



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Tiago André Dias Martins

Estudo da substituição do
fluido frigorígeno R404a pelo R290

Tiago André Dias Martins
Estudo da substituição do
fluido frigorígeno R404a pelo R290

UMinho | 2014

dezembro de 2014



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Tiago André Dias Martins

Estudo da substituição do
fluido frigorígeno R404a pelo R290

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Pedro Lobarinhas

dezembro de 2014

DECLARAÇÃO

Tiago André Dias Martins

Endereço electrónico: a58822@alunos.uminho.pt / tiago-a-martins@hotmail.com

Telefone: 962561451

Número do Bilhete de Identidade: 13926681

Título dissertação /tese

Estudo da substituição do fluido frigorigénio R404a pelo R290

Orientador:

Pedro Lobarinhas

Ano de conclusão: 2014

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Nos exemplares das teses de doutoramento ou de mestrado ou de outros trabalhos entregues para prestação de provas públicas nas universidades ou outros estabelecimentos de ensino, e dos quais é obrigatoriamente enviado um exemplar para depósito legal na Biblioteca Nacional e, pelo menos outro para a biblioteca da universidade respectiva, deve constar uma das seguintes declarações:

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, 19/12/2014

Assinatura: _____

Agradecimentos

Neste momento, em que se fecha um ciclo, queria agradecer o apoio a toda as pessoas que me ajudaram, à minha família, em especial aos meus pais que fizeram com que tudo isto fosse possível. Também um especial agradecimento à minha namorada, Ana, que sempre me deu o apoio e motivação necessários nos momentos mais difíceis, bem como aos meus irmãos e familiares que contribuíram para o meu sucesso.

Uma palavra de apreço também aos docentes do Departamento de Engenharia Mecânica que com o seu conhecimento e disponibilidade me ajudaram ao longo destes 5 anos, em especial agora ao meu orientador, o Professor Pedro Lobarinhas, por toda a disponibilidade e ajuda prestados na elaboração da dissertação.

Não podia também deixar de agradecer aos meus amigos e colegas de curso por toda a ajuda durante a nossa formação académica.

Resumo

Numa sociedade cada vez mais alertada para os problemas ambientais e com as organizações ecologistas a desenvolver grande pressão sobre as entidades governamentais, é com naturalidade que se assiste a uma legislação, cada vez mais, apertada sob substâncias que afectam negativamente o meio ambiente. Problemáticas como a destruição da camada de ozono e aquecimento global são hoje temas sobejamente conhecidos pelo grande público e o alerta para a sua contenção é geral.

Imprescindível para os padrões de vida de populações desenvolvidas, os sistemas de frio vieram alterar o mundo e a forma como o ser humano vive, permitindo um insubestimável aumento da qualidade de vida, e esperança média de vida, sendo hoje possível a conservação e transporte de bens sensíveis ao longo de todo o planeta.

Os referidos sistemas de frio, como por exemplo, os frigoríficos, têm no entanto, no interior das suas tubagens um fluido frigorígeno imprescindível ao seu funcionamento, sendo este, com as suas mudanças de fase, responsável pelas transferências de calor entre o espaço a refrigerar e o meio exterior. Este fluido de trabalho é um dos aspectos mais sensíveis e problemáticos do equipamento devido às propriedades requeridas, sendo que antigamente era pensado que a descoberta dos CFC's tinha permitido encontrar o fluido ideal. O que hoje é sabido não ser verdade, devido à sua acção destruidora da camada de ozono. Actualmente, a ocupar uma considerável fatia do mercado temos os seus substitutos, os HFC's, como o R404a, que solucionaram o problema da defesa da camada de ozono, contudo, têm geralmente um elevado contributo para outra problemática que está muito em voga, o aquecimento global. Isto leva a que o cerco legislativo à sua volta se aperte, sendo necessário encontrar alternativas viáveis.

É neste campo das alternativas que surge o R290, propano puro, sem efeito nocivo na camada de ozono e desprezável contributo para o aquecimento global. Este hidrocarboneto natural, devido às suas propriedades termodinâmicas favoráveis, está hoje a tomar novamente a sua posição, ele que praticamente desapareceu quando surgiram os CFC's, voltou do passado para ser uma alternativa de futuro.

Abstract

In a society increasingly alerted to environmental problems and with environmental organizations developing a great pressure on government entities, it is natural that we are witnessing one, increasingly tight legislation on substances that adversely affect the environment. Problems such as the destruction of the ozone layer and global warming are issues today well known by the general public and the alert for its restraint is general.

Indispensable to the living standards of developed populations, cooler systems have changed the world and how humans live, allowing a great increase in quality of life and life expectancy, and is now possible to preserve and transport sensitive goods over the entire planet.

These cooler systems have however, within their pipes a refrigerant fluid essential to its operation, and it is, with its phase changes, responsible for the heat transfer between the cooling space and the outside environment. This working fluid is one of the most sensitive and problematic aspects of the equipment due to the required properties, and was formerly thought that the discovery of CFCs had allowed finding the ideal fluid, which today is known not to be true due to its ozone depletion potential. Currently occupying a considerable share of the market are their replacements, HFC's, like R404a, which solved the problem of the ozone depletion potential, however, usually they have a high contribution to another issue that is very much in vogue, global warming . This leads to the legislative siege tighten around him, viable alternatives are needed.

In this field of alternatives appears the R290, pure propane, without damaging the ozone layer and without contribution to the global warming. This natural hydrocarbon due to its favorable thermodynamic properties is now taking its position again, it virtually disappeared when CFCs took the market but now they are back from the past to be a future alternative.

Índice de Conteúdos

Agradecimentos	i
Resumo.....	ii
Abstract	iii
Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas.....	viii
Nomenclatura.....	ix
1. Introdução.....	1
1.1 Motivação e enquadramento.....	1
1.2 Objectivos.....	2
2. A história da refrigeração.....	3
2.1 A necessidade de um espaço refrigerado	4
2.2 A refrigeração artificial.....	4
2.3 Refrigeração doméstica.....	5
2.4 Princípio de funcionamento.....	7
3. Sistemas de refrigeração.....	10
3.1 Compressão mecânica de vapor	11
4. Componentes de um sistema de frio	16
4.1 Compressor	16
4.1.1 Tipos de compressor	16
4.1.2 Lubrificação do compressor	20
4.2 Condensador	21
4.2.1 Tipos de condensador	22
4.2.2 Taxa de Rejeição de Calor	22
4.3 Evaporador	24
4.3.1 Tipos de evaporador.....	25
4.4 Dispositivo de expansão.....	26
4.4.1 Tubo capilar.....	26
4.4.2 Válvula de expansão.....	28
4.5 Acessórios auxiliares	30
4.5.1 Filtro e secador.....	30
4.5.2 Separador de óleo	31

4.5.3	Visores de líquido	31
4.5.4	Isolamento térmico	32
5.	Aplicações da refrigeração	34
5.1	Aplicação da refrigeração na conservação alimentar	35
5.2	Aplicações da refrigeração na indústria química e de processamento	37
5.3	Aplicações especiais da refrigeração.....	39
6.	Espaços refrigerados	41
6.1	Armários de serviço.....	41
6.2	Armários de explosão.....	43
6.3	Unidades de condensação remotas	44
6.4	Câmaras frigoríficas.....	45
7.	Classificação energética e testes de performance	47
8.	Fluido refrigerante	50
8.1	Era pré CFC's.....	51
8.2	Os CFC's e HCFC's sintéticos.....	53
8.3	O pós CFC's.....	55
8.4	Critérios na escolha de um fluido refrigerante	56
8.4.1	Propriedades termodinâmicas e termofísicas.....	56
8.4.2	Propriedades ambientais e de segurança	58
8.4.3	Custos	60
8.5	Grupos de segurança.....	60
8.6	Regulamentação legislativa.....	61
8.6.1	Limitação de utilização	61
8.6.2	Deteção de fugas	63
9.	Estudo comparativo de dois fluidos refrigerantes.....	66
9.1	R404a.....	66
9.2	R290.....	68
9.3	Análise comparativa	72
10.	Conclusões.....	78
10.1	Trabalhos futuros	80
11	Referências bibliográficas	81
11.1	Referência de imagens	83
Anexos	84
Anexo 1 – Diagrama Mollier R404a.....		85

Anexo 2 – Diagrama Mollier R290..... 86

Índice de Figuras

Figura 1 – Máquina frigorífica “ <i>Monitor-Top</i> ”	6
Figura 2 – Transferência de calor de fonte quente para fonte fria	7
Figura 3 – Representação termodinâmica de uma máquina frigorífica	8
Figura 4 – Sistema de refrigeração de compressão mecânica de vapor.....	12
Figura 5 – Sistema de refrigeração de compressão mecânica de vapor.....	13
Figura 6 – Diferentes tipos de um compressor de pistão.....	18
Figura 7 – Compressor de parafuso duplo.....	19
Figura 8 – Compressor de alhetas rotativas.....	20
Figura 9 – Variação da Taxa de Rejeição de Calor com as temperaturas do evaporador [T _e] e condensador [T _c].....	23
Figura 10 – Esquema do funcionamento de um evaporador.....	24
Figura 11 – Tubo capilar em cobre	27
Figura 12 – Esquema de uma válvula termostática	29
Figura 13 – Filtro secador para aplicação em equipamento frigorífico	30
Figura 14 – Separador de óleo lubrificante	31
Figura 15 – Visor de líquido.....	32
Figura 16 – Campos de aplicação da refrigeração e ar condicionado	34
Figura 17 – Túnel de congelamento.....	36
Figura 18 – Ringue de gelo artificial, construído para o “The Big Chill at the Big House”	40
Figura 19 – Classificação armários de serviço.....	42
Figura 20 – Classificação dos armários de explosão.....	43
Figura 21 – Classificação das unidades remotas de condensação	44
Figura 22 – Classificação das câmaras frigoríficas	45
Figura 23 – Etiqueta de classificação energética na Austrália	47
Figura 24 – Nova etiqueta de classificação energética europeia.....	48

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Variação das propriedades para diferentes pressões e temperaturas	12
Tabela 2 – Efeito da temperatura na vida útil de armazenamento de produtos alimentares.....	35
Tabela 3 – Condições de armazenamento recomendadas para frutos e vegetais	37
Tabela 4 – Vendas e stock de armários de serviço na União Europeia.....	43
Tabela 5 – Vendas e stock de armários de explosão na UE	44
Tabela 6 – Vendas e stock de unidades remotas de condensação na UE	45
Tabela 7 – Vendas e stock de câmaras frigoríficas na UE.....	46
Tabela 8 – Critério da classificação energética	49
Tabela 9 – Datas marcantes na regulamentação dos frigorígenos	63
Tabela 10 – Comparação entre R404a e R290	72
Tabela 11 – Pressões de trabalho a diferentes temperaturas	73
Tabela 12 – Performance comparativa de diferentes frigorígenos.....	74
Tabela 13 – Comparação de preços.....	74
Tabela 14 – Situações de estudo	75
Tabela 15 – Resultados do estudo comparativo	76

Nomenclatura

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Área de secção	m ²
EER	Relação de eficiência energética	-
h	Entalpia específica	kJ/kg
\dot{m}	Caudal mássico	kg/s
p	Pressão	Pa
Q	Calor	J
\dot{Q}_e	Potência calorífica permutada no evaporador	W
\dot{Q}_c	Potência calorífica permutada no condensador	W
rpm	Rotações por minuto	min ⁻¹
s	Entropia específica	kJ/kg.K
T	Temperatura	°C
T _i	Temperatura da fonte fria	°C
T _e	Temperatura da fonte quente	°C
TR	Tonelada de Refrigeração	W
TRC	Taxa de Rejeição de Calor	-
U	Coefficiente global de transferência de calor	W/(m ² .°C)
v	Velocidade	m/s
V	Volume	m ³
W _c	Trabalho fornecido pelo compressor	J
ρ	Massa volúmica	kg/m ³

1. Introdução

1.1 Motivação e enquadramento

Actualmente, é inconcebível o estilo, e qualidade, de vida do ser humano sem equipamentos de refrigeração. Desde os túneis de congelamento instalados em fábricas alimentares ao longo de todo o mundo, passando pelos transportes refrigerados, e pelo ar condicionado que nos permite habitar qualquer parte do globo com conforto, até ao frigorífico doméstico e pequenas arcas congeladoras que permitem a conservação de bens alimentares, com segurança e qualidade, por largos períodos de tempo.

Contudo, tudo isto, requereu grandes períodos temporais de inovação, permitindo agora ao ser humano possuir tecnologia de ponta. Tendo o ser humano já disponível o conhecimento para garantir a refrigeração de espaços, o grande objectivo actualmente é fazê-lo sem lesar o meio ambiente, e com maior eficiência, um conceito cada vez mais em voga. Se já no início do século passado era possível a refrigeração, em nada se podem comparar os sistemas dessa altura passada com os actuais, muito menos poluentes e mais eficientes, permitindo uma poupança de recursos energéticos, e económicos.

Ao falar de refrigeração, não é possível não mencionar os CFC's, estes, outrora, conhecidos por "refrigerante ideal", foi um dos responsáveis pela emancipação dos equipamentos frigoríficos e posteriormente um dos grandes alvos quando as preocupações ambientais se começaram a instalar, devido ao seu potencial de destruição da camada de ozono, o que levou à sua abolição. Após isto, muito tem mudado, mas as preocupações ambientais são cada vez mais um assunto presente no quotidiano, ainda para mais quando o mundo se começa a aperceber que o que parecia uma teoria sensacionalista é de facto uma realidade. Hoje, na mira das legislações governamentais, que visam controlar o problema do aquecimento global, está tudo aquilo que contribui para a mencionada problemática, e aqui inserem-se vários fluidos refrigerantes, como o R404a, um dos mais utilizados refrigerantes.

Obviamente, face a isto, é necessária uma alternativa que consiga ir de encontro daquilo que hoje, e no futuro, é esperado de um bom fluido refrigerante. Não ter impacto negativo no ambiente, apresentar propriedades termodinâmicas, químicas, de segurança e económicas que façam dele o futuro. Neste campo, surge o R290, já com uma larga história na indústria da

refrigeração, voltou recentemente ao mercado e tem reconquistado o seu espaço, sendo uma aposta de futuro face à legislação cada vez mais exigente que retira a sua concorrência do mercado.

1.2 Objectivos

O principal objectivo deste projecto, é a caracterização de equipamentos frigoríficos, com todos os seus componentes, com especial ênfase no fluido frigorígeno, o vulgo refrigerante. Este fluido de trabalho é o grande responsável pelas permutas de calor que permitem obter um espaço fechado refrigerado e é um dos elementos mais críticos de todo o sistema frigorífico, levando a diferentes necessidades de todos os componentes, desde o compressor, e as suas pressões de trabalho, até ao óleo lubrificante.

Os dois frigorígenos que serão aqui abordados são o R404a, um hidrofluorcarboneto (HFC) que actualmente é muito utilizado na indústria da refrigeração, mas que devido à nova legislação, como o Regulamento (UE) N°517/2014, que surgiu pós Protocolo de Montreal, cada vez mais protectora do ambiente, irá também ser retirado do mercado, em certos casos, impedidos de entrar em circulação equipamentos novos, já a partir de 1 de Janeiro de 2015. O outro fluido frigorígeno que é abordado, é uma alternativa natural ao R404a, propano puro, com a designação alfa numérica R290. Com excelentes propriedades termodinâmicas e indo de acordo ao actualmente pretendido dos fluidos frigorígenos, esta é uma alternativa de presente e futuro que visa aqui ser esmiuçada quanto ao seu verdadeiro potencial enquanto fluido frigorígeno seguro e eficiente.

2. A história da refrigeração

Ao longo da história da humanidade, sempre existiu a necessidade de conservar alimentos. Desde as primitivas salmouras, aos recentes armários frigoríficos existentes em aviões que transferem bens de locais longínquos num espaço de poucas horas, a exigência de manter em condições ideais de temperatura, humidade e pressão, os bens a transportar, quer sejam alimentos, ou outros bens, como flores, produzidos em muito poucos locais e apreciados em todo o mundo, é necessário transportar e armazenar. O ser humano, no dia-a-dia, toma contacto directo com inúmeras unidades refrigeradas, seja os frigoríficos e arcas congeladores que pontificam nos lares de praticamente toda a população, ou as enormes vitrinas frigoríficas com que se é deparado sempre que se entra num hipermercado.

Como facilmente é perceptível, da salmoura e do compartimento frigorífico primitivo, até às actuais arcas frigoríficas, estão implícitas grandes mudanças. Não apenas na capacidade dos mesmos, mas também em toda a parte mecânica escondida dos olhos do público. Desde os compressores aos evaporadores e condensadores, a tecnologia tem evoluído num sentido que permite cada vez melhores rendimentos. Mas para estes componentes do equipamento funcionarem interligados, existe algo fundamental, muitas vezes desconhecido do grande público. Os fluidos frigorígenos são o “sangue” de um equipamento frigorífico, e estes, à semelhança dos restantes componentes, tem sofrido também inúmeras alterações ao longo dos tempos, em especial nos últimos anos, pois durante finais da década de 1920, até aos anos 90, utilizou-se sobretudo fluidos de uma família de frigorígenos, que se pensavam serem ideais: os CFC's. Entretanto descobriram-se um conjunto de consequências nefastas para o ambiente associadas aos CFC's, o que levou a que um conjunto de países tenham imposto limitações à sua utilização.

Após o desaparecimento dos CFC's do mercado, as políticas ambientais, continuam a ser cada vez mais exigentes, tendo, actualmente, também os halogenados caído em desuso devido à sua proibição, e como solução surgem aqui os frigorígenos como o, comercialmente designado, R290, propano puro.

2.1 A necessidade de um espaço refrigerado

A utilização, por parte do homem, da refrigeração de espaços, representa um dos maiores avanços da humanidade na era moderna. Com impacto directo na qualidade de vida, e na esperança média da mesma, a refrigeração de espaços, permitiu ao ser humano controlar a temperatura de espaços fechados habitados, com recurso a sistemas de ar condicionado, bem como, conservar bens alimentares e outros, em espaços frigoríficos, que permitem a estes uma maior vida útil, com conservação das propriedades importantes, e com a acção de agentes de putrefacção inibida pelas baixas temperaturas.

As primeiras evidências da utilização de gelo, e neve, como forma de refrigerar alimentos, e vinho, remontam à civilização chinesa no ano 1000 a.C., sendo que também os Gregos e Romanos recorriam a gelo em espaços subterrâneos que cobriam com palha e outros materiais, de modo a conserva-lo durante mais tempo e ter assim um espaço refrigerado. Outro método artesanal engenhoso era utilizado na antiguidade pelo povo egípcio que recorria a jarras de barro poroso que eram arrefecidas pelo ar fresco da noite. A procura por um espaço refrigerado continuou e, nos séculos XVIII e XIX, o gelo começou a ser cortado de lagos, trazido de montanhas ou conservado desde o inverno em espaços, por natureza, mais frescos, e utilizado nos meses mais quentes. Um excelente exemplo disso, é o negócio criado por Frederic Tudor, que em 1806 cortava gelo do rio Hudson e de lagoas no Massachusetts e o exportava para vários países, como a distante Índia [1]. Para isto ser possível, o gelo era muitas vezes embalado com serrim e transportado para outras zonas onde era utilizado na preservação alimentar.

2.2 A refrigeração artificial

No século XVIII, foi pela primeira vez produzido gelo em laboratório, pela mão do professor escocês William Cullen. O princípio de funcionamento utilizado na sua génese, é aquele que ainda hoje se utiliza: a capacidade de líquidos absorverem grandes quantidades de calor e evaporarem. Neste seu trabalho, utilizando um recipiente fechado, Cullen colocava uma reduzida porção de água em contacto com éter, diminuindo depois a pressão, o que levava à formação de gelo [1]. Como agora é sobejamente conhecido, esta operação ocorre no evaporador. Para um ciclo de refrigeração funcionar em contínuo, teria de existir, após a vaporização, uma condensação, passando então o fluido frigorígeno do estado gasoso para o estado líquido novamente. Este processo, requer a rejeição de calor para o ambiente. Nos anos

seguintes à apresentação do trabalho do professor escocês, foram muitos os cientistas que se dedicaram ao processo de condensação, como Van Marum e Van Troostwijk que em 1787 condensaram amoníaco. [2]

No entanto, foi preciso esperar até meados do século XIX pelo aparecimento das primeiras máquinas frigoríficas, com compressão mecânica. Em 1805, o norte-americano Oliver Evans foi o pioneiro na descrição de um ciclo de refrigeração a operar utilizando éter como refrigerante. A sua ideia veio inspirar outros e em resultado de trabalho dos Escoceses Jacob Perkins e, posteriormente, James Harrison, surgiram as primeiras máquinas de compressão de vapor, com os elementos hoje utilizados: um compressor, um condensador, um evaporador e uma válvula entre os dois elementos onde se transfere o calor. [2]

Uma das grandes problemáticas destes sistemas eram os fluidos refrigerantes utilizados que eram muito pouco adequados, como por exemplo, o éter e a água. A grande procura que estas criações iam tendo, levou a que muitos outros se dedicassem ao seu desenvolvimento e começaram a surgir novas substâncias a circular como refrigerante, como o dióxido de carbono e o amoníaco, após Faraday mostrar a possibilidade de condensação deste. [2]

Já no século XX, depois de Edison “iluminar” o mundo em 1879, surgiu o primeiro refrigerador a funcionar a eletricidade. Daí em diante, não mais parou a evolução, e a emancipação, dos equipamentos de frio que hoje estão por todo o mundo, nas mais diversas formas e feitios, adequando-se às necessidades dos diversos utilizadores, sejam eles domésticos ou industriais.[2]

2.3 Refrigeração doméstica

Hoje em dia, a refrigeração doméstica existe em todas as casas, estando largamente difundida entre a população frigoríficos, que são praticamente um bem essencial, e arcas congeladoras de dimensões reduzidas. Contudo, nem sempre foi assim, tendo a refrigeração doméstica início nos primórdios do século XIX, com a caixa de gelo, que consistia numa simples caixa de madeira com um isolamento adequado, na qual era colocado gelo na parte superior, existindo assim na parte inferior temperaturas mais baixas, devido à corrente de convecção que era originada pela temperatura do gelo, que se encontrava no topo. Como é notado, esta forma de refrigeração trazia vários inconvenientes pois o utilizador tinha de substituir o gelo

frequentemente, o que poderia ser complicado devido à sua escassez quando os Invernos eram mais quentes, além da óbvia limitação da temperatura que não podia ser inferior à do gelo.

No final do século XIX, começaram a surgir então os primeiros refrigeradores domésticos mecânicos, contudo estes eram dispendiosos, não eram completamente automáticos nem fiáveis. Até ao início do século XX, os desenvolvimentos verificados nos pequenos compressores, melhores refrigerantes, vedantes mais eficazes, e melhorias no sistema elétrico, permitiram à *General Electric Company* (GE) a introdução do primeiro refrigerador doméstico produzido em série. Isto permitiu que em 1925, 14 anos após o lançamento do refrigerador da GE, existissem já 25 milhões de refrigeradores domésticos nos Estados Unidos. Este crescimento exponencial de vendas permitiu uma queda abrupta de preços, de 600 \$US em 1920, para 155 \$US em 1940, o que foi crucial para a sua proliferação pela população. Inicialmente, os compressores eram do tipo aberto, impulsionados por correntes, mas isso viria a mudar em 1926, com a GE mais uma vez a mexer no mercado e a introduzir o primeiro refrigerador com um compressor hermético, sendo que este tipo de compressor conquistou o mercado num curto espaço de tempo. Em 1927, também pela mão da GE, foi introduzido no mercado o *Monitor-Top*, apresentado na Figura 1. [2]

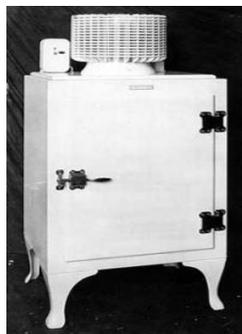


Figura 1 – Máquina frigorífica “Monitor-Top”

Nos anos 30 do século XX, na Europa, os refrigeradores eram ainda um luxo de que só as famílias mais ricas disponham, mas começaram também aqui a conhecer desenvolvimentos quando a sueca *Electrolux Company*, em 1931 lançou o primeiro refrigerador a funcionar no princípio de absorção. Apenas 8 anos depois, chegava ao mercado o primeiro refrigerador a duas temperaturas, aquele que hoje em dia é mais utilizado, o famoso refrigerador-congelador, com duas câmaras refrigeradas a temperaturas diferentes. Após a 2ª Guerra Mundial os refrigeradores conquistaram em definitivo o seu espaço nas habitações, um pouco por todo o mundo.[2]

2.4 Princípio de funcionamento

Antes de se proceder a um estudo sobre os actuais sistemas de frio, é necessário entender os conceitos que estão por trás dos actuais sistemas de refrigeração, pelo que para se chegar ao conceito de refrigeração, é antes de mais importante entender o conceito de transferência de energia, neste caso, transferência de calor. Na natureza, a transferência de calor ocorre no seu sentido lógico, isto é, o calor é transferido de uma fonte quente para uma fonte fria até ambas estarem em equilíbrio térmico, como o ilustrado na Figura 2, onde um corpo, fonte, quente transfere calor para o ambiente circundante, até ficar em equilíbrio térmico com este, logicamente, tratando-se de um espaço fechado, a temperatura da pedra irá diminuir, enquanto que a temperatura do meio envolvente vai aumentar.

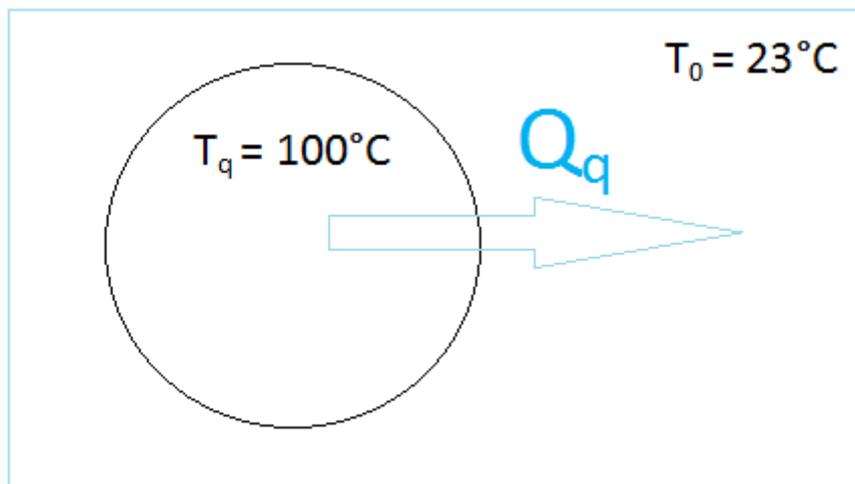


Figura 2 – Transferência de calor de fonte quente para fonte fria

Nesta situação de transferência de calor, temos o caso típico na natureza, onde o calor se transfere livremente entre um corpo quente e o meio ambiente. Contudo, com o avançar da tecnologia, o ser humano é agora também capaz de fazer com que a transferência de calor se dê no sentido contrário, isto é, de uma fonte fria para uma fonte quente, recorrendo para tal à aplicação de trabalho externo, como no caso da refrigeração.

Recorrendo a uma transferência de calor, de um corpo frio para um corpo quente, através da aplicação de trabalho externo, a máquina frigorífica consegue obter um espaço refrigerado, a uma temperatura inferior à temperatura ambiente. A representação esquemática de uma Máquina Frigorífica encontra-se na Figura 3.

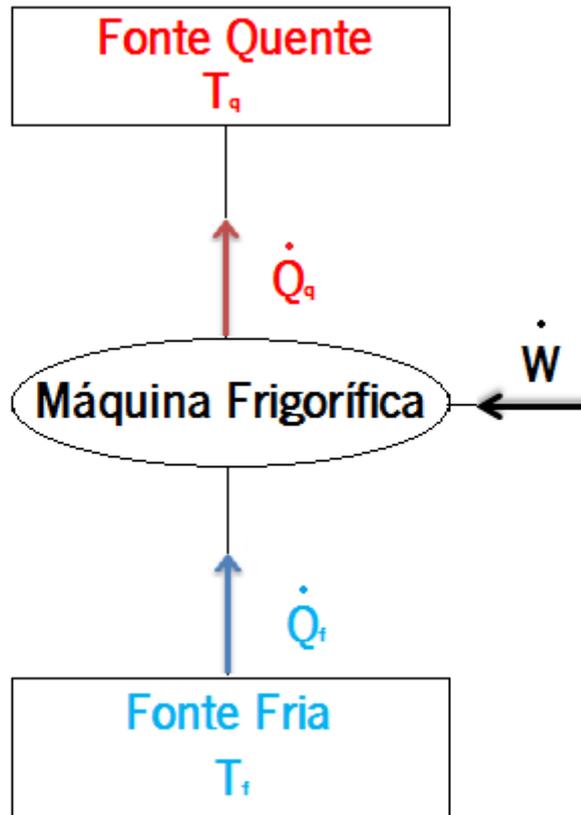


Figura 3 – Representação termodinâmica de uma máquina frigorífica

Como ilustrado na Figura 3, a Máquina Frigorífica, retira calor da Fonte Fria, que se encontra a uma temperatura T_f , rejeitando o mesmo para a Fonte Quente, que se encontra a uma temperatura, T_q , superior a T_f . Para que este processo seja possível, é necessário fornecer à Máquina Frigorífica trabalho, o que é conseguido através de um compressor mecânico.

Com um diversificado leque de aplicações, a máquina frigorífica originou uma revolução, permitindo a refrigeração de pequenos compartimentos para arrefecimento e conservação de bens alimentares, bem como a climatização de espaços, resultando numa melhoria da qualidade de vida para o ser humano. Para um sistema que funciona de acordo com um ciclo de compressão de vapor, é necessária a presença do fluido refrigerante. Durante o ciclo de trabalho, na fase líquida, será expandido num elemento expansor, sendo parcialmente transformado em vapor, baixando a sua pressão e temperatura, recebendo depois energia térmica da fonte fria, ao nível do evaporador, de onde sairá no estado de vapor saturado, ou sobreaquecido. Após isto, chega ao compressor, saindo a uma pressão mais elevada e a uma temperatura superior (obrigatoriamente superior à da fonte quente). Após a compressão o fluido segue para o condensador onde irá rejeitar calor para o ambiente, passando do estado de vapor

sobreaquecido a líquido saturado ou comprimido, antes de ser encaminhado de novo para o elemento expensor.

Dependendo do que é pretendido, este ciclo frigorífico permitirá ao utilizador a obtenção de frio positivo, isto é, temperaturas superiores a 0°C, ou frio negativo, onde a temperatura é inferior a 0°C.

3. Sistemas de refrigeração

Ao longo da história da refrigeração, os sistemas utilizados para a concepção do espaço refrigerado têm sido várias vezes alterados devido a factores como o surgimento de novos equipamentos e tecnologias. Contudo, o sistema mais utilizado continua a ser o de compressão mecânica de vapor, que por isso mesmo, será alvo de destaque neste capítulo, onde serão seguidamente abordados, de forma sucinta, outros métodos de refrigeração.

- Absorção de vapor

Apesar de não ser tão utilizado como o sistema de compressão mecânica de vapor, o sistema de absorção de vapor, assume-se como o segundo mais utilizado na indústria de frio. Surgiu em 1810 com John Leslie, quando o escocês utilizou ácido sulfúrico e água em dois jarros, com uma união. O funcionamento deste sistema consiste num fluido volátil, no referido caso água, cujo o vapor é absorvido por outro fluido, no caso, ácido sulfúrico, a baixa pressão e temperatura, sendo posteriormente destilado da solução a alta pressão. Hoje em dia é aplicado em frigoríficos domésticos e em sistemas de ar condicionado de médio e grande porte;

- Efeito termoelétrico

Neste sistema, uma corrente elétrica atravessa a junção de dois materiais diferentes, produzindo arrefecimento. Tipicamente, este método é utilizado em instrumentos de medida do ponto de orvalho do ar e ainda equipamentos electrónicos;

- Expansão de ar

Sendo utilizado no arrefecimento de aeronaves, este sistema recorre a ar a alta pressão, que expandido adiabaticamente realiza trabalho sobre um pistão, diminuindo desta forma a sua temperatura;

- Injecção de vapor

Também bastante especializado, este método é utilizado em sistemas de ar condicionado de navios, recorrendo a passagem de vapor a alta pressão através de um

difusor que provoca a evaporação da água existente num tanque, reduzindo desta forma a sua temperatura.

Apesar de muito menos utilizados, em especial os sistemas aplicados apenas em casos muito específicos como a expansão de ar e a ejeção de vapor, todos eles contribuem de forma merecedora de menção para a qualidade de vida do ser humano em todos os meios. Contudo, devido à sua maior preponderância no mercado, o sistema alvo de análise, será o sistema de compressão mecânica de vapor.

3.1 Compressão mecânica de vapor

Um sistema de refrigeração é um o conjunto de diversos componentes e equipamentos, ligados de forma a produzir o ciclo de refrigeração pretendido. O mais utilizado é o sistema de compressão mecânica de vapor, que mais não é do que o ciclo mais usualmente denominado de ciclo de refrigeração, onde um fluido refrigerante é responsável pela permuta de calor, evaporando a baixa pressão e condensado na pressão alta do ciclo. Este sistema tem um grande leque de aplicações. Desde os frigoríficos domésticos aos sistemas de refrigeração comercial, e até a aplicações de ar condicionado. Este sistema está representado de forma esquemática na Figura 4. O fluido refrigerante, no estado de vapor sobreaquecido, é comprimido mecanicamente entre os pontos 1 e 2, elevando a sua temperatura que irá dissipar no condensador, para a fonte quente. Seguidamente, com a perda de energia, no ponto 3 encontra-se no estado de líquido comprimido, que após passagem no elemento expensor vai baixar a temperatura e reduzir a pressão, atingindo o ponto 4 já como uma mistura de líquido e vapor. Após isto, a energia absorvida pelo fluido ao nível do evaporador vai promover a vaporização do refrigerante. Na Tabela 1 é apresentada uma relação da pressão e temperatura com outras propriedades importantes num fluido refrigerante, neste caso, o R290.

Tabela 1 – Variação das propriedades para diferentes pressões e temperaturas

P [bar]	T [°C]	h_{evap} [kJ/kg]	Volume específico vapor [m³/kg]	s_{vap} [kJ/kg.K]
0,7	-50	433,6	0,579	1,845
2,4	-20	400,5	0,182	1,772
4,7	0	374,5	0,097	1,745
8,4	20	343,9	0,055	1,728
13,69	40	306,5	0,033	1,715

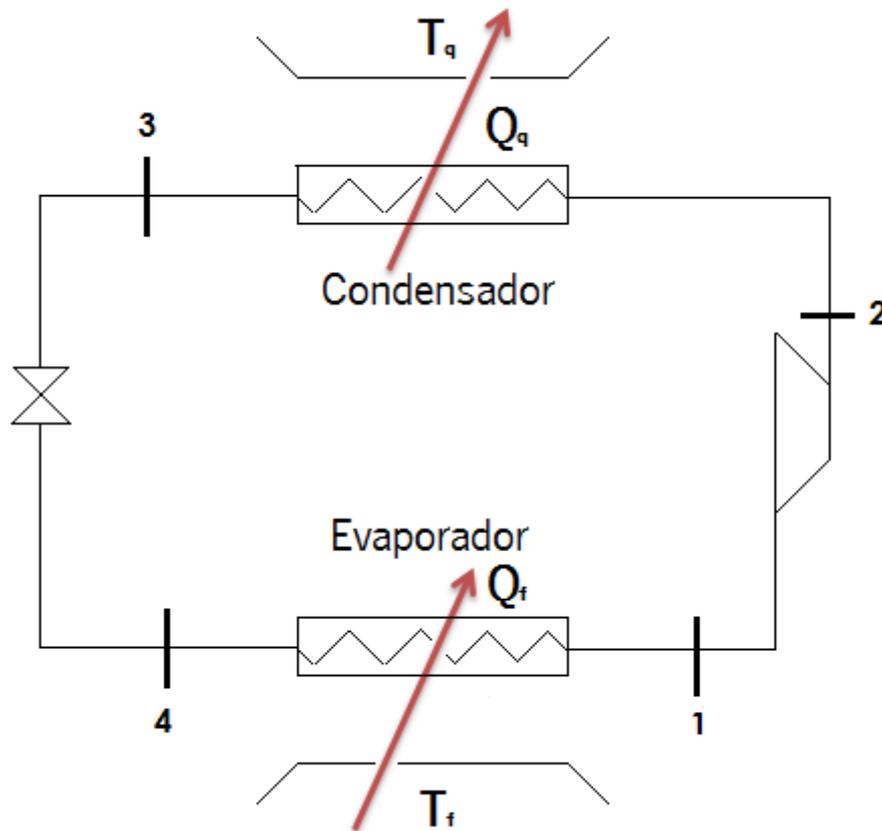


Figura 4 – Sistema de refrigeração de compressão mecânica de vapor

Por sua vez, e relacionado com o esquema do circuito da Figura 4, o gráfico da Figura 5, apresenta o ciclo de compressão mecânica de vapor, num genérico diagrama temperatura-entropia, onde podem ser observadas as variações de temperatura e pressão que o fluido refrigerante sofre ao longo do ciclo. De assinalar os dois níveis de pressão, P_A e P_B . A pressão alta

P_A verifica-se após a compressão e até ao elemento expensor. Após a passagem pelo elemento expensor e até à entrada no compressor, a pressão na linha é a pressão baixa, P_B .

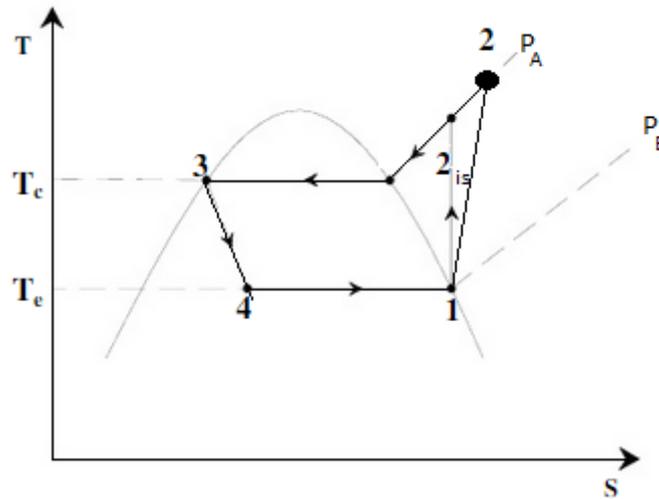


Figura 5 – Sistema de refrigeração de compressão mecânica de vapor

Um parâmetro relevante para a avaliação do desempenho de um sistema de refrigeração é o EER, do inglês “*Energy Efficiency Ratio*”, também designado relação de eficiência energética. O EER é um rácio entre a energia útil proporcionada pelo sistema e a energia que é necessário fornecer ao sistema para ele operar. Para um sistema de frio é comum mencionar o EER em vez de o rendimento, pois este apenas iria variar entre 0 e 1, enquanto que o EER pode assumir valores superiores à unidade.

No caso de um ciclo frigorífico o EER é calculado de acordo com a seguinte equação:

:

$$EER = \frac{Q_f}{W_c} \quad (1)$$

Onde:

EER: Relação de eficiência energética;

Q_f : Energia absorvida no evaporador [J];

W_c : Trabalho mecânico fornecido ao compressor [J];

Como é facilmente perceptível, o desempenho do equipamento é mais proveitoso quanto maior for o valor da energia absorvida no evaporador e menor a energia fornecida ao nível da

compressão do refrigerante. Quanto maior for o valor do EER, melhor é o desempenho do equipamento, e teoricamente deveria ser sempre superior à unidade, sendo que certos equipamentos podem apresentar um EER inferior à unidade devido às perdas que se verificam. Existem vários parâmetros que afectam o EER, como a temperatura de vaporização, a temperatura de condensação e ainda o grau subarrefecimento e sobreaquecimento do fluido.

Existem ainda outros parâmetros importantes, e que, como apresentado, entram no cálculo do EER. Um destes parâmetros de grande importância num ciclo refrigerante é o calor, Q_f , que é nada mais nada menos que a quantidade de calor, por unidade de tempo, permutada com a fonte fria no evaporador. Esta relação, considerando um volume de controlo correspondente ao fluido refrigerante contido no evaporador, e recorrendo à 1ª Lei da Termodinâmica, é apresentada da seguinte forma.

$$\dot{m} \cdot h_4 + \dot{Q}_f = \dot{m} \cdot h_1 \quad (2)$$

Onde:

\dot{m} : Caudal mássico de fluido refrigerante [kg/s];

h_4, h_1 : Entalpia específica no ponto referenciado [kJ/kg];

$$\dot{Q}_f = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) \quad (3)$$

Esta equação, de onde se obtém a potência refrigerante, mostra a relação entre o caudal mássico de refrigerante que passa no permutador e as entalpias específicas do ponto 1, imediatamente após o evaporador, e o ponto 4, na entrada do mesmo, obtendo-se assim o valor do calor retirado para o sistema.

Outro importante parâmetro num ciclo de compressão mecânica de vapor é precisamente a potência teórica de compressão, que é basicamente a quantidade de energia, por unidade de tempo, que tem de ser fornecida ao fluido refrigerante, pelo compressor, para a elevação de pressão necessária para o ciclo. Novamente, pela 1ª Lei da Termodinâmica, tem-se que:

$$\dot{m} \cdot h_1 + \dot{W}_c = \dot{m} \cdot h_2 \quad (4)$$

$$\dot{W}_c = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \quad (5)$$

Assim, relacionando a entalpia específica à saída (2) e entrada (1) do compressor, com o caudal mássico que atravessa o mesmo, é obtida a potência que é preciso fornecer ao fluido.

Em relação à equação da permuta de calor no condensador, o calor rejeitado que é transferido do sistema para o meio de arrefecimento do condensador, esta relaciona também o caudal mássico com as entalpias à saída e entrada do condensador, recorrendo-se novamente à 1ª Lei da Termodinâmica:

$$\dot{m} \cdot h_2 = \dot{m} \cdot h_3 + \dot{Q}_q \quad (6)$$

Onde:

\dot{Q}_q : Potência calorífica, calor, permutada no condensador [W]

$$\dot{Q}_q = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) \quad (7)$$

Logicamente, o condensador deve ser capaz de rejeitar a taxa de calor necessária, a qual depende também da carga térmica do sistema e da pressão de compressão:

$$\dot{W}_c + \dot{Q}_f = \dot{Q}_q \quad (8)$$

Também de realçar, é a relação que revela que a pressão do condensador, p_c , é a pressão de saturação correspondente à temperatura do condensador, T_c , ou seja:

$$p_c = p_{sat}(T_c) \quad (9)$$

Onde:

p_c : Pressão do Condensador [Pa];

p_{sat} : Pressão de Saturação [Pa];

T_c : Temperatura de Saturação [°C];

4. Componentes de um sistema de frio

Um sistema de refrigeração, neste caso, de compressão mecânica de vapor, é composto por diversos componentes, sendo os principais, compressor, condensador, evaporador e elemento expensor, ligados entre si, de forma a otimizar o rendimento de um ciclo de refrigeração. Além dos componentes principais apresentados de forma mais elaborada, também outros acessórios apresentados são fundamentais para o correcto funcionamento do sistema, como por exemplo, filtros, separadores de óleo e secadores.

A correcta escolha de componentes, começa assim pelo estudo do desenho e pela análise do desempenho de componentes individuais, algo realizado por profissionais qualificados. O sistema pode chegar já montado ao cliente, como o caso dos convencionais frigoríficos domésticos, escolhidos pelo utilizador para a necessidade que deseja satisfazer, onde os componentes foram já previamente escolhidos e montados, ou, em caso de sistemas de grande porte, montados no local e escolhidos pelos técnicos responsáveis. [2]

4.1 Compressor

O compressor, é o coração de um sistema de refrigeração, sendo o responsável por colocar em funcionamento o ciclo de refrigeração [3]. Este é responsável pela elevação da pressão do fluido refrigerante e pela sua movimentação ao longo do sistema. Dada a sua preponderância para a operacionalidade do sistema, este é um componente crítico e dispendioso, sendo geralmente o constituinte mais caro, com o seu valor a variar, consoante a aplicação, entre a meia dezena e milhares de euros, é comum o seu custo representar entre 30 a 40% do montante total despendido. [4]

4.1.1 Tipos de compressor

Existem três grandes grupos de compressores, os de pistão (ou alternativos), de parafuso rotativo e de alhetas rotativas. Actualmente, com os vários tipos de compressores existentes no mercado, a escolha do modelo para o projecto, depende da temperatura de vaporização, do fluido refrigerante utilizado e preponderantemente, da capacidade pretendida

para o sistema, existindo três grandes grupos, pequena capacidade (< 2,5 TR¹), média capacidade (2,5 a 75 TR) e grande capacidade (>75 TR). [2]

O compressor de pistão, ou alternativo, é um dos mais antigos modelos compressores, mas é ainda muito utilizado devido à sua eficiência e versatilidade. O princípio de funcionamento é bastante simples, um pistão desloca-se no interior de um cilindro, sendo este movimento linear transformado em rotativo através de uma biela ligada a uma cambota. Dispõem de concepção hermética, semi-hermética e aberta. Os compressores herméticos são utilizados essencialmente em frigoríficos domésticos e sistemas de ar condicionado com potência até 30kW. São bastante semelhantes aos compressores de concepção semi-hermética, apresentando a óbvia diferença de o invólucro dispor apenas de ligação para entrada e saída do fluido, bem como para a ligação elétrica do motor. No caso do compressor semi-hermético, o invólucro exterior encerra tanto o compressor propriamente dito, bem como o motor de accionamento. É utilizado exclusivamente com refrigerantes halogenados, sendo que o vapor do refrigerante arrefece o motor entrando em contacto com o enrolamento deste. A sua denominação advém da possibilidade de remoção do cabeçote, deixando acessíveis quer as válvulas, quer o pistão. Em relação ao modelo de construção aberta, neste o eixo de accionamento atravessa o invólucro, sendo accionado por um motor externo. Este tipo de compressor é o único adequado à utilização com amoníaco como refrigerante, sendo que pode também operar com halogenados.

Os compressores alternativos, sendo dos mais utilizados, estão já num estado de desenvolvimento bastante avançado, sendo construídos com capacidades que abrangem um vasto leque de opções, variando entre 1 e 700kW. São também bastante versáteis no que diz respeito ao refrigerante com que operam, sendo regra geral o R404a, mais utilizado para ar condicionado, enquanto que, na refrigeração industrial a escolha mais comum é o R717. [4]

As concepções herméticas e semi-herméticas, eliminam a necessidade de utilização de um selo de vedação para o eixo, necessário no caso do modelo aberto, no entanto, podem perder algum rendimento devido ao sobreaquecimento do refrigerante, promovido pelo contacto com o enrolamento. [5]

Para um mais simples entendimento das concepções referidas, são apresentadas na Figura 6 as três possibilidades, sendo a) o compressor hermético; b) semi-hermético; c) aberto.

¹ TR (Tonelada de Refrigeração) representa a energia necessária para liquefazer uma tonelada de gelo em 24 horas, sendo que 1 TR = 3,52 kW

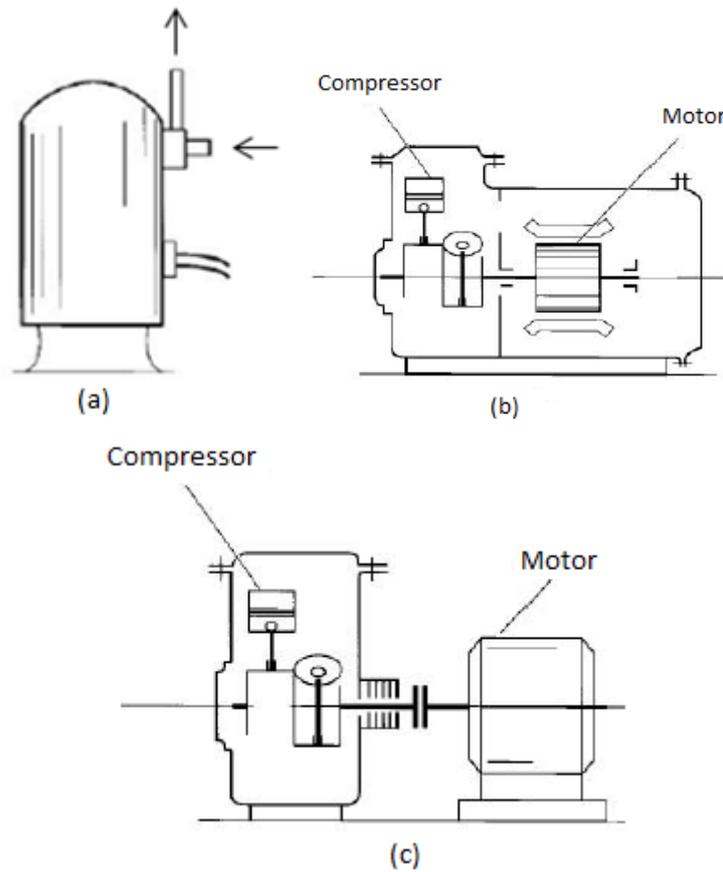


Figura 6 – Diferentes tipos de um compressor de pistão

O compressor de parafuso é um compressor de deslocamento, sendo actualmente líder no mercado, trabalhando com refrigerantes como o amoníaco, e outros gases. Existem dois tipos, de parafuso simples e de parafuso duplo. O de parafuso duplo é o mais utilizado devido à sua maior eficiência isentrópica [6]. As peças principais do compressor de parafuso são os rotores macho e fêmea, que se deslocam na direcção um do outro, enquanto o volume entre eles e a armação da caixa diminui. A relação de pressão de um parafuso depende do comprimento e perfil do parafuso e da forma da porta de descarga. O elemento de parafuso não está equipado com nenhuma válvula e não existem forças mecânicas que criem qualquer desequilíbrio. Pode, portanto, funcionar com uma alta velocidade do veio e combinar uma elevada taxa de compressão com reduzidas dimensões exteriores. [6]. Na Figura 7 é apresentado um compressor de parafuso duplo.



Figura 7 – Compressor de parafuso duplo

Quanto à sua capacidade, os compressores de parafuso situam-se normalmente entre os 70 e os 4570 kW, operando com diversos fluidos refrigerantes, como o R404a em aplicações para ar condicionado em ambiente de refrigeração industrial, o amoníaco é a escolha mais comum. [6]

O compressor de palhetas rotativas, como o apresentado na Figura 8, é baseado em tecnologia tradicional comprovada, sendo accionado directamente a uma velocidade muito baixa (1450 rpm), proporcionando uma fiabilidade sem rival. O rotor, a única peça em movimento contínuo, possui várias ranhuras ao longo do seu comprimento, nas quais se encaixam as palhetas que deslizam numa película de óleo. O rotor roda dentro do estator cilíndrico. Durante a rotação, a força centrífuga “prolonga” as palhetas a partir das ranhuras, formando células de compressão individuais. A rotação reduz o volume das células, aumentando a pressão do ar. O calor gerado pela compressão é controlado por injeção de óleo pressurizado. O fluido refrigerante a alta pressão é libertado pela porta de saída, sendo os resíduos restantes de óleo removidos pelo separador final do óleo. Regra geral, a sua potência vai até aos 75kW. [7]



Figura 8 – Compressor de alhetas rotativas

4.1.2 Lubrificação do compressor

Focando apenas num dos compressores mais utilizados, o compressor de pistão, é notório que este requer lubrificação entre as diversas partes móveis que contactam umas com as outras durante a operação. Normalmente, é utilizado um óleo lubrificante para atenuar o problema do desgaste. Este óleo lubrificante, regra geral, entra em contacto com o refrigerante e mistura-se com ele, pelo que é essencial que os mesmos sejam compatíveis. As propriedades mais importantes a considerar na escolha de um óleo lubrificante num compressor onde este tem contacto com o fluido refrigerante são as seguintes:

- Estabilidade química;
- Ponto de derrame e/ou solidificação;
- Rigidez dielétrica;
- Viscosidade.

Além disto, é também necessário ter em conta parâmetros como a natureza do refrigerante utilizado, o tipo do compressor, bem como a temperatura de descarga e o evaporador. É também importante que o lubrificante não se altere quimicamente ao longo do tempo de serviço, sendo de especial relevância que este não se decomponha com a temperatura, visto a descarga do compressor ocorrer normalmente a temperaturas elevadas. Isto é de especial importância num compressor hermeticamente selado, onde é esperado que o óleo lubrificante não seja trocado num período inferior a 10 anos. A nível estrutural, a estabilidade química do óleo é inversamente proporcional ao número de hidrocarbonetos insaturados, assim sendo, é desejado que o mesmo apresente um baixo nível destas partículas.

O tipo de lubrificação é também um parâmetro de relevância, podendo a mesma ser feita por uma de duas opções: por salpico ou forçada. A lubrificação por salpicos é aplicada a compressores pequenos, com potências até 10kW. Neste método, o cárter do compressor é cheio de óleo até um certo nível e a cambota ao rodar vai atingir o lubrificante e fazer com que este seja salpicado para as partes móveis em contacto. Em certos modelos, é inclusive ligada à cambota uma colher para maximizar este efeito.

A lubrificação forçada é utilizada em compressores de maiores dimensões e recorre a uma bomba que faz o óleo circular, sob pressão, para as várias superfícies onde é necessário. Isto vai efectivamente permitir uma distribuição mais uniforme, permitindo uma melhor lubrificação das partes móveis. De referir também, que o óleo após cumprir a sua função, volta a escorrer para o cárter, por gravidade, onde vai reentrar no circuito.

Quando o fluido refrigerante não é solúvel no óleo lubrificante, existe a possibilidade do lubrificante ser transportado para fora do compressor e depositado numa outra parte do sistema, o que iria pôr em causa o ciclo frigorífico. Para prevenir esta ocorrência, são utilizados separadores de óleo na zona de descarga do compressor, onde o óleo é separado do refrigerante vaporizado e é enviado de volta para o compressor. [8]

4.2 Condensador

O condensador é, tal como o evaporador, um permutador de calor, mas que neste caso será utilizado para remover do sistema o calor recebido pelo evaporador. Tal como este, para maximizar a transferência de calor, trabalha em mudança de fase, sendo neste caso na mudança de vapor para líquido. O condensador, como é perceptível, trabalha a temperaturas e pressões mais elevadas, sendo o objectivo dissipar calor para o meio exterior. [2] A transferência de calor, dá-se essencialmente em três fases:

- Arrefecimento sensível do vapor sobreaquecido;
- Transferência de calor latente na fase de condensação;
- Subarrefecimento do líquido.

Após a passagem pelo compressor o refrigerante entra no condensador em estado de vapor sobreaquecido, ocorre um arrefecimento sensível, atingindo depois o início da condensação, sendo que a fracção de vapor e líquido, ao longo do condensador é variável, saindo deste em estado líquido saturado, que é o estado do líquido no qual o vapor começa a

formar-se durante o aquecimento a pressão constante, ou comprimido. É durante a condensação e na mudança de fase que ocorre a maior fatia da transferência de calor, representando cerca de 80% do calor rejeitado.

4.2.1 Tipos de condensador

Os primeiros condensadores a aparecer no mercado eram refrigerados com água, e muito menos desenvolvidos comparativamente aos atuais. Contudo, os modernos condensadores a água têm um rendimento bastante bom comparando com os condensadores arrefecidos pelo ar, e funcionam com temperaturas de condensação muito mais baixas. Além dos condensadores arrefecidos a água e a ar, existem ainda condensadores evaporativos.

Em relação aos materiais construtivos, o aço, o cobre e o latão são as soluções predominantes para os fluidos halogenados, contudo, no caso da utilização de amoníaco, devido à oxidação que provoca no cobre e no latão, é utilizado o alumínio. [3]

A transmissão de calor propriamente dita, do refrigerante para o meio arrefecedor, ocorre por três mecanismos, convecção entre o fluido e o filme de óleo aderente à parede interna do tubo, condução através do filme de óleo, parede metálica do tubo e sujidade ou incrustações junto ao meio arrefecedor e ainda convecção entre a superfície exterior, ou interior e o meio arrefecedor. A transferência de calor do condensador depende do coeficiente global de transmissão de calor, da área de transferência de calor, e da diferença de temperatura média, como explicito na seguinte equação,

$$\dot{Q}_q = U \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (10)$$

Onde:

U : Coeficiente Global de Transferência de Calor do condensador [W/(m².°C)];

A : Área da superfície de Transferência de Calor [m²];

ΔT_m : Diferença de Temperatura Média [°C].

4.2.2 Taxa de Rejeição de Calor

Um dos parâmetros importantes num ciclo frigorífico, é a Taxa de Rejeição de Calor (TRC) no condensador. Esta é expressa na seguinte equação:

$$TRC = \frac{Q_q}{Q_f} = \frac{Q_f + W_c}{Q_f} = 1 + \frac{1}{EER} \quad (11)$$

Onde:

TRC: Taxa de Rejeição de Calor;

Q_q : Calor rejeitado para o ambiente (fonte quente);

Q_f : Calor retirado do espaço a refrigerar.

Pelas duas equações anteriores, e como o valor do calor permutado vai depender da diferença de temperatura entre os meios entre os quais se dá a permuta de calor, é visível que para uma temperatura do condensador fixa, caso a temperatura do evaporador diminua, o EER diminui e a TRC aumenta. É também um facto que a TRC é maior quando é utilizado um compressor do tipo hermético, isto devido ao calor adicional rejeitado pelo motor e pelo compressor nestes sistemas. A relação da TRC com o tipo de compressor, Temperatura do Evaporador (T_e) e Temperatura do Condensador (T_c), está explícita na Figura 9.

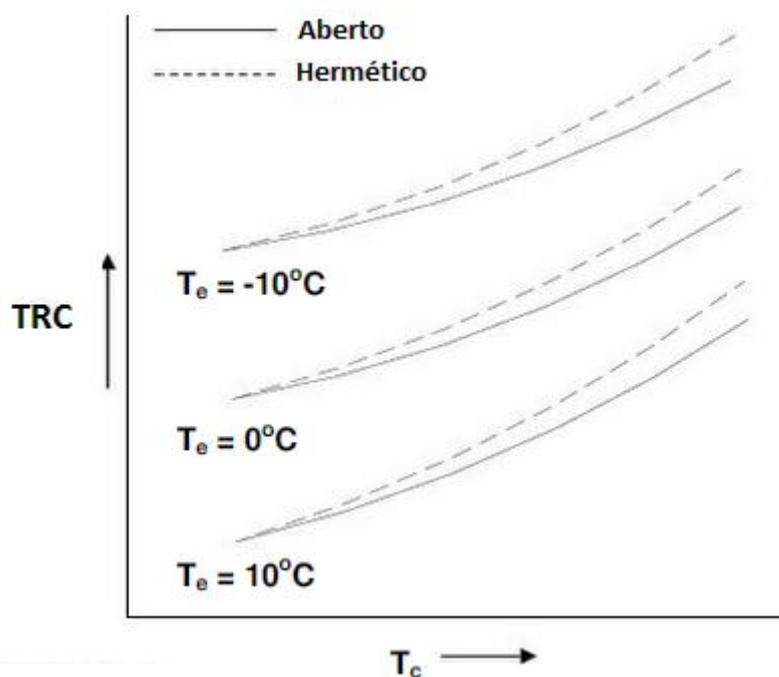


Figura 9 – Variação da Taxa de Rejeição de Calor com as temperaturas do evaporador [T_e] e condensador [T_c]

4.3 Evaporador

Num sistema de refrigeração, o evaporador é o componente encarregue de absorver o calor vindo de um espaço que se pretende arrefecer. Isto é conseguido mantendo a serpentina do evaporador a uma temperatura inferior à do local a refrigerar, o que vai originar que a transferência de calor da fonte fria, a câmara frigorífica, para o fluido refrigerante, resulte num arrefecimento controlado do ambiente interior. Neste componente, o fluido refrigerante absorve calor a temperatura constante, mudando da fase líquida para a fase de vapor. Aquim, uma vez atingido vapor saturado, se for fornecida mais energia ao fluido, vai originar a formação de vapor sobreaquecido, que pode ser desejado para evitar a possibilidade de surgirem gotas de líquido ao nível do compressor, mas por outro lado o sobreaquecimento do fluido também vai gerar menor rendimento no funcionamento do compressor.

O esquema do funcionamento de um tradicional evaporador pode ser visto na Figura 10.

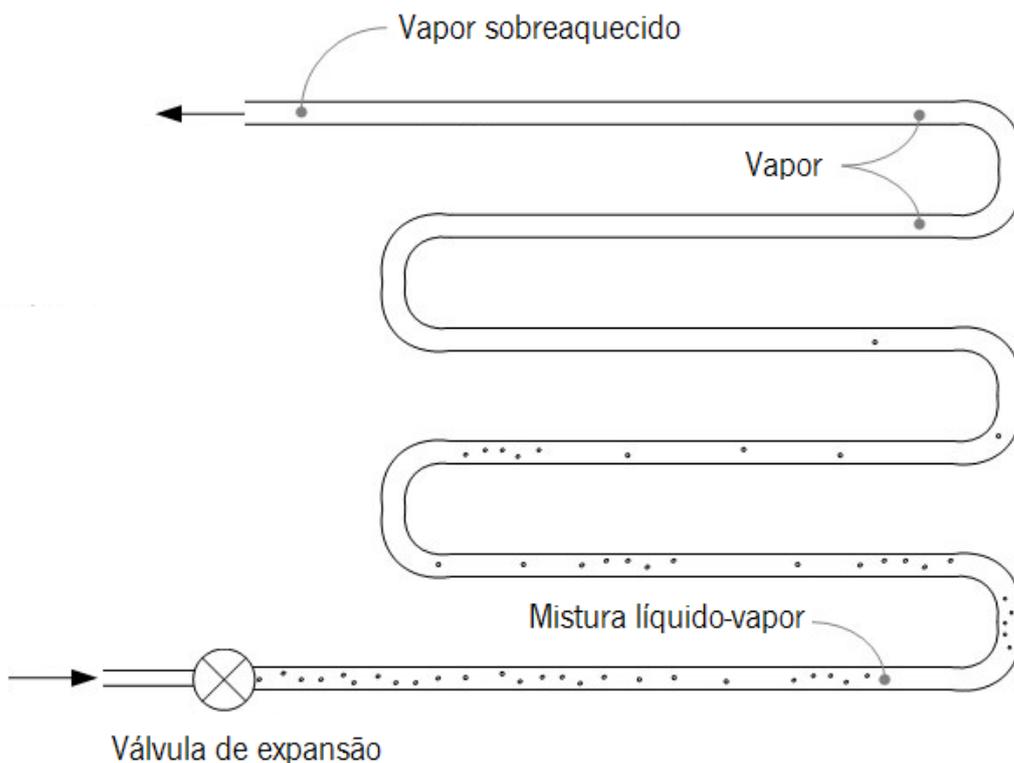


Figura 10 – Esquema do funcionamento de um evaporador

Num sistema são de extrema importância as temperaturas de vaporização e de condensação, sendo que no caso do evaporador, a propriedade mais importante é o ponto de evaporação, pois determina qual é a temperatura de funcionamento da serpentina. Daqui, é constatado que pressão e temperatura são duas propriedades fundamentais para o correcto

funcionamento de um evaporador, pois é em função da pressão que a temperatura de evaporação será maior ou menor.

Para levar a cabo a sua missão, ou seja, garantir a transferência de calor do espaço a refrigerar para a serpentina, existem várias características importantes na permuta de calor no evaporador que serão agora apresentadas.

1. O material do evaporador através do qual é efectuada a transferência de calor deve ser bom condutor de calor. Geralmente os evaporadores são de cobre, aço, latão, ou alumínio. Além da capacidade de transferir calor e do preço, a corrosão será um dos factores determinantes para a escolha do material a utilizar, assim sendo, quando haja contacto com materiais ácidos, materiais como o cobre ficariam corroídos, pelo que a escolha mais adequada é o aço inoxidável, apesar de ser pior condutor térmico;
 2. O meio com o qual se permuta calor é também um factor preponderante, pois a eficiência na transferência de calor entre dois líquidos é superior. Contudo, nem sempre são estes os meios presentes, sendo mais frequente encontrar permutas entre o ar e o fluido refrigerante, resultando um processo com uma menor eficiência do que se poderia observar entre dois líquidos;
 3. O coeficiente de película, que é a relação entre o meio a refrigerar e a superfície de transferência de calor. O coeficiente está relacionado com a velocidade do fluido do meio que passa sobre a superfície de permuta. Deste modo, quando a velocidade é reduzida, a película vai funcionar como um isolante e diminuir a transferência de calor. Assim sendo, verifica-se que a velocidade mantém a película na sua espessura mínima.
- [3]

4.3.1 Tipos de evaporador

Actualmente, existem inúmeros tipos de evaporadores e cada um deles tem a sua própria função. Os primeiros evaporadores utilizados, eram bastante simples e recorriam simplesmente à convecção natural. Tratavam-se na verdade de simples tubos onde circulava um fluido refrigerante e foram amplamente utilizados nas primeiras câmaras frigoríficas, colocados na parte superior, ou em volta das mesmas, aí arrefecia o ar. Estes evaporadores tinham dimensões bastante generosas, uma vez que a velocidade de ar que passava sobre a serpentina

era lenta, devida apenas à convecção natural, e transferência de calor necessitava assim de uma maior área. Posteriormente, a colocação de um sistema ventilador sobre a serpentina para forçar a circulação de ar, viria a melhorar o rendimento deste tipo de evaporador.

Hoje em dia, e após vários desenvolvimentos, o tipo de evaporador mais utilizado é o evaporador de tubo com alhetas. A utilização de uma superfície alhetada permite uma permuta de calor muito mais eficaz devido à maior área de superfície disponível para a transferência de calor. [3]

4.4 Dispositivo de expansão

Os dispositivos de expansão constituem o quarto elemento básico necessário para o funcionamento de um ciclo de compressão na refrigeração. Apesar de não serem tão visíveis como o condensador, evaporador e compressor, são de igual importância para o correcto funcionamento do sistema. São dispositivos que geralmente estão ocultos no interior do equipamento e não são evidentes para um qualquer observador ocasional, estando situado entre o condensador e o evaporador. Poderá tratar-se de uma válvula de expansão ou de um dispositivo de diâmetro fixo, vulgarmente designado por capilar. Este componente é uma das linhas divisórias entre o lado de alta pressão e o lado de baixa pressão, reduzindo a pressão do frigorígeno. É também o responsável por dosear a quantidade correcta de frigorígeno que chega ao evaporador. [3]

4.4.1 Tubo capilar

Um tubo capilar (ver Figura 11), é um tubo de cobre, com um diâmetro interior calibrado muito reduzido, compreendido na gama entre 0,5 e 3 mm, e com um comprimento que varia entre 1 e 6 m. Este diâmetro interior e o seu comprimento, vão determinar que quantidade de fluido passa no seu interior, e por consequente, a perda de pressão no ciclo.

O capilar é essencialmente utilizado em sistemas de pequena capacidade. A sua utilização origina alguns cuidados extra, pois a presença de humidade ou resíduos sólidos poderão causar a obstrução do vaso capilar, retirando-lhe a capacidade de realizar a queda de pressão. A utilização de um filtro antes do capilar é por isso uma medida recorrente para evitar a sua obstrução por partículas estranhas. O seu desempenho poderá também ser posto em causa por estrangulamento do tubo, originado por vincagem.



Figura 11 – Tubo capilar em cobre

A queda de pressão propriamente dita proporcionado pela tubo capilar deve-se ao facto de o refrigerante ter de ultrapassar a resistência friccional oferecida pelas paredes do tubo, o que origina logo alguma queda de pressão. Por outro lado, o refrigerante líquido evapora, formando uma mistura de líquido e vapor conforme a redução da pressão. Como a massa volúmica do vapor é menor que a massa volúmica do líquido, a massa volúmica do refrigerante diminui conforme flui pelo capilar, pois vai aumentando a percentagem de vapor na solução.

Com o caudal mássico pode ser calculado da seguinte forma:

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \quad (12)$$

Onde:

\dot{m} = caudal mássico [kg/s];

ρ : massa volúmica [kg/m³];

v: velocidade [m/s];

A: área de secção transversal [m²].

Com o caudal mássico e o diâmetro do tubo a serem constantes, a velocidade aumenta, o que se traduz num decréscimo da pressão.

São possíveis diversas combinações de comprimento e diâmetro do tubo capilar, no entanto depois de instalado, este vai ser responsável por reduzir a pressão, desde a pressão do

condensador até à pressão do evaporador, sendo o caudal mássico dependente destas duas pressões, não permitindo ajustamentos nem suportando variações de carga.

4.4.2 Válvula de expansão

As válvulas de expansão são um dos dispositivos reguladores de pressão e caudal mais comuns actualmente e podem ser de vários tipos como: válvulas manuais, de boia, electrónicas e de pressão constante (ou automática).

O mais arcaico destes dispositivos, as válvulas de expansão manuais, como o nome indica, são ajustadas manualmente por um operador, definindo a sua pressão de abertura, o que condiciona o caudal de fluido que a atravessa. Esta é a sua grande desvantagem, pois é inflexível a mudanças de carga no sistema, só podendo ser ajustada pelo operador. Tem também de ser aberta ou fechada manualmente sempre que o compressor arranca ou para. A sua utilização apenas é justificável em grandes instalações onde existe um operador responsável pelo seu funcionamento. Com algumas semelhanças à válvula manual, as válvulas de boia, mantêm o nível de líquido a um nível constante no evaporador ou num depósito. [3]

As válvulas de expansão termostáticas, actualmente mais utilizadas nos sistemas de expansão directos, devido à sua eficiência e facilidade de instalação, como a representada esquematicamente na Figura 12, são a solução favorita de muitos fabricantes. Estas válvulas controlam a quantidade de fluido refrigerante que chega ao evaporador, através de um sensor térmico que controla o sobreaquecimento no vapor à saída do evaporador. Não é recomendável que exista excesso de sobreaquecimento, mas com este tipo de válvula é necessário um ligeiro excesso para garantir que não sai nenhum líquido do evaporador, o qual seria prejudicial para o compressor. A válvula é constituída por corpo, mola, diafragma, parafuso de ajuste e bolbo sensível.

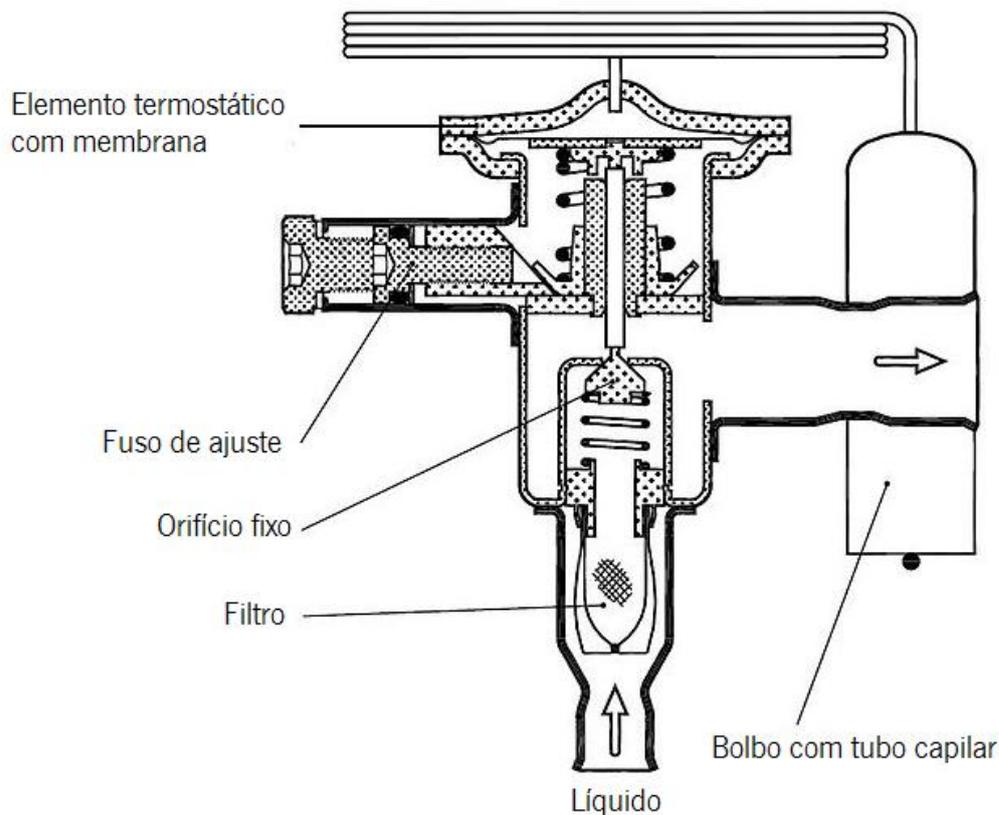


Figura 12 – Esquema de uma válvula termostática

A válvula de expansão eletrônica é um dispositivo de expansão que doseia a quantidade de refrigerante no evaporador utilizando um sensor de pressão. Neste regulador, a dimensão interior varia em resposta ao seu elemento sensor, deste modo é conseguida uma pressão constante no evaporador. Permite um controlo mais preciso e eficiente do caudal de refrigerante, resultando numa poupança energética. [3]

Actualmente os três tipos de válvula de expansão eletrônica mais comuns no mercado são: as accionadas por motores de passo (as mais eficientes e precisas), as de pulsos de largura modulada e as analógicas.

Relativamente às válvulas de expansão termostática, estas apresentam algumas vantagens, como o controlo mais preciso da temperatura, o controlo consistente do sobreaquecimento (mesmo em condições de pressão variável) a capacidade de operar com menores pressões de condensação e uma economia de energia a rondar os 10%.

Por fim, existem ainda as válvulas de pressão constante, que como o nome indica, mantêm à sua saída uma pressão constante. Isto irá permitir regular a saída de refrigerante em

função da necessidade do sistema. Esta válvula adequa-se melhor a situações em que a carga térmica é aproximadamente constante, limitando por isso o seu uso. [6]

4.5 Acessórios auxiliares

Além dos quatro componentes principais já mencionados, um sistema frigorífico para funcionar na perfeição utiliza ainda de acessórios auxiliares, que em certos casos, poderão, ou não, ser utilizados para um melhor funcionamento do equipamento.

4.5.1 Filtro e secador

Num sistema de refrigeração, é utilizado um filtro para eliminar partículas estranhas das tubagens do sistema. Este é constituído por um invólucro metálico, no interior do qual existe uma tela de malha fina, que poderá ser constituída por níquel ou bronze. Este filtro tanto poderá ser instalado na linha de vapor como na linha de líquido, tendo diferentes propósitos. No primeiro caso, o objectivo é evitar a entrada de impurezas no compressor, enquanto que no segundo caso é pretendido evitar a entrada de impurezas no evaporador.

Ao contrário de um simples filtro, poderá ser instalado um filtro secador, como o presente na Figura 13, que além da função anteriormente descrita, destina-se também a eliminar a humidade que possa estar presente no sistema, e que poderia originar diversos problemas. Sendo geralmente colocado na linha de líquido, este é constituído por um corpo com elementos filtrantes cheio de material elevadamente higroscópico (sílica gel). Este componente, filtro secador, causa no circuito uma considerável perda de carga, o que leva a que em instalações de médio e grande porte seja por vezes instalado isolado, em by pass, por meio de válvulas, ou instalado apenas em determinados períodos temporais. [6]



Figura 13 – Filtro secador para aplicação em equipamento frigorífico

4.5.2 Separador de óleo

Quando existem problemas de miscibilidade entre o óleo lubrificante e o refrigerante, quando o retorno do óleo é inadequado ou quando está em excesso em circulação, é comum a utilização de um separador de óleo como o visível na Figura 14, um elemento altamente eficaz no controlo do óleo lubrificante e que é muito utilizado em sistemas de grande porte.



Figura 14 – Separador de óleo lubrificante

Estes são constituídos por quatro partes diferentes:

- Tanque, ou cilindro externo, revestido por um isolamento térmico que impede a condensação de vapor;
- Filtro que retém o óleo;
- Válvula de agulha controlada por uma boia;
- Linha de retorno do óleo ao compressor.

O óleo é assim retido no filtro e devido à desaceleração do escoamento acumula-se no fundo do tanque. Quando este atinge um nível predefinido, a boia vai provocar a abertura da válvula de agulha, e como a pressão no separador é maior que a pressão no cárter do compressor, o óleo acumulado vai escoar para este último. [6]

4.5.3 Visores de líquido

Para verificar a passagem de líquido e a presença de humidade no sistema, é comum a utilização de um visor de líquido. Este é colocado à saída do reservatório do líquido, ou na entrada do evaporador, permitindo verificar se a carga de refrigeração está completa, bem como a presença de humidade, sendo geralmente utilizado um simples código de cores, onde o verde

indica a ausência de umidade, o amarelo a presença de umidade e o castanho a contaminação total do sistema. [6]

Um típico visor de líquido está ilustrado na Figura 15.



Figura 15 – Visor de líquido

4.5.4 Isolamento térmico

Como é notório, um equipamento refrigerante tem de estar isolado termicamente do ambiente exterior, caso contrário, e de acordo com os princípios de transferência de calor, este receberia energia térmica do espaço exterior até atingir o equilíbrio térmico. É assim necessário combater esta permuta de calor com isolamento térmico, um material que entreposto entre dois ambientes a temperaturas diferentes, retarda de maneira apreciável a transferência de calor do mais quente para o mais frio. Estes materiais isolantes, são formados por uma infinidade de células ocas, cheias de ar ou outro gás. Estas células devem ser pequenas de maneira a impedir o movimento do gás nelas encerrado de modo a retardar a transferência de energia.

Além as características de bom isolante, deve apresentar ainda características como baixa densidade, não possuir ou fixar cheiro, ser imputrescível, baixa absorção de umidade, oferecer adequada resistência à difusão de vapor de água, não ser suscetível ao ataque de insectos e/ou roedores, apresentar resistência a deformações causadas por diferenças de temperatura, possuir alta resistência mecânica a trepidações, não atacar nem ser atacado pelos produtos a conservar, apresentar baixo custo operacional, não ser inflamável e ser de fácil colocação. Como é perceptível, nenhum material é capaz de reunir todas estas condições a um nível de excelência, pelo que a escolha do material isolante vai depender da aplicação para o qual é pretendido. De entre as diferentes possibilidades, os materiais mais utilizados são a cortiça, a espuma rígida de vidro, resinas fenólicas (aqui, o pentano pode ser utilizado como

agente de expansão), espuma rígida de poliuretano, poliuretano expandido e poliestireno expandido. [6]

5. Aplicações da refrigeração

Como conceito geral, a refrigeração tem como objectivo o arrefecimento de sólidos ou fluidos a temperaturas mais baixas que a do ambiente envolvente. Isto envolve assim, transferência de calor a uma temperatura mais baixa e rejeição de calor a uma temperatura mais elevada para o ambiente.

Antigamente, o grande propósito da refrigeração era a produção de gelo, sendo este utilizado para arrefecimento de bens e preservação alimentar. Contudo, hoje em dia, a refrigeração é utilizada para as mais diversas finalidades de elevada importância para o ser humano. Apesar de no dia-a-dia o frigorífico doméstico ser o bem mais notado, sem as capacidades de refrigeração actuais, a vida como a conhecemos não seria possível.

Muitas vezes, os conceitos de refrigeração e de ar condicionado surgem um pouco confusos no pensamento do utilizador diário, e é por isso importante partir já do início para uma diversificação dos seus campos de utilização, o que pode ser constatado na Figura 16, onde está especificada a sua relação e diferenciação.



Figura 16 – Campos de aplicação da refrigeração e ar condicionado

Da análise, concluímos que tudo o que envolve um decréscimo da temperatura de um espaço é feito através de um ciclo de refrigeração, sendo que o ar condicionado envolve controlo da temperatura do ar, humidade, limpeza do ar e a sua distribuição pelos espaços onde é pretendido, sendo que nos meses de verão, quando é pretendido que a temperatura do espaço a refrigerar seja mais baixa, o ar condicionado funciona segundo o princípio de um ciclo de refrigeração, removendo calor do espaço quente e rejeitando-o para o ambiente. [2]

Seguidamente, são apresentadas as áreas onde a refrigeração é mais utilizada, sendo indispensável para o estado de evolução actual.

5.1 Aplicação da refrigeração na conservação alimentar

Actualmente, a refrigeração é indispensável na indústria alimentar, sendo uma constante no processamento, preservação e distribuição de bens consumíveis. Como é conhecido, os agentes de putrefacção podem rapidamente destruir os bens alimentares, ou torna-los impróprios para consumo humano, e nesse capítulo entra a refrigeração, sendo capaz de proporcionar, no espaço refrigerado, temperaturas onde a acção destes agentes é inibida. Também a manutenção do teor de água nos alimentos é de crucial importância, bem como o aspecto fresco do próprio bem alimentar. Com isto, surge a possibilidade de conservar bens alimentares, e transporta-los para onde estes serão consumidos, algo que anteriormente era impossível. De modo a ser perceptível o quanto a refrigeração é importante na conservação alimentar, a Tabela 2 exprime a diferença que a refrigeração faz no tempo de conservação alimentar. [2]

Tabela 2 – Efeito da temperatura na vida útil de armazenamento de produtos alimentares

Produto Alimentar	Média do tempo de armazenamento útil (dias)		
	0°C	22°C	38°C
Carne	6-10	1	<1
Peixe	2-7	1	<1
Aves	5-18	1	<1
Carne e peixe seco	>1000	>350 e <1000	>100 e <350
Frutos	2-180	1-20	1-7
Frutos secos	>1000	>350 e <1000	>100 e <350
Vegetais	3-20	1-7	1-3
Tubérculos	90-300	7-50	2-20
Sementes secas	>1000	>350 e <1000	>100 e <350

Pela leitura da Tabela 2, facilmente é perceptível a grande diferença que a refrigeração trouxe à indústria do processamento, conservação e transporte de bens alimentares, tornando possível a deslocação destes até sítios onde não era possível às massas populacionais acederem

a eles. Além disto, tornou muito mais seguro um sector cada vez mais exigente em relação às medidas de higiene e segurança alimentares.

Também de grande utilidade e importância, são os armários de explosão, e tuneis de congelação, como o ilustrado na Figura 17, que mais à frente são analisados, que permitem que, por exemplo, os vegetais e frutos sejam imediatamente arrefecidos após a colheita, impedido o seu amadurecimento precoce, o que poderia inviabilizar a chegada ao local de venda em condições de poderem ser consumidos pelo ser humano.



Figura 17 – Túnel de congelação

Está cientificamente provado que uma cadeia de frio adequada é muito eficaz na redução da deterioração dos alimentos, bem como na sua conservação, quer em termos de qualidade nutricional, quer em termos de aspecto. De modo a realçar esta importância da cadeia de frio logo após as colheitas de frutos, é estimado que na Índia, um país ainda em vias de desenvolvimento, sejam imediatamente perdidos 30% dos frutos colhidos, sendo que mesmo a qualidade dos restantes 70% pode ser comprometida. Isto destaca ainda mais a importância que tem uma cadeia de frio correcta para não existir uma perda de alimentos tão grande, alimentos esses que são cada vez mais escassos para uma população que não pára de crescer, em especial na região asiática, e põe cada vez mais pressão na distribuição de bens consumíveis.

Dada a importância das condições da cadeia de frio, diferentes para cada bem alimentar, a *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers* (ASHRAE) propõe as condições expressas na Tabela 3 para o transporte de bens alimentícios. [2]

Tabela 3 – Condições de armazenamento recomendadas para frutos e vegetais

Bem Alimentar	Temperatura de Armazenamento [°C]	Humidade Relativa [%]	Tempo Armazenamento Máximo Recomendado	Conservação de Vegetais em Frio em Países Tropicais
Maça	0 – 4	90 – 95	2 – 6 meses	-
Cenoura	0	98 – 100	5 – 9 meses	2 meses
Melão	7 – 10	90 – 95	2 semanas	-
Cebola	0	65 – 70	6 – 8 meses	-
Batata	4 – 16	90 – 95	2 – 8 meses	-
Laranja	0 – 4	85 – 90	3 – 4 meses	-
Espinafre	0	95	1 – 2 semanas	1 semana

Pela leitura da Tabela 3, está patente a clara diferença de condições de temperatura e humidade que os diversos bens alimentares necessitam para o seu correcto processamento e optimização de qualidade com que chega ao utilizador. De forma a não comprometer a segurança alimentar é por isso necessária uma cadeia de frio correcta para o bem em questão, não devendo nunca ser tratados de forma igual.

Como perceptível, a temperatura é um dos mais importantes parâmetros a controlar, sendo que esta é mais baixa para períodos de conservação superiores. Valores de temperatura de congelamento superiores ou inferiores ao adequado originam problemas nos alimentos, alterando o seu aspecto e sabor, podendo mesmo inutiliza-lo. Também o teor de humidade adequado deve ser respeitado, caso este seja inferior ao recomendado, existirão problemas de desidratação, levando a uma perda de peso, e conseqüente perda de valor, deterioração do aspecto e ainda perdas de vitaminas. Por outro lado, um teor de humidade superior às recomendações iria estimular a acção dos agentes de putrefacção. [2]

5.2 Aplicações da refrigeração na indústria química e de processamento

As indústrias de processamento como refinarias petrolíferas, petroquímicas, ou indústrias de pasta de papel necessitam de grandes capacidades de arrefecimento. Cada uma

destas unidades industriais requer um sistema de arrefecimento personalizado e otimizado para o caso em questão, sendo as aplicações mais usuais as seguintes:

- Separação de gases

Numa petroquímica, temperaturas de -150°C e capacidades de refrigeração elevadas como 10 000 Toneladas de Refrigeração, são requeridas para a separação de gases por meio de destilação fraccionada. Alguns gases condensam facilmente a temperaturas mais baixas a partir de misturas de hidrocarbonetos. O propano (R290) é utilizado como refrigerante em muitas destas plantas;

- Condensação de gases

Alguns gases que são produzidos sinteticamente, são condensados para o estado líquido, por arrefecimento, de modo a serem transportados e armazenados mais facilmente. Por exemplo, numa instalação de amoníaco sintético, o amoníaco é condensado a -10°C antes de preencher os cilindros, ser armazenado e expedido. Esta baixa temperatura requer refrigeração;

- Desumidificação do ar

Na indústria farmacêutica é requerida uma baixa humidade do ar, à semelhança de indústrias onde se faz liquefacção de ar. Esta desumidificação vai assim prevenir que a electricidade estática possa causar curto-circuitos em locais onde são utilizadas altas voltagens. O ar é arrefecido abaixo da temperatura de ponto de orvalho, de modo que algum vapor de água condensa e o ar é desumidificado;

- Remoção de calor de reacções

Em muitas reacções químicas, a eficiência é mais elevada se esta se der a uma temperatura baixa, isto vai requer um espaço isolado com temperaturas mais baixas, o que obriga à existência de refrigeração. Juntando a isto, muitas reacções são exotérmicas por natureza, produzindo calor, o que requer ainda maior capacidade de refrigeração. A produção de borracha sintética é um exemplo;

- Arrefecimento para preservação

Muitos compostos, à temperatura ambiente decompõem-se, ou evaporam a um ritmo muito elevado. Certos medicamentos, explosivos ou borracha natural são assim armazenados em ambientes mais frios para conservação por longos períodos de tempo;

- Recuperação de Solventes

Em muitos processos químicos são utilizados solventes que evaporam após a reacção. Estes podem ser recuperados por condensação a temperaturas mais baixas por sistemas de refrigeração. Um exemplo é o tetracloreto de carbono na produção de têxteis.

5.3 Aplicações especiais da refrigeração

Além destas aplicações mais usuais, e standardizadas, apresentadas no sub-capítulo anterior, a refrigeração é ainda aplicada, mais pontualmente, em certos casos específicos, como agora passa a ser enunciado.

- Medicina

O plasma sanguíneo e os antibióticos são fabricados pelo processo de liofilização, onde a água é levada à sublimação a baixa pressão e baixa temperatura. Este processo não afeta os tecidos sanguíneos. Centrifugadoras refrigeradas a -10°C , são utilizadas no fabrico de medicamentos. Refrigeração localizada por meio de azoto líquido pode ser utilizada como meio anestésico;

- Pistas de Gelo

Com o progresso da refrigeração artificial, desportos de inverno como o hóquei no gelo ou a patinagem não dependem hoje em dia do congelamento natural da água. Estes desportos, podem ser praticados tanto em interiores como estádios onde a água é congelada na superfície. Um frigorígeno, ou uma salmoura, que é uma solução de água saturada de sal, é utilizada em tubos que estão embutidos por baixo da superfície, que devido à sua temperatura congelam a água depositada na superfície. Um exemplo da perfeição desta tecnologia, está expressa na Figura 18, onde através de um ringue de gelo artificial se conseguiu disputar um jogo do Campeonato Universitário Norte-Americano de Hóquei no Gelo num estádio de futebol;



Figura 18 – Ringue de gelo artificial, construído para o “The Big Chill at the Big House”

- Dessalinização de água

Em algumas zonas do planeta, a água doce é escassa e a água do mar é dessalinizada para obtenção de água doce. Em certos casos, o processo é conseguido com energia solar, mas como alternativa, pode-se recorrer ao congelamento da água salgada. O gelo assim formado será relativamente livre do sal, sendo depois descongelado para obtenção de água doce;

- Produção de gelo

Esta que foi a primeira aplicação da refrigeração, é ainda uma realidade. Com a dessalinização de frigoríficos e congeladores domésticos, o normal utilizador pode já produzir o gelo de que necessita em casa, contudo, existem ainda grandes produtores de gelo, nomeadamente em zonas costeiras, onde o gelo é utilizado para o transporte de peixe congelado.

6. Espaços refrigerados

Actualmente, de forma a responder a toda a procura do mercado a nível mundial, existe um enorme leque de equipamentos refrigerados, indicados para todas as situações que necessitem de uma atmosfera controlada, quer seja para conservação, ou transporte de bens. Também para conforto do ser humano, com os famosos aparelhos de ar condicionado, a refrigeração está por toda a parte e este capítulo visa elucidar sobre as diferentes opções disponíveis, com muito diferentes concepções que podem ser feitas com os componentes já mencionados, em conjunto com todos os acessórios necessários ao seu funcionamento, bem como o imprescindível fluido frigorígeno que será abordado nos capítulos 9 e 10.

6.1 Armários de serviço

Os armários de serviço refrigerados comerciais, são projectados para o armazenamento de bens alimentares, e congelados, em geral. Um armário de serviço, é um espaço fechado, refrigerado, com um volume bruto interno entre os 100 e os 2000 litros. Neste espaço disponível está o bem a refrigerar, o qual pode ser acedido através de portas e gavetas. Num ambiente não doméstico, o tamanho dos produtos é baseado nas normas Gastronorm, de modo a facilitar todas as operações de carregamento e descarregamento, no caso da indústria alimentar. Uma classificação dos vários tipos de armário de serviço está expressa na Figura 19.

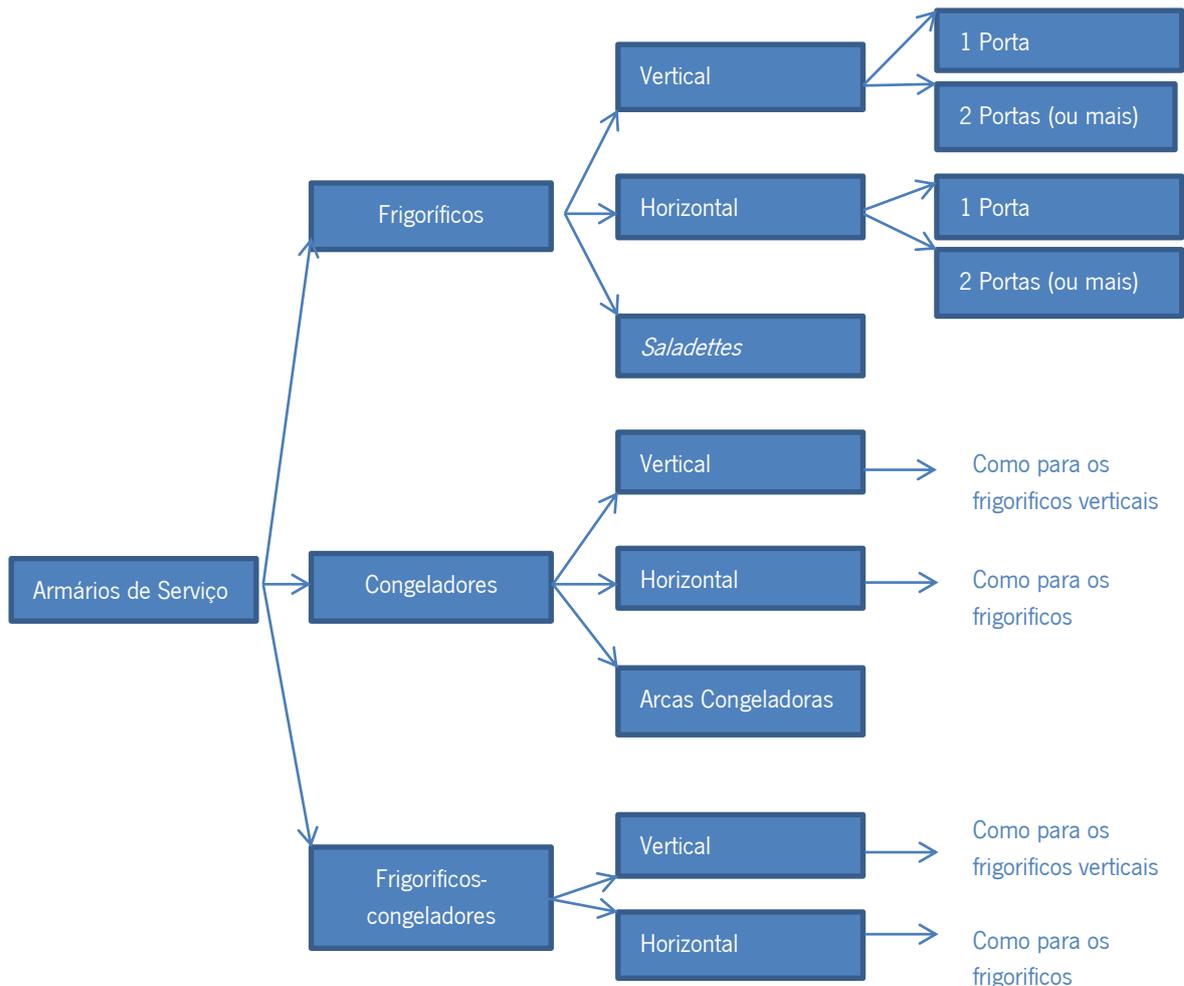


Figura 19 – Classificação armários de serviço

Os armários de serviço, são hoje muito utilizados em todo o mundo, e estão em crescendo no mercado, em resposta à demanda cada vez maior por este tipo de equipamentos. Em seguida, na Tabela 4, são apresentados os números de vendas, tal como de unidades disponíveis, em stock, nos últimos anos, bem como uma previsão dos mesmos para o futuro próximo, na União Europeia (UE). [9]

Tabela 4 – Vendas e stock de armários de serviço na União Europeia

Ano Nº	1990	2007	2008	2012	2020	2025
Vendas	313 237	393 985	397 444	412 096	440 230	461 396
Stock	2 404 852	3 228 919	3 260 163	3 380 904	3 621 615	3 824 409

6.2 Armários de explosão

Os armários de explosão, ou *Blast Cabinets*, utilizam um cortina de ar frio para reduzir a temperatura de bens, geralmente alimentares, quentes rapidamente, de modo a poderem ser armazenados com segurança, evitando o crescimento de bactérias, quer seja de modo congelado, ou apenas refrigerado. Actualmente, e com as normas para conservação alimentar cada vez mais exigentes, a sua utilização está disseminada por toda a UE. Para este tipo de equipamento, não existe ainda uma legislação, nem normas aplicadas aos seus consumos energéticos, pois a principal preocupação é a capacidade de arrefecimento, crucial para cumprir os padrões de higiene e segurança alimentar, capítulo prioritário em relação à eficiência energética. A sua classificação é apresentada na Figura 20.

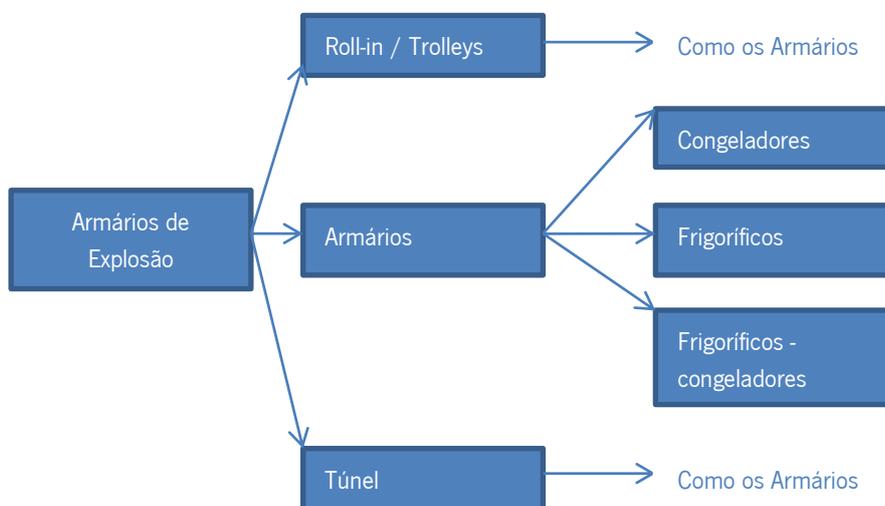


Figura 20 – Classificação dos armários de explosão

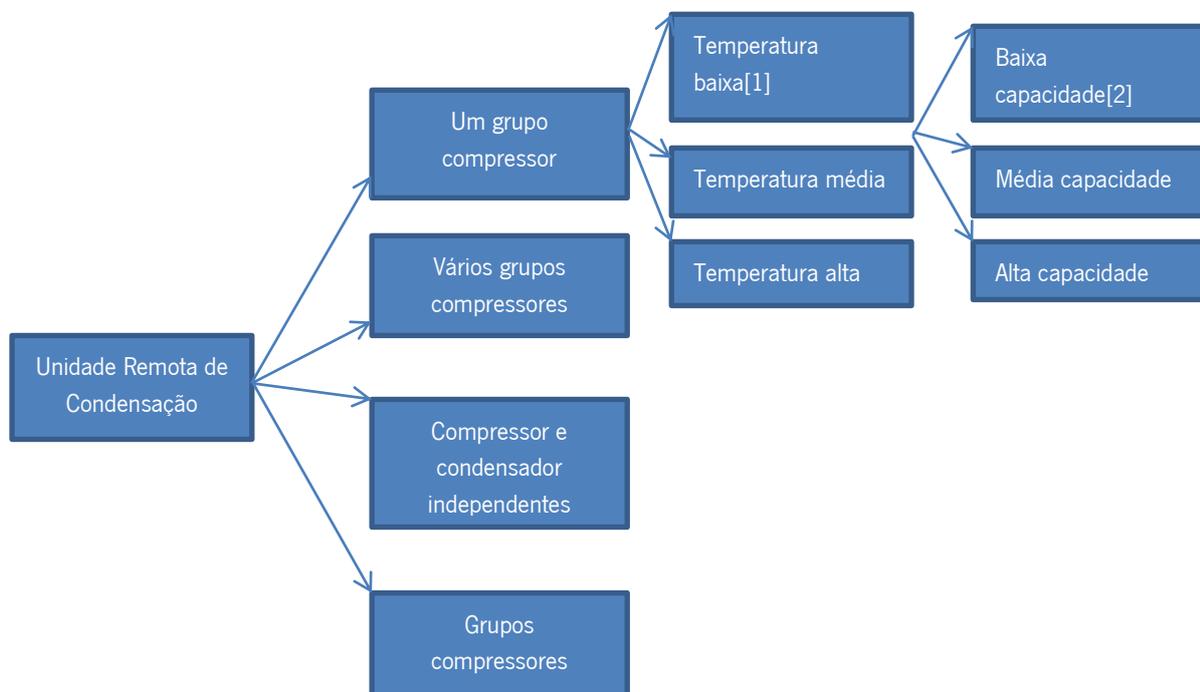
Com a crescente preocupação com a qualidade alimentar, é com naturalidade que estes equipamentos se têm vindo a difundir no mercado Europeu, como é possível constatar na Tabela 5. [9]

Tabela 5 – Vendas e stock de armários de explosão na UE

Ano Nº	1990	2007	2008	2012	2020	2025
Vendas	95 110	170 000	173 655	189 078	224 155	249 310
Stock	516 141	1 292 529	1 331 197	1 478 884	1 761 092	1 958 727

6.3 Unidades de condensação remotas

Uma unidade de condensação é, segundo o *International Dictionary of Refrigeration*, uma montagem que inclui um compressor com um motor, um condensador, e um receptor de líquido, quando necessário. Assim sendo, uma unidade condensadora remota, é a classificação atribuída a um produto que inclui apenas parte do ciclo de refrigeração, normalmente o compressor e o condensador, sendo que o evaporador e a válvula de expansão estão já presentes no armário de frio, e são necessários para completar o sistema para o ciclo frigorífico ficar operacional. Estas unidades de condensação remotas podem ser classificadas de acordo com a Figura 21. [9]



[1] – Temperatura alta: +5°C; Temperatura média: -10°C; Temperatura baixa: -35°C;

[2] – Alta capacidade: >50kW; Média capacidade: 20kW a 50kW; Baixa capacidade: 0,2kW a 20kW.

Figura 21 – Classificação das unidades remotas de condensação

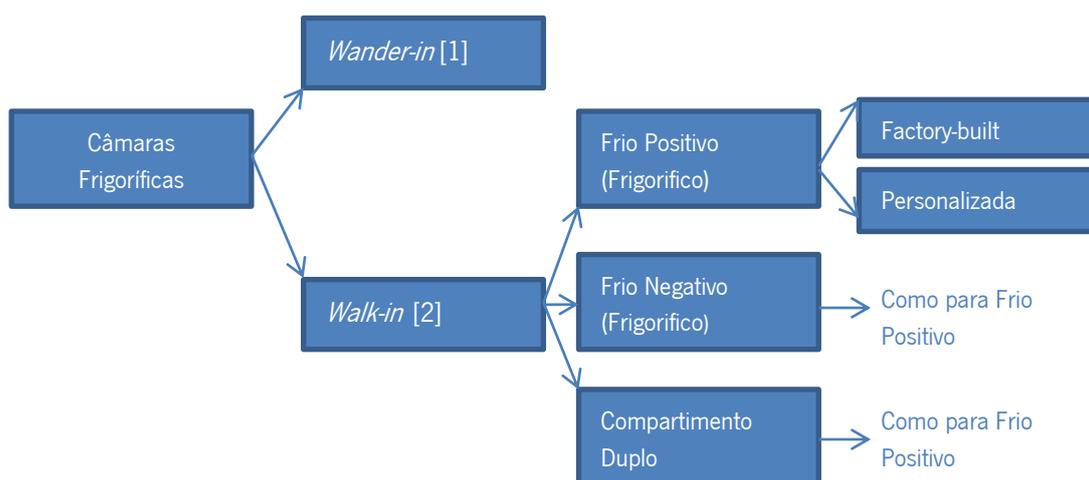
Ao contrário da tendência dos outros equipamentos de frio, as unidades de condensação remotas tem vindo a registar uma quebra de vendas na União Europeia, contudo, como visível na Tabela 6, o stock continua a crescer nos países membros. [9]

Tabela 6 – Vendas e stock de unidades remotas de condensação na UE

Ano Nº	1990	2007	2008	2012	2020	2025
Vendas	766 702	617 516	599 759	573 023	502 614	458 608
Stock	3 688 270	5 147 339	5 243 301	5 618 759	6 301 534	6 682 502

6.4 Câmaras frigoríficas

As câmaras frigoríficas, geralmente, dividem-se em duas grandes categorias, as personalizadas, por regra, de maiores dimensões, que são construídas no próprio local, com componentes de várias fontes, e de acordo com as especificações do utilizador final. Por outro lado temos também as mais pequenas, tipicamente construídas em espaços pré-fabricados isolados, denominadas “*factory-built*”. Além das utilizações mais usuais, como por exemplo, o acondicionamento de bens alimentares, as câmaras frigoríficas, são também utilizadas com propósitos médicos, científicos e de investigação. A sua classificação esta expressa na Figura 22, e foi elaborada de acordo com o feedback de partes interessada.



[1] – Produtos de dimensões superiores a 400m³, que fazem parte de um edifício, que são um edifício exterior ou fazem parte de um cais de descarga;

[2] – Produtos até 400m³ para aplicações interiores.

Figura 22 – Classificação das câmaras frigoríficas

Seguindo uma tendência do aumento do número de vendas no espaço europeu, este tipo de equipamentos tem vindo a ser cada vez mais comercializado, e, logicamente, aumenta a disposição de aparelhos em stock, como expresso na Tabela 7. [9]

Tabela 7 – Vendas e stock de câmaras frigoríficas na UE

Ano Nº	1990	2007	2008	2012	2020	2025
Vendas	73 481	88 052	88 289	91 059	99 230	103 522
Stock	1 122 444	1 507 074	1 521 659	1 578 022	1 690 370	1 785 024

7. Classificação energética e testes de performance

Hoje em dia, a eficiência de um equipamento refrigerante, é sem dúvida um dos principais aspectos que podem levar um utilizador, ou indústria, a optar por um equipamento em detrimento de outro. Em função disto, surgiram um pouco por todo o mundo normas para a regulamentação dos critérios de performance, e teste dos mesmos. Na Europa, estes testes, são determinados pela norma IEC 62552, sendo que também, por exemplo, Estados Unidos da América, Japão e Oceânia, têm as suas próprias legislações.

Em função dos consumos energéticos do equipamento, este vai ser classificado, e etiquetado, com um determinado rótulo, que varia de zona para zona, como pode ser visto na Figura 23, onde está expresso o caso Australiano. [10]

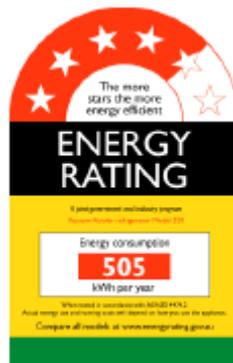


Figura 23 – Etiqueta de classificação energética na Austrália

Recentemente, na União Europeia, existiu uma mudança na classificação energética dos equipamentos, e a etiqueta de identificação foi também ela alterada, dando mais informação ao consumidor, como o caso do ruído produzido pelo equipamento, a capacidade da zona refrigerante, em litros, e da zona de armazenamento de congelados, caso exista, também ela em litros, bem como em destaque, o consumo energético anual em kWh. Um exemplo da mesma, pode ser visto na Figura 24.

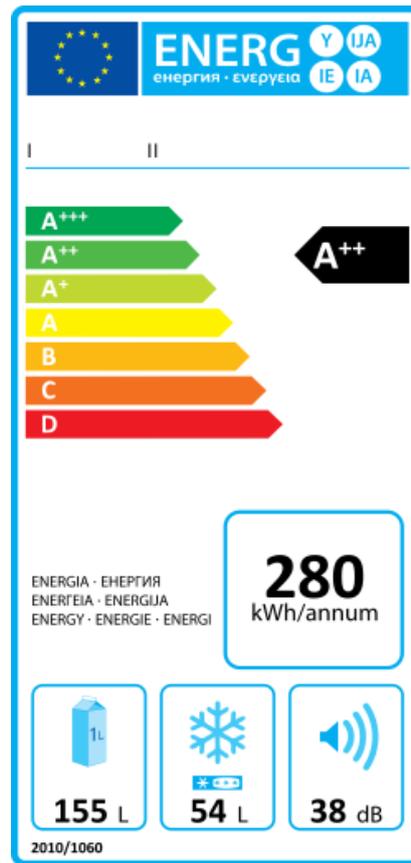


Figura 24 – Nova etiqueta de classificação energética europeia

Esta classificação energética, é mandatária, e uniforme, nos 28 membros da União Europeia. Existem assim, 7 possibilidades de classificação, de A a G, com três classes adicionais, A+, A++ e A+++. Esta classificação, visa ajudar o consumidor na hora da escolha do produto, neste caso específico, equipamentos frigoríficos, permitindo saber aquele que lhe permitirá ter custos energéticos mais baixos, para uma determinada potência.

Actualmente, existem duas tabelas possíveis, com diferença na escala. Para sistemas de compressão mecânica de vapor, a escala vai do referido A+++ até D, sendo esta a última classificação energética permitida. Por outro lado, para os sistemas de absorção, a escala vai de A+++ até G, pois estes equipamentos consomem mais energia, apresentando a vantagem de não produzir tanto ruído.

Os valores que ditam a atribuição da sua classificação energética são, são os apresentados na Tabela 8:

Tabela 8 – Critério da classificação energética

Classificação	Relação com EEI
A+++	<22%
A++	<30%
A+	<42%
A	<55%
B	<75%
C	<90%
D	<100%
E	<110%
F	<125%
G	>125%

Como se pode vislumbrar na Tabela 8, para a atribuição da classificação energética, existe a relação com o *Energy Efficiency Index* (EEI). Este valor, tem em conta parâmetros como o consumo anual de energia, o volume do equipamento, a temperatura mais baixa nos diferentes compartimentos e ainda factores como o tipo de construção e tecnologia utilizada, como por exemplo, *frost free*, um sistema caracterizado pela refrigeração sem produção de gelo. [11]

Como referido, existiram recentemente mudanças, quer na classificação, quer no teste aos equipamentos frigoríficos, prendendo-se esta necessidade com alguns inconvenientes dos parâmetros de teste anteriores, que eram também dispendiosos e testavam apenas o consumo a uma determinada temperatura. Esta mudança na legislação, permitiu assim eliminar pontos ambíguos, e realizar o teste mais rapidamente e com menores custos, com os equipamentos vazios, para o teste do consumo de energia, enquanto anteriormente não era feito deste modo. Em relação às temperaturas de teste, anteriormente era apenas testado a uma temperatura de 25°C, e actualmente o teste é efectuado a 16°C e 32°C, sendo o consumo de energia calculado por uma combinação destes dois valores, sendo o peso de cada um dependente da região na qual vai ser utilizado. [11]

Também o teste à performance de temperatura foi simplificado, utilizando embalagens de 0,5kg, o que permite maior reprodutibilidade dos testes nos vários equipamentos. Também alterado foi o teste de capacidade de congelamento, que basicamente, foi alterado para um teste de tempo de congelamento, que controla o tempo necessário para o congelamento de uma determinada carga. [10]

8. Fluido refrigerante

Como já abordado, para um ciclo refrigerante funcionar, este necessita de um fluido refrigerante que irá levar a carga todas as permutas de calor realizadas. A evolução da refrigeração, e mesmo da indústria do ar condicionado, está em muito dependente do desenvolvimento dos refrigerantes apropriados para as diversas situações de operacionalidade. Supra mencionado está que os sistemas de compressão mecânica de vapor são actualmente dominadores no mercado, e em muito esse facto se deve ao desenvolvimento de refrigerantes, e compressores, compatíveis com o mesmo.

Genericamente, um refrigerante pode ser definido como qualquer corpo ou substância que actua como meio de arrefecimento através da extracção de calor de outro corpo ou substância. Deste modo, várias substâncias poderiam ter a designação de fluido refrigerante, como por exemplo, gelo, água ou ar frio.

Os refrigerantes, podem ser classificados em duas categorias, os primários e os secundários. Os primários são aqueles que são utilizados directamente como fluidos de trabalho, por exemplo, no ciclo de compressão mecânica. São os mais utilizados e aqueles que aqui serão abordados. Por sua vez, os refrigerantes secundários, fluidos utilizados para transportar energia térmica de um local para o outro, têm também outras designações mais comuns como anticongelante. Ao contrário do refrigerante primário, o secundário nunca passa por uma mudança de fase, operando muitas vezes a temperaturas muito baixas, sendo por isso de grande importância o seu ponto de solidificação.

Num sistema de compressão mecânica de vapor, um fluido refrigerante, é um fluido de trabalho que passa por mudanças de fase cíclicas. Assim sendo, o fluido tem de evaporar e condensar às temperaturas pretendidas, o que geralmente se situa no intervalo entre os -100°C e os 100°C , a pressões razoáveis. Essencialmente, têm de ser voláteis.

Historicamente podemos dividir o desenvolvimento e utilização dos refrigerantes em 3 grandes eras, os refrigerantes anteriores aos Clorofluorcarbonetos (CFC's), os baseados em fluorcarbonetos (FC) sintéticos e os que surgem em actividade, e desenvolvimento, após surgirem as preocupações ambientais com a destruição da camada de ozono, e aquecimento global.

8.1 Era pré CFC's

Nos primórdios da civilização, numa perspectiva de aproveitamento dos recursos disponibilizados pela natureza, o homem utilizou a água como frigorígeno. A produção de frio através da evaporação da água data do ano 3000 A.C.. Foi também a água o primeiro frigorígeno utilizado num sistema de refrigeração, em 1755 por William Cullen. Seguidamente, Olivier Evans viria propor a utilização de um fluido volátil, éter, num ciclo fechado para a produção de gelo. Aquele que é creditado como o primeiro a construir um ciclo de refrigeração com compressão de vapor, Jakob Perkins, foi também um dos pioneiros no desenvolvimento dos frigorígenos, utilizando éter sulfúrico, obtido de borracha da Índia. O éter foi assim a escolha dos pioneiros da refrigeração mecânica, tendo sido a escolha de James Harrison para as primeiras máquinas refrigerantes comercializadas.

Inicialmente, o éter parecia ser um bom frigorígeno, em parte devido à facilidade de operação do mesmo, dado que à pressão e temperatura ambiente este se encontra no estado líquido e tem o seu ponto de vaporização a $34,5^{\circ}\text{C}$, o que indica que para se obterem temperaturas baixas, a pressão no evaporador tem de ser inferior a uma atmosfera, ou seja, existe a necessidade de operar em vácuo, o que acarreta riscos de uma fuga de ar para dentro do sistema, o que poderia originar uma mistura potencialmente explosiva. Por outro lado, o ponto de evaporação relativamente elevado indica pressões mais baixas no condensador, ou para uma dada pressão o condensador pode ser operado a temperaturas de condensação mais elevadas. Este facto, contribuiu decisivamente para um grande sucesso nos países tropicais, onde as temperaturas ambiente são mais elevadas, mesmo numa altura em que começaram a surgir novos, e mais eficientes, fluidos frigorígenos.

Dominador nos primeiros anos de aparecimento de refrigeradores, o éter era muito utilizado para a produção de gelo. Contudo, apresentava consideráveis problemas, devido à elevada toxicidade e inflamabilidade. Com o passar dos anos, as máquinas a operar com éter foram sendo progressivamente substituídas por equipamentos a utilizar amoníaco e dióxido de carbono. Foi precisamente o dióxido de carbono a atingir grande sucesso, quando em 1880, os cientistas alemães Franz Windhausen e Carl von Linde deram continuidade ao trabalho de T.S.C. Lowe, introduzindo-o em larga escala. Com excelentes propriedades termodinâmicas e termofísicas, apresenta como inconvenientes a baixa temperatura crítica ($31,7^{\circ}\text{C}$) e as elevadas pressões de operação requeridas. Uma vez que é uma substância não inflamável e não tóxica,

encontrou um vasto leque de aplicações, em especial na refrigeração marítima. Durante cerca de 60 anos granjeou de grande sucesso, contudo com o aparecimento dos CFC's perdeu espaço no mercado. Ironicamente, após a descoberta dos perigos de utilização de CFC's, o dióxido de carbono voltou em força e vai (re)conquistando o seu espaço no mercado.

Outro marco na história dos fluidos frigorígenos é a introdução do amoníaco. Em 1872 foi patenteado por David Boyle o primeiro ciclo de compressão com amoníaco, mas apenas em 1876, pela mão de Carl von Linde um sistema refrigerante utilizando amoníaco foi comercializado com sucesso. Considerado um dos mais importantes fluidos de trabalho, apresenta, à pressão atmosférica, um ponto de vaporização de 33,3°C, o que consequentemente obriga a uma pressão de operação muito superior à pressão atmosférica. Tem excelentes propriedades termodinâmicas e termofísicas, está facilmente disponível e é barato. Quanto a inconvenientes, tem a desvantagem da toxicidade e de ser ligeiramente inflamável, bem como um forte cheiro característico. A juntar a isto, é ainda incompatível com alguns materiais de construção como o cobre. Mesmo com estes inconvenientes, o amoníaco vai resistindo ao ataque do tempo, e de novas substâncias, mesmo no auge dos CFC's, e ainda hoje em dia é muito utilizado em grandes sistemas de refrigeração, bem como em pequenos frigoríficos, mas neste último caso apenas naqueles que funcionam segundo o princípio de absorção de vapor.

O final do século XIX, continuou a ser marcado por diversos progressos na área dos fluidos frigorígenos, e em 1874 Raoul Pictet introduziu o dióxido de enxofre. Rapidamente ganhou importância no mercado e foi muito utilizado em pequenos frigoríficos, como por exemplo, os frigoríficos domésticos. Com o ponto de evaporação nos 10°C, apresentava a enorme vantagem de ser auto-lubrificante, bem como não ser inflamável, sendo mesmo utilizado como elemento de combate ao fogo. A principal desvantagem apresentada é que o fluido não podia ter qualquer contacto com água, pois a sua presença iria induzir uma reacção química onde se forma ácido sulfúrico, o qual é altamente corrosivo. De modo a haver uma prevenção do aparecimento de ácido sulfúrico, para se trabalhar com dióxido de enxofre utilizava-se apenas compressores hermeticamente selados. [2] Apesar da popularidade que atingiram, quando apareceram os CFC's, caiu em completo desuso.

8.2 Os CFC's e HCFC's sintéticos

Nos primeiros anos da refrigeração artificial, como ilustrado, os refrigerantes sofriam de diversos problemas, a maioria dos quais ligados à toxicidade, inflamabilidade e elevadas pressões de trabalho. Estes defeitos dos fluidos de trabalho faziam com que fosse dificultada a comercialização em larga escala de equipamentos frigoríficos, o que fez notar que para o sucesso dos mesmos teria de “nascer” um fluido refrigerante capaz de suprimir todos estes defeitos. Foi com esta missão que Thomas Midgley, em conjunto com os seus associados, iniciou um estudo de forma a encontrar a solução para os problemas da indústria da refrigeração. Começando o estudo com apenas uma tabela periódica foram eliminando elementos de acordo com a sua insuficiente volatilidade, instabilidade e produção de gases tóxicos. Após isto, sobraram aqueles que ficaram conhecidos como os “Elementos de Midgley”, carbono, azoto, oxigénio, enxofre, hidrogénio, flúor, cloro e bromo. Dos referidos elementos, foi constatado que os refrigerantes anteriormente utilizados eram feitos de 7 deles, sendo que apenas o flúor não tinha ainda sido utilizado. Baseado nos seus estudos, Midgley e os seus colegas desenvolveram uma nova gama de refrigerantes, obtidos através da substituição parcial dos átomos de hidrogénio nos hidrocarbonetos por átomos de flúor e cloro. Esta fluoração e cloração de hidrocarbonetos permitiu variar as propriedades dos produtos obtidos de acordo com o desejado, escolhendo a volatilidade desejada, bem como influenciar a toxicidade e inflamabilidade.

O primeiro refrigerante comercial saído desta nova gama de Midgley foi o Freon-12, em 1931, obtido através da substituição de 4 átomos de hidrogénio no metano (CH_4) por 2 átomos de cloro e flúor, originando a composição CCl_2F_2 . Com um ponto de evaporação de $29,8^\circ\text{C}$, foi exclusivamente utilizado em pequenos frigoríficos domésticos, ar condicionado e arrefecedores de água, sendo um dos mais utilizados, e famosos, refrigerantes sintéticos. Passados 2 anos, seguiu-se a introdução do Freon-11 (CCl_3F) utilizado em grandes sistemas de ar condicionado. Após esta introdução, não mais pararam de chegar ao mercado estes compostos sintéticos, o que veio a trazer uma nova dificuldade aos fabricantes, a designação dos fluidos de trabalho.

Com esta cada vez maior oferta, surgiu a necessidade de passar a existir uma designação comercial para os produtos com base num sistema alfa numérico. Assim, por exemplo, o Freon-12, passou a ser designado R12. Novas normas entraram assim em vigor,

passando os refrigerantes a ser denominados/designados pela sua fórmula química ou pela sua designação numérica simbólica, e nunca pelo seu nome comercial. [2]

Esta designação numérica simbólica é estabelecida a partir da fórmula química da molécula do fluido, de acordo com a norma ASHRAE 34-1992, onde se segue as seguintes indicações:

- O primeiro dígito à direita, nos compostos sem bromo, indica o número de átomos de fluor;
- À esquerda do anterior, surge o dígito que indica o número de átomos de H+1;
- À esquerda do anterior, surge o dígito que indica o número de átomos de C-1, onde caso o resultado seja zero não é representado;
- Se a molécula possuir átomos de bromo, é acrescentado um B seguido do número de átomos de bromo no final do código anterior;
- Compostos azeotrópicos, ou seja, que resultam da mistura de dois fluidos refrigerantes, podem ser designados por um número da série 500, de forma arbitrária;
- Os algarismos de identificação dos refrigerantes de compostos orgânicos, obtêm-se a partir da soma de 700 mais o peso molecular, por exemplo, o Amónia é R717 pois o seu peso molecular é de 17g;
 - Quando existir mais do que um composto com o mesmo peso molecular utilizam-se as letras A, B, C, ..., como sufixos;
- Compostos mais complexos obedecem a outras regras que não são aqui abordadas.

De forma a clarificar esta designação, são apresentados dois exemplos práticos de designações de fluidos refrigerantes:

1) R22 (CHClF_2)

2 átomos de F

1 átomo de H

1 átomo de C

2) R134a ($\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$)

4 átomos de F

2 átomos de H

2 átomos de C [12]

A emancipação dos CFC's, revolucionou por completo a indústria da refrigeração e do ar condicionado, eliminando a maioria dos problemas dos frigorígenos primitivos, como a toxicidade, inflamabilidade e incompatibilidades de materiais. Estas melhorias, que viriam até a originar alcunhas como “gases maravilha” ou “frigorígeno ideal”, levaram a uma remoção praticamente total do mercado dos outros frigorígenos, com excepção do amoníaco. Durante 50 anos foram completamente dominadores do mercado, paralisando por completo a investigação de novos frigorígenos (não inseridos neste grupo dos CFC'S), que se julgava não ser necessária com este estatuto de perfeição alcançado.

Tudo se começou a alterar em 1974 quando Rowland e Molina apareceram com um tema até então desconhecido, a destruição da camada de ozono. Os seus estudos concluíram que a alta estabilidade dos clorofluorcarbonetos atacavam o ozono da estratosfera, destruindo a protecção natural do planeta contra os perigosos raios solares. [2] Com o avançar dos estudos nesta teoria, o problema dos CFC's atingiu rapidamente a escala global, o que levou a que as entidades governamentais se unissem na tentativa de banir estas substâncias do mercado. Deste modo, surgiu o Protocolo de Montreal, em que as substâncias com um grande efeito destrutivo na camada de ozono passavam a ser proibidas. Com o passar dos anos e uma maior preocupação ambiental, surgiria também outro termo que agora afecta o nosso planeta, o aquecimento global, o que levou a ainda mais restrições. Pode então ser dito que antes da entrada dos CFC's no mercado, um frigorígeno seguro era apenas aquele que não representava perigos para o utilizador, como a inflamabilidade e a toxicidade. Após o aparecimento dos CFC's, e o desenvolvimento de novas teorias ambientais, um frigorígeno seguro passou a ser não apenas aquele que não apresenta perigos directos para o utilizador, mas também aquele que não é perigoso para o ambiente, não tendo efeitos nocivos na camada de ozono ou contribuição para o “efeito-estufa”, e conseqüentemente para o aumento da temperatura média terrestre.

8.3 O pós CFC's

Após o afastamento dos CFC's, e com as preocupações ambientais em voga, começou a procura de fluidos frigorígenos com efeito 0 na camada de ozono, ou seja o *Ozone Depletion Potential* (ODP) de valor 0. Além disto, também o valor do potencial para o aquecimento global, *Global Warming Potential* (GWP), começou a ter sido em conta, e cada vez mais é procurado baixar este valor.

Posto isto, existem dois caminhos, a procura de substâncias sintéticas com ODP de 0, ou a utilização de substâncias naturais. Assim sendo, inseridos no primeiro caminho, surgiu a utilização de hidrofluorcarbonetos (HFC's), e suas misturas, enquanto que pela via natural, começou a surgir a utilização de dióxido de carbono, num ciclo supercrítico, água, vários hidrocarbonetos e suas misturas, bem como o amoníaco.

De momento, é atravessada uma fase de alguma incerteza no capítulo dos refrigerantes, com as alternativas aos CFC's a serem agora postas em causa. Inicialmente pareciam ser soluções adequadas, com valores 0 de ODP, como os HFC's. Contudo, estes tendem a apresentar valores elevados de GWP, contribuindo significativamente para o aquecimento global, e cada vez mais surgem regulamentações a limitar o seu uso, o que vai inevitavelmente traçar o seu fim no futuro próximo. Junto a isto, existe ainda a crescente preocupação com a eficiência na concepção dos novos equipamentos frigoríficos.

8.4 Critérios na escolha de um fluido refrigerante

Para a correcta escolha de um refrigerante para determinada aplicação, são seguidos alguns requisitos de várias origens:

- I. Propriedades termodinâmicas e termofísicas;
- II. Propriedades ambientais e de segurança;
- III. Custos.

8.4.1 Propriedades termodinâmicas e termofísicas

No que a este aspecto diz respeito, são vários os parâmetros de relevância a considerar aquando da escolha do fluido de trabalho, nomeadamente:

a) Pressão de vapor

Para uma determinada temperatura do evaporador, a pressão de vapor deve ser acima da pressão atmosférica para prevenir a entrada de ar ou humidade no sistema e facilitar a detecção de fugas. Uma maior pressão de vapor é desejável pois não será necessário um trabalho de compressão tão elevado;

b) Pressão de condensação

Para uma determinada temperatura do condensador, a pressão de condensação deve ser o menor possível para permitir uma construção mais leve do

compressor e condensador. Deve também corresponder a uma temperatura claramente inferior ao ponto crítico de modo a facilitar a condensação;

c) Relação de compressão

Deve ser o menor possível para uma elevada eficiência volumétrica e um menor consumo energético;

d) Calor latente de vaporização

Deve ter o valor o mais elevado possível para que o caudal mássico por unidade de capacidade de refrigeração possa ser o mais pequeno possível;

e) Índice de compressão isentrópico

É desejável que seja o menor possível para o aumento de temperatura durante a compressão ser inferior;

f) Calor específico na fase líquida

Pretende-se que seja o mais baixo possível para que o grau de subarrefecimento seja elevado para existir menor quantidade de gás na entrada do evaporador;

g) Calor específico na fase de vapor

Deve ser elevado para o sobreaquecimento ser menor;

h) Condutividade térmica

Tanto na fase líquida como na fase de vapor, a condutividade térmica deve ser elevada para um maior coeficiente de transferência de calor;

i) Viscosidade

É pretendido que seja reduzida para diminuir a queda de pressão devido ao atrito.

As propriedades termodinâmicas estão interligadas e maioritariamente dependentes do ponto de evaporação, temperatura crítica, peso e estrutura molecular. O ponto normal de evaporação indica os níveis úteis de temperatura pois está directamente relacionado com a

pressão de operação. Uma temperatura crítica elevada favorece um EER elevado devido ao sobreaquecimento reduzido. Por outro lado, como a pressão do vapor é mais baixa quando a temperatura é elevada, a capacidade volumétrica será inferior para os refrigerantes com uma temperatura crítica alta.

Propriedades importantes como o calor latente de vaporização e calor específico dependem da estrutura e peso molecular, sendo mais elevado em estruturas moleculares mais leves. Por sua vez, o ponto de solidificação deve ser inferior à temperatura mais baixa de operação para prevenir o bloqueio das condutas.

8.4.2 Propriedades ambientais e de segurança

Tal como as propriedades termodinâmicas e termofísicas, as propriedades ambientais e de segurança são muito importantes, sendo hoje em dia decisivas para a escolha do refrigerante a utilizar, pois são inclusive medidas de segurança ambiental que retiraram do mercado muitos dos refrigerantes utilizados e que dominavam o mercado, como o infame caso dos CFC's. Deste modo, as propriedades a ter em conta são:

a) *Ozone Depletion Potential* (ODP)

O efeito de um refrigerante na camada de ozono é uma das grandes preocupações em termos legislativos que limitam a sua utilização. De acordo com o Protocolo de Montreal, o ODP de um refrigerante deve ser 0, em caso contrário não poderá ser utilizado. Como este valor depende essencialmente da presença de cloro e bromo nas moléculas, os fluidos com estes elementos não podem ser utilizados à luz das novas regulamentações;

b) *Global Warming Potential* (GWP)

Após o choque da destruição da camada de ozono, chegou a problemática do aquecimento global, sendo a contribuição para este efeito cada vez mais um factor limitativo da utilização de diversas substâncias. É pretendido que este valor seja o mais reduzido possível, com uma tendência de conversão dos limites regulamentares para 0, o que levará num futuro próximo a uma continuada revolução no sector dos fluidos refrigerantes;

c) *Total Equivalent Warming Index (TEWI)*

Este factor, é cada vez mais também um conceito que se vai instalando tal como o ODP e o GWP na análise de um frigorígeno. Ao contrário dos anteriores que atendem apenas a um parâmetro, o TEWI considera o contributo directo, com a descarga para a atmosfera, e o indirecto, através do consumo de combustível, do fluido para o aquecimento global. Naturalmente, é aqui preferível um valor baixo;

d) Toxicidade

Idealmente, o frigorígeno deveria ser não-tóxico, contudo isto não é possível pois todos os fluidos, com excepção do ar atmosférico, podem ser considerados tóxicos pois podem levar o ser humano a sufocar, dependendo da sua concentração. Assim sendo, o termo toxicidade é bastante relativo, dependendo da concentração e do tempo de exposição. Existem fluidos que são tóxicos mesmo em pequenas quantidades, enquanto outros apenas o são em grandes concentrações e exposição prolongada. Por outro lado, existem ainda substâncias, como os CFC's que não sendo tóxicos misturados com o ar, quando expostos a uma chama, decompõem-se formando elementos altamente tóxicos;

e) Inflamabilidade

Preferencialmente, os frigorígenos deverão ser não inflamáveis e não explosivos. Em caso de a escolha recair num elemento inflamável, deverão ser tomadas precauções adicionais para evitar acidentes;

f) Estabilidade química

Deve ser apresentada estabilidade química durante todo o período de presença no sistema de refrigeração;

g) Compatibilidade

É também importante a compatibilidade com os materiais de construção, metálicos e não-metálicos;

h) Miscibilidade com o óleo lubrificante

Frigorígenos completamente miscíveis com o lubrificante são de mais fácil manuseamento. Caso não sejam miscíveis, deve ser utilizado um separador de óleo à saída do compressor;

i) Rigidez dielétrica

Esta é uma propriedade de relevo em sistemas que utilizam um compressor hermético, devendo neste caso o valor da rigidez dielétrica ser o mais elevado possível;

j) Facilidade de detecção de fugas

Em caso de uma fuga de frigorígeno do sistema, esta deve ser facilmente detectável.

8.4.3 Custos

Preferencialmente, o fluido frigorígeno deve apresentar um custo baixo e estar facilmente disponível. Este factor é de momento bastante preponderante, em especial para equipamentos que são mais difundidos pela população em geral devido à crise económica.

8.5 Grupos de segurança

Actualmente, um dos parâmetros decisivos, como anteriormente expresso, são os critérios de segurança, não só para o operador mas também para o ambiente. Posto isto, é com naturalidade que a *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers* (ASHRAE), apresentou uma elaboração de grupos de segurança que é hoje em dia globalmente aceite. Esta classificação da sociedade norte americana, a norma ASHRAE 34-92, visa a segurança de bens materiais, e seres humanos, classificando os frigorígenos de acordo com o seu nível de toxicidade e inflamabilidade.

Deste modo, a cada frigorígeno é atribuída uma designação alfa numérica, onde o primeiro carácter é uma letra maiúscula que caracteriza o seu nível de toxicidade, seguindo-se-lhe um algarismo que indica o seu grau de inflamabilidade. Dependendo do seu grau de toxicidade para concentrações abaixo de 400ppm (partes por milhão), os compostos são classificados em dois grupos:

- Classe A: compostos cuja toxicidade não foi identificada;
- Classe B: foram identificadas evidências de toxicidade.

Em relação ao nível de inflamabilidade, existem três níveis possíveis de classificação:

- Classe 1: não se observa propagação de chama em ar a 18°C e 101,325 kPa;
- Classe 2: limite inferior de inflamabilidade superior a 0,10kg/m³ a 21°C e 101,325 kPa, poder calorífico inferior a 19000 kJ/kg;
- Classe 3: inflamabilidade elevada, caracterizando-se por um limite inferior de inflamabilidade inferior ou igual a 0,10kg/m³ a 21°C e 101,325 kPa, para poder calorífico superior a 19000 kJ/kg.

8.6 Regulamentação legislativa

Atualmente, com as preocupações ambientais em voga e com acordos, como o inicial Protocolo de Montreal a delimitar cada vez mais o uso de substâncias que lesam o ambiente, a exigência é cada vez maior. Já com ordem de retirada do mercado devido a estas limitações estão os CFC's e HCFC's devido ao seu potencial destruidor da camada de ozônio, ODP. Com esta problemática já quase resolvida, as atenções centram-se agora nas substâncias que contribuem para o aquecimento global, com elevado GWP, e ainda para o uso de refrigerantes que permitam maiores eficiências energéticas. Estamos portanto perante uma época de mudanças no campo dos refrigerantes, após a retirada dos CFC's, continuam ainda as retiradas de fluidos do mercado.

8.6.1 Limitação de utilização

Ao nível de legislação aplicada aos fluidos refrigerantes, o utilizador depara-se inicialmente com especial relevância no CE nº2037/2000, que veio regular a utilização dos refrigerantes CFC e HCFC. Assim sendo, os CFC's estão proibidos desde 1 de Outubro de 2000. Este regulamento, decretou também o fim do famoso R22, um dos fluidos mais utilizados no mercado, aqui surge a decretação da proibição de venda para o ano 2004, a proibição de utilização virgem para serviço e manutenção em 2010 e a sua retirada por completo de circulação em 2015. [13]

De acordo com o mesmo regulamento do Parlamento Europeu e do Conselho, de 29 de Junho, a partir de 1 de Janeiro, os CFC's recuperados começaram a ter como único fim a sua destruição, a partir de tecnologias ambientalmente adequadas. Em relação aos já mencionados

HCFC's, os mesmos podem, além da destruição, ser ainda reutilizados até 1 de Janeiro de 2015. A partir desta data, todos os hidroclorofluorcarbonetos passam a estar proibidos.

Com o assunto relativo aos gases que contribuem para a destruição da camada de ozono já resolvido, as atenções estão agora, como referido, viradas para os gases fluorados com efeito estufa. Nesta temática, surge o Regulamento (UE) N°517/2014, que entrará em vigor a 1 de Janeiro de 2015, aprovado pelo Parlamento Europeu e Conselho a 16 de Abril de 2014 e que veio substituir o Regulamento (CE) n°842/2006.

Com medidas tidas como drásticas, e sob o alerta do Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre as Alterações Climáticas, e com o intuito de limitar a 2°C o aumento da temperatura por via das alterações climáticas a nível mundial e evitar, assim, efeitos indesejáveis no clima, os países desenvolvidos terão de reduzir as emissões de gases com efeito estufa entre 80% e 90% até 2050, em comparação com os níveis de 1990.

Neste mesmo regulamento, é ainda mencionado que caso existam alternativas adequadas a determinados gases fluorados com efeito de estufa, deverá ser proibida a sua colocação no mercado, quer em novos equipamentos de refrigeração, ar condicionado e protecção contra incêndios, exceptuando casos que não existam alternativas viáveis ou acarretem estas custos desproporcionados. É também autorizada a colocação no mercado dos equipamentos que contenham gases fluorados com efeito de estufa se as suas emissões globais, tendo em conta taxas de fuga e de recuperação realistas, forem inferiores durante o seu ciclo de vida às que resultariam de equipamentos equivalentes sem gases fluorados com efeito estufa. [14]

Além destas medidas tomadas na União Europeia, do outro lado do Atlântico os hidrofluorcarbonetos (HFC's), como o R404a, podem ter também os dias contados. A *US Environmental Protection Agency* (EPA) vai propor a retirada dos HFC's frigorígenos do mercado, através de um limite do valor GWP para níveis mais baixos, impossibilitando desta forma a utilização de fluidos de trabalho como o R404a e o R134a.

Deste modo, está patente que o futuro não passará pelos frigorígenos com elevado contributo para o aquecimento global, que neste momento ocupam uma grande cota do mercado, com os dois gigantes de ambos os lados do Atlântico a marcar a tendência no

combate a estas substâncias. Desta forma, a indústria está perante uma era de mudança, procurando-se as melhores alternativas a estes fluidos.

Uma compilação de algumas das mais importantes medidas está presente na Tabela 9.

Tabela 9 – Datas marcantes na regulamentação dos frigorígenos

Data	Medida
1985	Lançamento das bases, em Viena, para um futuro protocolo de protecção ambiental;
1987	Assinatura do Protocolo de Montreal, que determina o abandono dos halons até 1992 e reduções na produção e consumo dos CFC's, em 50% até 2000, com vista à sua retirada;
1990	Emenda de Londres ao Protocolo de Montreal, determinando o fim da produção de CFC's em 2000;
1992	Em Copenhaga, é determinada o fim de produção e utilização de HCFC's até 2030, a completa proibição dos CFC's até 1996 e o congelamento da produção e consumo de brometo de metilo até 1995;
1997	Nova emenda, desta feita em Montreal, banindo o brometo de metilo em países industrializados até 2005 e restantes em 2015. HCFC's sem produção a partir de 2025;
2006	Comité de Avaliação Científica antecipa para 2020 a supressão da produção de HCFC's, sendo impossibilitada a utilização virgem a partir de 2010;
2014	Regulamento (UE) N°517/2014 visa combater os HFC's, com limitações a começarem já em 2015.

8.6.2 Detecção de fugas

Como já mencionado, num equipamento frigorífico, é de extrema importância a detecção de fugas do frigorígeno, devido aos diversos perigos que podem originar para os utilizadores, bem como para o meio ambiente. Daí, adveio a necessidade de uma regulamentação do processo de detecção de fugas. Tal foi introduzido pela Comissão Europeia, que emitiu um decreto, o n°1516/2007 e, estabeleceu, nos termos do Regulamento (CE) n° 842/2006, disposições normalizadas para a detecção de fugas em equipamentos fixos de refrigeração, com especial ênfase nos gases fluorados com efeito estufa. Ressalva ainda, para que este regulamento não se aplica aos equipamentos hermeticamente fechados, que estejam rotulados como tal, e que contenham menos de 6kg de gases fluorados com efeito de estufa.

Os controlos sistemáticos, são uma das medidas defendidas pelo regulamento, (em destaque no artigo 4º) e refere que devem ser controladas as seguintes partes dos equipamentos de refrigeração:

1. Juntas;
2. Válvulas, incluindo hastes;
3. Vedantes, incluindo em secadores e filtros amovíveis;
4. Partes do sistema sujeitas a vibração;
5. Ligações a dispositivos de segurança ou funcionamento.

Em relação à medição de fugas, existem dois métodos generalistas, os métodos directos, que podem ser utilizados em todas as situações, e os métodos indirectos, que só podem ser aplicados quando os parâmetros dos equipamentos a analisar contenham informações seguras sobre a carga de gases fluorados com efeito estufa indicada nos registos dos equipamentos e não existir qualquer suspeita de fuga.

Os métodos directos, englobam assim, a verificação dos circuitos e componentes que apresentam risco de fuga, com dispositivos de detecção de gases adaptados ao sistema, a aplicação de fluido de detecção de ultravioletas (UV) ou de um corante adequado no circuito, e ainda a aplicação exterior de soluções exclusivas de espuma/água com sabão. De salvaguardar ainda que a aplicação de fluidos de detecção UV ou corantes adequados no circuito de refrigeração está dependente da aprovação do fabricante dos equipamentos, indicando que tais métodos são tecnicamente possíveis. O método será aplicado apenas por pessoal acreditado para o exercício de actividades que impliquem a violação de circuitos de refrigeração que contêm gases fluorados com efeito de estufa.

Os métodos indirectos, aplicados apenas nas condições já mencionadas, consistem em controlos visuais e manuais dos equipamentos, com uma análise de um, ou mais, dos parâmetros seguintes:

- a) Pressão;
- b) Temperatura;
- c) Corrente do compressor;
- d) Níveis de líquido;
- e) Volume de recarga.

Caso exista qualquer mínima suspeita de fuga de gás fluorados com efeito estufa, deve proceder-se à verificação utilizando um método directo.

Após a detecção da fuga, o próximo passo é também de extrema importância, a reparação da fuga. Esta apenas deve ser efectuada por pessoal acreditado para o desempenho dessa actividade específica. Além disto, antes de se proceder à reparação, é sempre necessário proceder-se à bombagem, ou à recuperação. Assim sendo, após a remoção dos gases fluorados com efeito estufa de toda a aplicação, pode assegurar-se a estanqueidade com um ensaio com azoto isento de oxigénio, ou outro gás adequado para a verificação de pressão e secante, seguido da evacuação, recarga e detecção de fugas. Na medida do possível, deve identificar-se a causa da fuga, para evitar a repetição do problema. [15]

9. Estudo comparativo de dois fluidos frigorígenos

Como referido inicialmente, o objectivo expressado, é a comparação, com o intuito de provar a utilidade do R290, na substituição do R404a em actividade, uma vez que de acordo com a legislação apresentada no capítulo 9.6, o mesmo terá em breve uma regulamentação que começará a limitar a sua utilização, com vista a uma futura retirada do mercado. Substancialmente diferentes, é agora apresentada neste capítulo uma descrição de ambos os fluidos, bem como um estudo comparativo de ambos.

9.1 R404a

O R404a, é uma mistura não azeotrópica de pentafluormetano, R125, em 44%, tetrafluormetano, R134a, em 4% e trifluormetano, R143A, em 52%. Surgiu na indústria em meados dos anos 90, como substituto do R502 e do R12, ambos CFC's, e posteriormente substituiu também o R22, um HCFC, e um dos mais utilizados frigorígenos no passado.

Sendo uma substância zeotrópica, em fase de vapor, a composição da mistura altera-se, com possíveis consequências para a instalação, o que requer que o carregamento seja feito em fase líquida. O facto de não ser prejudicial à camada de ozono, foi fundamental para a sua grande popularidade, ao que se junta uma baixa toxicidade e a não inflamabilidade. De acordo com o indicado, a ASHRAE, incluiu o R404a, no grupo de Segurança A1, destinado aos fluidos com baixa toxicidade e ausência de propagação de chama, no que à inflamabilidade diz respeito. [16]

Em relação à sua utilização, esta é essencialmente em aplicações de temperaturas médias e baixas, sendo que tanto é aplicado a nível comercial, como industrial e doméstico, sendo por isso um frigorígeno global, com um leque muito variado de aplicações, desde os frigoríficos domésticos aos expositores comerciais e até mesmo às pistas de patinagem no gelo artificiais, o que em Portugal apenas agora começa a entrar na moda na época natalícia, mas que em países com tradições desportivas no gelo é um mercado bastante importante. Também é utilizado em transportes refrigerados. No que diz respeito à sua carga no sistema, é indicado ser feita em estado líquido, sobre a linha de líquido. Por outro lado, o enchimento pode ser também feito em estado gasoso, sobre a linha de vapor e com o compressor em funcionamento.

No que à lubrificação diz respeito, é altamente recomendada a utilização de óleo lubrificante POE, um lubrificante sintético baseado em ésteres de polióis indicado para refrigerantes sem cloro, como o caso do mencionado. Este tipo de lubrificante, é miscível com o refrigerante, o que é extremamente importante e não aconteceria com um óleo mineral. Em comparação com estes, os óleos de polióis, são cerca de 100 vezes mais higroscópicos, ou seja, vão absorver muita mais humidade, o que mesmo com recurso a vácuo e calor é de difícil remoção do sistema. Isto, exige então um cuidado acrescido para impedir que a humidade penetre no compressor, sendo de evitar, por exemplo, aberturas do compressor durante um período temporal superior a 15 minutos. [17]

Com uma massa molar de 97,6 kg/kmol, o R404a, tem o seu ponto de evaporação (a 0,1013MPa) aos $-46,45^{\circ}\text{C}$, com uma temperatura crítica de $72,07^{\circ}\text{C}$, e uma pressão de 3,73MPa. No Anexo 1 está presente o Diagrama de Mollier do R404a.

Também de grande relevo no panorama actual é o impacto ambiental, e neste caso temos um ODP de 0, ou seja, não tem qualquer impacto na camada de ozono, e um GWP de 3260, o que é um valor bastante elevado e que devido às novas regulamentações europeias que entram em vigor a 1 de Janeiro de 2015 vão limitar, com vista a uma retirada do mercado, os equipamentos que operam com este refrigerante. [16]

Para o seu manuseamento, estão identificadas situações potencialmente perigosas para os operadores, como o risco de asfixia em altas concentrações, o que realça ainda mais a importância da prevenção, pois o gás libertado é mais pesado que o ar, e por isso pode acumular-se em espaços confinados, em especial ao nível do solo, ou abaixo deste. É inodoro, e por isso impossível de detectar pelo olfacto do operador. São também identificadas as vias de exposição na pele e nos olhos. Apesar de não ser uma substância considerada como tóxica, em caso de contacto com as referidas vias, é recomendada uma abundante lavagem com água, durante 15 minutos, bem como a obtenção de ajuda médica. Em relação à exposição ao fogo, a mesma pode provocar a rotura e/ou explosão dos recipientes, sendo que em caso de incêndio, podem formar-se gases corrosivos e/ou tóxicos como o fluoreto de hidrogénio, cloreto de hidrogénio e monóxido de carbono. Assim sendo, em caso de combate a um incêndio, é adequado utilizar equipamento de respiração autónomo de pressão positiva, sendo que todos os agentes de extinção conhecidos podem ser utilizados no combate às chamas.

Em caso de fugas acidentais, a área deve ser evacuada, sendo necessário assegurar a adequada ventilação da mesma para o retomar da normalidade. No que ao perigo ambiental diz respeito, é necessário impedir a entrada do produto em fossas, caves ou qualquer outro lugar onde a sua acumulação possa ser perigosa.

Para o correcto, e seguro, manuseamento e armazenamento da substância, são também necessárias algumas medidas para que ocorram em total segurança. No que diz respeito à protecção individual, é recomendada a protecção de olhos, rosto e pele, de modo a prevenir que uma eventual projecção de líquido atinja o operador. Como forma de protecção das vias respiratórias, é necessário a utilização de equipamento respiratório adequado, enquanto que para as mãos, é indicada a utilização de luvas criogénicas. Para a adequada protecção da pele, em caso de possível contacto, deve ser utilizada roupa de protecção, incluindo as já referidas luvas, avental, mangas, botas e ainda protecção de cara e cabeça, incluindo óculos de segurança. Durante a manipulação, deve ser aberta lentamente a válvula do recipiente, de modo a evitar o choque de pressão, deve ainda ser impedida a entrada de água no recipiente, não permitir o retorno de produto para o mesmo, e utilizar somente equipamentos com especificações apropriadas a este produto e à sua pressão e temperaturas, bem como seguir à risca todas as instruções do fornecedor. Para um correcto armazenamento, o recipiente deve ser colocado num local bem ventilado, a temperaturas inferiores a 50°C. [16]

9.2 R290

Com o aumento das discussões ambientais, os hidrocarbonetos têm ganho relevância no campo dos fluidos refrigerantes. Com um potencial de destruição da camada de ozono nulo, apresentam também um insignificante potencial de aquecimento global, ao mesmo tempo que possuem propriedades termodinâmicas muito favoráveis. Além disso, têm ainda uma boa compatibilidade com os óleos lubrificantes, podendo ser aplicados com compressores herméticos e semi-herméticos. Em relação aos materiais de construção, é também compatível com os mais usuais, sendo apenas de evitar o zinco e ligas com percentagens de magnésio superiores a 2%. Posto isto, existe aqui um grande potencial de uma alternativa aos refrigerantes livres de cloro, os HFC's, que contribuem significativamente para o aquecimento global. Como desvantagem, apresentam muitas vezes a sua inflamabilidade, o que obriga a uma especial atenção às normas de segurança, desde o projecto, construção e operação, o que acaba por limitar a sua aplicação.

Neste campo de hidrocarbonetos utilizados como refrigerantes, surge o propano, neste meio identificado pela nomenclatura R290. Com uma longa história na refrigeração, era utilizado já antes do aparecimento dos CFC, tendo depois perdido espaço no mercado para estes. Com a sua retirada pelas questões já referidas, tem vindo a conquistar novamente o seu espaço, sendo agora uma alternativa viável aos mais utilizados refrigerantes no mercado.

O R290 apresenta uma baixa toxicidade, sendo potencialmente explosivo entre os limites de ignição entre 1,7 e 10,9% do volume no ar, ou seja, apenas numa faixa bastante restrita. Como foi referido, é compatível com os lubrificantes convencionais e óleos de éster, apresentando uma solubilidade muito elevada, o que favorece a circulação do óleo no sistema. Por outro lado, pode haver uma considerável diminuição da viscosidade do óleo no compressor, principalmente com a baixa temperatura do óleo e elevada pressão de sucção, o que pode ser combatido utilizando um óleo de viscosidade básica mais elevada. Deste modo, em virtude da alta solubilidade do R290 nos lubrificantes tradicionais, os compressores com R290 são carregados com óleo Polialfaolifina (PAO) com menor solubilidade, menor pressão de vapor e viscosidade uniforme sobre a temperatura.

O refrigerante com alto nível de pureza, não contém nenhum elemento com tendência a formação de ácido e, conseqüentemente, é menos crítico em relação às reações químicas. Entretanto, o alto índice de humidade deve ser evitado, caso contrário existe o perigo de ocorrer cristalização. Com alta pressão e baixa temperatura a hidratação do gás também pode ocorrer na fase líquida. Evitar, o quanto possível, qualquer mistura de aditivo no refrigerante e a presença de gases inertes. Para a prevenção de tais problemas devem ser postas em prática medidas como a utilização de propano com qualidade "2.5" ou compatível. É assim necessária a instalação de um filtro secador generosamente dimensionado e com projeto e dimensões de acordo com as instruções dos fabricantes e instalação de um visor de líquido com indicador de humidade que forneça uma indicação definida do estado de "desidratação" do R290 (< 50 ppm). Para teste de vazamentos com alta pressão, deve ser utilizado preferencialmente o nitrogênio seco. Se for utilizado ar seco, o compressor deve ser isolado durante este procedimento (as válvulas de serviço deverão permanecer fechadas). Utilizar bomba de vácuo de duplo estágio (é necessário 1,5 mbar de vácuo mínimo) e com grandes conexões de acesso, manter as válvulas de serviço do compressor fechadas até o último processo de evacuação.

A instalação e manutenção dos sistemas com R290, que deve apenas ser realizada por

técnicos autorizados, requerendo também algumas considerações como ventilação do espaço de trabalho quando se realiza alguma intervenção no equipamento, a soldadura de tubulações e conexões, que deve ser realizada juntamente com um gás de protecção (nitrogénio seco), e tanto quanto possível, evitar o uso de tubos capilares e utilizar apenas tubagens metálicas. [18]

Em relação aos cuidados a ter com o manuseamento e utilização do R290, estão identificados alguns cuidados a ter, uma vez que é considerado um gás extremamente inflamável, tendo risco de explosão sob acção do calor. É apresentada como forma de prevenção, manter afastado de qualquer fonte do calor, faíscas, chama aberta e superfícies quentes, bem como a proibição de fumar perto de onde seja utilizado. Como resposta a incêndio por fuga de gás, não é aconselhado o combate às chamas caso não seja possível estancar a fuga em segurança. Para um correcto armazenamento, este deve ser feito em local bem ventilado.

No que diz respeito à exposição ao gás através da inalação, este pode causar asfixia em concentrações elevadas, sendo comuns sintomas como perda de conhecimento e motricidade, podendo a vítima não ter percepção da asfixia. Em concentrações menores pode ter efeitos narcotizantes, apresentando sintomas como vertigens, dor de cabeça, náuseas e perda de coordenação. Em ambos os casos é aconselhado retirar a vítima da área contaminada e utilizar equipamento de respiração autónomo, mantendo a vítima quente e em repouso. Deve ser chamado auxílio médico, e aplicar respiração artificial se a vítima parar de respirar. Em caso de contacto, em estado líquido, com a pele e os olhos, deve a zona de contacto ser abundantemente lavada durante, pelo menos, 15 minutos. A ingestão não é considerada como uma via de potencial exposição.

Em caso de incêndio, deve ter-se presente que os fumos gerados são perigosos, como monóxido de carbono em caso de combustão incompleta, podendo o fogo iniciar-se a uma certa distância da fuga. A exposição ao fogo, pode provocar rotura e/ou explosão dos recipientes. Para o combate ao incêndio, podem utilizar-se todos os agentes de extinção conhecidos, sendo aconselhado eliminar a fuga do produto. O recipiente que contém o propano deve ser arrefecido com água, protegendo-se sempre atrás de uma parede para o fazer. É também necessário ter presente que não é aconselhável extinguir uma fuga de gás inflamada, a menos que seja absolutamente necessário, pois pode-se reproduzir reinflamação espontânea e explosiva. Para o

combate ao incêndio, devido aos gases gerados, deve utilizar-se equipamento de respiração autónoma de pressão positiva.

Caso aconteça uma fuga accidental, é necessário utilizar equipamento de respiração autónoma de pressão positiva, a não ser que se comprove que a atmosfera é respirável. A área deve ser evacuada, assegurada a ventilação de ar e eliminadas as possíveis fontes de ignição. Por questões ambientais é necessário impedir a entrada do produto em esgotos, fossas, caves ou qualquer outro lugar onde a sua acumulação possa ser perigosa.

Para uma correcta manipulação do fluido, deve ser evitada a acumulação de cargas electrostáticas, impedir a entrada de água no recipiente, purgar o ar da instalação antes de introduzir o gás, não permitir o retorno do produto para o recipiente, utilizar somente equipamentos com especificação apropriada a este produto e à sua pressão e temperatura de fornecimento e manter ao abrigo de toda a fonte de inflamação, incluindo as referidas cargas electrostáticas. No que diz respeito ao armazenamento, em armazém, os gases oxidantes devem estar separados de outros produtos oxidantes. O local deve ser bem ventilado e com temperatura inferior a 50°C.

A protecção individual dos operários que manuseiam o R290 deve ser assegurada recorrendo a luvas, vestuário de protecção adequado, óculos e sapatos de segurança. Para o seu transporte deve ser assegurado que a válvula está fechada e não tem fugas, que o tampão de saída da válvula está correctamente instalado, bem como o seu dispositivo de protecção. Além disto, deve ser cumprida toda a legislação em vigor.

Em relação ao seu fim de vida, este não deve ser descarregado em locais onde haja o perigo potencial de formar uma mistura explosiva com ar. O gás descarregado deve ser queimado em queimador apropriado, equipado com dispositivo de anti-retorno de chama.

No que diz respeito à sua utilização, existem algumas limitações à quantidade, em massa de gás presente no sistema por motivos de segurança, expressos na Norma EN 378, limitando a 1,5kg em áreas públicas e 2,5kg em áreas comerciais privadas, podendo ser aumentado para 10kg. Caso se trate de uma área comercial industrial o limite poderá ser de 25kg. Em sistemas herméticos fechados com área bem ventilada não existe carga máxima definida. [19]. No Anexo 2 está presente o respectivo diagrama de Mollier.

9.3 Análise comparativa

Actualmente, como foi já referido, o cerco aos HFC's, como o R404a está a apertar e urge garantir a sua substituição progressiva, começando a sua retirada obrigatória do mercado em 2020. Neste lote de alternativas, surge o R290 que vai de acordo ao actualmente pretendido pelos refrigerantes. Com efeito nulo na destruição da camada de ozono e desprezável efeito para o aquecimento global, é com naturalidade que o propano puro é olhado como uma alternativa de futuro, correspondendo também aos, muito importantes, critérios alta eficiência e conforto, emitindo pouco ruído e baixo impacto ambiental. [20] O seu potencial de substituir, com ganhos de desempenho, o R404a, em especial nos equipamentos mais ligeiros, é enorme.

Como ponto de partida para esta análise comparativa, a Tabela 10, mostra algumas das características dos dois refrigerantes, permitindo, desde já, notar algumas diferenças óbvias.

Tabela 10 – Comparação entre R404a e R290

Frigorígeno	Massa Molar [kg/kmol]	Temperatura Crítica [°C]	Pressão Crítica [kPa]	Ponto de Vaporização Normal [°C]	Grupo Segurança ASHRAE
R404a	97,60	72,15	3735	-46,45	A1
R290	44,10	96,7	4284	-42,10	A3

Daqui é imediatamente perceptível, algumas diferenças importantes, como a grande diferença da massa molar, bem como a temperatura e pressão crítica superiores do R290, o que caso fosse necessário utilizar uma pressão superior seria benéfico para uma mais fácil condensação. Em relação ao ponto de evaporação normal das substâncias, este difere apenas em cerca de 4 graus. Na questão dos grupos de segurança, devido à maior inflamabilidade do R290, este é cotado no grupo A3, enquanto que o R404a, se fica pelo A1.

Muitas vezes descurado, o parâmetro do ruído de um equipamento frigorífico é um aspecto muito importante, não só em equipamentos domésticos, como também na área comercial. Apesar de ser um parâmetro subjectivo, o som produzido pelo equipamento é imediatamente recebido, e perceptido, pelo ser humano, podendo em muitos casos ser prejudicial ao bem estar. Além destes requisitos, num aspecto de conforto, em certos espaços, como hospitais, um equipamento mais silencioso pode mesmo ser obrigatório, e aqui, o R290, assume-se claramente como a escolha certa.

Apesar de os compressores que operam o R404a serem compatíveis com o R290, é recomendável não fazer uma substituição directa, isto é, retirar o R404a de um ciclo onde opera e após isto fazer o enchimento com R290. Devido às suas especificidades, tal poderia originar problemas, pelo que todo o sistema deve ser revisto antes de proceder à substituição.

Além do limite imposto pela legislação que obrigará à retirada do mercado no futuro do R404a, o R290 apresenta uma outra vantagem, em operação, para uma determinada temperatura, requer uma pressão de trabalho mais baixa, o que é notoriamente uma grande vantagem. Na Tabela 11 está presente essa mesma diferença para três temperaturas diferentes.

Tabela 11 – Pressões de trabalho a diferentes temperaturas

Temperatura [°C]	Pressão [kPa]	
	R404a	R290
-40	132,7	111
10	820	636,4
60	2871	2116

Estas menores pressões de trabalho, e maior eficiência, apesar de parecer um parâmetro não muito importante para o leigo utilizador, vão permitir uma poupança energética e, conseqüentemente, monetária significativa.

Esta diferença de eficiência ficou patente já no longínquo ano de 2000, quando um grupo multinacional de engenheiros aproveitou as Olimpíadas de Sidney, na Austrália, e um período temporal compreendido entre Dezembro do mesmo ano e Março de 2001, em vários pontos do território Australiano, para testar arcas congeladoras exactamente iguais, operando umas com R290 e outras com R404a, tendo as primeiras consumido, em média, menos 9% de energia, um excelente resultado com efeito directo na conta eléctrica do utilizador. [21]

Estudos recentes, continuam a provar a utilidade do R290, sendo que a sua performance meramente comparativa em relação ao R404a, está apresentada na Tabela 12, em que como ponto de comparação é tido o já ultrapassado, por questões ambientais pois é um CFC, R22.

Tabela 12 – Performance comparativa de diferentes refrigerantes

Item a comparar	R22	R404a	R290
Pressão	Aceitável	Problemática	Aceitável
Temperatura de descarga	Problemática	Boa	Boa
Capacidade volumétrica	Boa	Boa	Boa
EER	Aceitável	Problemática	Aceitável

No que diz respeito ao preço dos fluidos refrigerantes, este depende muito da sua proveniência, pelo que um recipiente que provém de um fabricante de renome tem sempre um preço mais elevado. Isto torna um pouco mais difícil fazer um ponto de comparação, pois, além de poucos fabricantes fornecerem livremente os preços de venda, estes mesmos fabricantes não produzem os dois refrigerantes, que são eles substancialmente diferentes, posto isto, a análise de custos fica bastante complicada, sendo apresentados na Tabela 13, preços disponibilizados no mercado para o caso em estudo.

Tabela 13 – Comparação de preços

Refrigerante	Marca	Quantidade [kg]	Preço [\$]
R404a	<i>A-Gas</i>	10,886	100
R290	<i>FrostyCool</i>	13,608	149

Atendendo agora a quatro situações de utilização de ambos os refrigerantes, será feita mais uma comparação, desta vez, tendo em conta várias implicações, como efeitos nocivos, ou futuras retiradas de mercado. Antes de mais, são agora apresentadas as 4 situações alvo de estudo, na Tabela 14, onde cada uma delas será explorada com duas diferentes cargas de fluido refrigerante, variando, em massa, entre 2kg e 30kg:

- 1) Equipamento de refrigeração, com temperaturas inferiores a -50°C , hermeticamente selado, com sistema de deteção de fugas e com refrigerante virgem;
- 2) Equipamento de refrigeração, com temperaturas superiores a -50°C com refrigerante reciclado;
- 3) Unidade de refrigeração de veículo móvel, com temperaturas inferiores a -50°C , com refrigerante virgem;
- 4) Unidade de refrigeração de veículo móvel, com temperaturas superiores a -50°C , hermeticamente selado, com sistema de deteção de fugas e com refrigerante reciclado.

Tabela 14 – Situações de estudo

Situação	Frigorígeno	Massa fluido [kg]	GWP	CO ₂ e [kg]	Retirada do mercado	Frequência de verificação de fugas
1	R290	5	3	15		Não necessita
1	R290	20	3	60		Não necessita
1	R404a	5	3922	19 610		Início a 31/12/16
1	R404a	20	3922	78 440		12 Meses
2	R290	2	3	6		Não necessita
2	R290	30	3	90		Não necessita
2	R404a	2	3922	7 844		Início a 31/12/16
2	R404a	30	3922	117 660	2030	6 Meses
3	R290	5	3	15		Não necessita
3	R290	20	3	60		Não necessita
3	R404a	5	3922	19 610		12 Meses
3	R404a	20	3922	78 440		6 Meses
4	R290	2	3	6		Não necessita
4	R290	30	3	90		Não necessita
4	R404a	2	3922	7 844		Não necessita
4	R404a	30	3922	117 660	2030	12 Meses

Pela análise da Tabela 14, são logo contempladas vantagens na utilização do R290, em relação ao R404a, com visibilidade imediata para a contribuição para o aquecimento global, valor de GWP, e na produção equivalente de CO₂ (CO₂e), onde 1 kg de fluido, no caso do R404a irá gerar 3922 kg CO₂e, enquanto que a mesma massa de R290 origina apenas 3 kg de CO₂e.

Além disto, a utilização de propano, por não contribuir para o aquecimento global, não tem qualquer limitação legal em termos ambientais que apontem para a sua retirada do mercado, necessitando apenas de cuidados básicos devido à sua inflamabilidade, o que não deve ser sobrevalorizado devido à estreita faixa em que isso é de facto um problema. Mesmo em relação à detecção de fugas, como é legislado pela CE 1516/2007, esta apenas visa um maior controlo dos gases fluorados com contribuição para o efeito estufa, como é o caso do R404a.

Para uma melhor comparação das performances de ambos os fluidos refrigerantes num mesmo caso concreto, foi realizado um estudo teórico, para um equipamento de produção de gelo, através de água à temperatura ambiente (15°C), com a temperatura ao nível do evaporador de -20°C e ao nível do condensador de 30°C, apresentando à saída o refrigerante 10°C de sobrearrefecimento. O rendimento isentrópico do compressor é de 90% e o caudal de refrigerante no evaporador de 2,5 kg/min.

Com a total caracterização termodinâmica dos 4 pontos chave, isto é, entre os 4 principais componentes do sistema de frio, compressor, condensador, elemento de expansão e evaporador, é possível obter as pressões ao nível do condensador (alta) e ao nível do evaporador (baixa), bem como o EER do sistema. Pela seguinte fórmula é também possível quantificar o caudal de gelo produzido por minuto no equipamento, em função do frigorígeno utilizado:

$$\dot{m}_r \cdot (h_1 - h_4) = \dot{m}_{H_2O} \cdot [C_p \cdot (T_1 - T_2) + \Delta h_{LS}] \quad (13)$$

Os valores obtidos para o caso de estudo, são apresentados na Tabela 15:

Tabela 15 – Resultados do estudo comparativo

Item a comparar	R404a	R290
P _a [bar]	15,29	10,81
P _b [bar]	1,31	2,44
EER	3,70	4,39
Caudal Gelo Produzido [kg/min]	0,744	1,88

Pela leitura da Tabela 15, é constatado que o R290 apresenta um rácio de pressões, isto é, a relação entre a pressão alta e a pressão baixa, muito mais favorável (4,43) do que o R404a (11,67). Também em relação à relação de eficiência energética, esta é superior no R290, que consegue também uma maior produção de gelo por unidade de tempo. Assim sendo, em todos os aspectos comparados o R290 é superior ao R404a.

Com já uma vasta história na refrigeração, o R404a, começa agora a ver o seu prazo de utilidade chegar ao fim. As exigências ambientais são cada vez maiores, e as legislações governamentais, quer na Europa, quer em outros grandes focos de consumo e produção de equipamentos, como os Estados Unidos, são cada vez mais restritivas em relação a gases que lesem o ambiente. Com esta retirada dos países primários, o R404a, vai sofrer nos próximos anos redução na sua utilização, a começar já em 2020, e sendo banido em cada vez mais aplicações até 2030. Com isto, abrem-se as portas a fluidos frigorígenos com potencial e a conquistar cada vez mais espaço no mercado, como os hidrocarbonetos, onde surge em especial destaque, o propano puro, no meio da refrigeração, designado por R290. Com as suas

apropriadas propriedades termodinâmicas e a sua “limpeza”, este é um caminho a explorar pelas grandes indústrias a trabalhar na produção e utilização de equipamentos de frio.

10. Conclusões

Actualmente, os padrões de vida humanos, estão amplamente dependentes dos equipamentos de frio e refrigeração. Desde o condicionamento de ar que permite habitar espaços inóspitos e com condições menos favoráveis, aos frigoríficos domésticos que permitem conservar os bens alimentares de forma económica e segura, até aos transportes refrigerados de frutas ou flores e à congelação, e transporte, de alimentos que apenas estão disponíveis em certas localizações geográficas, e em determinadas alturas do ano, e que são disponibilizadas ao consumidor nas mais vastas superfícies comerciais, nada disto seria possível sem os básicos princípios da refrigeração, e sem o desenvolvimento da sua tecnologia que actualmente permite o consumo, em condições de segurança, de produtos e bens alimentares.

Podendo os sistemas frigoríficos ser alvo de várias diferenças, actualmente o mais utilizado, e desenvolvido, é o sistema de compressão mecânica de vapor, que tem vindo a ser refinado ao longo dos últimos anos, sendo hoje em dia a base, entre muitos outros equipamentos, dos frigoríficos domésticos amplamente vendidos em todo o mundo. Mas se isto é possível, em muito se deve ao estudo e desenvolvimento dos seus componentes, como os principais, compressor, evaporador, condensador e dispositivos de expansão, que com as suas contínuas melhorias são hoje perfeitamente funcionais e com eficiências, e custos, que permitiram a evolução, e massificação destes equipamentos.

A juntar a tudo isto, e para permitir o pleno funcionamento de um sistema frigorífico, é necessário um fluido refrigerante, que através das suas mudanças de fase seja capaz de realizar as transferências de calor nos respectivos permutadores, o condensador e o evaporador. Este fluido de trabalho, designado por refrigerante, tem também ele sido alvo de inúmeras alterações ao longo da história da refrigeração, começando no primitivo éter, a indústria procurou depois a solução nas substâncias naturais como o amoníaco. Mas todas as tentativas de mudanças, e introdução, de novos fluidos, ficavam aquém do esperado, não permitindo a massificação da refrigeração, para, por exemplo, todos os lares. Foi com o intuito de resolver esta problemática que surgiram os CFC's, que prometiam resolver este problema e contribuíram para o revolucionar da refrigeração.

Com estudos sobre os mesmos, e com o criar, e intensificar, de uma mentalidade, e políticas de protecção ambiental, em especial a preservação da camada de ozono, os CFC's, tornaram-se no alvo de todas as atenções e limitações regulamentares, onde medidas como o Protocolo de Montreal vieram atacar a sua utilização e ordenar a sua retirada do mercado, não mais permitindo a sua reintrodução. Isto levou a nova revolução no campo dos frigorígenos, tornando-se os HFC's a principal alternativa, no qual se destaca o R404a, ainda hoje um dos mais utilizados fluidos frigorígenos. Mas seguindo o rumo da evolução, e ainda maiores preocupações ambientais, os holofotes virar-se-iam para o aquecimento global, e efeito estufa, levando a que as substâncias que contribuem para este fenómeno fossem alvo de atenções ecologistas e governamentais. Surgem assim cada vez mais limitações aos HFC's, que com a legislação que entra em vigor a 1 de Janeiro de 2015, começam a ter os dias contados, pelo que urge encontrar a solução ideal pois esta é uma indústria que não pode parar.

É neste campo das alternativas que surge o R290, propano puro. Este hidrocarboneto apresenta propriedades termodinâmicas e químicas extremamente interessantes que fizeram com que no passado já fosse utilizado na refrigeração, contudo, quando se deu a emancipação dos CFC's, caiu no esquecimento, regressando agora em força. Sendo uma substância natural, não tem contribuição para o aquecimento global, bem como a produção equivalente de CO₂, é bastante baixa. Tem ainda a vantagem de permitir a utilização de pressões de trabalho mais reduzidas que a concorrência, como o R404a, o que permite uma economia de recursos monetários ao nível do compressor, bem como uma construção mais leve do compressor e sistema, não lidando este com pressões tão elevadas como noutros casos. É também compatível com a generalidade dos óleos lubrificantes utilizados, como os ésteres de póliois, bem como com os usuais materiais de construção. Sendo uma substância natural, e ainda abundante na natureza, sendo o seu preço não muito superior ao R404a, contudo, como já referido, a questão do preço depende em muito dos fabricantes considerados.

Em relação a desvantagens na utilização do R290, é constantemente referida a sua inflamabilidade. Contudo, é uma questão bastante sobrevalorizada pois é facilmente controlado com um adequado controlo de fugas, e é apenas potencialmente explosivo numa estreita faixa de concentração, que vai dos 1,7 aos 10,9%.

Tendo tudo isto em consideração, é visível que o futuro passa pelo R290, um fluido frigorígeno moderno, adequado às limitações impostas pelas legislações ambientais, que

oferece excelentes propriedades termodinâmicas e compatível com aquele que é o mercado actual.

10.1 Trabalhos futuros

Concluída esta dissertação, acerca do estudo da substituição do fluido refrigerante R404a pelo R290, como sugestão de trabalhos futuros, fica a indicação de um teste prático. Ou seja, comparar, na prática, dois equipamentos destinados ao mesmo trabalho, e testar toda a sua performance, e desta forma ter uma análise de custos reais para esta substituição.

11 Referências bibliográficas

- [1] Dinçer, Ibrahim - **Refrigeration Systems and Applications**. WILEY, 2003.
- [2] Kharagpur - Kharagpur, EE, et al. - **Refrigeration & Air Conditioning**. India, 2008. [Consult. em 1 Março 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://pt.scribd.com/doc/29982457/Refrigeration-and-Air-Conditioning-by-lit-Kgp>
- [3] Whitman, William C. e Johnson, William M. - **Tecnología de la Resfrigeración y Aire Condicionado – Refrigeración Comercial II**. Thomson Paraninfo, 2007.
- [4] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - **Apostila de Refrigeração**. Bahia, 2009.
- [5] Dossat, Roy J. - **Principles of Refrigeration**. 4th Edition. Prentice Hall, 1997.
- [6] Pirani, Marcelo J. et al. - **Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial**. Rio de Janeiro: Electrobrás, 2005.
- [7] CompAir – **Informações Sobre Ar Comprimido: Os três tipos de compressores**. [Consult. 1 Maio 2014]. Disponível em WWW:<URL:http://www.compair.pt/About_Us/Compressed_Air_Explained-03The_three_types_of_compressors.aspx
- [8] Kelpen Oil – **Lubrificação de Compressores e Bombas a vácuo**. [Consult. 14 Maio 2014]. Disponível em WWW:<URL:<https://pt.scribd.com/doc/55924965/Lubrificacao-de-Compressores-e-Bombas-a-vacu>
- [9] Bio Intelligence Service – **Preparatory Study for Eco-design: Summary document**. Bruxelas, 2011.
- [10] International Electrotechnical Commission - **Norma IEC 62552**
- [11] CECED - **Nova Etiqueta Energética da UE**. [Consult. 1 Outubro 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.newenergylabel.com/index.php/pt/home/>
- [12] Lobarinhas, Pedro – **Energia e Ambiente 5, Slides Aula**.

[13] Regulamento do Parlamento Europeu e do Conselho - **CE nº2037/2000**

[14] Regulamento do Parlamento Europeu e do Conselho – **UE Nº517/2014**

[15] Regulamento do Parlamento Europeu e do Conselho - **CE 1516/2007**

[16] Air Liquide – **Ficha de Segurança, Gás Refrigerante R404a**. Portugal, 2009.

[17] Tecumseh Products Company – **Guidelines For Utilization of R404a and R507**. Michigan, 2014.

[18] Engenharia Arquitetura - **R290 Aplicado na refrigeração comercial**. [Consult. 2 Março 2014]
Disponível em WWW:<URL:<http://www.engenhariaearquitectura.com.br/noticias/537/R290-aplicado-na-refrigeracao-comercial.aspx>

[19] Air Liquide – **Ficha de Dados de Segurança, Propano/ Propano F/ Propano G31**. Portugal, 2010.

[20] Sediajk, Jozef – **Propane as real alternative to R404a Refrigerant in light commercial refrigeration**. Politechniki Krakowskiej. Cracóvia, 2012.

[21] Elefsen, Frank et al. – **Field test of 75 R404a and R290 ice cream freezers in Australia**. Ecolibrium. Australia, 2003.

11.1 Referência de imagens

Figura 1 –

[http://www.idsa.org/sites/default/files/cliver/GE_Monitor_Top_Refrigerator_1927.jpg?1264957792]

Figura 7 – [<http://mixmanutencao.com.br/wp-content/uploads/2013/06/compressor-parafuso.png>]

Figura 8 –

http://1.bp.blogspot.com/N5L_ICfBl4t4/UYkus7Oo76I/AAAAAAAAAG8/bwSQixMEHqY/s1600/palhetas.gif

Figura 9 – [2]

Figura 10 – [<http://www.mmcofap.com.br/Arquivos/Institucional/LinhaTermica/evaporador.jpg>]

Figura 11 – [http://www.balizaservice.com.br/wscv3/lojavirtual_wsv35/img/tubocap.jpg]

Figura 12 – [<http://www.atmosferis.com/valvula-de-expansion-termostatica/>]

Figura 13 –

[http://loja.thermotech.com.br/ecommerce_site/arquivos11077/arquivos/1368631265_1.jpg]

Figura 14 – [http://www.nepin.com.br/imagens/produtos/danfoss_separador_oleo_oub.jpg]

Figura 15 – [<http://www.tarefrigeracao.com.br/imagens/pecas/VISOR%20DE%20LIQUIDO.JPG>]

Figura 17 – [http://frigorificos.pt351.com/icones/big/tuneis_congelacao_14.jpg]

Figura 18 – [<https://encrypted-tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRft0n6yAd-G7ouUTAnE7YEaV5Zix-V3YvsEbQ4gepzV42zf7U2A>]

Figuras 19, 20, 21, 22 – [9]

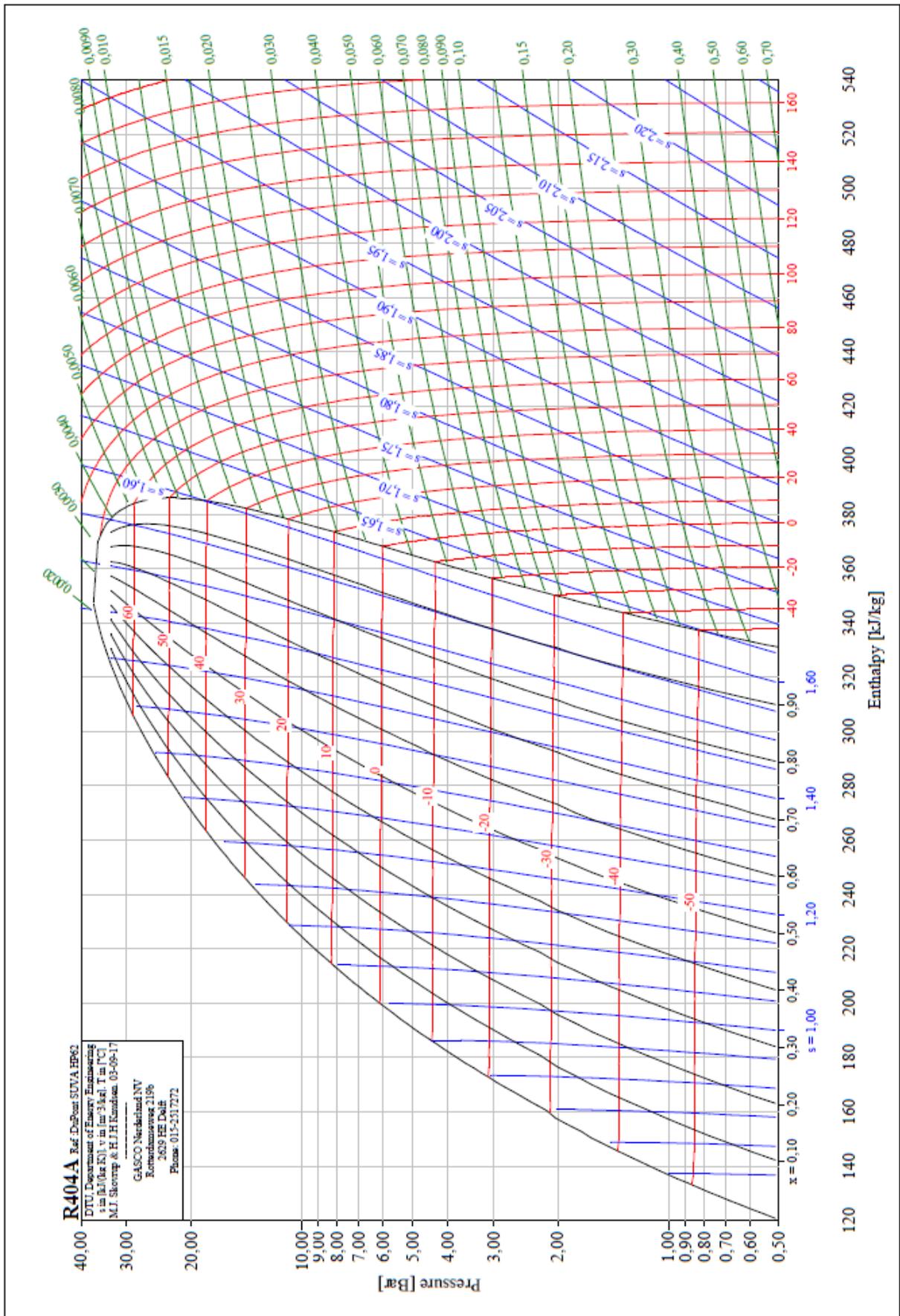
Figura 23 – [10]

Figura 24 –

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/60/Energy_label_2010.svg/2000px-Energy_label_2010.svg.png]

Anexos

Anexo 1 – Diagrama Mollier R404a



Anexo 2 – Diagrama Mollier R290

