



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Frio Industrial: caracterização geral de sistemas e principais oportunidades para o aumento da eficiência energética

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente

Autor

José Miguel Lopes Fernandes

Orientador

**Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva
Ribeiro**

Júri

Presidente Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar

Vogais Mestre Vítor Alexandre Ribeiro Branco Ferreira

Orientador Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva Ribeiro

Coimbra, setembro, 2016

Try not to become a man of success, but rather try to become a man of value

Albert Einstein

Agradecimentos

Esta dissertação representa o ponto final no meu percurso académico. Foram cinco anos que irei para sempre recordar com satisfação. Não poderia deixar passar a oportunidade de prestar o meu reconhecimento a algumas pessoas pois este trabalho só foi possível graças à sua colaboração.

Aos meus pais por me darem a oportunidade de aprofundar os meus estudos e me apoiarem ao longo desta e de todas as etapas pelas quais tenho passado.

Aos meus amigos que de um modo ou outro foram estando presentes.

Aos meus colegas que conheci nessa qualidade e que levo como amigos.

Ao Professor Doutor José Baranda Ribeiro pela orientação, ajuda e paciência.

Obrigado!

José Miguel

Resumo

A refrigeração, pela importância que foi ganhando no quotidiano da sociedade, é hoje responsável por uma fatia importante do consumo energético. Num mercado cada vez mais competitivo surge a necessidade de conhecer estes sistemas e as tecnologias disponíveis para os otimizar, sendo esse o objetivo desta dissertação.

Numa primeira fase serão abordados os diferentes ciclos de refrigeração fazendo-se uma comparação entre estes e, seguidamente incidir-se-á mais particularmente sobre o ciclo de compressão a vapor por ser o de maior relevo em instalações deste tipo. Por último serão apresentadas medidas e respetiva poupança estimada de energia.

Espera-se que com a leitura desta tese se compreenda o funcionamento de uma instalação de refrigeração e se fiquem a conhecer as tecnologias existentes e um conjunto de boas ações que permitam diminuir os gastos relativos à energia.

Com a informação recolhida, pode-se concluir que o desempenho energético deve ser planeado e considerado nas várias fases de implementação do projeto. Atualmente, já existe no mercado um conjunto de tecnologias que promovem um melhor desempenho energético dos sistemas de refrigeração, contribuindo, assim, para a redução dos custos energéticos e ambientais.

Palavras-chave: Refrigeração, Ciclo de compressão a vapor, Oportunidades, Eficiência energética.

Abstract

Refrigeration, due to the importance that has been gaining in everyday society, is now responsible for an important section of energy consumption. In an increasingly competitive market comes the need to know these systems and the technologies available for its optimization and that is the purpose of this thesis.

Firstly, the thesis will cover the different cooling cycles and it will be made a comparison between them, secondly, it will direct its focus, more particularly, to the vapor compression cycle due to its greater role in such installations. Finally you will be presented with measures/technologies and their estimated savings of energy.

It is expected that with the reading of this thesis comes an understanding of the operation around a cooling installation, and the awareness of the existing technologies as well as a set of good actions that allow the decrease of energy related costs.

With the information gathered, it can be concluded that the energy performance should be planned and considered in the various stages of the project implementation. Currently, there is already on the market a set of technologies/measures which promote a better energy performance of the refrigeration systems, thus contributing to the reduction of energy costs and environmental impact.

Keywords Refrigeration, Vapor compression cycle, Opportunities, Energetic efficiency.

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	vi
Siglas	vii
Siglas	vii
1. Introdução	1
2. Ciclos de refrigeração	3
2.1. Alterações relativamente ao ciclo de Carnot reverso	4
2.2. Ciclo ideal por compressão de vapor	4
2.3. Ciclo real de compressão de vapor	5
2.4. Variações do ciclo de refrigeração por compressão de vapor	5
2.4.1. Refrigeração em cascata	6
2.4.2. Compressão em múltiplos estágios	7
2.5. Absorção	8
2.6. Adsorção	8
2.7. Efeito termoelétrico	9
2.8. Refrigeração evaporativa	10
2.9. Ciclo reverso de Brayton	10
2.10. Eficiência	11
2.11. Comparação dos diferentes ciclos	11
3. Instalação	15
3.1. Câmara frigorífica	15
3.2. Distribuição	18
3.3. Sistema de geração de frio	18
3.3.1. Compressor	19
3.3.2. Condensador	23
3.3.3. Evaporador	26
3.3.4. Dispositivo de estrangulamento	27
3.4. Fluido refrigerante	30
4. Oportunidades	31
4.1. Barreiras	32
4.2. O que medir	33
4.3. Medidas de redução de consumo de energia	33
5. Conclusão	40
Referências bibliográficas	42
Anexo A	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Estratégias para o desenvolvimento sustentável [3]	1
Figura 2 –Princípio de funcionamento da refrigeração [6].....	3
Figura 3 - Representação esquemática do ciclo de compressão a vapor [6]	4
Figura 4 - Representação esquemática de um sistema de refrigeração em cascata [6]	6
Figura 5 - Representação esquemática de um sistema de compressão em múltiplos estágios [1]	7
Figura 6 - Representação esquemática de um ciclo de absorção [12].....	8
Figura 7– Funcionamento do ciclo de adsorção [13]	9
Figura 8 - Representação do efeito termoelétrico [1]	9
Figura 9 – Representação do processo de refrigeração evaporativa [8].....	10
Figura 10 – Representação esquemática do ciclo de refrigeração de Brayton [1]	11
Figura 11 - Custo típico de um sistema de iluminação ao longo da sua vida [3]	16
Figura 12 - Alguns dos fatores que influenciam a carga térmica da câmara [7]	17
Figura 13 – Contribuição de diferentes itens na carga térmica da câmara [22]	18
Figura 14 – Componentes do ciclo de compressão a vapor [24].....	19
Figura 15 - <i>Performance</i> do compressor a diferentes temperaturas de condensação [1]	19
Figura 16 - <i>Performance</i> do compressor a diferentes temperaturas de evaporação [1]	20
Figura 17 – <i>Performance</i> de um compressor parafuso [24]	21
Figura 18 - Condensador arrefecido a ar [1].....	24
Figura 19 - Características típicas de condensadores arrefecidos a ar [10].....	24
Figura 20 - Características típicas de condensadores arrefecidos a água [10]	25
Figura 21 – Funcionamento de um condensador evaporativo [29]	25
Figura 22 – Válvula de expansão termostática [1]	28
Figura 23 – Representação esquemática do funcionamento de uma válvula de expansão termostática [10].....	28
Figura 24 - Representação esquemática do funcionamento de uma válvula de expansão eletrónica [32].....	29
Figura 25 – Funcionamento típico de uma instalação de refrigeração [30]	32

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos diferentes ciclos	12
Tabela 2 – Aplicações e estado de maturidade tecnológico dos diferentes ciclos	14
Tabela 3 – Características de um bom isolante [10].....	17
Tabela 4– Grupos de compressores de refrigeração	20
Tabela 5 – Classificação dos evaporadores [10,25]	26
Tabela 6 – Características de um bom fluido frigorígeno [20].....	30
Tabela 7 - Características de alguns refrigerantes [9]	44
Tabela 8 - Potencial dano para o ambiente de alguns refrigerantes [20].....	45

SIGLAS

Siglas

Tep – Tonelada equivalente de petróleo

SGCIE – Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia

kWh – Quilowatt-hora

kg - Quilograma

COP - *Coefficient of performance*

TR – Tonelada de refrigeração

Kcal – Quilocaloria

h – hora

W - Watt

VEV – Variador eletrónico de velocidade

EER - *Energy Efficiency Rate*

SCADA - *supervisory control and data acquisition system*

kW – Quilowatt

EER - *Energy Efficiency Rate*

AC - *Alternating current*

DC - *Direct current*

1. INTRODUÇÃO

Desde cedo o ser humano entendeu a importância da refrigeração. Um fenómeno conhecido, apesar de não compreendido, era o de que a evaporação da água surtia esse efeito. Esta técnica foi usada, senão antes, pelo menos no início do século II, no Egipto.

Ao longos dos tempos, vários engenheiros e cientistas criaram invenções que visavam promover uma refrigeração artificial e, em 1834, Jacob Perkins, patenteou a primeira máquina de compressão a vapor. Até aos dias de hoje, aliado à evolução tecnológica, muitos avanços têm sido feitos neste campo permitindo que se tornasse parte do quotidiano da sociedade [1].

Estes sistemas tornaram-se imprescindíveis ao atual modo de vida social e representam, aproximadamente, 4% da eletricidade na indústria portuguesa, com o setor agroalimentar a ser responsável por cerca de 80% desta fatia [2]. Numa ótica de competitividade económica é um tema interessante de analisar de forma a perceber-se onde se encontram as oportunidades para reduzir o consumo elétrico e, por conseguinte (e mais interessante na perspectiva de competitividade das empresas) diminuir a fatura elétrica. O facto de se reduzir as necessidades energéticas permite, também, ir ao encontro das estratégias que visam assegurar um desenvolvimento sustentável como se pode ver na Figura 1.

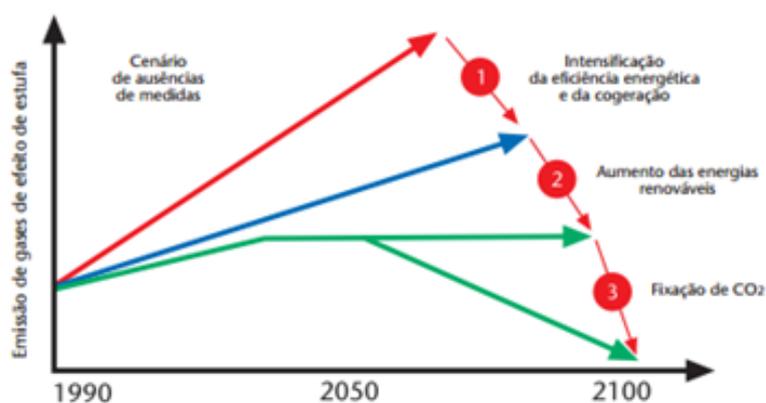


Figura 1 - Estratégias para o desenvolvimento sustentável [3]

Segundo dados mais recentes foram estimados potenciais de poupança de 18,25tep (tonelada equivalente de petróleo)/ano por instalação inscrita no SGCIE (Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia), a operar refrigeração em Portugal, adotando medidas transversais como a recuperação de calor, melhores isolamentos térmicos, iluminação eficiente, monitorização e controlo entre outros [4]. Olhando para este valor compreende-se o interesse em aprofundar o conhecimento sobre estes sistemas de forma a tornar as possíveis poupanças reais. Neste contexto o objetivo deste documento é abordar os parâmetros que influenciam a eficiência de uma instalação de frio e sugerir medidas que a otimizem.

Na vertente ambiental há a destacar a importância de que com maiores eficiências é minimizado o consumo elétrico permitindo uma redução nas emissões de carbono em centrais destinadas a produzir eletricidade. Atualmente no nosso país é considerado que por cada kwh (quilowatt) elétrico produzido são produzidos 0,47kg (quilograma) de dióxido de carbono [5].

O presente documento começará por abordar vários itens de refrigeração iniciando-se pela apresentação de ciclos de refrigeração, seguindo-se uma análise à constituição de uma instalação frigorífica e por último serão apresentadas um conjunto de medidas/alterações ao sistema de modo a aumentar a sua eficiência. As conclusões/sugestões serão analisadas como último item deste documento.

2. CICLOS DE REFRIGERAÇÃO

Neste capítulo serão apresentados diferentes ciclos de refrigeração sendo que na parte final do capítulo será apresentada uma comparação entre os mesmos (Tabela 1) assim como aplicações e o estado de maturidade tecnológico destes (Tabela 2).

Pela segunda lei da termodinâmica sabe-se que não ocorre naturalmente um fluxo de energia sob a forma de calor de um corpo a baixa temperatura para um corpo a alta temperatura. Sendo o objetivo da refrigeração diminuir a temperatura de um espaço fechado ou substância e mantê-la a uma temperatura mais baixa que o ambiente circundante (vizinhança) é necessário uma máquina e o fornecimento de energia sob a forma de trabalho para o atingir.

Note-se que a designação “produção/geração de frio ou calor”, apesar de vulgarmente utilizada, é termodinamicamente incorreta já que quer o calor quer o frio não são produzidos. O que ocorre é a criação de condições (com recurso a uma máquina) para que ocorra um fluxo de energia sob a forma de calor de um espaço/sistema a baixa temperatura para um espaço circundante a temperatura mais elevada como se pode ver na Figura 2 [6].

Usualmente associa-se o termo arrefecimento a qualquer processo, natural ou artificial, pelo qual se remove energia sob a forma de calor. Para casos em que se produz frio extremo entra-se no domínio da criogenia [7].

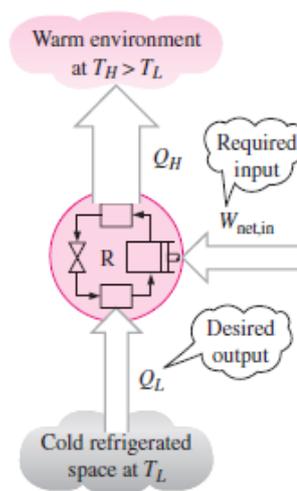


Figura 2 - Princípio de funcionamento da refrigeração [6]

2.1. Alterações relativamente ao ciclo de Carnot reverso

Os atuais sistemas de refrigeração a vapor diferem significativamente do ciclo de Carnot reverso (ciclo teórico de refrigeração mais eficiente a operar entre dois níveis de temperatura) o que origina um COP (*coefficient of performance*) inferior. Uma das diferenças é a de que a temperatura do refrigerante no evaporador é menor que a da região fria pelo que o processo de transferência de calor deixa de ser isotérmico. Outra das alterações é a de que a temperatura do refrigerante no condensador deixa de ser constante e igual à temperatura da fonte quente. De modo a evitar-se uma compressão na qual se esteja na presença de uma mistura líquido-gás, pois a presença de gotículas poderia danificar o compressor, o ciclo é realizado de modo a que o compressor apenas lide com vapor [8]. A última alteração prende-se com a alteração do processo de expansão na turbina (supostamente isentrópico) por um processo de expansão numa válvula de estrangulamento (processo isentálpico) [6].

2.2. Ciclo ideal por compressão de vapor

O ciclo ideal por compressão de vapor, esquematizado na Figura 3, é constituído por quatro processos, a saber:

- 1-2: Compressão isentrópica num compressor
- 2-3: Rejeição de calor a pressão constante num condensador
- 3-4: Estrangulamento num dispositivo de expansão
- 4-1: Absorção de calor a pressão constante num evaporador

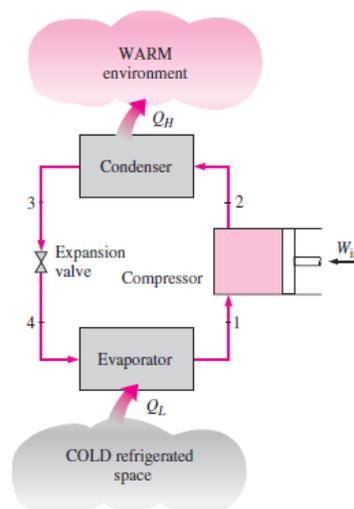


Figura 3 - Representação esquemática do ciclo de compressão a vapor [6]

Ao entrar no compressor (1) o refrigerante é comprimido, aumentando a sua pressão e temperatura (2). Saindo do compressor o fluido frigorígeno encaminha-se para o condensador onde ocorre um processo de rejeição de calor do refrigerante para a vizinhança (água ou ar) fazendo com que este arrefeça numa primeira fase e condense numa segunda (3); nesta fase a temperatura do refrigerante é ainda superior à do meio (exterior). Na válvula de expansão dá-se uma queda de pressão, que é acompanhada por um grande decréscimo de temperatura, de modo a que a pressão final corresponda à pressão de evaporação a que corresponde uma temperatura de evaporação inferior à do espaço a refrigerar. Como líquido a baixa pressão, o refrigerante absorve calor no evaporador fazendo com que mude de fase (1). Ao sair do evaporador o fluido frigorígeno encontra-se como vapor saturado e entra novamente no compressor de forma a completar o ciclo [6].

2.3. Ciclo real de compressão de vapor

Na prática as instalações funcionam em condições diferentes daquelas apresentadas no ciclo teórico sobretudo devido às quedas de pressão e temperatura devidas ao escoamento do refrigerante e à transferência de calor de, e para, a envolvente [1]. De forma a garantir que o fluido refrigerante entre como líquido saturado na válvula de expansão o sistema é idealizado para ocorrer um sobrearrefecimento do refrigerante na saída do condensador, o que permite um aumento da eficiência do sistema. Segundo o que ocorre no ciclo teórico, o fluido refrigerante ao sair do evaporador e entrar no compressor fá-lo como vapor saturado no entanto, na prática, é complicado controlar este parâmetro de modo tão rigoroso, por esse motivo o sistema é projetado para que este fique ligeiramente sobreaquecido na entrada do compressor de modo a assegurar que esteja totalmente vaporizado ao entrar neste equipamento [6].

2.4. Variações do ciclo de refrigeração por compressão de vapor

Existem casos onde o ciclo de compressão a vapor mencionado demonstra ser inadequado: por exemplo quando se requerem temperaturas demasiado baixas no evaporador [9].

2.4.1. Refrigeração em cascata

Na Figura 4 é apresentada uma representação esquemática de um sistema de refrigeração em cascata em que dois ciclos de refrigeração de compressão de vapor são dispostos em série com um permutador de calor a ligá-los. Este permutador serve como evaporador para o ciclo A e de condensador para o ciclo B. A energia rejeitada durante a condensação do refrigerante no ciclo B é usada para evaporar o refrigerante do ciclo A. O efeito desejado ocorre no evaporador do ciclo B e a rejeição de calor do ciclo (geral) ocorre no condensador do ciclo A.

Como o trabalho do compressor diminui ao trabalhar com diferenças de pressões menores e a quantidade de calor absorvida do espaço refrigerado aumenta este sistema apresenta um maior COP relativamente ao ciclo base, além de permitir um menor desgaste do compressor. O facto de se reduzir a taxa de refrigerante que circula permite a redução das dimensões das linhas de líquido e de sucção. Pode ainda afirmar-se que para uma mesma pressão de evaporação estes sistemas requerem menor capacidade (deslocamento volumétrico) do compressor. Pode ser usado apenas um refrigerante ou diferentes refrigerantes sendo que os refrigerantes com pontos de ebulição menores são usados progressivamente [6,8,10,11].

Este ciclo de refrigeração é usual quando se trabalha com grandes intervalos de temperatura entre o espaço a refrigerar e o meio para o qual é rejeitado o calor [6].

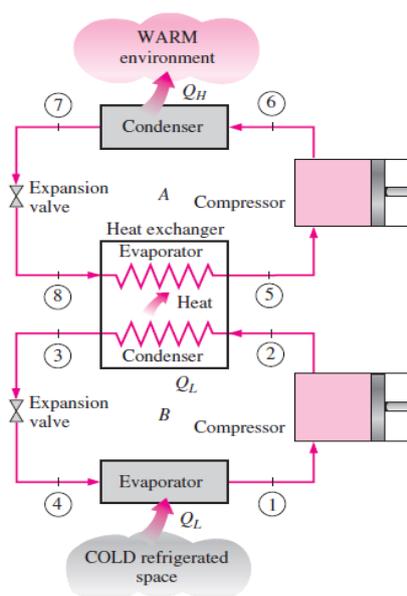


Figura 4 - Representação esquemática de um sistema de refrigeração em cascata [6]

2.4.2. Compressão em múltiplos estágios

Atualmente um sistema é denominado de refrigeração de compressão em múltiplos estágios quando, partindo dos mesmos fundamentos de um sistema em cascata, só se utiliza um fluido refrigerante em todo o processo. Neste caso tem-se um separador de líquido e uma câmara de mistura em vez do permutador de calor, como se pode ver na Figura 5, o que torna o sistema mais eficiente [6].

Comparativamente ao sistema em cascata o facto de só se usar um refrigerante leva a que possam ocorrer valores extremos de pressão e volume específico causando alguns problemas, por esse motivo o refrigerante deverá possuir temperatura crítica elevada e baixo ponto de congelação. Além deste fator deve-se analisar cuidadosamente as pressões de operação pois à medida que a temperatura no evaporador diminui, a pressão de saturação correspondente diminui fazendo com que o sistema possa operar a uma pressão menor que a atmosférica o que poderá originar a entrada de ar (e humidade) para dentro do sistema caso não esteja bem vedado. Deve também assegurar-se que não ocorre migração de óleo lubrificante entre compressores que poderia originar a sua falha [9].

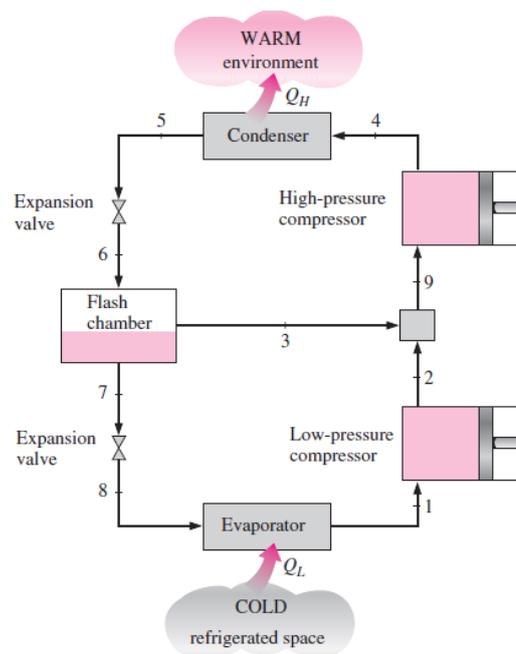


Figura 5 - Representação esquemática de um sistema de compressão em múltiplos estágios [1]

2.5. Absorção

O processo é em grande parte semelhante ao do ciclo de compressão de vapor excetuando que neste não existe um compressor. Ao invés o fluido refrigerante vaporizado no evaporador é absorvido no absorber e mistura-se com o fluido absorvente (sem ocorrer interação química), libertando calor. A mistura é bombeada para o gerador sendo fornecido calor para separar o fluido refrigerante do fluido absorber. O fluido refrigerante completa o circuito frigorífico enquanto o fluido absorber regressa ao absorber. Ao invés de ter um compressor como o ciclo de compressão de vapor este ciclo tem um conjunto de passos que, tal como representado na Figura 6, podem ser imaginados como um “compressor térmico” [12].

Vulgarmente utiliza-se para este ciclo o par NH_3 -água e o par água-brometo de lítio [1].

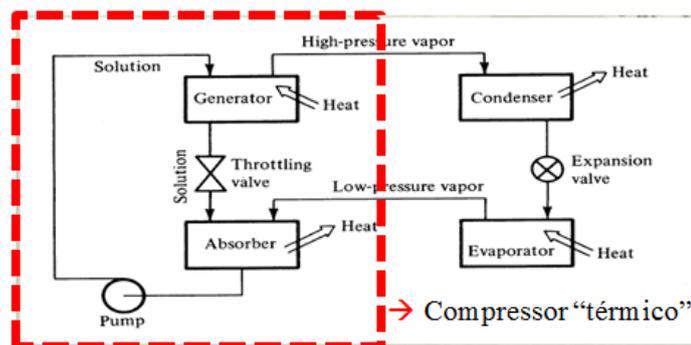


Figura 6 - Representação esquemática de um ciclo de absorção [12]

2.6. Adsorção

A adsorção é o processo que consiste em colocar um sólido em contacto com um fluido de modo a que as moléculas sejam retiradas no material sólido. O processo, esquematizado na Figura 7, é constituído por quatro etapas: aquecimento e pressurização, dessorção e condensação, arrefecimento e despressurização e adsorção e evaporação.

Alguns exemplos de pares de trabalho utilizados são: par sílica-gel-água, carvão ativado-metanol, zeolite-água e carvão ativado-amónia [13].

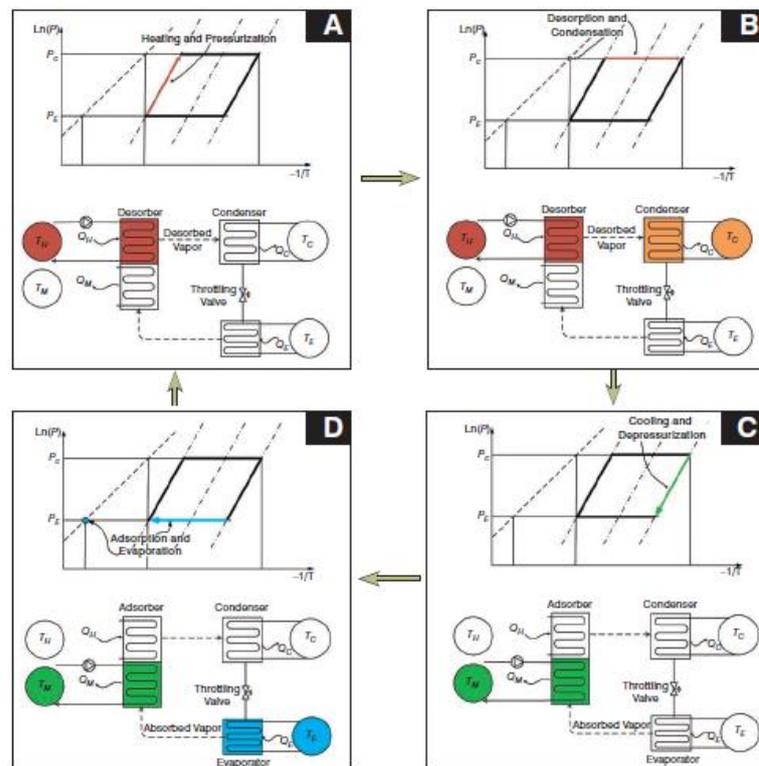


Figura 7– Funcionamento do ciclo de adsorção [13]

2.7. Efeito termoelétrico

Um outro sistema de refrigeração é o denominado efeito termoelétrico. Este consiste em utilizar metais diferentes ligados entre si formando um circuito fechado e ao ocorrer uma variação de temperatura entre estes dá-se a ocorrência de uma corrente (efeito Seebeck). O efeito de refrigeração deste sistema ocorre quando a corrente passa através da junção dos dois fios diferentes (efeito Peltier). Como se mostra na Figura 8 o calor é absorvido do espaço refrigerado e rejeitado para a vizinhança. [6].

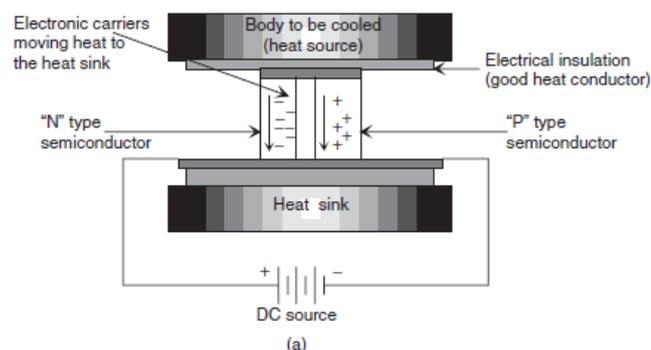


Figura 8 - Representação do efeito termoelétrico [1]

2.8. Refrigeração evaporativa

A refrigeração evaporativa baseia-se no princípio de que à medida que a água evapora o calor latente de evaporação é absorvido da água e do ar, e como resultado desse efeito ambos os fluídos são arrefecidos.

Com recurso à Figura 9 explicita-se o processo: primeiramente o ar quente e seco é forçado a entrar no refrigerador evaporativo (1) onde contacta com água líquida. Em função desse contacto, alguma água evapora pela absorção do calor da corrente de ar fazendo com que a temperatura da corrente de ar à saída do refrigerador seja menor e a sua humidade maior (2). Para uma eficiência total do processo o ar a sair do refrigerador evaporativo deverá encontrar-se saturado, levando a que se atinja a menor temperatura do processo [6].

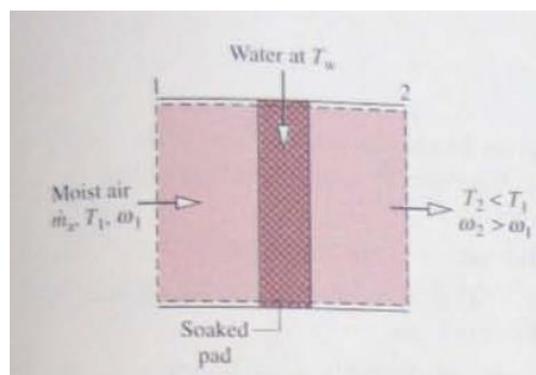


Figura 9 – Representação do processo de refrigeração evaporativa [8]

2.9. Ciclo reverso de Brayton

Este ciclo tem a particularidade de se trabalhar com um gás não condensável ao invés de se ter um fluido frigorígeno. Uma representação esquemática do sistema é apresentada na Figura 10: no compressor dá-se um aumento de pressão do refrigerante do seu valor mais baixo para o valor mais alto (compressão isentrópica, 1-2); seguidamente o gás encaminha-se para um permutador de calor onde se dá a rejeição de calor permitindo baixar a temperatura do gás (processo isobárico); um dispositivo de expansão reduz a pressão e temperatura do refrigerante (3-4); por último o gás vai para um permutador de

calor onde recebe calor (carga de refrigeração) o que faz com que a sua pressão e temperatura aumente (processo isobárico) [1].

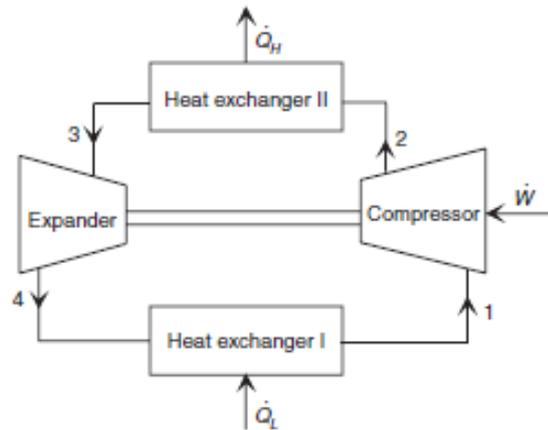


Figura 10 – Representação esquemática do ciclo de refrigeração de Brayton [1]

2.10. Eficiência

Para se avaliar a eficiência de um sistema é comum recorrer-se ao COP. Este é definido como o calor extraído a dividir pelo trabalho [13].

2.11. Comparação dos diferentes ciclos

Nas tabelas seguintes é feita uma análise às vantagens e desvantagens de cada ciclo e apresentado o estado de maturidade tecnológico de cada um sendo, também, apresentado o COP para os ciclos disponíveis no mercado.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos diferentes ciclos

Ciclo	Vantagens	Desvantagens
Compressão a vapor	<ul style="list-style-type: none"> → Elevada eficiência [12] → Fiabilidade [13] → Adaptabilidade [12] → Compacto [12] 	<ul style="list-style-type: none"> → <i>Performance</i> decresce a carga parcial [10] → Ruído e vibrações [12] → Impacte ambiental da maioria dos refrigerantes [14] → Originam picos elevados de consumo de eletricidade [12] → Problemas de corrosão dependentes do fluido refrigerante [10]
Absorção	<ul style="list-style-type: none"> → Operação silenciosa [1] → Fiabilidade [1] → Atende à variação de carga de modo eficiente [1] 	<ul style="list-style-type: none"> → Problemas de corrosão [13] → Poderão ocorrer problemas de cristalização [13] → Não recomendáveis para aplicações onde ocorram grandes vibrações (ex: barcos de pesca, comboios) [13]
<i>A fonte de calor deve estar, pelo menos, a 90°C [13]</i>		
Adsorção	<ul style="list-style-type: none"> → Apresenta menos problemas de corrosão para o par adsorvente-refrigerante comparativamente ao ciclo de absorção [13] → Pode ser usado em aplicações onde ocorram vibrações significativas [13] → Usa refrigerantes com pouco (ou nenhum) impacte para o ambiente [13] → Não tem problemas de cristalização [13] 	<ul style="list-style-type: none"> → COP [13]
<i>A temperatura da fonte de calor não deve ser inferior a 50°C [13]</i>		

Efeito termoeletrico	<p>→As perdas mecânicas diminuem com a diminuição da diferença de temperatura. Ideal para pequenas elevações de temperatura (ex: COP de 10 para uma diferença de temperatura de 5°C). Será de esperar que para diferenças de temperatura abaixo dos 5°C apresente melhores <i>performances</i> que o ciclo de compressão a vapor [15]</p> <p>→Fiabilidade [6]</p> <p>→Equipamento de tamanho reduzido e silencioso [6]</p> <p>→Simplicidade (não apresenta partes móveis) [8]</p>	<p>→Dificuldade em encontrar materiais com baixas condutividade térmica e alta condutividade elétrica [8]</p> <p>→COP diminui rapidamente com o aumento da diferença de temperaturas [15]</p>
Refrigeração evaporativa	<p>→Sistema simples: requer pouca manutenção e os custos de reparação são baixos [16]</p> <p>→Eficiente [16]</p> <p>→Filtram o ar eficientemente (ex: poeiras e pólenes ficam presos nos filtros) [16]</p> <p>→Não usa qualquer tipo de fluido que afete o ambiente [16]</p>	<p>→Pouco fiável (dependência com a temperatura e humidade do ar) [16]</p> <p>→Consumo de água [14]</p>
Brayton reverso (também conhecido como <i>air standart refrigeration system</i>)	<p>→O fluido de trabalho (ar) não apresenta problemas ambientais [17]</p> <p>→Muita fiabilidade (requer pouca manutenção) [17]</p> <p>→Ideal quando se querem sistemas de refrigeração com baixo peso [1]</p> <p>→Torna-se ideal quando se tem uma dupla finalidade (por exemplo o ar tanto pode ser para refrigeração como ser o meio do ar condicionado) [1]</p> <p>→Mais eficiente que o ciclo de compressão a vapor quando opera fora dos valores para os quais foi projetado [17]</p> <p>→Produz calor a uma temperatura na qual poderá ser usado [17]</p>	<p>→Comparativamente ao ciclo de compressão a vapor requer grandes quantidades de massa de circulação para altas cargas de refrigeração [1]</p>

Tabela 2 – Aplicações e estado de maturidade tecnológico dos diferentes ciclos

Ciclo	Aplicações / setor	Estado de maturidade tecnológico
<i>Compressão a vapor</i>	<ul style="list-style-type: none"> →Indústria alimentar [10] →Instalações industriais (óleos, borrachas, químicos, produtos farmacêuticos, têxteis) [10] →Processamento de bebidas [10] →Refrigeração doméstica [6] →Refrigeração comercial [12] →Climatização [12] →Transporte de mercadorias [12] 	<ul style="list-style-type: none"> →Disponibilidade comercial [14] ●COP típico: 3-4 [18]
<i>Absorção</i>	<ul style="list-style-type: none"> →Cogeração e trigeração [12] →Climatização [12] →Indústria (aproveitamento de calor residual) [12] 	<ul style="list-style-type: none"> →Disponibilidade comercial [14] ●COP típico: 0,2 – 0,9 [1]
<i>Adsorção</i>	<ul style="list-style-type: none"> →Indústria (aproveitamento de calor residual) [12] 	<ul style="list-style-type: none"> →Disponibilidade comercial [14] ●COP típico: < 0,4 [13]
<i>Efeito termoelétrico</i>	<ul style="list-style-type: none"> →Aquecimento/refrigeração de bancos do carro [15] →Fontes elétricas de pequena escala [15] →Indústria aeronáutica e espacial [1] 	<ul style="list-style-type: none"> →Pesquisa e desenvolvimento [14]
<i>Refrigeração evaporativa</i>	<ul style="list-style-type: none"> →Torres de arrefecimento [1] 	<ul style="list-style-type: none"> →Disponibilidade comercial: só para regiões com climas quentes e secos [14]
<i>Brayton reverso</i>	<ul style="list-style-type: none"> → Indústria aeronáutica [1] →Liquefação de gases [1] 	<ul style="list-style-type: none"> →Pesquisa e desenvolvimento [14]

3. INSTALAÇÃO

Uma instalação frigorífica pode ser dividida em três parcelas: sistema de geração de frio, que corresponde aos equipamentos que permitem obter a máquina que realiza o processo, o sistema de distribuição que, tal como o nome indica, se refere ao transporte e distribuição de fluídos, e o sistema de armazenamento (ou uso final) que remete para o espaço a ser refrigerado/utilização final do frio (câmaras frigoríficas) [19].

3.1. Câmara frigorífica

A câmara frigorífica corresponde ao espaço físico onde são armazenados os produtos. O sistema de refrigeração é dimensionado para atender aos parâmetros necessários neste espaço. Aquando do dimensionamento da câmara devem ter-se em consideração as condições climáticas do local, as condições internas da câmara, a carga térmica decorrente da transmissão de calor pelas paredes, teto e piso e a carga térmica devida à infiltração de ar externo aquando da abertura e fecho de estruturas de acesso à câmara [10].

Relativamente às condições climáticas do local deve ter-se em atenção, entre outras, a orientação do edifício (as áreas de maiores envidraçados devem situar-se preferencialmente no quadrante sul e devem ser utilizadas proteções solares adequadas como palas, persianas, vegetação,..), a qualidade térmica da envolvente, o tipo de envidraçados e a inércia térmica [3]. Teoricamente, uma estrutura cúbica apresentará menores perdas.

As condições internas deste espaço são dependentes do tipo de produto a armazenar e dos seus requerimentos sendo que, idealmente, deveria utilizar-se uma câmara para cada tipo de produto o que não se revela economicamente viável. A carga térmica do produto pode ser devida ao calor sensível antes do congelamento, ao calor latente de congelamento, ao calor sensível após congelamento e/ou ao calor de respiração do produto (quando aplicável). Neste parâmetro também se podem incluir as cargas térmicas devidas a luzes, pessoas (uma pessoa gera um potência calorífica de 80W quando em descanso [2]), motores e outras fontes de calor dentro da câmara. Sendo a luz artificial um ponto importante nestas instalações, analisando a Figura 11 percebe-se a importância de os

intervenientes pensarem a longo prazo optando, para o caso em foco, por sistemas de iluminação mais eficientes mesmo podendo ser mais dispendiosos numa fase inicial. Ainda relativamente aos sistemas de iluminação a tendência de melhoramentos destes é tal que podem existir melhorias que permitam poupanças mesmo que o sistema tenha sido instalado num espaço de tempo entre 5 a 10 anos [21].



Figura 11 - Custo típico de um sistema de iluminação ao longo da sua vida [3]

A carga térmica decorrente da transmissão de calor pelas paredes, teto e piso é função da diferença de temperatura entre o ambiente exterior e o interior da câmara, da condutividade térmica dos materiais construtivos da câmara e da área exposta ao diferencial de temperatura; é neste ponto que é fulcral a existência de um bom isolamento (ver Tabela 4) sendo que, para o cálculo da espessura a utilizar, deve ter-se em consideração o coeficiente de convecção interno, a condutividade térmica dos materiais que constituem a parede e o coeficiente de convecção externo, no entanto é comum só se considerar a condutividade térmica dos materiais que constituem a parede da câmara. Para valores na ordem dos $9,3\text{W}/\text{m}^2$ considera-se um isolamento excelente, para valores de $11,63\text{W}/\text{m}^2$ considera-se um isolamento bom, para valores na ordem dos $13,96\text{W}/\text{m}^2$ considera-se um isolamento aceitável, valores na casa dos $17,45\text{W}/\text{m}^2$ são considerados normais e valores inferiores a $17,45\text{W}/\text{m}^2$ são considerados valores insuficientes de isolamento. Na prática considera-se um valor de espessura de 5cm para cada 10°C de diferença de temperatura entre a temperatura de trabalho na câmara e a temperatura da face externa do isolante uma boa relação entre a eficiência e o valor económico do isolante. Na ótica dos isolantes é preciso salientar que para cada 1% de concentração em massa de humidade no isolante a sua condutividade térmica aumenta entre 1 e 3% sendo outro problema o de que para isolamentos a baixas temperaturas ocorre a condensação da

humidade do ar sobre a superfície externa da parede e, por esse motivo, é recomendável que a temperatura desta não seja inferior à temperatura de orvalho [10].

Bom isolante	<ul style="list-style-type: none"> →Baixa densidade. →Não possuir ou fixar cheiro. →Ser imputrescível. →Baixa absorção de humidade (baixa permeabilidade). →Oferecer adequada resistência à difusão de vapor de água. →Não ser atacado por insetos ou roedores. →Resistência a deformações causadas por diferenças de temperatura. →Alta resistência mecânica a trepidações. →Inerte para com os produtos. →Não ser inflamável →Baixo custo e fácil colocação
---------------------	--

Tabela 3 – Características de um bom isolante [10]

Por último a carga térmica devido à infiltração de ar externo diz respeito à entrada de ar quente e saída de ar frio da câmara frigorífica através de aberturas desta [10].

A temperatura usual nas câmaras situa-se entre os 8°C e os -23°C [22].

Na Figura 12 são sumarizados alguns dos aspetos anteriormente abordados enquanto na Figura 13 são apresentados valores com que alguns itens contribuem para a carga térmica na câmara.

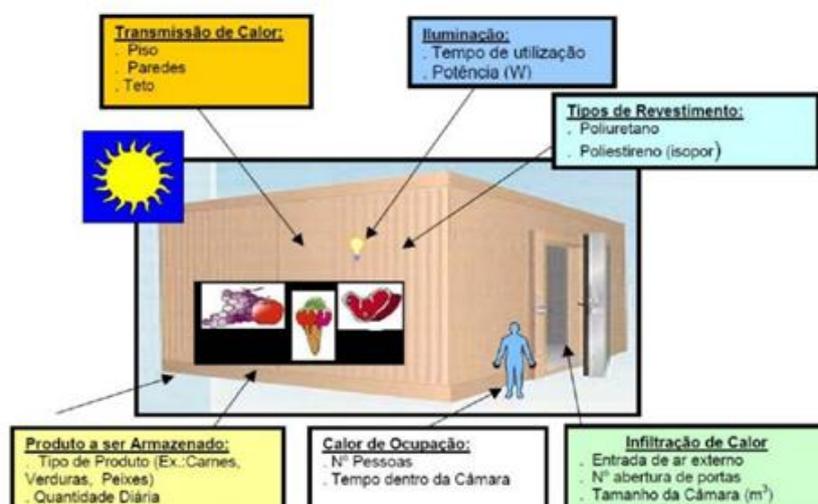


Figura 12 - Alguns dos fatores que influenciam a carga térmica da câmara [7]



Figura 13 – Contribuição de diferentes itens na carga térmica da câmara [22]

3.2. Distribuição

Existem diferentes arranjos para a forma como a instalação irá operar. Um deles é o de colocar todos os compressores num mesmo local (casa das máquinas), ter linhas que permitam a chegada do refrigerante a todo o sistema e, normalmente, os condensadores (se arrefecidos a ar) são montados na parte exterior do edifício (sistema centralizado); estes sistemas são particularmente vantajosos quando os sistemas apresentam grandes variações de carga. Outro tipo de sistema, chamado sistema descentralizado, consiste em localizar os equipamentos perto do local a refrigerar (os componentes são montados como um todo), o que requer menores comprimentos de tubagens; estes sistemas são recorrentes em instalações cujo investimento inicial e uma fácil instalação sejam fatores importantes, no entanto têm uma limitada capacidade para alterar as condições de funcionamento. Há ainda sistemas que usam dois fluídos: um (fluido frio) para remover o calor do espaço e outro para arrefecer o fluido frio que circula pelo sistema. Deste modo também se pode caracterizar a instalação quanto à forma como o refrigerante é usado: podem ser sistemas diretos ou indiretos [1,10, 23].

3.3. Sistema de geração de frio

É amplamente reconhecido que o ciclo de compressão a vapor é o ciclo mais usado nos sistemas de refrigeração, por esse motivo a restante informação diz respeito a sistemas a operar com este ciclo.

Os principais componentes do ciclo de compressão a vapor são o compressor, o condensador, a válvula de expansão e evaporador como se ilustra na Figura 14 [6]. Um

aspecto fulcral que é necessário reter é o de que a operação de um sistema deste tipo custa, geralmente, 8 a 10 vezes mais do que o seu custo inicial [20].

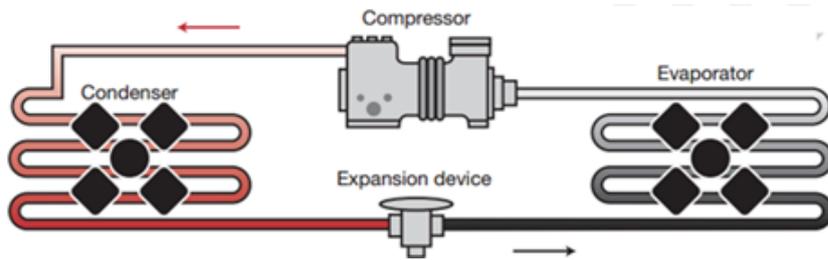


Figura 14 – Componentes do ciclo de compressão a vapor [24]

3.3.1. Compressor

O compressor tem como função receber o fluido refrigerante que chega do evaporador e comprimi-lo de forma a elevar a sua pressão até à qual pode ser liquefeito por arrefecimento para o meio circundante e promover a circulação do mesmo no sistema [10]. É comum considerar este equipamento como o “coração” do sistema [8].

Apesar de existir um número alargado de situações que interferem com a eficiência do compressor, as a seguir mencionadas são as mais relevantes [8]:

-O compressor é mais eficiente quando a pressão de condensação é baixa e a pressão de evaporação é alta, permitindo que a diferença de temperatura e taxa de compressão sejam mínimas (recorrendo às Figuras 15 e 16 sabe-se que, em princípio, se a potência consumida pelo compressor diminuir o COP aumenta, assumindo que a carga a remover se mantém) [1].

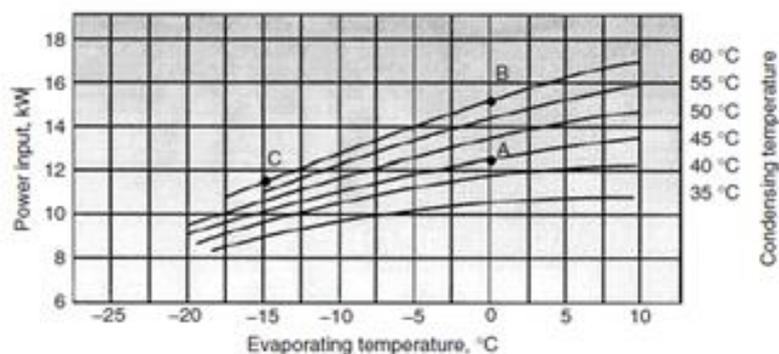


Figura 15 - Performance do compressor a diferentes temperaturas de condensação [1]

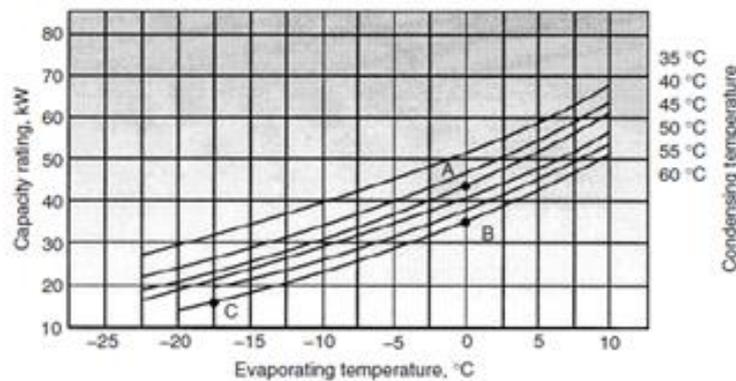


Figura 16 - Performance do compressor a diferentes temperaturas de evaporação [1]

-O compressor deve ser devidamente lubrificado e arrefecido de forma eficiente (insuficiente lubrificação aumenta o atrito e a temperatura e, desse modo, reduz a eficiência do equipamento)

Na ótica do utilizador a escolha do compressor a utilizar deve-se essencialmente à sua capacidade de refrigeração sendo que esta pode ser dividida em:

- Pequena capacidade (< 2,5 TR(tonelada de refrigeração))
- Média capacidade (entre 2,5 e 75 TR)
- Grande capacidade (> 75 TR)

Sendo um TR descrito como a potência que fornece a quantidade de calor necessária para derreter uma tonelada de gelo em 24 horas [10].

$$1,0 \text{ TR} = 3.024 \text{ Kcal (quilocaloria) /h(hora)} = 3.516,28 \text{ W(watt)}$$

Dentro dos compressores de refrigeração podem considerar-se dois tipos: volumétricos (ou de deslocamento positivo) e dinâmicos (ou turbo compressores) [10]. Realçar que a carga de refrigeração do compressor refere-se à capacidade que este equipamento tem para bombear o fluido refrigerante [20].

Compressores volumétricos ou de deslocamento positivo	Compressores dinâmicos ou turbo Compressores
Alternativo (Reciprocating)	Centrífugo
Parafuso (Screw)	
Palheta (Rotaty Vane)	
Espiral (Scroll)	

Tabela 4– Grupos de compressores de refrigeração

3.3.1.1. Compressores volumétricos/deslocamento positivo

Os compressores que se enquadram neste grupo caracterizam-se pelo aumento da pressão ser conseguido através da redução do volume interno de uma câmara de compressão através da aplicação de uma força mecânica [20].

3.3.1.1.1. Alternativo

- Podem ser de simples ou duplo efeito e ter um ou mais cilindros [25];
- Apresentam volume residual [10];
- São os mais utilizados nos sistemas de refrigeração [10];
- Utilizados maioritariamente em sistemas de pequenas e médias dimensões [10];
- Fabricados com capacidades desde uma fração de TR até cerca de 200TR [10];

3.3.1.1.2. Parafuso

- Capacidade frigorífica entre 20 a 1300 TR, sendo normalmente utilizadas capacidades entre 50 e 130 TR [10];
- Bastante utilizados nos sistemas de refrigeração [25] ;
- Compactos e mais silenciosos que os alternativos [26];
- Mais eficientes que os alternativos e os centrífugos [27];
- Operação em carga parcial apresenta baixas eficiências (ver Figura 17) [27];

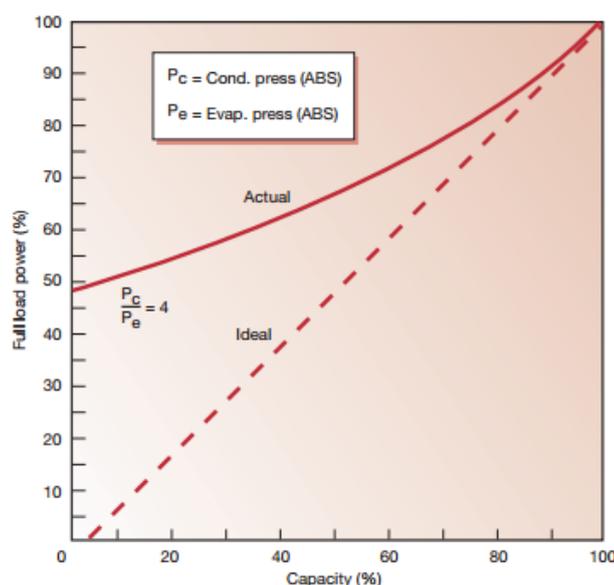


Figura 17 – Performance de um compressor parafuso [24]

- Requerem instalação de separador de óleo [10];
- Podem ser classificados como de: parafuso simples ou parafuso duplo (mais utilizado) [10];

3.3.1.1.3. De palhetas

- Podem ser divididos em palhetas simples ou múltiplas [10];
- Usados em refrigeração doméstica e sistemas de ar condicionado [1];
- Silenciosos [1];
- Requerem pouca manutenção [1];
- Necessitam de mais partes móveis o que os torna mais dispendiosos e por esse motivo estão a ser substituído por outros compressores (por exemplo pelos compressores parafuso) [23];

3.3.1.1.4. Espiral ou scroll

- Composto por duas peças em forma de espiral, uma fixa e outra móvel [10];
- Capacidade frigorífica na faixa de 1 a 60 TR [10];
- Boas eficiências para aplicações de ar condicionado e para casos de refrigeração em que a temperatura a obter seja elevada [1];
- Normalmente não vêm equipados com controlo de capacidade [1];
- São relativamente recentes e espera-se que substituam os compressores alternativos nalgumas aplicações devido à sua melhor eficiência e ao facto de apresentarem melhores performances quando trabalham em carga parcial [1];

3.3.1.2. Compressores dinâmicos/Turbo compressores

Nos compressores deste grupo o aumento de pressão ocorre pela conversão de energia cinética em energia de pressão. Esta é conseguida transmitindo-se ao vapor um movimento de rotação sendo depois convertida a energia cinética em entalpia, com o conseqüente ganho de pressão [22].

3.3.1.2.1. Centrífugos

- Utilizados em sistemas de grande capacidade com diferenças de pressão baixas [1];
- Múltiplos estágios quando é necessário maiores taxas de compressão [10];

3.3.1.3. Construção do compressor

Atendendo aos aspetos construtivos, os compressores podem ainda ser considerados: abertos, herméticos ou semi-herméticos [25].

3.3.1.3.1. Compressor Aberto

Este tipo de compressor caracteriza-se por o seu eixo de acionamento atravessar o invólucro e estar ligado a um motor exterior que aciona o compressor [25].

3.3.1.3.2. Compressor Semi-hermético

Neste compressor tanto o motor como o compressor encontram-se no mesmo espaço, no entanto existem aberturas a partir das quais se pode ter acesso aos pistões e válvulas para manutenção [25].

3.3.1.3.3. Compressor Hermético

Para esta unidade todo o conjunto é encapsulado e apenas as linhas de refrigerante e conexões elétricas, e nenhum veio rotativo, penetram no invólucro [25].

3.3.2. Condensador

O condensador é o componente do ciclo de refrigeração que promove a condensação do fluido refrigerante e no qual o calor, absorvido no evaporador e a energia adicionada ao fluido pela compressão, é dissipado para o ambiente externo [8].

3.3.2.1. Tipo de condensadores

A caracterização dos condensadores é feita em função do fluido para o qual transferem o calor.

3.3.2.1.1. Arrefecido a ar

Este tipo de condensador, o qual se ilustra na Figura 18, utiliza o ar como absorvente do calor do refrigerante de modo a que este possa passar ao estado líquido. A circulação do ar pode ocorrer naturalmente ou ser forçada [25].

As capacidades usuais destes condensadores situam-se entre 1 e 100 TR no entanto a sua instalação em paralelo permite obter capacidades bastante superiores. Para boas condições de funcionamento a temperatura de condensação deve ser fixada a uma temperatura superior de 11°C a 15°C relativamente à temperatura de bolbo seco do ar que entra no condensador no entanto, economicamente, o valor ótimo da diferença entre a

temperatura de condensação e a temperatura do ar que deixa o condensador situa-se entre os 3,5 e os 5,5°C [10]. A *performance* destes condensadores em diferentes circunstâncias pode ser visualizada na Figura 19.



Figura 18 - Condensador arrefecido a ar [1]

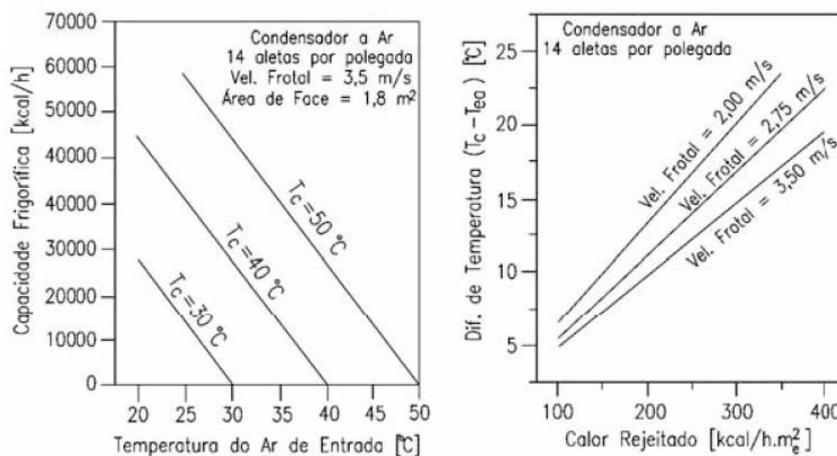


Figura 19 - Características típicas de condensadores arrefecidos a ar [10]

3.3.2.2. Arrefecido a água

Estes condensadores apresentam uma maior eficiência relativamente aos condensadores arrefecidos a ar sobretudo em períodos de elevada temperatura ambiente. Para este equipamento a temperatura de condensação deve ser fixada entre 5°C a 8°C acima da temperatura da água que entra no condensador [10].

Para sistemas fechados a água terá de ser arrefecida para ser novamente usada e esse arrefecimento é efetuado, geralmente, numa torre de arrefecimento; no caso de sistemas abertos, por exemplo sistemas que utilizem água proveniente de um rio, não é necessária torre de arrefecimento no entanto deve avaliar-se as temperaturas de descarga de

modo a cumprirem a legislação vigente [28]. Para qualquer caso é necessário uma bomba(s) para bombear água [13]. Na Figura 20 pode ser visualizada a *performance* destes condensadores em diferentes situações.

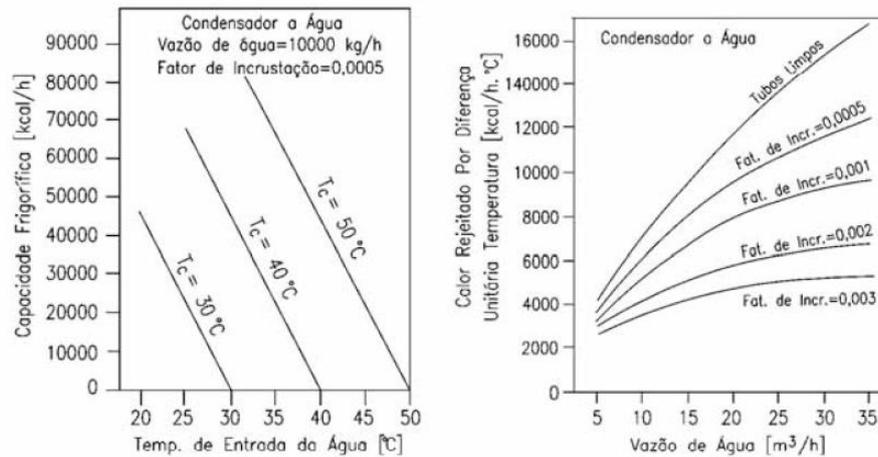


Figura 20 - Características típicas de condensadores arrefecidos a água [10]

3.3.2.3. Condensador evaporativo

Neste tipo de condensador o vapor a ser condensado passa pela serpentina que é continuamente molhada com água e que é atravessada por um fluxo de ar que vai evaporando alguma da água (esquema na Figura 21), o que melhora a taxa de remoção de calor permitindo que o fluido refrigerante condense a uma temperatura inferior [29]. É um sistema que requer ventilador(s) e bomba(s). Neste tipo de equipamentos deve existir uma diferença de 10°C a 15°C entre a temperatura de condensação e a temperatura de bolbo húmido do ar que entra no condensador [10].

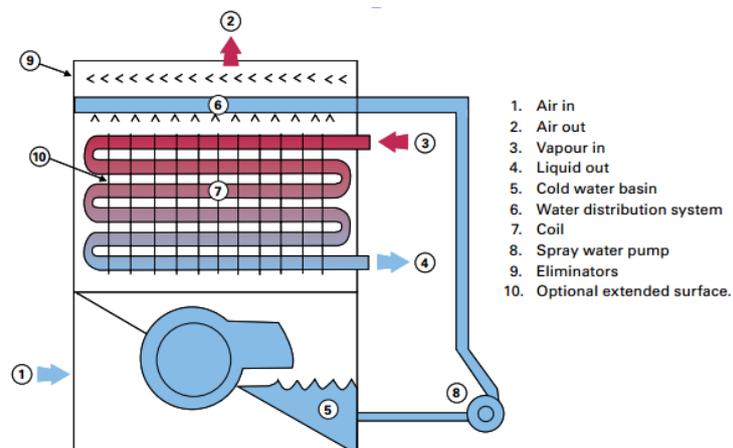


Figura 21 – Funcionamento de um condensador evaporativo [29]

3.3.3. Evaporador

Este equipamento é, tal como o condensador, um permutador de calor. Os evaporadores são divididos em diferentes grupos como se pode ver na tabela X.A capacidade de refrigeração do equipamento está dependente da diferença de temperaturas entre o meio a ser refrigerado e a substância refrigerante (quanto maior for esta diferença maior a transferência de calor) [20].

Método de alimentação	- Inundado - Expansão seca - Sobrealimentação	
Configuração do circuito	- Circuito em série simples - Circuito dividido - Circuitos paralelos múltiplos	
Método de circulação	- Convecção natural - Convecção forçada	
Tipo de construção	Tipo de superfície	- Tubos lisos - Placas - Tubos alhetados
	Evaporadores de líquido	- Tubo duplo - Baudelot - Carcaça e serpentina - Tubo e carcaça

Tabela 5 – Classificação dos evaporadores [10,25]

3.3.3.1. Métodos de descongelação

Devido aos evaporadores operarem grande parte do tempo abaixo de 0°C a água no ar congela e acumula-se nas serpentinas. Este fator leva a que a capacidade de transferência de calor se reduza o que provoca uma menor eficiência do equipamento. Por este motivo criaram-se métodos de descongelação [1,25].

3.3.3.1.1. Descongelação elétrica

Este tipo de descongelação implica que aquando da construção do evaporador se incorporem passagens paralelas aos tubos de refrigeração onde são introduzidos aquecedores de resistência elétrica [25]. Como ponto negativo tem o facto de necessitar de energia elétrica [20].

3.3.3.1.2. Descongelação a gás quente

Utilizando vapor descarregado (pelo compressor), o fluxo de fluido refrigerante é interrompido e o gás quente passa pelo evaporador para permitir a descongelação [20]. Por vezes aumenta-se a pressão de descarga para facilitar o descongelamento, no entanto essa opção é errada visto que penaliza todo o sistema para facilitar uma função menos frequente [30].

3.3.3.1.3. Descongelação a água

A descongelação é obtida através da pulverização de água sobre as serpentinas do evaporador. A mistura da água e água de degelo é recolhida por um tabuleiro (chamado tabuleiro de drenagem) e é encaminhada para fora do espaço refrigerado [25].

3.3.4. Dispositivo de estrangulamento

Este equipamento tem o objetivo de reduzir a pressão do refrigerante desde a pressão de condensação até à pressão de vaporização e regular o fluxo de refrigerante que chega ao evaporador [1].

3.3.4.1.1. Válvula de boia

As válvulas de boia mantêm constante o nível de líquido num reservatório. O seu modo de funcionamento é bastante simples: no reservatório existe uma boia que controla o nível de líquido abrindo ou fechando a válvula dependendo desse nível [31].

3.3.4.1.2. Tubo capilar

Consiste num tubo de pequeno diâmetro com um determinado comprimento através do qual o refrigerante se encaminha para o evaporador. A queda de pressão é conseguida pelo facto de o refrigerante ter de ultrapassar a resistência à fricção dada pelas paredes do tubo e pelo aumento da velocidade do refrigerante ao passar pelo tubo. Uma combinação entre o diâmetro e o comprimento do tubo permite atingir a queda de pressão

pretendida. Apesar do seu baixo custo o equipamento apresenta o inconveniente de não permitir ajustes para variações de carga [31].

3.3.4.1.3. Válvulas de expansão termostática

Este tipo de equipamento, que se encontra ilustrado na Figura 22, é o mais utilizado devido à sua eficiência e adaptabilidade e tem como característica o facto de manter um sobreaquecimento do vapor na saída do evaporador. A sua operação baseia-se em detetar a temperatura do refrigerante que deixa o evaporador através da utilização de um bolbo, que contém refrigerante saturado, e relacionar diferentes pressões causadas pela alteração da carga térmica de forma a abrir ou fechar a válvula (esquema do funcionamento deste equipamento na Figura 23). Por exemplo, no caso de a carga térmica aumentar, aumenta a pressão no bolbo, no tubo que liga ao bolbo, e no diafragma fazendo com que a agulha se desloque para baixo abrindo a válvula e, desse modo, aumenta o fluxo de refrigerante [10,14]. O grau de sobreaquecimento pode ser ajustado regulando a pressão que deve ser imposta à mola [10]. Quando em operação a temperatura do lado exterior da válvula é (muito) inferior à temperatura do lado interior, caso isso não aconteça poderá dever-se a sujidade ou humidade que são os principais problemas deste dispositivo [1]. Este equipamento tem o inconveniente de requerer uma queda de pressão mínima de 6 bar [32].

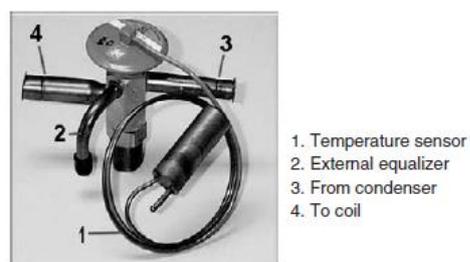


Figura 22 – Válvula de expansão termostática [1]

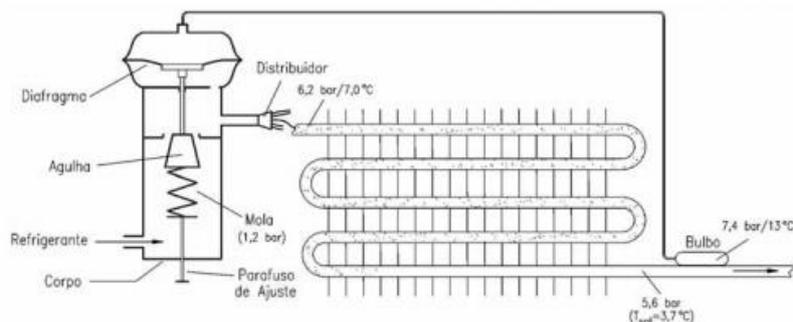


Figura 23 – Representação esquemática do funcionamento de uma válvula de expansão termostática [10]

3.3.4.1.4. Válvula de expansão eletrónica

Com recurso à Figura 24 explica-se o funcionamento deste equipamento. Com um sensor de temperatura de líquido, instalado na saída do evaporador, é detetada a presença de refrigerante líquido; quando tal não acontece a temperatura do sensor aumenta o que reduz a sua resistência elétrica. Esta variação é analisada por um circuito que envia um sinal de forma a posicionar corretamente a agulha da válvula. A utilização de válvulas de expansão eletrónica permite um controlo mais preciso e eficiente do fluxo de fluido frigorígeno sendo necessário uma queda de pressão mínima de 4 bar [10,32].

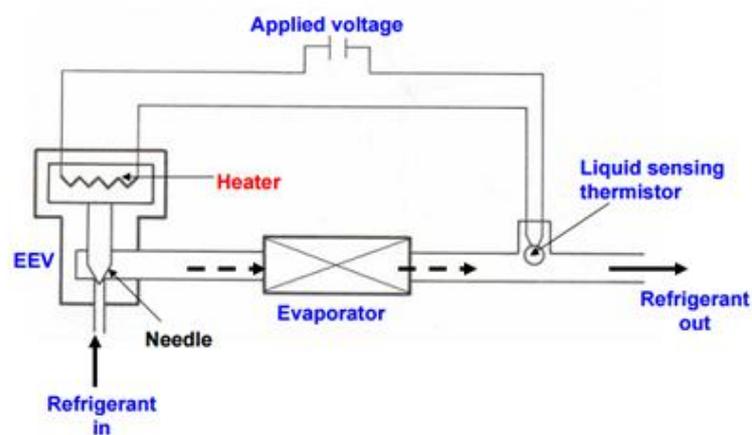


Figura 24 - Representação esquemática do funcionamento de uma válvula de expansão eletrónica [32]

3.3.4.1.5. Válvula de expansão a pressão constante

O funcionamento desta válvula, também conhecida como válvula de expansão automática, é devido à interação de duas forças opostas: a pressão do fluido frigorífico no evaporador e a pressão de mola, que influenciam o movimento de uma agulha. Quando a pressão da mola supera a pressão do refrigerante a agulha move-se de forma a abrir a válvula, quando a pressão da mola é superada pela do refrigerante a agulha move-se de forma a fechar a válvula. A sua aplicação é limitada a cargas constantes [10].

3.4. Fluido refrigerante

O refrigerante é o composto químico puro, ou mistura, que atua como fluido de trabalho no circuito de refrigeração.

Para assegurar uma taxa de transferência de calor razoável deve ter-se uma diferença de temperatura de 5 a 10°C entre o refrigerante e o meio com o qual se dá a troca de calor [1].

Apesar de não existir o fluido frigorígeno perfeito as características apresentadas na Tabela 5 seriam desejáveis.

Fluido frigorígeno	<ul style="list-style-type: none"> →Estabilidade química, compatível com os materiais de construção do sistema →Temperatura crítica e ponto triplo afastados dos valores com que se trabalha →Pouco danoso para o ambiente (“amigo do ambiente”) →Alto calor latente de vaporização →Baixo custo →Miscível com lubrificantes →Não corrosivo, não tóxico e não inflamável
---------------------------	---

Tabela 6 – Características de um bom fluido frigorígeno [20]

No anexo A são apresentadas algumas características dos refrigerantes mais comuns.

4. OPORTUNIDADES

A energia deve ser considerada como um fator de produção tão importante como o trabalho, o capital e as matérias-primas. Sendo assim, gerir a energia é tão importante como gerir recursos humanos ou financeiros.

A gestão da energia deve começar logo na fase de projeto das instalações e na escolha dos equipamentos, privilegiando-se equipamentos que apresentem uma maior eficácia energética. Mas essa ação não significa que as ações de gestão energética terminem. A gestão de energia é um processo contínuo e indispensável em qualquer organização e deverá permitir, de forma contínua, a utilização cada vez mais racional da energia [33].

Num mercado competitivo como o atual é importante a utilização de algumas ferramentas, tal como o *benchmarking*, para aferir o modo de funcionamento de um sistema/processo. Por esse motivo sugere-se a utilização da ferramenta mencionada de modo a avaliar se uma determinada empresa está a utilizar os recursos de uma forma inferior, praticamente semelhante ou superior às empresas cuja atividade é análoga à sua. Para sistemas de refrigeração industriais alguns índices de referência relevantes são os da eficiência energética, razão entre potência do sistema e a capacidade de refrigeração (por exemplo kW(quilowatt)/TR), custo específico, consumo específico e o EER (*Energy Efficiency Rate*) que é a razão entre a refrigeração e a energia elétrica fornecida [19].

As instalações de frio operam grande parte do tempo fora dos valores para os quais foram dimensionadas, como se pode ver na Figura 25, e, como já visto, existem equipamentos que se revelam menos eficientes a cargas parciais; por esse motivo e de forma a otimizar o funcionamento de uma instalação é importante saber quais as melhores práticas e tecnologias existentes no mercado.

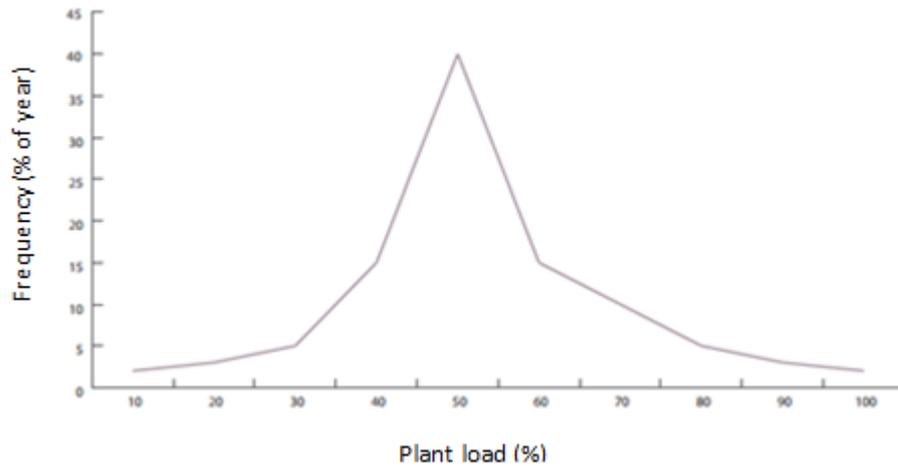


Figura 25 – Funcionamento típico de uma instalação de refrigeração [30]

4.1. Barreiras

Apesar das vantagens para o utilizador de energia e para a sociedade em geral devidas a uma utilização mais racional da energia, alguns obstáculos dificultam a implementação de novas tecnologias, a saber [3]:

- Desconhecimento, por parte dos consumidores, das tecnologias mais eficientes e seus potenciais benefícios;

- Aversão ao risco associado à introdução de novas tecnologias;

- As tecnologias mais eficientes são normalmente mais dispendiosas em termos de investimento inicial;

- Escassez de capital para realizar os investimentos e limitações no acesso a crédito em condições tão vantajosas como as obtidas pelas empresas responsáveis pela oferta de energia;

- Ausência de incentivos para os agentes envolvidos na seleção dos equipamentos e na gestão de energia das instalações;

4.2. O que medir

Para se conhecer o modo de funcionamento de um sistema é necessário proceder-se a algumas medições. Abaixo listam-se alguns dos parâmetros a ser medidos [10,20]:

- Temperaturas e pressões do sistema.
- Temperatura de bolbo seco do ar para condensadores arrefecidos a ar ou temperatura de bolbo húmido do ar para condensadores evaporativos ou condensadores arrefecidos a água.
- Temperatura do refrigerante no circuito frigorífico.
- Energia consumida pelo compressor(es) e equipamentos auxiliares.
- Pressão e velocidade do ar.
- Caudal de fluído refrigerante.

4.3. Medidas de redução de consumo de energia

Com o intuito de analisar os efeitos de alterações de equipamentos ou condições de funcionamento de sistemas de refrigeração existe um vasto número de documentos onde são apresentadas possíveis ações para a melhoria do sistema. No entanto, devido ao facto de não existirem instalações iguais a contabilização do efeito das medidas torna-se difícil de obter, isto é, a mesma medida em instalações diferentes pode originar poupanças (ou não) bastante dispares.

As medidas apresentadas na Tabela 8 são focadas em alterações passíveis de implementação numa instalação já existente, no entanto, nunca é demais salientar a importância de uma boa projeção da estrutura. Caso exista uma forte aposta na vertente energética a revisão do *design* da instalação pode permitir poupanças de 10 a 50% [3,27,30].

Os valores das potenciais economias são dados individualmente por cada item e não são cumulativos entre si [2]. Se não for dada informação em contrário as poupanças referidas são devidas à energia. Para as medidas tabeladas que não apresentem poupanças, estas podem ser vistas como boas práticas a implementar que contribuirão para uma poupança de energia mas cujo valor típico de poupança é desconhecido.

As alterações devem começar a ser efetuadas no sistema de armazenamento seguindo-se o sistema de distribuição e por fim o sistema de geração de frio para que este último não fique sobredimensionado [19].

Tabela 8 - Medidas de poupança de energia aplicáveis a um sistema de refrigeração

Área	Medida	Poupança
<i>Iluminação</i>	→Aproveitamento da luz natural (utilização de <i>skylitte</i>) [3]	
	→Avaliar quais as lâmpadas mais eficientes para o caso em análise e utilizá-las. É recomendado ter um nível de iluminação de 10W/m ² [10,21]	2% [2] 10% ¹ [34]
<i>Isolamento</i>	→Utilizar maior espessura e um isolante com baixa condutividade térmica. Isolantes mais comuns: poliestireno expandido (EPS), poliestireno extrudido (XPS), lã mineral (rocha, vidro) (MW), poliuretano (PUR), aglomerado negro de cortiça (ICB) [3,10]. <u>Nota:</u> poderá ser benéfico não isolar a linha que une o compressor ao condensador.	
	→Utilizar vidros e janelas com baixa condutividade térmica. [3]	
	→ Os cabos elétricos devem ser introduzidos no interior da câmara através do menor número possível de aberturas e devem ter um revestimento de plástico [7]	5 – 10% [2,22]
<i>Portas</i>	→Instalar portas automáticas [35]	
	→Instalar cortinas de ar na porta da câmara frigorífica [35]	7,5 - 10% ² [22]
	→Revestir portas com uma leve chapa de metal ou de plástico. Para portas sujeitas a grandes choques as chapas metálicas devem ser mais grossas. As portas devem possuir superfícies lisas e não absorventes [7]	10% ¹ [34]

¹ Contabilização conjunta das duas áreas² Considerando um COP entre 3 e 4

<i>Minimizar ganhos térmicos</i>	→Utilização de cores claras [10] →Manter o nível de pessoas dentro da câmara no mínimo [10]	
	→Se possível colocar antecâmara que funcione como filtro à entrada de calor e humidade [10]	12 – 17% ² [10]
	→Evitar que equipamentos que gerem ganhos térmicos para o sistema sejam colocados nas imediações e, na impossibilidade de o fazer, desligá-los quando a sua operação não for necessária [35] →Otimização do período de funcionamento do sistema de ventilação (devem permanecer desligados aquando da abertura de portas) [35]	
<i>Armazenamento de produtos</i>	→Armazenar os produtos na câmara frigorífica de forma a não obstruírem o fluxo de ar dos evaporadores [19] →Arrefecer os produtos antes de colocá-los na câmara caso seja possível [19] →Armazenar produtos que requeiram as mesmas necessidades de frio [10] →Evitar colocar produtos junto das paredes da câmara e manter um espaçamento entre eles [19]	
	→Avaliar a possibilidade de deixar a temperatura da câmara aumentar ligeiramente ao longo do dia [30]	2% [30]
<i>Refrigerante</i>	→Avaliar qual o refrigerante que melhor se adequa às características de funcionamento do sistema [24]	10% [24,27]
	→Reparar fugas de refrigerante: ir analisando os pontos mais propícios a esta ocorrência: juntas de dilatação, outras juntas mecânicas, pontos de junção de instrumentos de medição, válvulas e pontos com vibrações [19]	11 – 15% na poupança financeira [24,22]
<i>Recuperação de calor</i>	→Recuperar calor da descarga de vapor e do óleo de arrefecimento [30] →Instalar recuperador de calor [2]. <u>Nota:</u> Os compressores não devem trabalhar com este fim visto que originaria uma falsa economia [30]	2 – 60% [2,22,30]

² Considerando um COP entre 3 e 4

<i>Sistema de distribuição</i>	→Substituir periodicamente os filtros de refrigerante para as perdas de carga serem mínimas [19] →Instalar diâmetros superiores [19] →Instalar condutas tubulares em vez de condutas com secções retangulares [3] →Instalar filtros secadores na linha de líquido do sistema. Assegurar troca periódica dos filtros [19] →Proceder a tratamento químico e limpezas químicas e/ou mecânicas periódicas [10]	
	→Instalar purgadores de ar (eletrónicos ou manuais (no caso de não existir eletricidade disponível na localização do purgador)) [1]	2% [30]
<i>Instalação/ funcionamento de equipamentos</i>	→Instalar compressor mais eficiente / substituir compressor sobredimensionado [2]	2 - 5% [2]
	→Instalar VEV(s) (variador eletrónico de velocidade) [27]	2 – 20% [2,3,27,30]
	→Instalar ventiladores mais eficientes: substituir motores <i>shaded-pole AC (alternating current)</i> por <i>DC (direct current) electronically commutated</i> [35]	65% [35]
	→Instalar compressor num nível inferior ao evaporador para facilitar o retorno do óleo [10]	
	→Permitir a variação da pressão de condensação para tirar vantagens das condições ambiente [30]	9 – 35% [2,27,30]
	→Utilizar arrefecimento a água ou termossifão ao invés de sistema de injeção de líquido [30]	5 – 6% [19,30]
	→Instalar separador de óleo (para evitar acumulação de óleo lubrificante dos compressores no interior dos evaporadores [19]) →Instalar termostato / Trabalhar com a máxima temperatura de evaporação (se possível acima de 0°C) [10] →Trabalhar com a mínima temperatura de condensação possível [10]	2 - 4% por cada grau diminuído na diferença de temperaturas [22]

<i>Instalação/ funcionamento de equipamentos</i>	→Instalar pressostato [10] →Instalar <i>anti-sweat</i> [22] →Evitar que os condensadores sejam instalados em locais sujeitos a radiação solar direta ou próximos de fontes de calor [19]	
	→Adotar superfície de transferência de calor adicional no condensador assegurando um sobrearrefecimento [19].	1 – 9% [19,22,30]
	→Instalar condensador maior [22].	10% [22]
	→Utilização de válvulas de expansão eletrônicas em detrimento das válvulas de expansão termostáticas [19].	20% [27]
	→Evitar instalação do depósito de líquido em locais expostos ao sol ou sujeitos a temperaturas elevadas [19].	
	→Utilizar compressores de capacidades menores sendo cada um ligado apenas quando a carga assim o exigir (evitar trabalhar com cargas parciais) [24,30]	15% [36]
	→Programar o sistema para trabalhar, maioritariamente, nas horas nas quais o preço da tarifa elétrica é inferior [10]	
	→Utilização de <i>software</i> que permite a otimização da energia da instalação (por exemplo a tecnologia SCADA (<i>supervisory control and data acquisition system</i>) [30]	5 – 8% [22,30]
	→Evitar “curto-circuito” do ar, ou seja, garantir que o ar quente expelido pelos condensadores não seja sugado pelos ventiladores e assegurar que o fluxo de ar a passar pelos condensadores não é restringido. Manter o condensador sem obstruções. [19]	10% [22]

<i>Método de descongelamento</i>	→Avaliar qual o melhor método de descongelamento, por exemplo o <i>hot gas</i> apresenta poupanças relativamente ao descongelamento elétrico [19]	4,5 - 7% [19]
	→Manter as superfícies de troca de calor dos evaporadores livres de gelo ou qualquer outro elemento que diminua a superfície de transferência de calor: trabalhar com um sistema de controlo que assegure ciclos de degelo apenas quando for necessário (permite operação mais estável) por exemplo utilizando sensores. [19] →Programar ventilador para apenas voltar a operar quando a temperatura das serpentinas, após degelo atinge valores convenientes à operação [19]	2 – 5% [2,30]
	→Minimizar a capacidade do fluido ou produto refrigerado absorver o calor do descongelamento [24]	
	→Sempre que o degelo ocorre em horário fixo deve programar-se esse horário para as horas fora do horário de pico [19]	(Apenas) poupança financeira
	→No descongelamento por <i>hot gas</i> dedicar um compressor para essa função ao invés de se aumentar a pressão de descarga [30]	

5. CONCLUSÃO

A análise dos diferentes ciclos de refrigeração existentes permitiu perceber que ainda existe um grande potencial de melhoria neste campo. Pelas mais variadas razões, onde destacaria o COP, considero que o ciclo de compressão a vapor ainda não tem alternativa adequada no mercado.

Após o levantamento dos principais constituintes de uma instalação frigorífica é perceptível a complexidade a que cada instalação está sujeita. Provavelmente o dado mais importante a reter é o de que o custo de operação de um sistema de produção de frio é bastante superior ao seu custo inicial sendo, por isso importante um bom planeamento das características da instalação.

A importância de perceber a constituição de uma infraestrutura deste tipo e seus componentes foi/é de grande utilidade pois permite logo à partida projetar um conjunto de boas práticas a ser seguido.

Sendo a otimização energética um ponto importante nos dias atuais já existe no mercado um conjunto de medidas e aperfeiçoamento de práticas/equipamentos que permite obter poupanças consideráveis. No entanto, devido às particularidades de cada sistema, a quantificação da poupança por medida torna-se difícil de obter e, como tal, deve ter-se sempre algum cuidado na forma como o potencial de cada medida é apresentado aos intervenientes interessados.

Ainda relativamente a medidas energéticas é recomendável fazer uma auditoria energética antes da introdução destas visto que desse modo é atingido um melhor conhecimento da instalação e das oportunidades de poupança nesta. Para qualquer alteração a introduzir deve analisar-se essa modificação no contexto geral, isto é, não faz sentido implementar uma medida em que se estima uma elevada poupança quando possa existir um conjunto de más práticas ou funcionamento defeituoso de equipamento que não permita ao sistema, ainda sem qualquer tipo de intervenção, funcionar de forma adequada.

Contrariamente às instalações com consumos superiores a 500tep/ano, que são obrigadas pela legislação a estarem inscritas no SGCIE e desse modo têm de cumprir com obrigações relativamente à redução do uso de energia, outras instalações com consumos anuais menores, pelo facto de não estarem sujeitas a esse tipo de imposições, poderão

representar um potencial de redução energética por instalação superior [37]. Muitas das vezes um conjunto de práticas que requerem pouco ou nenhum investimento podem permitir poupanças superiores a 20% em muitas das instalações de refrigeração [22].

Sendo certo que já existe um número apreciável de tecnologia que visa a melhoria energética nesta área, esforços devem continuar a ser desenvolvidos para se atingirem patamares de eficiência energética superiores de forma a assegurar um futuro risonho para gerações vindouras.

Como mensagem final nunca é demais repetir que a energia deve ser constantemente objeto de análise.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] İbrahim Dinçer and Mehmet Kanoglu, Refrigeration Systems and Applications, 2nd Edition
- [2] ISR-UCoimbra, ADENE e ADEME, Guia Técnico Programa Motor Challenge - Soluções para melhorar os sistemas accionados por motores eléctricos, 2007
- [3] BCSD Portugal, 2005, Manual de boas práticas de eficiência energética
- [4] SGCIE, Relatório Síntese de Janeiro de 2016
- [5] Portaria n.º 63/2008 de 21 de Janeiro, 1.ª série
- [6] Cengel, Y.A. and M.A. Boles, Thermodynamics: An Engineering Approach, 5th Edition
- [7] Universidade da Beira Interior Faculdade de Engenharia, 2012, Estado da arte do sector do frio por fileira
- [8] Michael J. Moran and Howard N. Shapiro, Fundamentals of Engineering thermodynamics, 6th Edition
- [9] ASHRAE, 2009, ASHRAE handbook – fundamentals. SI edition,
- [10] Venturini, O.J., Pirani, M.J., 2005, Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial, ELETROBRÁS/PROCEL, Rio de Janeiro
- [11] http://professor.unisinos.br/mhmac/Refrigeracao/CAP5_REx1.pdf
(consultado em 08-03-2016)
- [12] Brites, G.J.V.N., 2014. “Sistemas Energéticos”, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
- [13] Kai Wang and Edward A. Vineyard; New Opportunities for solar adsorption refrigeration
- [14] William Goetzler, Robert Zogg, Jim Young and Caitlin Johnson; Alternatives to vapor compression HVAC technology
- [15] Reinhard Radermacher, Bao Yang and Yunho Hwang; Integrating alternative and conventional cooling technologies
- [16] <https://enlightenme.com/evaporative-cooling-systems/> (consultado em 12-03-2016)
- [17] http://www.grimsby.ac.uk/documents/frperc/research/aircycle_research.pdf
(consultado em 14-03-2016))
- [18] JRC scientific and policy reports, 2012, Background report on EU-27 district heating and cooling potentials, barriers, best practice and measures of promotion
- [19] Eficiência energética em sistemas de refrigeração industrial e comercial, manual prático

- [20] Ceati International, 2010, Refrigeration Systems, Energy Efficiency Reference Guide,
- [21] U.S. Department of Energy, August 2010, Operations & maintenance best practices
- [22] Carbon trust, Refrigeration systems technology guide
- [23] ASHRAE, 2008, HVAC Systems & Equipment
- [24] Etsu, Hardwell, Didcot, Oxfordshire, OX11 0RA and Safety Services Refrigeration Cool Concerns, 2010, Good Practice Guide, Energy efficient refrigeration technology – the fundamentals
- [25] Wilbert F. Stoecker, Industrial Refrigeration Handbook
- [26] Arpakorn “Ping” Kumpanon and Rizwan Syed, 2015, Industrial Refrigeration Projects: Challenges and Opportunities for energy efficiency
- [27] Sustainability Victoria 2009, Energy efficiency best practice guide industrial refrigeration
- [28] Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Reference Document on the application of Best Available Techniques to Industrial Cooling Systems, December 2001
- [29] https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/37618/5/ECA768_Industrial_Refrigeration_Equipment.pdf (consultado em 10-04-2016)
- [30] NSW government, 2011, Energy Saver technology report industrial refrigeration and chilled glycol and water applications
- [31] Iit Kharagpur, Refrigeration and Air Conditioning
- [32] Carbon trust, How to minimize head pressure in refrigeration
- [33] Luis Roriz, Climatização: Concepção, instalação e condução de sistemas, 2ª Edição, Edições Orion
- [34] Eco-efficiency for Queensland Manufacturers, 2010, Refrigeration efficiency
- [35] Carbon trust, 2011. How to reduce heat gain in refrigeration
- [36] Carbon trust, How to maintain refrigeration equipment
- [37] Ribeiro, J.M.B., 2015. “Sistemas Energéticos”, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

ANEXO A

Refrigerant		Chemical Formula	Molecular Mass	Boiling Pt. (NBP) at 101.325 kPa, °C	Freezing Point, °C	Critical Temperature, °C	Critical Pressure, kPa	Critical Density, kg/m ³	Refractive Index of Liquid ^{b,c}
No.	Chemical Name or Composition (% by Mass)								
728	Nitrogen	N ₂	28.013	-195.8	-210.0	-146.96	3395.8	313.3	1.205 (83 K) 589.3 nm
729	Air	—	28.959	-194.25	—	-140.59	3789.6	335.94	—
740	Argon	Ar	39.948	-185.85	-189.34	-122.46	4863.0	535.6	1.233 (84 K) 589.3 nm
732	Oxygen	O ₂	31.999	-182.96	-218.79	-118.57	5043.0	436.14	1.221 (92 K) 589.3 nm
50	Methane	CH ₄	16.043	-161.48	-182.46	-82.586	4599.2	162.66	—
14	Tetrafluoromethane	CF ₄	88.005	-128.05	-183.61	-45.64	3750.0	625.66	—
170	Ethane	C ₂ H ₆	30.07	-88.581	-182.8	32.72	4872.2	206.18	—
503	R-23/13 (40.1/59.9)	—	87.247	-87.76	—	18.417	4280.5	565.68	—
508A ^d	R-23/116 (39/61)	—	100.1	-87.233	—	10.192	3650.8	567.58	—
508B ^d	R-23/116 (46/54)	—	95.394	-87.206	—	11.205	3771.6	568.45	—
23	Trifluoromethane	CHF ₃	70.014	-82.018	-155.13	26.143	4832	526.5	—
13	Chlorotrifluoromethane	CClF ₃	104.46	-81.48	-181.15	28.85	3879	582.88	1.146 (25) ²
744	Carbon dioxide	CO ₂	44.01	-78.4 ^d	-56.558 ^d	30.978	7377.3	467.6	1.195 (15)
504	R-32/115 (48.2/51.8)	—	79.249	-57.906	—	62.138	4428.8	504.68	—
32	Difluoromethane	CH ₂ F ₂	52.024	-51.651	-136.81	78.105	5782.0	424	—
410A	R-32/125 (50/50)	—	72.585	-51.446	—	71.358	4902.6	459.53	—
125	Pentafluoroethane	C ₂ HF ₅	120.02	-48.09	-100.63	66.023	3617.7	573.58	—
1270	Propylene	C ₃ H ₆	42.08	-47.62	-185.2	91.061	4554.8	230.03	1.3640 (-50) ¹
143a	Trifluoroethane	CH ₃ CF ₃	84.041	-47.241	-111.81	72.707	3761.0	431.0	—
507A	R-125/143a (50/50)	—	98.859	-46.741	—	70.617	3705	490.77	—
404A	R-125/143a/134a (44/52/4)	—	97.604	-46.222	—	72.046	3728.9	486.53	—
502	R-22/115 (48.8/51.2)	—	111.63	-45.174	—	80.507	4016.8	568.70	—
407C	R-32/125/134a (23/25/52)	—	86.204	-43.627	—	86.034	4629.8	484.23	—
290	Propane	C ₃ H ₈	44.096	-42.11	-187.62	96.74	4251.2	220.4	1.3397 (-42)
22	Chlorodifluoromethane	CHClF ₂	86.468	-40.81	-157.42	96.145	4990.0	523.84	1.234 (25) ²
115	Chloropentafluoroethane	CClF ₂ CF ₃	154.47	-39.25	-99.39	79.95	3129.0	614.8	1.221 (25) ²
500	R-12/152a (73.8/26.2)	—	99.303	-33.603	—	102.09	4168.6	495.1	—
717	Ammonia	NH ₃	17.03	-33.327	-77.655	132.25	11 333.0	225.0 ^d	1.325 (16.5)
12	Dichlorodifluoromethane	CCl ₂ F ₂	120.91	-29.752	-157.05	111.97	4136.1	565.0	1.288 (25) ²
134a	Tetrafluoroethane	CF ₃ CH ₂ F	102.03	-26.074	-103.3	101.06	4059.3	511.9	—
152a	Difluoroethane	CHF ₂ CH ₃	66.051	-24.023	-118.59	113.26	4516.8	368	—
124	Chlorotetrafluoroethane	CHClF ₂ CF ₃	136.48	-11.963	-199.15	122.28	3624.3	560.0	—
600a	Isobutane	C ₄ H ₁₀	58.122	-11.75	-159.42	134.66	3629.0	225.5	1.3514 (-25) ¹
142b	Chlorodifluoroethane	CClF ₂ CH ₃	100.5	-9.15	-130.43	137.11	4055.0	466.0	—
C318	Octafluorocyclobutane	C ₄ F ₈	200.03	-5.975	-39.8	115.23	2777.5	619.97	—
600	Butane	C ₄ H ₁₀	58.122	-0.49	-102.7	151.98	3796.0	227.94	1.3562 (-15) ¹
114	Dichlorotetrafluoroethane	CClF ₂ CClF ₂	170.92	3.586	-94.15	145.68	3257.0	579.97	1.294 (25)
11	Trichlorofluoromethane	CCl ₃ F	137.37	23.708	-110.47	197.96	4407.6	554.0	1.362 (25) ²
123	Dichlorotrifluoroethane	CHCl ₂ CF ₃	152.93	27.823	-107.15	183.68	3661.8	550.0	—
141b	Dichlorofluoroethane	CCl ₂ FCH ₃	116.95	32.05	-103.5	204.4	4212.0	458.6	—
113	Trichlorotrifluoroethane	CCl ₂ FCClF ₂	187.38	47.585	-36.22	214.06	3392.2	560.0	1.357 (25) ²
718 ³	Water	H ₂ O	18.015	99.974	0.01	373.95	22 064.0	322.0	—

Notes:

^aData from NIST (2007) REFPROP v. 8.0.

^bTemperature of measurement (°C, unless kelvin is noted) shown in parentheses. Data from CRC (1987), unless otherwise noted.

^cFor the sodium D line.

^dSublimes.

^eAt 527 kPa.

References:

¹Kirk and Othmer (1956).

²Bulletin B-32A (DuPont).

³Handbook of Chemistry (1967).

⁴NIST Standard Reference Database 23, v. 7 (Lemmon et al. 2002).

Tabela 7 - Características de alguns refrigerantes [9]

Type	Examples	ODP *	GWP **
CFC	R12 R502 R11	High	High
HCFC	R22 R409A R411B	Low	High
NH ₃ Ammonia	R717	Zero	Very low
HFC	R134a R404A R407C R410C R507	Zero	High
HC e.g. propane, iso-butane	R600a R290 Care 30 Care 50 R1270	Zero	Very low
CO ₂ Carbon dioxide		Zero	Very low

*Ozone depletion potential

**Global warming potential

Tabela 8 - Potencial dano para o ambiente de alguns refrigerantes [20]