring & compliance web-based system. Cumprir Quioto.pt. Climate Change Commission.
- Bandarra, D. E. P. (2011), Uso de Fluidos Alternativos em Sistemas de Refrigeração e Ar Condicionado: Artigos Técnicos. Tendências do Uso de Fluidos Refrigerantes Alternativos em Sistema de Ar Condicionado Automotivo.
- Danfoss (2021). Refrigerantes para diminuir o potencial de aquecimento global. Recuperado em 1 de Fevereiro de 2022, de <https://www.danfoss.com/pt-br/about-danfoss/our-businesses/cooling/refrigerants-and-energy-efficiency/refrigerants-for-lowering-the-gwp/>.
- Diana, J. (2020). Pesquisa descritiva, exploratória e explicativa. Qual a diferença entre pesquisa descritiva, exploratória e explicativa? Recuperado em 23 de fevereiro de 2022 de <https://www.diferenca.com/pesquisa-descritiva-exploratoria-e-explicativa/>.
- Singh, K. K., Kumar, R., Singh, A. (2021). Thermo-economic optimization of environment-friendly refrigerants for cascade refrigeration. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 46, 12235–12252.

Duarte, V. (2013). Estudo da bomba de calor – Fluidos de trabalho e eficiência energética. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Eletromecânica. Universidade da Beira Interior.

EEA (2020). Fluorinated greenhouse gases 2020 — Data reported by companies on the production, import and export of fluorinated greenhouse gases in the European Union, 2007-2019, Confidential Report, European Environment Agency.

EEA (2021). Fluorinated greenhouse gases 2021 — Confidential dataset: Compilation and analysis of data reported by companies on the production, import, export, destruction and feedstock use of fluorinated greenhouse gases in the European Union, European Environment Agency.

Ferraz, M. (2008). Avaliação do desempenho dos sistemas de refrigeração nas indústrias agroalimentares da Beira Interior. Tese de Doutoramento. Recuperado a 6, dezembro, 2021.

Ferreira, J. (2009). Modelagem e Simulação do Regime Térmico-Operativo em Transformadores de Potência- Sistema de Apoio à Decisão. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

Ferreira, N. (2016). Estudo Comparativo entre os Coeficientes de Performance dos Ciclos Frigoríficos Convencional de Cascata Amônia/Amônia do Processo de Liofilização de Café. Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso superior de Engenharia Mecânica do Departamento Académico da Mecânica para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil.

Fogaça, J. (2021). Destruição da Camada do Ozônio. Disponível em <https://www.manualdaquimica.com/quimica-ambiental/destruicao-camada-ozonio.htm>.

Fortulan, M.R. (2005). Uma proposta de aplicação de Business Intelligence no chão-de-fábrica. Gestão & Produção, v.12, n.1, p55-66.

Fonseca, M. (2017). Transformação de Variáveis Qualitativas em Quantitativas; Um Estudo de Caso. Dissertação para a obtenção do grau de Químico com atribuições Tecnológicas. Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

Gas Natural Fenosa (2014). Gas Natural Fenosa 2014 Annual Report. Consolidated Annual Reports.

Gaspar, P. & Aguiar, L. (2020). Refrigerantes Naturais: Tendências do Mercado, políticas e tecnologias na indústria agroalimentar portuguesa. X Congresso Ibérico- VIII Congresso Iberoamericano de las Ciencias y Técnicas del Frío Pamplona, Spain.

GASSERVEI (2022). Refrigerantes. Recuperado 2m 25 de junho de 2022 de <https://gas-servei.com/pt-pt/produtos/refrigerantes/>.

Gea (2020). Compressores. Recuperado em 15 de novembro de 2020 de <https://www.gea.com/pt/products/compressors/index.jsp>.

Getu, H. & Bansal, P. (2008). Thermodynamic analysis of an R744-R717 cascade refrigeration system. Department of Mechanical Engineering, The University of Auckland, Private Bag 92019, Auckland, New Zealand.

Grings, E. (2014). Desenvolvimento de um sistema de refrigeração para um equipamento automático de bebidas quentes. Faculdade Horizontina. Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica. Faculdade Horizontina.

Gupta, A, Anand Y., Tyagi S.K. & Anand S. (2016). Economic and thermodynamic study of different cooling options: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62, 164-194. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.035>.

Harby, K. (2017). Hydrocarbons and their mixtures as alternatives to environmental unfriendly halogenated refrigerants: An updated overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 73, 1247-1264. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.039>.

INTARCON. (2021). F-gas or the prohibition of fluorinated gases. Recuperado em 16 de março de 2021, de <https://www.intarcon.com/en/f-gas/>.

Dias, J. A. Q. (2012). Concepção de Instalações Frigoríficas em Expansão Directa versus Sistemas Inundados. Análise Energética das Soluções. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Linde (2022). Produtos e Fornecimento - Gases Refrigerantes. Recuperado em 3 de fevereiro de 2022 de https://www.linde-gas.pt/pt/products_and_supply/refrigerants/index.html.

Lopes, P. (2019). Válvulas de Expansão: Comparação da aplicação de válvulas de expansão eletrônica e termostática em sistemas frigoríficos. Centro Universitário do Sul de Minas. Engenharia Mecânica.

Pirani, M. J. (2013). Refrigeração e Ar Condicionado. Universidade Federal da Bahia. Departamento de Engenharia Mecânica.

Silva, M. N. (2005). Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial. Ministério de Minas e Energia. Trabalho elaborado no âmbito do contrato realizado entre a ELETROBRÁS/PROCEL e o consórcio EFFICIENTIA/FUPAI.

Soares, M &. LUSA (2013). Emissão de gases com efeito de estufa caiu 1,2% em 2011. Público. Poluição.

Martin, T. (2022). A look at alternative refrigerants to R-134a. New EPA regulations require 2021 MY and later vehicles to use a refrigerant other than R134a. Recuperado em 30 de junho

de 2022 de <https://www.vehicleservicepros.com/service-repair/diagnostics-and-drivability/article/21195430/a-look-at-alternative-refrigerants-to-r134a>.

Massucheto, L. (2018). Análise do Desempenho Termodinâmico de Sistemas de Refrigeração em Cascata Utilizando Misturas de Refrigerantes contendo CO₂. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas.

Ministério do Meio Ambiente. (2011). Uso de Fluidos Alternativos em Sistemas de Refrigeração e Ar Condicionado. Artigos Técnicos.

Mesquita, N. (2009). Redução do consumo energético de um equipamento de frio. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

NEULAENDER (2007). Características do Dióxido de Carbono (CO₂/R744). Ambiente Gelado. Artigos Técnicos. Recuperado em 28 de junho de 2021 de www.ambientegegado.com.br/artigos-tecnicos/fluidos-refrigerantes/tipos-defluidos/470-caracteristicas-do-dioxido-de-carbono-co2-r744.

Norman, J. (2022). Rowland & Molina Suggest that CFCs Deplete the Ozone Layer. Recuperado em 5 de março, 2022 de <https://www.historyofinformation.com/detail.php?id=2721>.

Nunes, J., Neves, D., Gaspar, P.D., Silva, P.D., Andrade, L.P., 2014. Predictive tool of energy performance of cold storage in agrifood industries: The Portuguese case study. Energy Conversion Management, 88, 758–767. doi:10.1016/j.enconman.2014.09.018.

Oliveira, P. (2012). Fundamentos de Termodinâmica Aplicada. Análise Energética e Exergética. (pp.163-181).

Passos, J. (2003). Carnot e a Segunda Lei da Termodinâmica. Unidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Mecânica.

Pavkovic, B. (2013). Refrigerants – Part 2: Past, present and future perspectives of refrigerants in air-conditioning applications. The REHVA European HVAC Journal, 50(6), 28 –33.

Paul, S., Sarkar, A., & Mandal, B. K. (2013). Environmental Impacts of Halogenated Refrigerants and Their Alternatives: Recent Developments. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 3(3), 400-409.

Perestrelo, J. (2017). Projeto e dimensionamento de equipamento frigorífico para túneis de congelação. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica.

PHC Software. (2017). Business at Speed. Que indicadores medem a sustentabilidade da sua empresa? Recuperado em 22 de dezembro de 2021, de <https://phcsoftware.com/business-at-speed/indicadores-de-sustentabilidade-empresa/>.

Pina, M. (2021). Sistema de apoio à decisão na precificação dinâmica de produtos hortícolas em função do decaimento da qualidade microbiológica. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial. Universidade da Beira Interior.

Proklima GT (2010). Guidelines for the safe use of hydrocarbon refrigerants. A handbook for engineers, technicians, trainers and policy-makers – for a climate-friendly cooling. GIZ Proklima, Federal Ministry for Economic Cooperation and Development, Eschborn.

Garcia, R. (2014). Portugal já cumpriu o Protocolo de Quioto. Público. Ambiente.

Dossa, R. J. (1997). Principles of Refrigeration. Prentice-Hall, Fourth Edition.

Ramos, A. (2016). Área Departamental de Engenharia Mecânica A Investigação e a Inovação na Fabricação de Equipamentos de Frio Industrial em Portugal. Tese de Mestrado.

Ramos, M. (2013). A Diminuição da Espessura da Camada de Ozono. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ensino de Física e Química no 3º ciclo do Ensino Básico e no Ensino Secundário. Universidade da Beira Interior.

Dufrio R. (2021). Fluido Gás Refrigerante: saiba como escolher a melhor opção. Dufrio Refrigeração, 29/07/2021. Recuperado em 30 de junho, 2022 de <https://www.dufrio.com.br/blog/ar-condicionado/fluido-gas-refrigerante-saiba-como-escolher-a-melhor-opcao/>.

Rocha, R. (2022). Análise de Desempenho Termodinâmico de Ciclos de Refrigeração Cascata para Temperaturas Ultrabaixas. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rosa D. (2022). Instruções if...else em C explicadas. Recuperado em 12 de agosto de 2022 de <https://www.freecodecamp.org/portuguese/news/instrucoes-if-else-em-c-explicadas/>

Roy, R. & Mandal, B. (2020). Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of vapour cascade refrigeration system using different refrigerant combinations: A comparative study. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 139(5). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08710-x>.

Saldanha, P. (2019). Dimensionamento de um circuito frigorífico a CO₂ com evaporadores inundados. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia Universidade do porto.

Silva, A. (2012). Aplicação da Amônia na Refrigeração Industrial: Inovações Tecnológicas. Recuperado em 13 de maio de 2022 de <https://livrozilla.com/doc/462769/am%C3%B4nia--r717->

SIRLOONGGROUP (2018). Ethane R170 é um refrigerante comumente usado na indústria. Recuperado em 27 de junho de 2022 de <http://m.pt.sirloonggroup.com/news/ethane-r170-is-a-commonly-used-refrigerant-in-21678186.html>.

- Tazzetti (2022). Fluidos Refrigerantes. R422A. Recuperado em 5 de setembro de 2022 de <https://www.tazzetti.com/pt-pt/products-and-services/fluidos-refrigerantes/R422A>
- Turban, E., Aronson, J., & Liang, T.P. (2007). Decision support systems and intelligent systems. Prentice -Hall Of India Pvt. Limited, 2005, 7th Edition.
- UE (2006). Regulamento (CE) N.º 842/2006 do Parlamento Europeu e do Conselho relativo a determinados gases fluorados com efeito de estufa. M. Guerra, “Apontamentos de Produção de Frio e Refrigeração,” ISEL, 2014.
- UE (2009). Regulamento (CE) N.º 1005/2009 do Parlamento Europeu e do Conselho relativo às substâncias que empobrecem a camada de ozono.
- UE (2014). Regulamento (EU) N.º 517/2014 do Parlamento Europeu e do Conselho relativo aos gases fluorados com efeito de estufa e que revoga o Regulamento (CE) n.º 842/2006 .
- UNEP (2003). Handbook for the International Treaties for the Protection of the Ozone Layer. Ozone Secretariat United Nations Environment Programme. Sixth Edition. Disponível em <http://www.unep.org/ozonoe>.
- Verde, M., Harby, K., de Boer, R., Corberán J.M. (2016). Performance evaluation of a waste-heat driven adsorption system for automotive air-conditioning: part I modeling and experimental validation. Energy, 116, 526–38.
- Stoecker, W. F. (1998). Industrial Refrigeration as Distinguished from Comfort Air Conditioning. Industrial Refrigeration. Chapter 1, p1-11.
- YUEON (2022). Gás refrigerante R1270 CAS 115-07-1. Recuperado em 30 de junho de 2022 de <http://m.pt.sdya-chem.com/hydrocarbon-refrigerant/propylene-r1270/refrigerant-gas-r1270-cas-115-07-1.html>.
- Zhang, T., Mohamed, S. (2015). Conceptual design and analysis of hydrocarbon-based solar Thermal power and ejector cooling systems in hot climates. Journal of Solar Energy Engineering, 137(2), 021001-1- 021001-9. Disponível em <https://doi.org/10.1115/1.4028365>.