

# Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração na Indústria



GUIA DE BOAS PRÁTICAS



Agência para a Energia

# Prefácio

A refrigeração é o processo de arrefecimento, levado com frequência a temperaturas muito inferiores à do ponto de congelação da água e tem sido usada, quase desde o princípio da civilização, para conservar alimentos e aumentar o conforto do homem. Naturalmente, nos tempos primitivos, os únicos meios de refrigeração eram os que a própria natureza proporcionava, como a frialdade das cavernas, o frio da água das fontes e dos rios, assim como o gelo natural que era recolhido e armazenado para ser usado no tempo quente. Mas com o desenvolvimento de meios mecânicos para obtenção de temperaturas baixas, o emprego da refrigeração ampliou-se tanto que grande parte da nossa atual maneira de viver seria impossível sem ela.

A refrigeração é utilizada principalmente para facilitar e aumentar o conforto do dia a dia. A fabricação de gelo, o transporte de víveres rapidamente deterioráveis, os armazéns frigoríficos e os alimentos congelados são possíveis devido à refrigeração mecânica e permitem aumentar a variedade dos alimentos utilizáveis ao longo do ano. O emprego da refrigeração no condicionamento de ar, por exemplo, torna possível anular o desconforto provocado pelo tempo quente nos escritórios, nas lojas, nos cinemas e nas nossas casas.

Finalmente, poder-se-á dizer que a refrigeração empregada pela Ciência e pela Indústria tem contribuído para o desenvolvimento e a produção de muitos artigos de grande utilidade.

Sendo os sistemas de refrigeração responsáveis por uma parte significativa dos consumos energéticos em determinados subsectores industriais, faz todo o sentido promover a racionalização desses consumos e a sua redução. Contribui para a redução de custos e para a notoriedade das empresas que fazem esse esforço e é sem dúvida uma ajuda assinalável no combate às alterações climáticas.

Com este Guia de Boas Práticas pretende-se de uma forma simples e efetiva dar um conjunto de orientações às Empresas e Técnicos que lidam com estes sistemas, no sentido de poderem ser desencadeadas ações que conduzam à redução de emissões e a forma mais fácil de fazer isto é utilizar a energia mais eficientemente.

Assim, será apresentado um conjunto de boas práticas e de tecnologias disponíveis na área dos sistemas de refrigeração industriais que, se forem adotadas, poderão proporcionar reduções de consumos de energia e de emissões de gases poluentes que contribuem para o efeito de estufa, associados a tais sistemas, além de que este Guia procurará ser um suporte para uma melhor compreensão dos sistemas de refrigeração e de como é que as economias de energia podem ser conseguidas.

Em suma, espera-se que o presente documento contribua para a promoção das tecnologias e práticas referidas, conduzindo a uma indústria nacional cada vez mais moderna e competitiva, pela racionalização dos seus consumos energéticos, beneficiando desse modo não só as empresas potenciais utilizadoras, mas também o País dada a sua forte dependência energética do exterior.

# Índice

<b>1. Introdução</b>	4
<b>2. Sistemas de Refrigeração</b>	7
2.1. Ciclos de Refrigeração	7
2.2. Fluidos frigorigêneos	13
2.3. Fatores que afetam a eficiência dos sistemas de refrigeração	19
2.3.1 Parâmetros que atestam a eficiência de um equipamento de refrigeração – COP, EER, ESEER e Eficiência em kW/TR	19
2.3.2 Fatores chave a considerar	22
2.3.3 Outros aspectos a ter em consideração	24
2.4. O que fazer para identificar medidas de URE em sistemas de refrigeração	24
<b>3. Boas Práticas e tecnologias energeticamente eficientes aplicáveis aos Sistemas de Refrigeração</b>	28
3.1. Boas práticas e o que deve ser evitado	29
3.2. Medidas aplicáveis aos Sistemas de Refrigeração, conducentes a economias de energia	34
<b>4. Conclusões</b>	56
<b>5. Referências Bibliográficas</b>	59

1

# In tro du çã o

Para que se produza a refrigeração, o calor deve ir sendo retirado da substância que se vai progressivamente arrefecendo. Este fluxo de calor terá somente lugar quando existir um agente ou substância a uma temperatura inferior à da substância que está sendo refrigerada. Por outras palavras, o calor só fluirá de uma temperatura mais alta para uma temperatura mais baixa. O fluxo de calor ou transferência de calor depende da diferença de temperaturas existente entre as duas substâncias, das dimensões das superfícies que intervêm no processo e do isolamento que possa existir ao longo do fluxo de calor.

Este Guia Técnico cobre essencialmente os sistemas de refrigeração que são conhecidos como sistemas frigoríficos de tipo industrial. Um sistema frigorífico corresponde a um processo de extração de calor ou de produção e conservação de frio, entendendo-se tal como um sistema projetado de modo a manter um dado meio a uma temperatura inferior a 0 °C, absorvendo continuamente calor desse meio. Contudo, os sistemas de arrefecimento forçado que operam entre 0 °C e a temperatura ambiente são bastante usuais e baseiam-se nas mesmas tecnologias utilizadas para a refrigeração ou extração de calor dentro de determinado gradiente de temperaturas. Portanto, a maior parte das medidas descritas neste documento para sistemas de refrigeração são semelhantes às indicadas para sistemas de arrefecimento forçado e podem igualmente ser aplicadas a esses sistemas.

Apenas os sistemas de arrefecimento que funcionam a uma temperatura superior à temperatura ambiente devem ser tratados separadamente. A utilização de torres de arrefecimento para remoção de calor não é discutida neste Guia, ainda que também envolva sistemas de motores, sobretudo bombas e ventiladores.

O potencial de economia de energia associado a tais equipamentos é normalmente o que é típico encontrar-se em sistemas de bombagem e em sistemas de ventilação, como por exemplo a substituição de motores por outros de rendimento superior, a aplicação de variadores eletrónicos de velocidade nos motores de tais componentes, etc.

É de salientar que as torres de arrefecimento deverão ser sempre preferidas comparativamente a sistemas ativos frigoríficos e de arrefecimento, dadas as poupanças significativas de energia que daí resultam. Também os sistemas frigoríficos ou de arrefecimento “acionados” termicamente (sistemas de absorção) não são discutidos em detalhe neste documento, ainda que sejam mencionados como podendo constituir uma boa alternativa aos sistemas de compressão de vapor.

Feita esta introdução sobre o que se entende por sistemas de refrigeração, tem interesse sabermos qual é o peso relativo destes sistemas em termos de consumos energéticos. Estima-se que a refrigeração industrial poderá representar cerca de 10% do consumo de energia elétrica na Indústria Portuguesa, ou seja cerca de 1,6 TWh/ano (com base no Balanço Energético provisório de 2018, da DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia, e no que se conhece dos pesos relativos usuais destes sistemas nos vários subsectores industriais, a partir da informação de diversas auditorias energéticas, realizadas no âmbito do cumprimento da legislação vigente (como o atual regulamento SGCI, instituído pelo Decreto-Lei n.º 71/2008 de 15 de abril) e de diversos estudos nacionais e comunitários), sendo a maioria deste consumo (mais de 90%) devido às Indústrias de Alimentação e Bebidas e às Indústrias Químicas e de Plásticos. A Tabela 1 dá uma indicação dos pesos relativos dos sistemas de refrigeração nos consumos de energia elétrica que é frequente encontrarmos em vários subsectores industriais.

**Tabela 1 – Valores típicos de % do consumo de energia elétrica associados a sistemas de refrigeração**

SUBSETOR / INDÚSTRIA	PERCENTAGEM TÍPICA
Laticínios	20 - 45
Fabricação de produtos à base de carne	45 - 80
Preparação e congelação de produtos de pesca e de aquacultura / Produção de conservas de peixe	65 - 80
Conservação de frutos e de produtos hortícolas (incluindo congelação)	60 - 85
Fabricação de malte e cerveja	10 - 30
Fabricação de artigos de matérias plásticas	5 - 18
Fabricação de produtos químicos	5 - 30

Considerando que o potencial de economia de energia tipicamente associado aos sistemas frigoríficos industriais é avaliado como podendo atingir um valor da ordem dos 20%, isto equivale a aproximadamente 313 GWh/ano ou a uma redução de custos energéticos anuais de cerca de 34,5 milhões de euros (se se considerar um custo médio de 0,110 EUR/kWh), a que corresponderia uma redução anual de aproximadamente 147 200 toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>. Isto significa que estamos perante valores não desprezáveis de possíveis poupanças e que a par de todos os benefícios de melhoria da eficiência energética e obviamente de ordem económica daí resultantes, serão igualmente importantes as correspondentes repercussões em termos de redução de impactos ambientais para o Setor Industrial.

Existem três importantes razões pelas quais vale a pena investir tempo e esforço em eficiência energética e, portanto, na redução de custos energéticos associados a equipamentos e sistemas, como os abordados neste Guia:

- É possível economizar energia e dinheiro, identificando e eliminando desperdícios de energia, e havendo redução de custos tal refletir-se-á em ganhos de competitividade para as próprias empresas que desenvolverem esse esforço;
- Melhora-se a fiabilidade e o desempenho destes sistemas;
- Contribui-se para a redução do impacto ambiental, através de menores consumos de energia e das correspondentes emissões de gases poluentes.

Daí o interesse deste Guia para quem opera com tais equipamentos ou tem a responsabilidade da sua gestão, para dar a conhecer tais benefícios e ajudar a estimular alterações de práticas. Salienta-se, no entanto, que a identificação de oportunidades de poupanças energéticas em refrigeração é uma tarefa complexa e que requer tempo. O número de opções a considerar é apreciável, pelo que é essencial que seja seguida uma abordagem lógica e estruturada, tendo em conta que é conveniente categorizar as várias oportunidades por diferentes fases – no projeto (de processos, sistemas e componentes) e na operação e manutenção. Na 1ª fase enquadra-se tudo o que tem a ver com a seleção e o “layout” da nova instalação de frio e com modificações da instalação existente. A 2ª fase, que é aquela em que mais incidirá o presente documento, diz respeito à operação efetiva da instalação de frio existente.





2

# Sistemas de Refrigeração

Neste capítulo procurar-se-á relembrar e esclarecer importantes conceitos de refrigeração, necessários para uma completa compreensão do que é um sistema de refrigeração ou instalação de frio e de como é que deve operar e ser mantida de forma eficiente.

## 2.1. Ciclos de Refrigeração

A maior parte dos sistemas frigoríficos baseia-se no ciclo de compressão de vapor com recurso a um fluido frigorígeno (refrigerante) no qual é possível a sua mudança de fase do estado líquido para o estado gasoso. Os principais componentes de um sistema frigorífico são o compressor, o condensador e o evaporador. Na Figura seguinte encontra-se representado um ciclo de refrigeração de vapor, por exemplo para refrigerar água (ou seja, no evaporador, o calor do processo é admitido sob a forma de água quente, pretendendo-se que com o efeito de refrigeração se obtenha na saída água refrigerada).

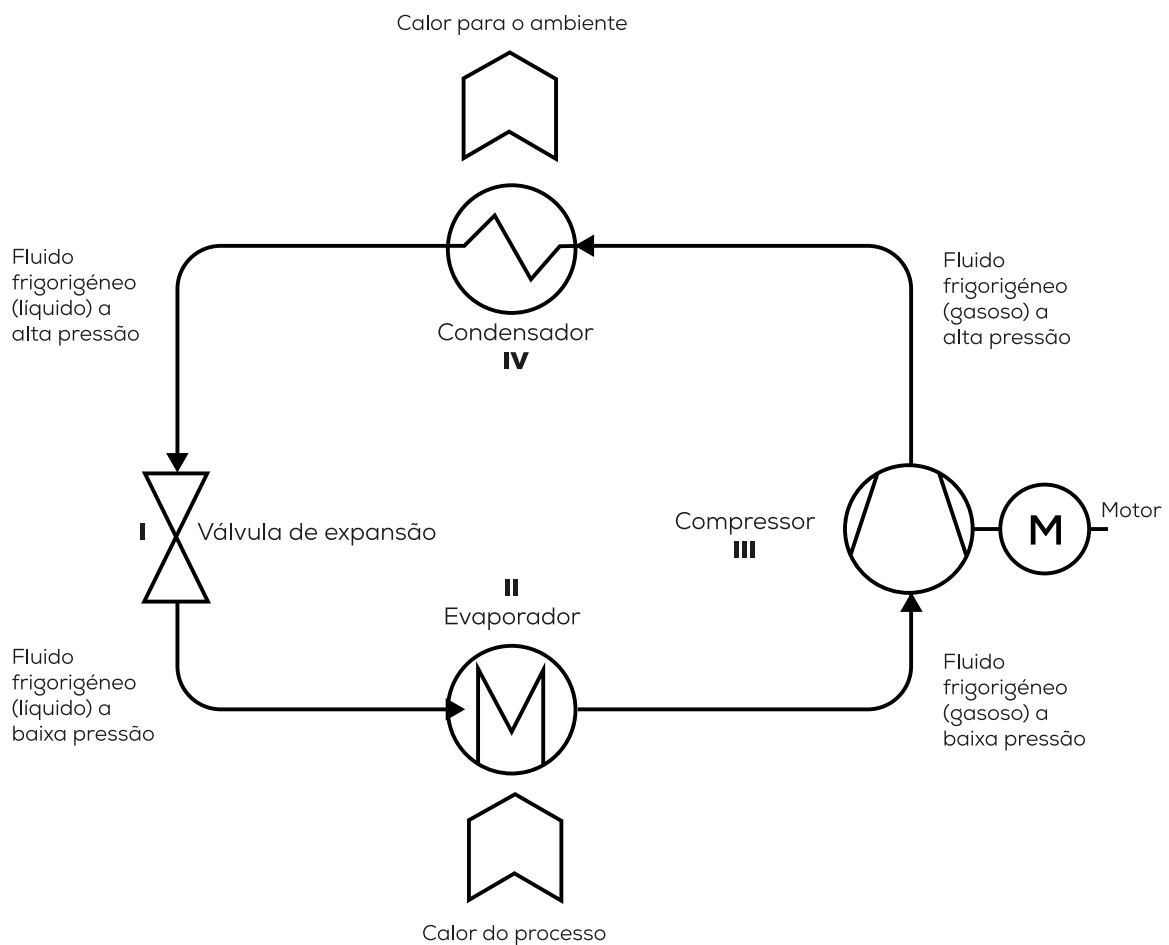


Figura 1 – Ciclo básico de compressão de vapor

Dependendo da aplicação, o sistema pode ser constituído por vários compressores, condensadores e evaporadores. A transmissão de calor no processo de refrigeração pode realizar-se diretamente através de um permutador de calor ou por via de um circuito secundário de arrefecimento, em especial se os riscos de contaminação derivados de fuga do fluido frigorígeno forem elevados. Na gama de temperaturas acima de 0 °C é frequente a utilização de água gelada.



**Evaporador:** No interior do permutador de calor do evaporador, o fluido é vaporizado. O calor proveniente do espaço condicionado pelo evaporador provoca a evaporação (ou vaporização) do fluido a uma temperatura muito baixa, originando-se vapores a baixa temperatura e baixa pressão.

**Compressor:** Através da tubagem que liga o evaporador ao compressor, este faz a aspiração dos vapores do fluido frigorífero do evaporador, comprimindo-os para uma pressão mais elevada. Da compressão resulta, também, para o fluido, uma elevação da sua temperatura. Os compressores são usualmente instalados centralizados numa sala de máquinas. Há atualmente em utilização três grupos principais de compressores: alternativos ou de pistões, rotativos e de parafuso, e centrífugos. Mais adiante indicar-se-á para cada um destes tipos de compressores a gama típica de potências.

**Condensador:** Normalmente não se localiza centralizado. No seu permutador de calor é feita a transferência do calor trazido pelo fluido frigorífero para um outro meio que poderá ser o ar ambiente. À medida que os vapores do fluido, sob a forma de gás a alta pressão, avançam no interior das tubagens do condensador, iniciando-se a troca térmica, vão perdendo o sobreaquecimento que trazem da compressão e arrefecendo, até que iniciam a mudança de estado e se encontram totalmente em fase líquida e a uma pressão constante. Sob a forma de líquido a alta pressão e a uma temperatura ligeiramente mais elevada que a temperatura ambiente, abandonam o condensador.

**Válvula de Expansão:** Neste dispositivo faz-se, de modo controlado, a passagem do fluido frigorífero sob forma de líquido a alta pressão, para as tubagens do evaporador. O fluido que se encontrava em fase líquida e a alta pressão (à pressão de condensação), ao passar através de um orifício da válvula, fica submetido a uma pressão baixa (pressão de evaporação) originada pela aspiração do compressor. Com esta despressurização, o ponto de ebulição do fluido baixa significativamente, pelo que este começa a vaporizar-se a uma temperatura baixa que vai originar o "frio" no interior das tubagens do seu permutador.

O ciclo representado na Figura 1 pode ser seguido num diagrama de pressões-entalpias como o que se representa na Figura 2.

Em I o fluido refrigerante que se encontrava líquido à pressão  $P_c$  passa através da válvula de expansão, onde a sua pressão baixa a  $P_e$ , que é a pressão no evaporador e a pressão de sucção do compressor. A refrigeração do fluido refrigerante desde a temperatura de condensação até à temperatura de evaporação resulta da vaporização de uma pequena porção do líquido imediatamente a jusante da válvula de expansão. O vapor produzido desta forma designa-se por vapor "flash".

O estado da mistura de fluido refrigerante líquido e de vapor à entrada do evaporador está representado no diagrama pelo ponto **A**. Admitindo que a expansão na válvula é isoentálpica, se a massa de fluido vaporizado for  $f$  quilogramas por quilograma de refrigerante circulado, pode escrever-se:

$$h_{ve} \cdot f + h_{le} \cdot (1 - f) = h_{lc}$$

ou

$$f = (h_{lc} - h_{le}) / (h_{ve} - h_{le})$$

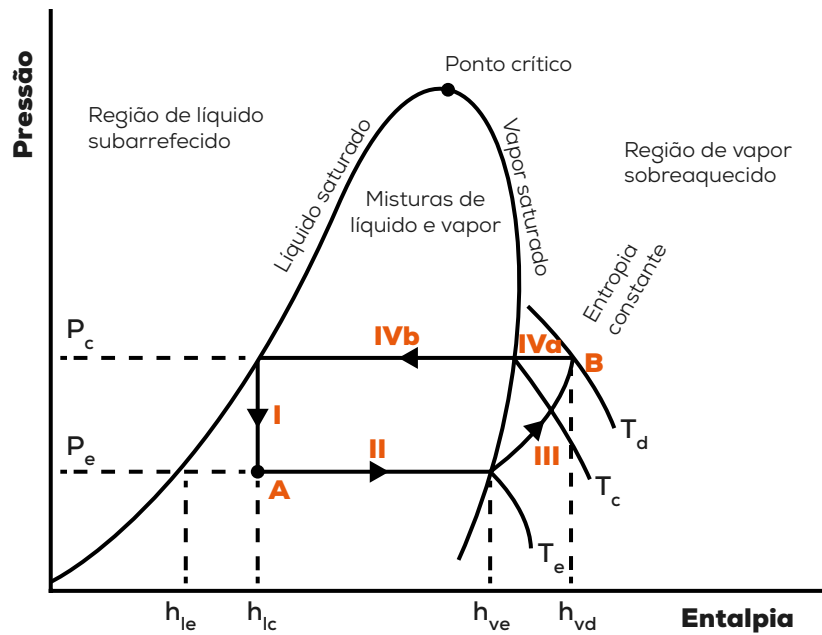


Figura 2 – Ciclo básico de compressão de vapor no diagrama de pressões-entalpias

A linha II representa a vaporização do líquido restante, a temperatura constante, e a transferência de calor entre o fluido que está a ser refrigerado (e que no exemplo apresentado considerámos ser água) e o fluido refrigerante que circula no evaporador. O **efeito refrigerante**, por cada quilograma de fluido refrigerante em circulação, é dado por:

$$\begin{aligned} \text{Efeito refrigerante} &= (h_{ve} - h_{le}) \cdot (1 - f) \\ &= h_{ve} - h_{lc} \end{aligned}$$

Continua a ser vulgar medir o efeito de refrigeração em toneladas de refrigeração (TR), sendo cada tonelada de refrigeração equivalente a 12000 Btu/h ou 3025 kcal/h ou 3,517 kW. Se se pretender uma refrigeração de X kJ/h, vem que o caudal de fluido refrigerante deve ser:

$$m = X / (h_{ve} - h_{lc}) \text{ kg/h}$$

se  $h_{ve}$  e  $h_{lc}$  forem dados em kJ/kg.

A linha III representa a compressão do fluido refrigerante, sob a forma de vapor, desde a pressão  $P_e$  até  $P_c$ . Se a compressão for adiabática e irreversível, a evolução dá-se no diagrama segundo uma curva de entropia constante. Simultaneamente dá-se um aquecimento e o vapor à saída do compressor encontra-se sobreaquecido, no estado B. O trabalho de compressão,  $W_c$ , é dado por:

$$W_c = m.(h_{vd} - h_{ve})$$

Finalmente, no condensador, o gás perde o seu sobreaquecimento e calor latente de vaporização, processo que no diagrama está representado pelas linhas IVa e IVb, a pressão constante, até tornar inteiramente à forma líquida. A quantidade de calor rejeitado é:

$$\text{Calor rejeitado no condensador} = m.(h_{vd} - h_{lc})$$

No ciclo descrito, estabeleceram-se diversas hipóteses simplificativas, pelo que se lhe pode chamar ciclo de saturação simples. Na prática, à entrada da válvula de expansão o líquido encontra-se a uma temperatura vários graus inferior à temperatura de condensação. Por outro lado, à entrada do compressor, o gás encontra-se alguns graus acima da temperatura de evaporação. Além disso, há perdas de carga na sucção, descarga e condutas de líquido, e o processo de compressão desvia-se mais ou menos da entropia constante.

Define-se **rendimento do ciclo, R**, como o quociente entre a energia removida no evaporador (efeito de refrigeração) e a energia fornecida ao compressor:

$$R = (h_{ve} - h_{lc}) / (h_{vd} - h_{ve})$$

Pelo exposto atrás, salientam-se os seguintes aspetos:

- A diferença de entalpias entre dois pontos do ciclo representa energia fornecida ou libertada;
- A energia fornecida ao refrigerante no evaporador (equivalente ao efeito de refrigeração) mais a energia fornecida ao compressor é igual à energia removida no condensador;
- Para perceber como é que um sistema de refrigeração funciona é necessário compreender como é que os pontos de ebulição dos refrigerantes variam com a pressão: a baixas pressões (p. ex., no evaporador) o refrigerante ferve a uma temperatura baixa e efetua o arrefecimento adequado (à temperatura de evaporação); e, a uma pressão mais elevada no condensador, o ponto de ebulição é muito superior e o refrigerante pode ser arrefecido e liquefeito por ar ou água à temperatura ambiente ou a uma temperatura próxima desta (temperatura de condensação);

- As temperaturas de evaporação e de condensação são muito importantes na refrigeração. Uma vez que há mudanças de fase (líquido → vapor e vapor → líquido) no evaporador e no condensador, as condições são de saturação e as temperaturas em questão correspondem a determinadas pressões. As temperaturas de evaporação e de condensação são normalmente medidas recorrendo a manómetros de pressão localizados na sucção e na descarga do compressor, com estes frequentemente calibrados para valores de temperatura para um determinado refrigerante.

Como se viu, num sistema de refrigeração de estágio único há quatro componentes principais – evaporador, condensador, compressor e válvula de expansão. Estes componentes existem disponíveis em variados tipos. Os evaporadores podem ser de tubo liso, de placas, de tubos e alhetas, arrefecedores de serpentina e carcaça, arrefecedores de tubo e carcaça (*shell and tube*) – tipo inundado ou expansão direta, etc., e dentro de algumas destas categorias podem encontrar-se arranjos construtivos distintos.

Entre os condensadores distinguem-se os que são arrefecidos a ar (convecção natural e convecção forçada) e os que são arrefecidos a água, que podem ser do tipo multitubular (*chiller*) com variantes de tubo duplo, de serpentina e carcaça (*shell and coil*) e de tubo e carcaça (*shell and tube*), condensadores de placas e condensadores evaporativos (unidades que combinam um condensador com uma torre de arrefecimento). Os compressores podem ser de parafuso, alternativos, de espiral ou *scroll*, centrífugos e do tipo rotativo, e as válvulas de expansão podem ser do tipo termostático, de boia e eletrónicas. Diferentes combinações destes componentes são adequadas para aplicações distintas.

Os sistemas com ciclo de estágio único são os mais comuns de se encontrar na refrigeração industrial, mas em grandes instalações com temperaturas inferiores a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  também é frequente a utilização de sistemas de refrigeração de dois e três estágios, para se obter eficiências superiores. A Figura 3 mostra uma representação esquemática de um sistema de refrigeração de dois estágios.

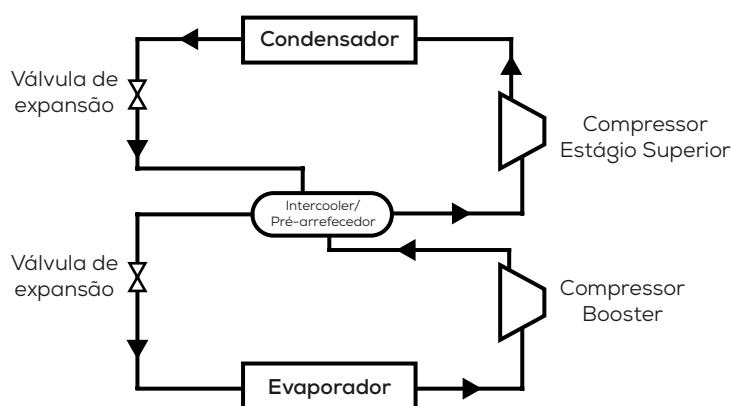


Figura 3 – Diagrama esquemático de um sistema de refrigeração de dois estágios

Por último, deve ser salientado que ao analisar-se um sistema de refrigeração, não se deve considerar unicamente que os consumos energéticos desse sistema e as oportunidades para a sua racionalização se situam apenas no(s) compressor(es) da instalação frigorífica. Ainda que a potência consumida no compressor seja obviamente importante porque afeta quer o investimento quer o custo operativo da máquina de refrigeração, também os equipamentos auxiliares associados a um tal sistema podem ser responsáveis por consumos significativos de energia elétrica e entre esses equipamentos destacam-se:

- Bombas e ventiladores de evaporadores;
- Bombas e ventiladores de condensadores;
- Bombas e ventiladores de circuitos secundários de distribuição de refrigerante;
- Bombas de óleo; e,
- Aquecedores para descongelação.

Portanto, estes equipamentos devem também ser tidos em consideração aquando de uma avaliação de consumos e custos devidos a sistemas de refrigeração. Os equipamentos auxiliares podem afetar significativamente a eficiência de sistemas operando sobretudo em regime de carga parcial, ou acrescentar consumos importantes aos que têm que ser garantidos para suprir as necessidades de refrigeração da instalação existente, podendo acontecer que em determinadas situações os custos de operação de tais equipamentos sejam verdadeiras surpresas.

## 2.2. Fluidos frigoríficos

A escolha de um fluido frigorífico deve obedecer a um conjunto de requisitos:

- Por razões de eficiência energética deve ter uma elevada entalpia de evaporação e temperaturas de evaporação e de condensação em gamas de pressão que sejam tecnicamente realizáveis. Pressões de funcionamento elevadas correspondem a sistemas de refrigeração dispendiosos e pressões de funcionamento subatmosféricas significam que podem ocorrer entradas de ar para o interior do sistema;
- Por razões de utilização, deve apresentar uma elevada estabilidade química;
- Por razões de segurança, não deve ser inflamável, explosivo ou tóxico;
- Por razões ambientais, deve ter baixo (preferencialmente, nulo) ODP (*Ozone Depletion Potential* ou Potencial de Destruição da Camada de Ozono) e baixo GWP (*Global Warming Potential* ou Potencial de Aquecimento Global ou de Efeito de Estufa);
- Devem ser tidas em consideração as propriedades de transferência de calor, a tendência para fugas, a disponibilidade do fluido em questão e, naturalmente, o seu custo.



De acordo com a NP EN 378-1, os fluidos frigorigênicos podem classificar-se como **“naturais”** ou **artificiais**, em função da sua proveniência. Na última categoria incluem-se os conhecidos hidrocarbonetos halogenados (CFC, HCFC e HFC), alguns deles muito associados à destruição da camada de ozono. Nesta classificação, as siglas ou referências associadas a cada fluido significam o seguinte:

- CFC - clorofluorcarbonetos que contêm cloro, flúor e carbono;
- HCFC - halocarbonetos que contêm hidrogénio, cloro, flúor e carbono;
- HFC - halocarbonetos que contêm hidrogénio, flúor e carbono;
- PFC - halocarbonetos totalmente fluorados que contêm flúor e carbono;
- HC - hidrocarbonetos puros, que contêm apenas hidrogénio e carbono.

Os fluidos frigorigêneos também podem ser classificados, pela sua composição, em:

- Substâncias puras - com um componente único e com uma temperatura única para cada pressão, quando entram em ebulição;
- Misturas azeotrópicas - compostas por várias substâncias puras, que não podem ser separadas por destilação, ou seja, quando evaporam, condensam como se fossem uma só substância com propriedades diferentes das dos seus constituintes; e,
- Misturas zeotrópicas (ou não azeotrópicas) - compostas por várias substâncias puras e em que o processo de mudança de fase não ocorre a temperatura e pressão constantes. Estas misturas comportam-se como uma mistura binária, em que a composição da fase de vapor é distinta da que se verifica na fase líquida, quando ambas se encontram em equilíbrio a uma determinada pressão e temperatura.

Em função dos circuitos em que se movimentam, os fluidos frigorigêneos podem ainda ser classificados como **fluidos primários** e **fluidos secundários**:

- Fluidos primários: Exemplos - R717 ( $\text{NH}_3$ ), R134a e R404A;
- Fluidos secundários: Exemplos - água glicolada e salmoura.

NOTA: A água glicolada é uma solução de água com um glicol, enquanto a salmoura é uma solução de sal ( $\text{NaCl}$  ou  $\text{CaCl}_2$ ) diluído com água.

Na Tabela 2 resume-se a classificação dos fluidos frigorigêneos mais conhecidos, incluindo alguns que já foram banidos e que não se encontram em utilização na sequência da subscrição pelo nosso País do Protocolo de Quioto e da produção de legislação nesse sentido.

Tabela 2 – Classificação dos Fluidos Frigoríficos

CLASSIFICAÇÃO DOS FLUIDOS FRIGORÍFICOS									
Grupo	Classe	N.º	Tipo	Designação	Fórmula	Propriedade	GWP <sup>(1)</sup>	ODP <sup>(2)</sup>	Segurança <sup>(3)</sup>
NATURAIS	Inorgânicos	R717	N	Amoníaco	NH <sub>3</sub>	Tóxico/Inflam.	0	0	B2
		R718	N	Água	H <sub>2</sub> O		0	0	A1
		R729	N	Ar	N <sub>2</sub> e O <sub>2</sub>		0	0	A1
		R744	N	Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	Asfixiante	1	0	A1
	Hidrocarbonetos	R50	HC	Metano	CH <sub>4</sub>	Inflamável	23	0	A3
		R600a	HC	Isobutano	CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	Inflamável	3	0	A3
		R290	HC	Propano	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	Inflamável	3	0	A3
		R170	CH	Etano	CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	Inflamável	3	0	A3
ARTIFICIAIS	CFC, HCFC e HFC (Série metano)	R12	CFC	Diclorodifluorometano	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	Fora de uso	10 600	1	A1
		R22	HCFC	Monoclorodifluorometano	CHClF <sub>2</sub>	Fora de uso	1 700	0,06	A1
		R23	HFC	Trifluorometano	CHF <sub>3</sub>	Pto. ebulição	10 600	0	A1
		R32	HFC	Difluorometano	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	Inflamável	550	0	A2
	HFC (Série etano)	R125	HFC	Pentafluoroetano	CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>		3 400	0	A1
		R134a	HFC	Tetrafluoroetano	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>		1 300	0	A1
		R143a	HFC	Trifluoroetano	CH <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	Inflamável	4 300	0	A2
	HFO	R1234yf		Tetrafluoropropeno	CH <sub>2</sub> =CFCF <sub>3</sub>	Inflamável	4	0	A2L
	Misturas zeotrópicas	R404A	HFC	R125/R143a/R134a	(44/52/4)		3 780	0	A1
		R407A	HFC	R32/R125/R134a	(20/40/40)		1 990	0	A1
		R407C	HFC	R32/R125/R134a	(23/25/52)		1 650	0	A1
		R417A	HFC	R125/R134a/R600	(47/50/3)		1 950	0	A1
		R422A	HFC	R125/R134a/R600a	(85/12/3)		3 040	0	A1
		R422D	HFC	R125/R134a/R600a	(65/12/3)		2 620	0	A1
	Misturas azeotrópicas	R502	CFC	R22/R115	(48,8/51,2)	Fora de uso	4 510	0,33	A1
		R507A	HFC	R125/R143a	(50/50)		3 850	0	A1
		R509A	HCFC	R22/R218	(44/56)	Fora de uso	5 560	0,2	A1
R511A		HFC	R290/R152a	(95/5)		ND	0	A1	
R512A		HFC	R134a/R152a	(5/95)		ND	ND	A1	

(1) Valor com efeitos em 100 anos, considerando como referência o valor de GWP do CO<sub>2</sub> = 1;

(2) Valor que toma como referência o valor de ODP = 1 para o refrigerante R11;

(3) A1 = Sem Propagação de Chama e Baixa Toxicidade; A2 e A2L = Baixa Inflamabilidade e Baixa Toxicidade; A3 = Alta Inflamabilidade e Baixa Toxicidade; B1 = Sem Propagação de Chama e Alta Toxicidade; B2 e B2L = Baixa Inflamabilidade e Alta Toxicidade; B3 = Alta Inflamabilidade e Alta Toxicidade

Fontes: Referências Bibliográficas [ 1 ], [ 3 ] e outras

Os principais grupos de fluidos usados como frigorigêneos são o Amoníaco (na atualidade), os Hidrocarbonetos Halogenados (mais no passado, porque vão sendo substituídos em parte, sobretudo os que têm cloro, por novos fluidos alternativos menos nocivos) e algumas Misturas Azeotrópicas e Zeotrópicas que se vão impondo a pouco e pouco. Dos Hidrocarbonetos Halogenados destacam-se os clorofluorcarbonetos (CFC), tais como o R-12 que já deixou de ser produzido, os hidroclorofluorcarbonetos (HCFC) como por exemplo o R-22, também já fora de uso, e os hidrofluorcarbonetos (HFC) como o R-134a, o R-404 e o R-507.

No passado os fluidos CFC foram bastante utilizados como fluidos frigorigêneos, mas o seu fabrico foi cancelado na sequência de acordos internacionais devido ao seu impacto extremamente nocivo aquando da sua libertação na atmosfera, devido à destruição que provocam na camada de ozono envolvente da Terra, por força da grande estabilidade química das suas moléculas e pelo cloro nelas existente. O nível de impacto ou destruição na camada de ozono é quantificado pelo índice ODP, sendo os piores refrigerantes aqueles que têm valores de ODP não nulos. A utilização de refrigerantes HCFC como o R-22 em instalações novas está proibida desde o ano 2000. Fluidos como o R12 têm sido substituídos pelo R134a (ainda que com problemas de perdas de rendimento, sendo tal substituição apenas recomendada para instalações de pequena capacidade e "altas" temperaturas) ou por fluidos como o R423A ou o R413A. Também no caso do R22 a sua substituição deu-se fundamentalmente com fluidos HFC como o R404A, o R507A, o R407C, o R410A, o R417A e outros.

As alternativas aos hidroclorofluorcarbonetos (HCFC) são os fluidos frigorigêneos naturais, tais como o dióxido de carbono, o amoníaco e a água. Os fluidos frigorigêneos mais usuais na atualidade são:

### **Amoníaco, NH<sub>3</sub> (R-717)**

O amoníaco é utilizado como fluido frigorigêneo em grandes instalações industriais. Quer em fase líquida, quer em fase gasosa, é incolor, tem cheiro muito intenso (acre) e é extremamente incomodativo. O amoníaco quando aquecido arde e pode ser explosivo a altas temperaturas. Em fase gasosa tem um peso específico que é cerca de metade do valor do ar. A principal desvantagem do amoníaco é a grande exigência dos seus elevados requisitos de segurança.

### **R-134a**

O R134a é um simples hidrofluorcarboneto ou composto HFC. Não apresenta cloro na sua composição, tem um ODP nulo e apresenta um valor modesto de GWP. As suas maiores aplicações verificam-se no setor automóvel, em condicionamento de ar e em refrigeração de média temperatura.

### **R407C**

O R407C é uma mistura ternária de hidrofluorcarbonetos ou compostos HFC, contendo 23% de R32, 25% de R125 e 52% de R134a. O R407C é considerado uma boa alternativa para substituição direta do R22 na indústria. Contudo, quando os sistemas são carregados com uma mistura zeotrópica (como é o caso), crescem as preocupações quanto à possibilidade de deslizamento entre os vários componentes da mistura (e fuga parcial, apenas de um ou mais, dos seus componentes) a temperaturas diferentes, bem como com a sua solubilidade nos óleos lubrificantes.

## R123 Diclorotrifluoretano, $\text{CHCl}_2\text{CF}_3$

É um líquido sintético, não combustível e volátil, que se usa como fluido frigorífero sobretudo em instalações comerciais e industriais de ar condicionado. O R123 é correntemente utilizado como fluido transitório de substituição de fluidos frigoríferos como os clorofluorcarbonetos e os bromofluorcarbonetos, cuja produção foi descontinuada na sequência do Protocolo de Montreal relativo às Substâncias que Empobrecem a Camada de Ozono, assinado em 1987. A Adenda de Copenhaga ao Protocolo de Montreal, em 1992, impôs para o R123 e outros hidrofluorcarbonetos o cancelamento do seu fabrico até ao ano de 2020.

Na Tabela seguinte dá-se uma perspetiva sobre a utilização de vários fluidos frigoríferos, além do amoníaco.

Tabela 3 – Utilização expectável de alguns dos fluidos frigoríferos mais recomendados

TIPO DE COMPRESSOR	GAMA TÍPICA DE POTÊNCIAS	FLUIDO ALTERNATIVO DE SUBSTITUIÇÃO DIRETA
Alternativo	1 a 400 kW <sub>el</sub>	HFC-407C
Parafuso	100 a 1000 kW <sub>el</sub>	HFC-407C HFC-134a
Scroll	5 a 100 kW <sub>el</sub>	HFC-407C HFC-134a
Centrífugo	Acima de 300 kW <sub>el</sub>	HFC-134a HCFC-123

Além destes refrigerantes, há toda uma diversidade de outros fluidos, que uma vez terminado o período de transição para alguns fluidos que ainda são permitidos, têm perspetivas de aplicação alargada, sobretudo no que respeita a refrigerantes HFC, refrigerantes com “reduzido GWP” (HFO, misturas HFO/HFC, R32) e alguns refrigerantes não halogenados, como fica evidente nos exemplos das duas Figuras seguintes, onde são dadas informações importantes quanto à escolha adequada do refrigerante em função da temperatura de evaporação para determinada instalação e sobre o sistema a adotar – simples compressão, dois estágios ou cascata.

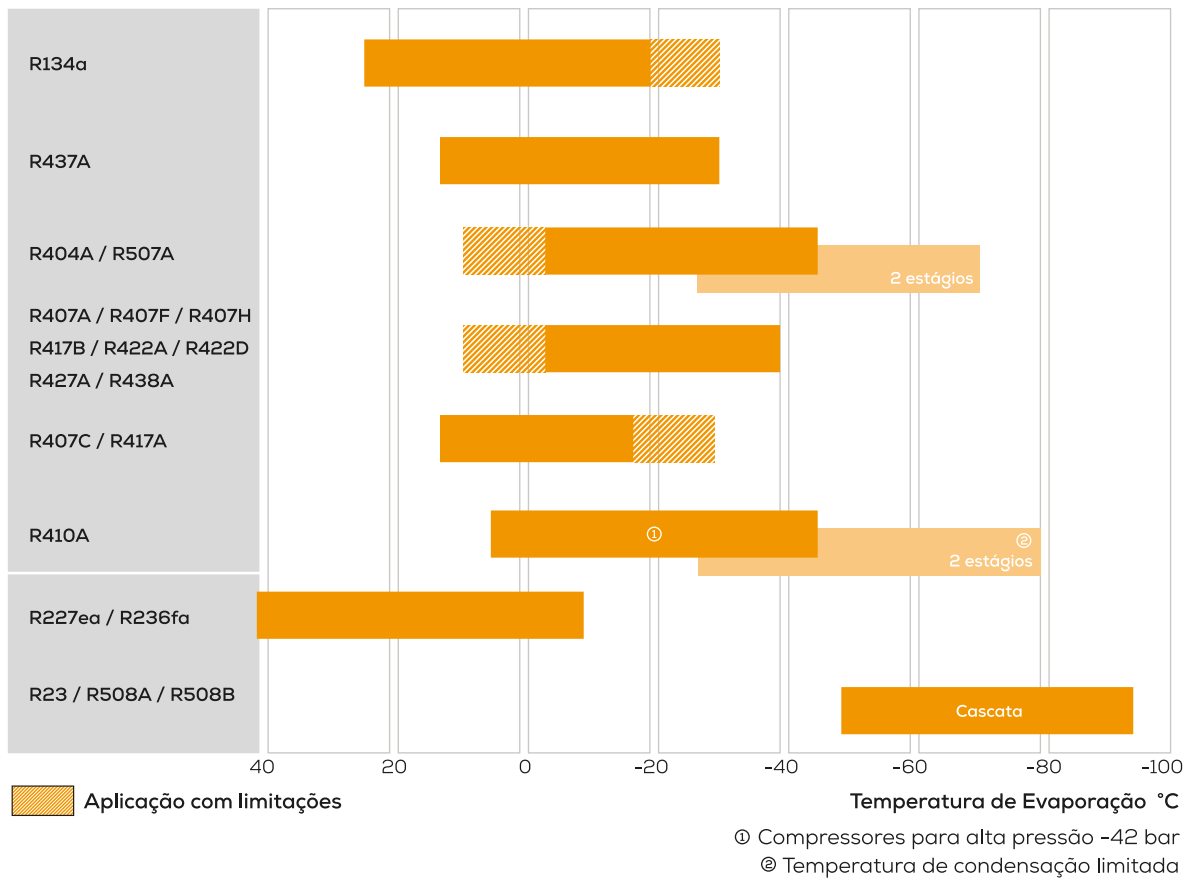


Figura 4 – Campo de aplicação dos refrigerantes HFC (ODP = 0)

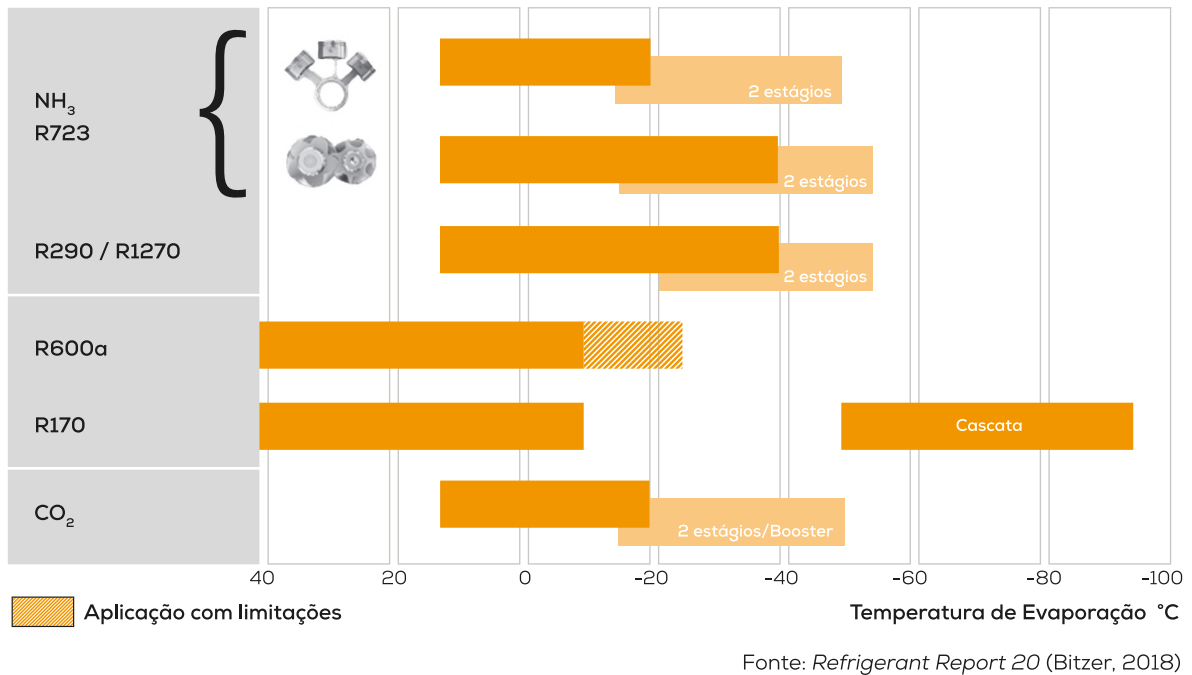


Figura 5 – Campo de aplicação dos refrigerantes não halogenados



## 2.3. Fatores que afetam a eficiência dos sistemas de refrigeração

É importante compreender os fatores que afetam a eficiência de um sistema de refrigeração e conseqüentemente os seus custos de operação. As oportunidades de economia de energia nesta área dependem da forma como efetivamente se controla estes fatores.

### 2.3.1. Parâmetros que atestam a eficiência de um equipamento de refrigeração – COP, EER, ESEER e Eficiência em kW/TR

#### COP

O coeficiente de desempenho ou *performance* (COP, do inglês *Coefficient of Performance*) é um índice importante para avaliar o “rendimento” ou eficiência de um equipamento de refrigeração. É definido como a razão entre a Capacidade de Remoção de Calor desse equipamento (Energia Útil ou Efeito Refrigerante) e a Energia Consumida pelo Compressor. Pode expressar-se em termos de razão de potências:

$$\text{COP} = \frac{\text{Energia útil}}{\text{Energia consumida no compressor}}$$

OU

$$\text{COP} = \frac{\text{Potência frigorífica}}{\text{Potência elétrica absorvida no compressor}}$$

Embora hoje em dia o parâmetro COP esteja mais associado a sistemas de ar condicionado do tipo bomba de calor para a função de aquecimento (com uma definição similar à referida atrás, residindo a diferença apenas no termo do numerador, em que aparece potência calorífica em vez de potência frigorífica), continua a ser um parâmetro bastante útil na avaliação de sistemas de refrigeração. O COP é um índice adimensional, maior que 1, e quanto maior for o seu valor, melhor é o rendimento do equipamento. Ou seja, um maior valor de COP significa que o equipamento em questão consegue obter maior efeito refrigerante para uma determinada potência elétrica absorvida no compressor e conseqüentemente é mais eficiente. Um menor valor de COP significa que o equipamento/sistema é menos eficiente.

De salientar que, tomando como referência a Figura 2 apresentada atrás e todos os comentários que se teceram sobre a mesma, a definição de COP corresponde à seguinte expressão:

$$\text{COP} = \frac{h_{ve} - h_{lc}}{h_{vd} - h_{ve}}$$

Para muitas aplicações industriais os valores usuais de COP situam-se na gama entre cerca de 2 (para instalações com temperaturas de evaporação à volta dos  $-40^{\circ}\text{C}$ ) e 5 (para instalações com temperaturas de evaporação de cerca de  $0^{\circ}\text{C}$ ). O valor de COP pode variar significativamente com alterações das condições meteorológicas e/ou das necessidades do processo.

A definição de COP atrás indicada é das mais utilizadas na indústria. Contudo, nem sempre é o melhor parâmetro para a avaliação de um sistema completo e isto porque a energia não é apenas consumida no compressor, mas também nos equipamentos auxiliares como bombas e ventiladores do evaporador e do condensador. Daí que seja mais sensato recorrer-se ao parâmetro **COP do Sistema**, definido como a razão entre o efeito de refrigeração e a energia total consumida pelo sistema:

$$\text{COP do Sistema} = \frac{\text{Potência frigorífica}}{\text{Potência elétrica total absorvida (incluindo auxiliares)}}$$

Um sistema de refrigeração funciona tanto mais eficientemente quanto maior for possível a temperatura de evaporação e menor seja possível a temperatura de condensação. Esta regra deriva da definição do COP teórico de um ciclo termodinâmico:

$$\text{COP Teórico} = \frac{T_e}{T_c - T_e}$$

em que  $T_c$  é a temperatura de condensação e  $T_e$  é a temperatura de evaporação, em graus Kelvin ( $273,15\text{ K} = 0^{\circ}\text{C}$ ). Na prática, os ciclos reais tendem a ter uma eficiência de 50 ou 60% comparativamente ao desempenho teórico, pelo que a margem para aumentar a eficiência dos sistemas de refrigeração é grande. De modo a minimizar a utilização de energia num ciclo de refrigeração é, portanto, necessário diminuir tanto quanto possível a diferença entre as temperaturas de condensação e de evaporação. Mais adiante ver-se-á como é possível de se conseguir isso com algumas tecnologias e sistemas de controlo.

Tudo isto serve para dizer que, se o COP de determinada instalação é desconhecido e não há forma de se conseguir obtê-lo por cálculo através dos valores de potência frigorífica e potência elétrica absorvida, uma boa forma de o mesmo ser estimado é a partir da expressão que se indica a seguir, em que os valores de temperatura que entram na equação vêm expressos em graus Kelvin:

$$\text{COP} = 0,5 \times \frac{T_e}{T_c - T_e}$$

## EER e ESEER

Atualmente o indicador EER – *Energy Efficiency Rate* (Rácio de Eficiência Energética) é o que é mais utilizado, correspondendo ao rácio de arrefecimento fornecido pelo equipamento ou sistema relativamente à quantidade de eletricidade fornecida para o gerar. Assim, se o sistema gerar 5 kW de frio com 1 kW de eletricidade fornecida, o seu EER é 5,0. Acaba por ser equivalente ao COP do Sistema que vimos atrás.

$$\text{EER} = \frac{\text{Potência frigorífica}}{\text{Potência elétrica absorvida}}$$

Contudo, dever-se-á ter em conta que a eficiência de um sistema de refrigeração depende das condições em que opera (p. ex., a carga plena e/ou a carga parcial) e das condições de operação no evaporador e no condensador. Assim, foi definido um indicador – ESEER – *European Seasonal Energy Efficiency Ratio* (Rácio Europeu de Eficiência Energética Sazonal), aplicável a equipamentos de refrigeração, de arrefecimento e de condicionamento de ar, que é calculado combinando diferentes valores de EER a diferentes cargas e para condições sazonais distintas de temperaturas de ar e água, com fatores de ponderação adequados. Estes valores são mostrados na Tabela seguinte.

Tabela 4 – Parâmetros do índice ESEER

Carga (%)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura da água (°C)	Fator de ponderação
100	35	30	3%
75	30	26	33%
50	25	22	41%
25	20	18	23%

A fórmula de cálculo de ESEER pode ser apresentada da forma seguinte:

$$\text{ESEER} = (\text{EER a carga } 100\% \times 0,03) + (\text{EER a carga } 75\% \times 0,33) + (\text{EER a carga } 50\% \times 0,41) + (\text{EER a carga } 25\% \times 0,23)$$

Esta classificação é controlada (entre outras) pela Empresa de Certificação Eurovent.

## Eficiência em kW/TR

Também é usual a indicação da eficiência de um equipamento em kW/TR, ou seja, relacionando o Trabalho de Compressão (em kW) com o Efeito Refrigerante ou Frigorífico (dado em toneladas de refrigeração (TR)).

$$\text{KW/TR} = \frac{h_{vd} - h_{ve}}{h_{ve} - h_{lc}} = \frac{\text{Pot. Elétrica absorvida no Compressor (kW)}}{\text{EF (TR)}}$$

## 2.3.2. Fatores chave a considerar

### Cargas de refrigeração

A importância das cargas de refrigeração nos custos de operação de uma instalação de frio não deve ser menosprezada. Se a carga é maior do que a necessária, então mais arrefecimento é necessário e os custos de operação serão superiores.

### Temperatura de Evaporação

A Figura 6 mostra o efeito da temperatura de evaporação no COP.

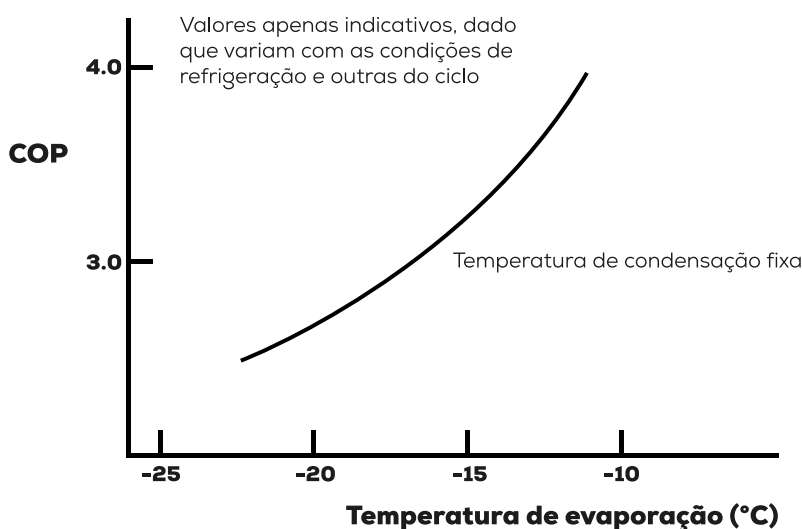


Figura 6 – Efeito da temperatura de evaporação no COP da instalação de frio

Quanto maior for a temperatura de evaporação maior será o valor de COP (e consequentemente também o valor de EER) e menor o custo de operação. A título indicativo, poder-se-á dizer que, por cada aumento de 1 °C na temperatura de evaporação, os custos de operação reduzem-se entre 2 a 4%. Maiores valores de temperatura de evaporação podem ser obtidos à custa de bons sistemas de controlo e *set points* adequados, e fazendo o melhor uso possível da superfície disponível do evaporador com procedimentos por forma a evitar incrustações, congelações, sobreaquecimentos excessivos, transferência de calor reduzida, etc.

### Temperatura de Condensação

A Figura 7 representa o efeito da temperatura de condensação no COP. Um menor valor desta temperatura significa menores custos de operação. Como guia deve-se considerar a seguinte regra, de que por cada redução de 1 °C na temperatura de condensação os custos de operação diminuem entre 2 e 4%. Temperaturas de condensação mais baixas podem ser conseguidas com bons sistemas de controlo e fazendo o melhor uso possível da superfície disponível do condensador com procedimentos por forma a evitar incrustações, entupimentos, transferência de calor reduzida, etc.

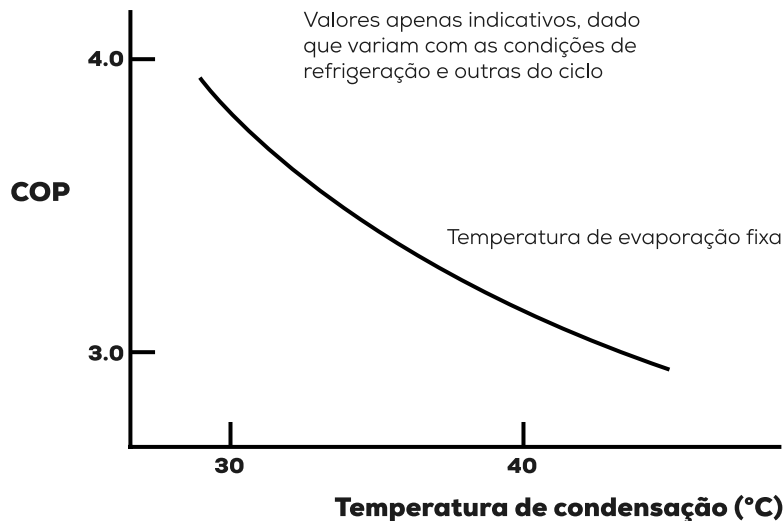


Figura 7 – Efeito da temperatura de condensação no COP da instalação de frio

## Rendimento do Compressor

A Figura 8 representa o efeito do rendimento do compressor no COP. Um maior rendimento significa menores custos de operação. O rendimento isentrópico é a melhor forma de medir a eficiência do compressor. Com a maior parte dos compressores, sobretudo de parafuso e centrífugos, o rendimento diminui drasticamente com a operação a carga parcial. O rendimento do motor do compressor é também importante. De um modo geral, é possível manter eficiências elevadas evitando a operação a carga parcial, utilizando os melhores compressores em qualquer momento e com uma boa manutenção destes equipamentos.

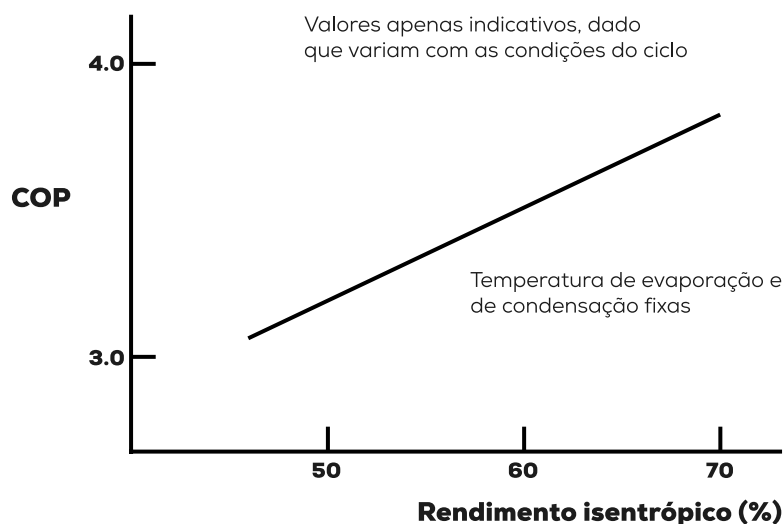


Figura 8 – Efeito do rendimento do compressor no COP da instalação de frio



## Consumo dos equipamentos auxiliares

O consumo energético devido aos equipamentos auxiliares (bombas, ventiladores, etc.) de um sistema de refrigeração pode chegar a representar cerca de 25% do consumo total desse sistema, ou até mais. A redução desses consumos pode contribuir significativamente para o aumento da eficiência do sistema. Uma boa utilização dos sistemas de controlo de modo a evitar a operação excessiva desses componentes do sistema e/ou estrangulamentos de caudais, bem como uma boa manutenção de bombas, ventiladores e iluminação associada ao equipamento, são boas práticas específicas que devem ser exploradas.

### 2.3.3. Outros aspetos a ter em consideração

#### De natureza ambiental e de manutenção, fiabilidade e segurança

Outros aspetos que devem ser tidos em conta na operação de um sistema de refrigeração incluem efeitos ambientais, custos de manutenção, fiabilidade e segurança. Quaisquer medidas de eficiência energética a implementar não devem ter efeitos adversos nestes aspetos e estes não devem ser usados como desculpa para uma baixa eficiência.

#### Período de funcionamento

Qualquer sistema que opere durante um longo período obviamente consome mais energia do que um sistema com capacidade similar que funcione durante um período mais curto. No primeiro caso as medidas de eficiência energética serão mais efetivas em termos de redução de custos. Pode fazer sentido operar determinada instalação apenas em determinados períodos em que é necessária, sem, portanto, aplicar-se aqui qualquer medida de eficiência energética propriamente dita. Mas, na maioria das situações, a implementação de “verdadeiras” medidas de eficiência energética pode ser bastante compensadora.

#### Operação a carga parcial

Uma das razões mais frequentes para valores reduzidos de eficiência das instalações de refrigeração está relacionada com a operação a carga parcial. Muitas instalações dependem menos de 20% das horas de funcionamento anual nas condições nominais ou em condições próximas destas. Durante as restantes horas do ano, temperaturas ambientes mais frias permitem temperaturas de condensação mais baixas e menores necessidades de arrefecimento alteram a capacidade requerida para o compressor. A menos que estas condições de carga parcial sejam tidas em consideração, é provável que o COP do sistema venha a ser baixo, mesmo que o COP nas condições nominais seja bom.

## 2.4. O que fazer para identificar medidas de URE em sistemas de refrigeração

Como primeiro passo para a identificação de medidas de URE (Utilização Racional de Energia) aplicáveis a sistemas de refrigeração e conseqüentemente conducentes a economias de energia e de custos, deve fazer-se um levantamento ou **inventário** dos componentes dos sistemas frigoríficos existentes numa determinada unidade industrial, bem como dos respetivos parâmetros operacionais desses sistemas. O referido inventário deve comportar 3 fases: A – Descrição básica do sistema, B – Documentação e medição dos parâmetros operativos do sistema, e, C – Indicadores globais da eficiência do sistema.

## A – Descrição do sistema básico

A descrição básica do sistema compreende a consulta de registos da empresa e/ou a realização de medições simples, de modo a reunir os seguintes dados:

1. Listagem do equipamento e seu "layout", e principais características técnicas (potência elétrica, potência frigorífica, tecnologia, idade, ...);
2. Fluido frigorígeno utilizado na instalação;
3. Temperatura final de utilização (temperatura de serviço, temperaturas mínima/máxima);
4. Carga a refrigerar/arrefecer (Que tipo e que quantidade de produto são tratados pelo sistema de refrigeração / arrefecimento?);
5. É requerida mais do que uma temperatura para a extração de calor?
6. Número de horas de funcionamento anual;
7. Perfil de consumo energético: estimativa de variação diária/semanal, dia/noite e sazonal;
8. O sistema é desligado quando não é necessário?



Figura 9 – Identificação em inventário de determinado sistema

Em muitas empresas, a maior parte ou a totalidade destes dados poderá ser recolhida por técnicos da própria empresa.

## B – Documentação e medição dos parâmetros operativos do sistema

É desejável documentar ou medir os seguintes elementos para todos os sistemas, e é essencial fazê-lo para os grandes sistemas (acima de 20 kW<sub>el</sub>). A recolha destes dados poderá ser feita por técnicos qualificados da equipa interna de engenharia, ou por uma entidade externa, como por exemplo um Consultor Técnico Auditor.

1. Diferenças em diagramas de carga elétricos totais da empresa, entre situação de instalação de frio em serviço e situação de quando a instalação de frio não está a funcionar;
2. Tipo e funcionamento do sistema de controlo, bem como de cada dispositivo de controlo individual do fluido frigorífero;
3. Consumo total de energia (incluindo ventiladores do condensador + bombas – por exemplo, de água de arrefecimento ou de um circuito secundário);
4. Para grandes sistemas, dever-se-á recorrer a um “data logger” e/ou a outro tipo de dispositivos de recolha de dados (em princípio instalados apenas para o período de avaliação) para medir: pressões, temperaturas, caudais, potências/intensidades de corrente envolvidas (absorvidas) e humidade relativa do ar ambiente, para um período representativo.

## C – Indicadores globais de desempenho do sistema

Com base nos dados recolhidos, os seguintes indicadores globais de desempenho do sistema podem ser determinados:

Tabela 5 – Indicadores de desempenho do sistema

I	Custo do investimento anualizado [EUR/ano]	A	Horas de funcionamento anual [h/ano]
II	Custos anuais de manutenção [EUR/ano]	B	Potência elétrica total absorvida pelo Sistema de Refrigeração [kW]
III	Custos energéticos da refrigeração [EUR/ano]	C	COP <sup>(1)</sup> ou EER [-]
IV	Custos Totais (Soma de I-III)	D	Potência frigorífica (B x C) [kW]
V	Produção [kg/h; L/h; ...]	E	Custo unitário da eletricidade (EUR/kWh)
Custos específicos globais da refrigeração (IV/D) [EUR/kWrefrigeração]			
Outros indicadores específicos: (se possível) kWh <sub>el</sub> /Produção (A x B/V) EUR/Produção (IV/V)			

<sup>(1)</sup> Se o COP da instalação for desconhecido, pode ser estimado a partir do conhecimento das temperaturas de condensação e de evaporação, a partir da expressão indicada no final da página 20 deste Guia Técnico.

De salientar que para muitos sistemas (em especial, com potências inferiores a 10 kW), as economias potenciais não justificam uma complexa e dispendiosa recolha dos dados necessários para se estabelecer indicadores precisos. Nesses casos, a avaliação pode basear-se em métodos empíricos adequados, como por exemplo:

- os custos de capital (investimento) anualizados podem ser estimados em 10% do custo atual de substituição de todo o sistema;
- os custos de manutenção podem ser de 7% a 9% do atual custo de substituição;
- os custos energéticos podem ser estimados a partir da potência nominal e do período de funcionamento.

# 3

## **Boas Práticas e tecnologias energeticamente eficientes aplicáveis aos Sistemas de Refrigeração**



Neste capítulo serão referidas algumas boas práticas e tecnologias que, se forem implementadas, poderão conduzir a significativas economias de energia e de custos nos sistemas de refrigeração, a par de reduções importantes de emissões de gases poluentes.

### **3.1. Boas práticas e o que deve ser evitado**

Os problemas surgem nas instalações de refrigeração devido a 4 razões principais:

- A instalação foi mal concebida;
- A instalação foi bem concebida, mas atualmente opera em condições diferentes daquelas para as quais foi projetada;
- O sistema foi mal instalado;
- A instalação tem sido negligenciada.

Os problemas na instalação de refrigeração podem manifestar-se de 2 modos: ou o equipamento falha, o que é raro, ou os custos de operação aumentam significativamente, o que é mais usual. O maior problema relacionado com a segunda situação, é que tal pode acontecer, mas ninguém dar por isso, porque não há medições separadas (por utilizações finais) dos consumos de energia elétrica ou porque a instrumentação existente é insuficiente ou inadequada.

Um mau projeto não é normalmente da responsabilidade do fornecedor de equipamento. A maioria das vezes é devido ao que o utilizador (Operador) não fez ou não conseguiu a especificação correta da carga de arrefecimento em jogo, quando encomendou a instalação. Uma vez instalado o sistema, a carga deve ser confirmada para assegurar que a instalação está dimensionada corretamente. O mais comum é a situação dessa carga ir aumentando com o decorrer do tempo (devido a maiores necessidades de arrefecimento por alterações de processo ou de ajustes de capacidade da instalação, etc.), afastando-se do valor de projeto.

Também as falhas na montagem dos sistemas de refrigeração acontecem. São situações que devem ser detetadas durante os testes de comissionamento. Outras problemas podem ser mais difíceis de detetar, como por exemplo pequenos pedaços de metal derivados da soldadura que são deixados no circuito de refrigerante líquido, ou pequenas fugas que não são visíveis durante algum tempo.

Contudo, se existir instrumentação adequada e forem efetuadas com frequência verificações da eficiência do sistema, tais problemas podem ser resolvidos. Se pelo contrário, nada for feito para esta avaliação ou pura e simplesmente negligenciar-se o estado de operação do(a) sistema/instalação, as consequências serão bastante previsíveis, como por exemplo, aparecimento de elementos indesejáveis, como musgo e algas, em torres de arrefecimento, rutura de correias em ventiladores, colmatação de filtros nos sistemas de circulação de ar, etc., que contribuirão para perdas de eficiência na transferência de calor e perdas de refrigerante, que se refletirão em perdas de capacidade de arrefecimento.



## Como confirmar uma operação eficiente de um Sistema de Refrigeração?

Há quatro procedimentos, como requisito mínimo, que devem ser efetuados, pelo que a instalação de refrigeração deve ser monitorizada, para assegurar que se obtém o melhor rendimento da mesma. Assim, devem ser verificados o consumo de energia do compressor, as pressões de sucção e de descarga (ou seja, as pressões a montante e a jusante do compressor, respetivamente) e a quantidade de óleo adicionada ao sistema (ou removida através de purga).

O consumo de energia servirá como indicação inicial se se verificar que os custos de operação estão a aumentar sem que haja uma variação na produção ou no serviço realizado. As pressões de sucção e de descarga também dão uma boa pista para um diagnóstico correto, dado que as causas mais comuns para um valor elevado ou baixo de pressão são normalmente as indicadas na Tabela seguinte. Os registos de óleo contribuirão para prevenir atempadamente a ocorrência de eventuais incrustações em torno do circuito do sistema de refrigeração.

Tabela 6 – Causas usuais de alterações nos valores das pressões de sucção e de descarga

PRESSÃO DE SUÇÃO	
BAIXA	ELEVADA
Caudal baixo de refrigerante Escassez de refrigerante Temperatura do processo abaixo do valor de projeto Carga de arrefecimento a ser restringida	Reduzido sobreaquecimento
PRESSÃO DE DESCARGA	
BAIXA	ELEVADA
Válvulas do compressor defeituosas Escassez de refrigerante	Condensador com sujidade Falha na torre de arrefecimento Sobrecarga de refrigerante Ar no Sistema

Falhas numa instalação de refrigeração são dispendiosas. Como valores indicativos da proporção de aumento nos custos de operação, em resultado de falhas do tipo das que foram sendo referidas atrás, podem ser referidos os seguintes (Fonte: EURA (UK)): sujidade nas superfícies de transferência de calor do condensador – 20%; gás nas linhas de líquido – 10%, válvulas de expansão baratas – 25%; evaporador subdimensionado – 20%; óleo no evaporador – 15%; má conceção da linha de sucção – 15%. Ou seja, é perfeitamente possível que, em resultado de uma operação deficiente da instalação ou de uma montagem mal feita da mesma, essa instalação venha a ter um período de retorno do investimento bastante superior ao que seria expectável, podendo mesmo duplicar.



É usual serem identificados desperdícios energéticos “consideráveis” em muitas instalações de refrigeração. Em muitos casos são possíveis economias de energia da ordem dos 20% ou mais, à custa de investimentos pouco avultados ou mesmo sem requerer qualquer investimento, na resolução de problemas/avarias da responsabilidade dos fabricantes/instaladores dos equipamentos, ou em resultado de uma manutenção mais cuidada.

### **O que é necessário ter em consideração e que ações devem ser desencadeadas?**

A maioria das ações está nas mãos dos utilizadores das instalações, que devem:

- Estar cientes do(s) problema(s). Este é o passo mais importante a tomar, já que uma vez compreendido o potencial de economias, os passos seguintes tornam-se óbvios;
- Avaliar onde é que o arrefecimento está a ser utilizado. Muitas vezes a refrigeração está a ser feita onde não é necessária (ou para a qual existem outras alternativas que requerem menores consumos de energia), ou a temperaturas mais baixas do que o necessário;
- Analisar o desempenho e a eficiência da instalação existente – isto revelará todos os desperdícios energéticos, incluindo defeitos de conceção ou de um mau projeto, e os problemas de operação e manutenção. Tais análises devem ser repetidas periodicamente;
- Ter em consideração o consumo energético da instalação/equipamentos quando se adquire uma nova instalação ou novos equipamentos. Por exemplo, uma seleção cuidadosa de um compressor pode contribuir para uma redução dos custos de operação da ordem dos 25%. É sempre mais fácil conseguir-se economias de energia no estágio de projeto/conceção das instalações;
- Após a instalação de uma nova central de refrigeração, o seu desempenho ser avaliado por uma entidade independente. É espantoso como muitos defeitos ou falhas na operação dos equipamentos não são detetados durante a fase de comissionamento.

Mas o melhor é ilustrar com exemplos os problemas que muitas vezes ocorrem.

### **Utilizações inapropriadas**

Aquando da avaliação de uma instalação de refrigeração, é essencial estimar a potência frigorífica necessária e onde é que a mesma será utilizada, para se evitarem situações de o requisito de arrefecimento adequado não representar uma percentagem inferior, por exemplo de 50% ou menos, do total da potência pretendida.

Outros problemas podem estar relacionados com a potência de ventiladores para a circulação de ar, cargas de iluminação e infiltrações de ar quente. Cada um destes itens deve ser cuidadosamente reduzido, na medida do possível, e assim tornando possível a redução das necessidades globais de arrefecimento.

## **Instalação mal feita**

Um exemplo de dificuldade em manter no verão condições suficientes de arrefecimento em determinadas instalações pode dever-se a reduzidos caudais de ar de circulação sobre serpentinas de arrefecimento, em resultado de uma deficiente instalação dos respetivos ventiladores. A reparação de tal deficiência pode conduzir, para além da economia de energia, a ganhos tão importantes como a melhoria da qualidade do produto. Este é um exemplo claro de uma falha que deveria ter sido detetada durante os testes iniciais de comissionamento, mas que raramente são realizados a um nível desejável, ou se é que são mesmo realizados.

## **Incrustações de óleo**

Uma das causas mais frequentes de desperdício energético, por exemplo em sistemas de refrigeração com amoníaco, reside em incrustações de óleo nos evaporadores. A presença deste óleo baixa a temperatura de evaporação da instalação, contribuindo assim para o aumento do consumo de energia e conseqüentemente para a redução da capacidade de arrefecimento. A perda energética pode ser da ordem dos 30%.

Provavelmente a razão para esta deficiência passar despercebida é que alguns operadores assumem que um compressor utiliza o óleo da mesma maneira que o motor de um carro, ou seja, queimando-o. Mas não é este o caso – qualquer subida de óleo no compressor corresponde a uma deposição desse mesmo óleo em partes do circuito de refrigeração. A solução é simples: esse óleo deve ser purgado a cada dois ou três meses, sendo, pois, uma operação fácil e rápida.

## **Seleção da instalação**

A eficiência de compressores de refrigeração aparentemente similares pode variar consideravelmente. Os custos de operação resultantes são diretamente proporcionais às eficiências dos compressores, se as diferenças forem grandes. Uma seleção cuidadosa de uma nova instalação não tem custos e se se optar pela solução mais eficiente, as economias de custos serão bem compensadoras.

## **Controlos pobres**

Não é invulgar encontrar-se uma boa instalação e, portanto, bem apetrechada tecnologicamente, mas a mesma encontrar-se a operar ineficientemente, devido a um sistema de controlo insuficiente. Por exemplo, ter um sistema de vários "chillers", com cada um operando a cargas bastante reduzidas, corresponde a tal situação. Ora, ter-se vários compressores a operar a 30% da sua carga plena, com uma eficiência naturalmente bastante inferior ao que se registaria a 100% da carga, é uma situação que seria de todo evitável se existisse um bom sistema de controlo, que faria com que apenas um número mínimo de máquinas operasse ao nível mais eficiente e as restantes fossem desligadas.

Exemplos como os referidos atrás são inúmeros. Há potenciais de economia de energia significativos, apenas pela adoção de algumas boas práticas como as que foram sendo aqui listadas. Para além das economias de energia que lhes estão associadas, a redução de custos e o aumento da fiabilidade e da qualidade dos produtos que também implicam, são benefícios tão ou mais importantes, que não podem ser ignorados pelas Empresas.

Com todas estas vantagens, é agora o momento destes Operadores começarem a investigar as suas instalações de refrigeração (e antes que o verão chegue). O diagrama da Figura 10 (Fonte: EURA (UK)) ilustra bem as áreas típicas de uma instalação de refrigeração onde muitas vezes se verificam perdas energéticas, com a indicação de valores médios percentuais de perdas de eficiência para cada área problemática.

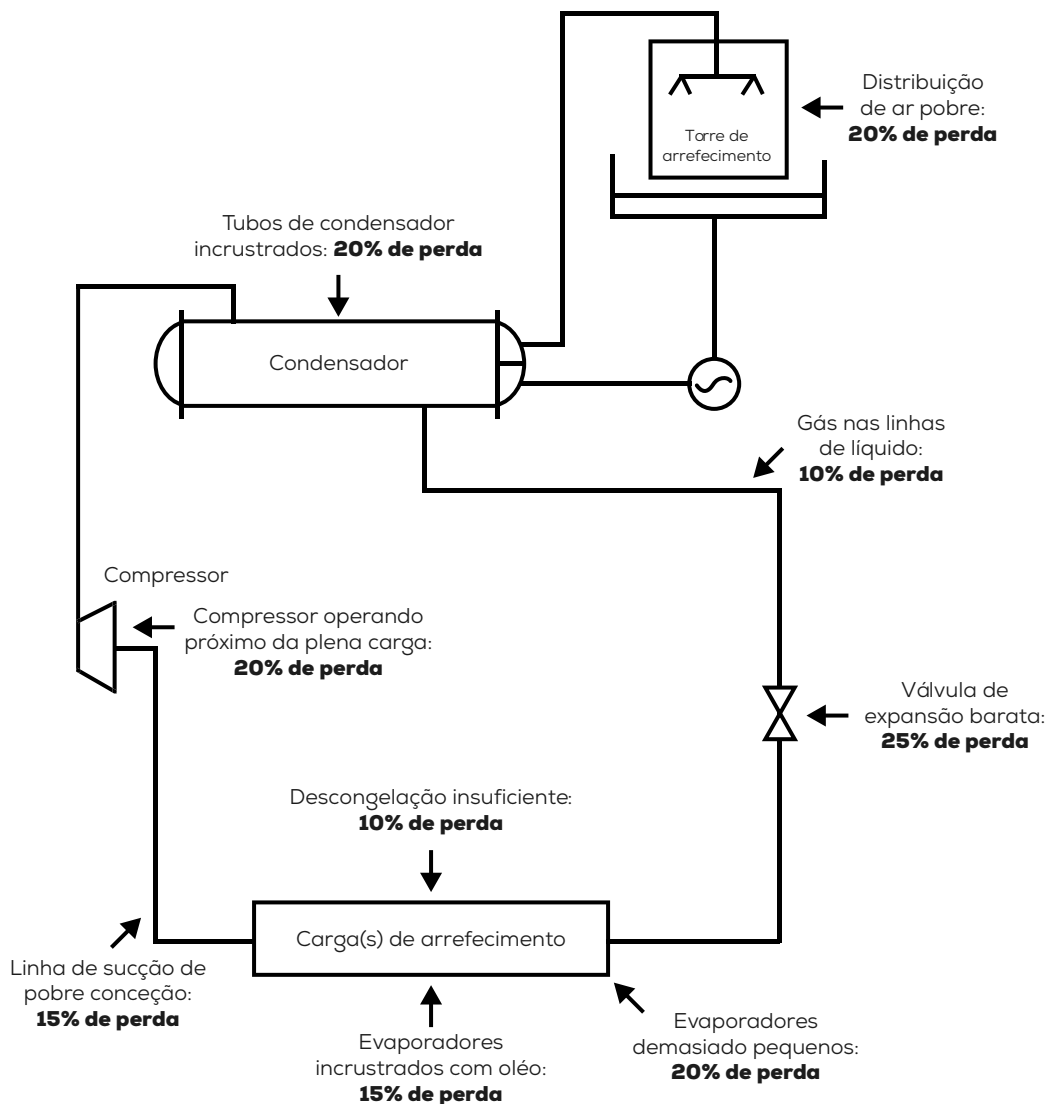


Figura 10 – Perdas percentuais de eficiência em áreas problemáticas de um sistema de refrigeração

## 3.2. Medidas aplicáveis aos Sistemas de Refrigeração, conducentes a economias de energia

Na sequência da realização dos passos descritos no item 2.4 deste Guia, podem ser identificadas as medidas que podem levar a reduções dos consumos de energia elétrica dos sistemas de refrigeração e, no caso particular de uma recuperação de calor, também a economias de outras formas de energia. Podemos classificar essas **medidas** como **gerais ou específicas**, de que são exemplos as que se indicam a seguir:

### MEDIDAS GERAIS

**Medidas de otimização do sistema:** Os processos de refrigeração industrial têm, em geral, rendimentos elevados, mas também grandes consumos energéticos. A principal medida de eficiência energética consiste, pois, na conceção e dimensionamento otimizados, quer das necessidades frigoríficas, quer da produção de frio, especialmente para operação em situações de carga parcial. As medidas aplicáveis ao sistema repercutem-se em consideráveis potenciais de economia, que, tipicamente, extravasam quaisquer medidas com incidência apenas em componentes individuais, como por exemplo sobre o motor elétrico. Aquelas deverão também abranger o controlo do sistema global. Este tipo de medidas conduz normalmente a economias de energia entre 8 e 10%.

**Medidas eficientes de operação e manutenção:** As práticas de operação e manutenção podem também melhorar significativamente a eficiência dos sistemas de refrigeração. A limpeza várias vezes por ano das serpentinas de arrefecimento e o acautelamento de que os permutadores exteriores se encontram protegidos da incidência direta do Sol e que à sua volta se faz boa circulação do ar, são alguns exemplos dessas boas práticas. Também, a garantia de que as portas de câmaras e túneis frigoríficos fazem boa vedação, ou se tal não se verificar, por deficiência nas borrachas de vedação com os aros, que se procede de imediato à sua recuperação, constituem exemplos de medidas deste tipo. Se uma manutenção adequada for efetuada com regularidade, o potencial de economia de energia correspondente situa-se, tipicamente, entre 4 e 8%.

### MEDIDAS ESPECÍFICAS

**Acionamentos de força motriz com rendimento melhorado:** São possíveis economias até 7%, por via da substituição dos motores elétricos existentes para acionamento de compressores frigoríficos, ou de bombas de fluido frigorigéneo, ou de ventiladores do condensador, por motores de rendimento superior, dentro dos chamados motores de alto rendimento (classe IE2 ou superior).

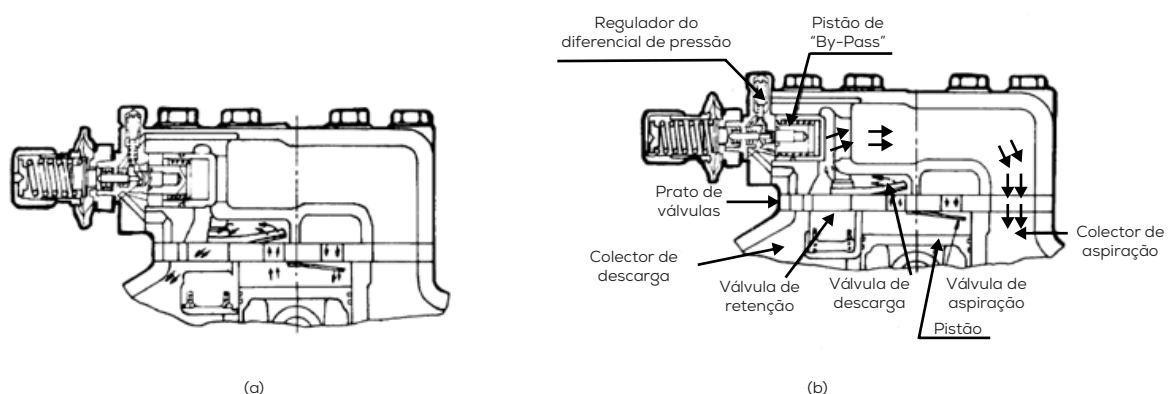
**Utilização de compressores bem dimensionados e com eficiência máxima:** Um compressor frigorífico tem um ponto de eficiência máxima na sua gama de operação. O rendimento baixa para outras condições de funcionamento. Será, portanto, mais eficiente utilizar-se um compressor na sua potência máxima durante um curto período e armazenar uma determinada quantidade de frio, do que utilizá-lo continuamente com o sistema em pedido de carga reduzida.

Para cada aplicação, deve(m) ser selecionado(s) o(s) compressor(es) de melhor rendimento.

**Utilização de variadores eletrônicos de velocidade para ajuste de operações de carga variável:** A quase totalidade das instalações de refrigeração existentes na Indústria em Portugal funciona segundo o *ciclo de compressão de vapor*, sendo rara a existência de sistemas de produção de frio que funcionem segundo o princípio de *absorção*. Logo, as instalações frigoríficas existentes, com temperaturas de evaporação normalmente compreendidas na gama  $-40^{\circ}\text{C} / +10^{\circ}\text{C}$  e com condensadores maioritariamente arrefecidos a água (sendo frequentes os do tipo evaporativo com torre de refrigeração), têm no compressor o seu principal equipamento consumidor de energia. Os compressores geralmente utilizados nestas instalações são do tipo de pistão, dotados de movimento alternativo, e muito raramente do tipo rotativo, quando se trata de pequenas potências. Para grandes potências, normalmente acima de 600 kW, recorre-se a compressores de *parafuso* ou *centrífugos*.

Para certas aplicações bem definidas, e especialmente quando se trata de instalações de grandes dimensões que dispõem apenas de um compressor e vários evaporadores para diferentes serviços, câmaras de carga irregular e em particular de instalações nas quais por vezes se torna excessiva a potência do compressor e não é aconselhável um ciclo demasiado frequente de arranques e paragens, é habitual equipar a máquina com um dispositivo destinado a reduzir a capacidade da mesma. Serve também para reduzir o par de arranque e facilitar o início do funcionamento do compressor. Este dispositivo que atua governado por elementos automáticos de controlo apropriados, pode fazer o curto-circuito de um ou mais cilindros do compressor (no caso de um compressor clássico do tipo aberto de pistão, multicilindro), respondendo a determinadas variações na pressão de aspiração ou temperaturas, ou controlando a cilindrada útil ao reduzir o volume de gás aspirado, variando o espaço prévio.

O acionamento de um dispositivo deste tipo é descrito graficamente na Figura 11. Quando o compressor trabalha a plena carga (situação (a) da Figura) e a pressão de aspiração se encontra acima do limite estabelecido, abre-se a válvula do dispositivo de regulação, o gás descarregado penetra na câmara de descarga e a pressão reinante fecha o pistão do "by-pass". O cilindro comprime ao máximo e o gás da descarga obriga a válvula de retenção a abrir-se, permitindo que aquele se descarregue no coletor de saída.



**Figura 11** – Sistema convencional de compressor refrigerante de capacidade regulável: (a) compressor a trabalhar a plena carga, com o dispositivo regulador de capacidade sem estar a atuar; (b) compressor descarregado, com o dispositivo regulador de capacidade a atuar sobre o cilindro.

Para descarregar o compressor quando a pressão de aspiração se encontra abaixo do limite de controlo estabelecido, abre-se a válvula do dispositivo de regulação. O gás descarrega-se por detrás do pistão do “by-pass”, até à câmara de aspiração, abrindo-se o referido pistão, o que faz com que o gás de descarga volte a circular em direção à câmara de aspiração, descarregando deste modo o cilindro. A redução da pressão de descarga obriga a válvula de retenção a fechar-se, isolando a comunicação entre o cilindro e o coletor de descarga (situação (b) da Figura 11).

Este método de “descarga” de um ou mais cilindros reduz a eficiência destes, ou por outras palavras reduz mais o efeito refrigerante do sistema do que a energia elétrica consumida pelo compressor no acionamento do respetivo motor. Logo, diminui o rendimento do ciclo de compressão de vapor, dado pelo quociente entre a energia removida no evaporador (efeito de refrigeração) e a energia fornecida ao compressor. Como pode ser visto na Figura 12, um efeito similar também se verifica nos compressores de parafuso.

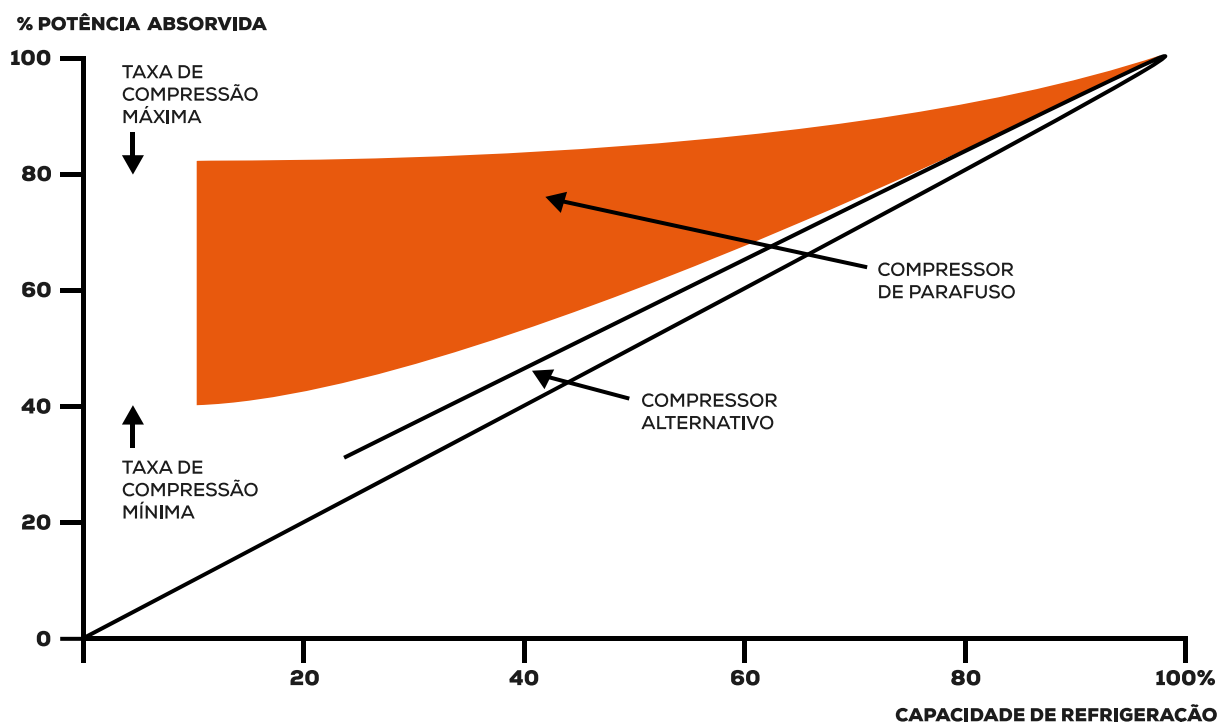


Figura 12 – Potência absorvida pelo compressor versus capacidade de refrigeração, em função do tipo de compressor utilizado.

Uma alternativa mais eficiente sob o ponto de vista do consumo de energia consiste em ajustar o caudal volumétrico do compressor através da variação da velocidade do mesmo. Isto pode ser feito recorrendo a um variador eletrónico de velocidade (VEV), denominado de “inversor de frequência”, ou utilizando um motor assíncrono de duas velocidades (4 e 8 pólos) ou um motor de combustão interna para acionamento do compressor.

O método mais adequado, devido ao curto período de retorno do investimento necessário, consiste na utilização de um inversor de frequência (vide Figura 13), especialmente no caso de compressores de elevada capacidade. Este tipo de VEV baseia-se no facto da velocidade de um motor de indução depender do número de pólos e da frequência da corrente, pelo que a sua regulação pode ser conseguida por transformação da tensão e da frequência. Assim, os inversores fazem com que a tensão da rede seja retificada e a tensão DC resultante seja invertida para produzir uma alimentação trifásica ajustável em frequência e em tensão.

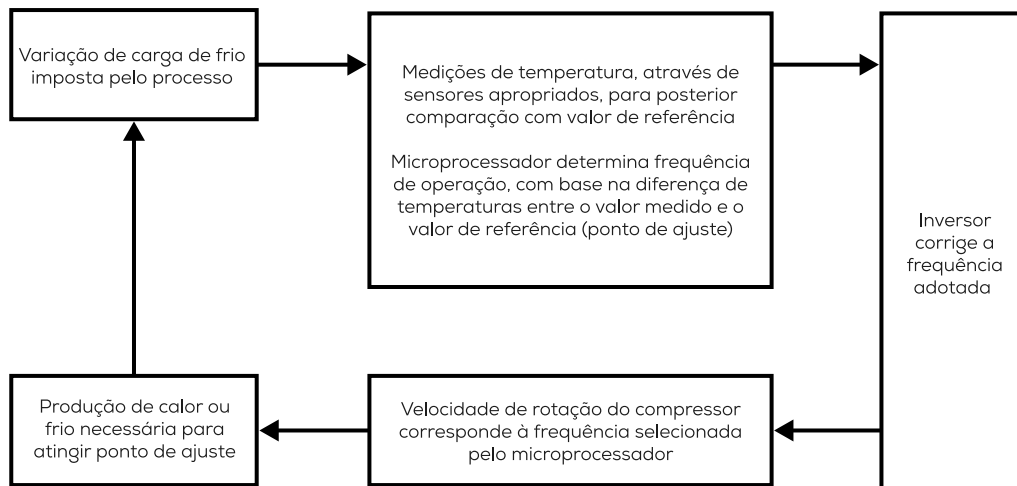


Figura 13 – Diagrama ilustrativo do modo de funcionamento de um inversor de frequência

Com este sistema, a produção de frio pode ser gerida e controlada através de um PLC (controlador lógico programável ou autômato programável) com programa específico de acordo com a aplicação de refrigeração. Com esta tecnologia, que permite que a produção de frio seja continuamente adaptada às necessidades do processo, são possíveis economias de energia até 50% (ainda que o valor mais usual seja da ordem dos 20%), comparativamente aos sistemas convencionais de compressores de capacidade regulável, conduzindo a uma amortização do respetivo investimento normalmente inferior a 3 anos.

Esta tecnologia da variação eletrónica de velocidade, além de poder ser aplicada ao motor de acionamento do compressor frigorífico, também pode ser aplicada aos motores de acionamento de bombas de refrigerante (quer de fluidos frigoríficos primários, quer de fluidos secundários como salmouras) e aos motores de acionamento de ventiladores de condensadores, desde que se verifiquem regimes de carga variável nesses motores elétricos, e com as economias de energia resultantes a serem da mesma ordem dos valores referidos atrás.

Os motores assíncronos de duas velocidades são mais apropriados para casos onde seja claro a existência de apenas dois níveis de carga. Já os motores de combustão interna apresentam algumas vantagens comparativamente aos outros métodos mencionados, nomeadamente: a possibilidade de obtenção de uma larga margem de variação da velocidade, a possibilidade de recuperação do excedente de calor dos gases de escape e o custo da fonte de energia (combustível) utilizada no seu acionamento ser consideravelmente inferior ao da energia elétrica.

Para além destas técnicas, será bom ter também presente que a maior eficiência energética em compressores é conseguida quando estes trabalham à máxima capacidade de projeto, pelo que deveriam funcionar sempre nestas condições. Uma maneira de conseguir isto é ter vários compressores a trabalhar em paralelo, de modo a que o efeito de refrigeração possa ser regulado pela paragem de um ou mais compressores, mantendo os restantes a plena carga.



**Utilização de outros dispositivos de regulação para operação em carga parcial, adequados ao sistema e à tecnologia do compressor:** Consoante o tipo de compressor ou de sistema, assim se recomenda:

Em compressores alternativos:

- Por abertura da válvula de aspiração de um ou mais cilindros; ou,
- Variação do “volume livre”.

Em compressores centrífugos:

- Uso de alhetas orientadoras na aspiração.

Em compressores de parafuso:

- Reinjeção do fluido frigorífero.

Em todos os sistemas:

- Uso de sistemas de armazenamento de frio, como *bancos de gelo e placas ou bolas eutéticas*.

**Recuperação de calor:** O compressor frigorífico produz calor que se perde para o meio envolvente. Esta energia, conjuntamente com o calor removido no condensador, trazido pelo fluido refrigerante, constitui energia térmica que pode ser aproveitada para outras aplicações, nomeadamente para aquecimento ambiente ou produção de água quente. A disponibilidade desta energia, contudo, depende da operação do sistema, produzindo-se mais energia durante o período de verão.

Dado que uma máquina frigorífica é projetada de modo a manter um determinado meio a uma temperatura inferior à temperatura ambiente, removendo calor continuamente desse meio, o calor assim extraído é transferido para um meio mais quente (ar atmosférico ou água, utilizado como fluido de arrefecimento no condensador).

Esta energia de condensação pode, pois, ser recuperada, sob a forma de ar quente ou água quente como já se disse, que por exemplo poderá servir para fazer face às necessidades de aquecimento ambiente existentes na empresa, economizando-se dessa forma energia que seria consumida para assegurar esse serviço. Outra possível utilização do calor recuperado será no aquecimento de águas do processo, de ar para secadores, etc., também com as correspondentes economias de energia associadas.

Contudo, para que estas recuperações de calor sejam viáveis técnica e economicamente, ter-se-ão que verificar as seguintes condições:

- A distância entre a fonte de calor (condensador da instalação frigorífica) e a secção ou equipamento potencial utilizador desse calor não ser muito grande;
- Haver simultaneidade no tempo entre a produção do calor que se pretende recuperar (isto é, do funcionamento da instalação frigorífica) e a utilização daquele pelo potencial utilizador;
- Um valor mínimo de temperatura do fluxo de calor a recuperar (normalmente, apenas temperaturas de 25–35 °C num condensador a ar ou a água viabilizam uma recuperação destas).

Relativamente ao último aspeto atrás focado, há que salientar o seguinte:

- Por exemplo, no caso de um condensador a água, poder-se-á obter temperaturas de água mais elevadas se se reduzir o caudal daquele fluido, mas isso tem um efeito contraproducente, já que aumenta a pressão de condensação e conseqüentemente a potência absorvida pelo compressor e, além disso, também irá contribuir para diminuir o tempo de vida útil do compressor em resultado do aumento das pressões de funcionamento;
- Por outro lado, é possível recuperar calor a um nível térmico superior, por exemplo intercalando um permutador de calor na linha de descarga entre o compressor e o condensador. Este dispositivo efetivamente *dessobreaquece* o refrigerante sob a forma de gás quando este está à sua máxima temperatura, podendo obter-se ar ou água a 60-70 °C, mas em termos globais a quantidade total de energia extraída através de um dispositivo deste tipo é muito pequena (apenas 5-15%) comparativamente à energia total disponível no condensador.

O aquecimento direto de ar num condensador poderá ser a forma mais eficiente de recuperação de calor, mas se a distância entre o condensador e os locais potenciais utilizadores do calor recuperado for grande, será necessário recorrer a um fluido de aquecimento intermédio, como por exemplo água. Para sistemas que usam amoníaco como refrigerante, também são necessários fluidos intermediários de aquecimento, mas por razões de segurança.

Em síntese, poder-se-á dizer que a implementação de um sistema de recuperação de calor é recomendada quando há consumos de ar quente ou água quente no processo (como por exemplo, em secadores) ou em aquecimento ambiente, próximos da localização da instalação de refrigeração e em que esses consumos são simultâneos com o período de funcionamento do sistema de refrigeração. Com tais sistemas de recuperação de calor evitam-se consumos de energia térmica (p. ex., vapor), que teria que ser produzida para essa finalidade (aquecimento de ar ou água). Os períodos de retorno dos investimentos associados a este tipo de medida tendem a ser relativamente curtos. Podem obter-se economias de energia da ordem dos 25% ou mais, comparativamente a equipamentos convencionais (p. ex., secadores) que sejam alimentados com fluidos de aquecimento típicos (como vapor) e sem qualquer recuperação de calor da condensação.

Em instalações de refrigeração, como por exemplo as que utilizam compressores de parafuso, existem radiadores de arrefecimento de óleo, dos quais pode também recuperar-se energia, através de um permutador óleo/água, para se obter água a 35-40 °C. Esta energia que se pode recuperar não representa, no entanto, mais do que 10-25% daquela dissipada no condensador.

Um outro sistema de recuperação de calor de um condensador de uma instalação de refrigeração é através do uso de bombas de calor. O princípio de funcionamento de uma bomba de calor é em tudo idêntico ao de uma máquina frigorífica, residindo a única diferença nos objetivos: o de uma bomba de calor é o de fornecer calor a um dado meio (ar ou água), o qual é mantido a uma temperatura acima da temperatura ambiente, provindo a maior parte desse calor de um meio a temperatura inferior (ou por outras palavras, e de acordo com a 1ª lei da termodinâmica, a energia fornecida por uma bomba de calor através do seu condensador é igual à energia removida no respetivo evaporador mais a energia correspondente ao trabalho do compressor da bomba de calor). Logo, os sistemas de recuperação de calor através do recurso a bomba de calor podem assumir uma das seguintes formas: 1) instalação de uma bomba de calor água/água para recuperação de calor da água de saída do condensador; ou, 2) instalação de uma bomba de calor em cascata com a instalação de refrigeração de modo a que o condensador desta última funcione também como evaporador da bomba de calor. Esta última solução é a que apresenta maior rendimento em termos de recuperação de energia do condensador.

Com bombas de calor modernas é possível obter temperaturas de 110-120°C em ar ou água. O interesse na instalação de uma bomba de calor aumenta com o número de horas de funcionamento dessa instalação e com a diminuição da diferença entre as temperaturas de condensação e de evaporação no circuito da bomba de calor. Em geral, aquela diferença de temperaturas não deverá ser superior a 45-55 °C e o número de horas de funcionamento anual não deverá ser inferior a 2000. Em alguns casos pode ser preferível a utilização de uma bomba de calor reversível, a qual permite que as funções do evaporador e do condensador possam ser invertidas. Isto permite que a máquina possa ser usada para produzir calor ou frio, atingindo temperaturas mais elevadas do que as obtidas pela simples recuperação de calor do condensador. São possíveis desse modo economias de energia de 45% comparativamente a instalações convencionais (p. ex., secadores) sem bomba de calor, onde existam aquelas duas necessidades, além de aumentos de produtividade daquelas instalações, redução da área requerida pelas mesmas e melhorias da qualidade dos produtos.

**Condensadores evaporativos:** A maior parte dos sistemas de refrigeração recorre a condensadores arrefecidos apenas por ar para a rejeição do calor. Os condensadores evaporativos fazem uso de um sistema misto, em que, além do caudal de ar habitual, existe um chuveiro de água recirculada por uma pequena bomba, de modo que esse ar impulsionado pelo(s) ventilador(es) passa, em contracorrente, pelas serpentinas aquecidas do condensador, criando-se com a evaporação parcial da água que cai, um efeito suplementar de arrefecimento (vide Figura 14). Os sistemas de refrigeração com condensadores evaporativos são mais eficientes.

Como este sistema de condensação se baseia na evaporação da água, o teor de humidade no ar tem um efeito significativo no funcionamento deste tipo de condensador: é muito mais eficiente quando o ar é seco ou tem pouca humidade. Também à medida que a água evapora, o teor de sais minerais na água recirculada aumenta, pelo que deverá haver o cuidado de neste tipo de sistema manter a qualidade da água num nível adequado.

Convém lembrar que, quer o investimento inicial necessário, quer os custos de operação dos condensadores, de sistemas de refrigeração, dependem do tipo de sistema de condensação adotado e que a temperatura de condensação ( $T_c$ ) é determinada principalmente pelo tipo de condensador. Os condensadores evaporativos são os que permitem que o refrigerante seja condensado a uma temperatura mais baixa do que a que se verifica com outros sistemas, com exceção dos que utilizam água corrente. Esta temperatura ( $T_c$ ), nos condensadores evaporativos, é determinada pela seguinte expressão:  $T_c = t_{BH} + 12^\circ\text{C}$ , em que  $t_{BH}$  é a temperatura de bolbo húmido mais desfavorável na região onde o condensador é instalado.

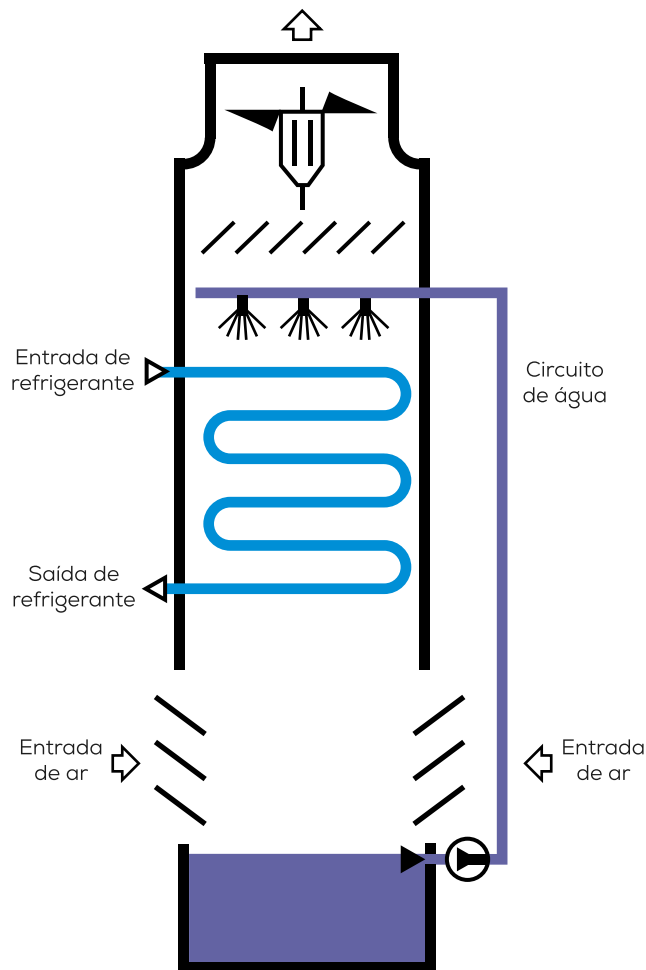


Figura 14 – Representação esquemática do funcionamento de um condensador evaporativo

Deve-se ter presente que por cada grau centígrado que a temperatura de condensação é reduzida, conseguem-se economias de energia de 2 a 4%, dependendo das características do compressor e da temperatura de evaporação requerida.

**Colocação do condensador:** A localização do condensador deve verificar-se em locais sombreados protegidos da incidência direta do Sol, de modo que a rejeição do calor se processe com facilidade.

**Evitar temperaturas demasiado baixas que são desnecessárias:** Devem ser verificadas as temperaturas requeridas para o processo. Deve-se tentar manter a temperatura do fluido frigorigéneo tão elevada quanto possível. Se são requeridas temperaturas bastante baixas, deve-se equacionar a possibilidade de utilização de um ou mais compressores de dois andares, o que constituirá, seguramente, uma opção de melhor eficiência.

**Limpeza dos permutadores de calor:** Deve-se proceder à limpeza periódica e regular dos permutadores de calor. Superfícies de permuta limpas facilitam a transferência de calor. A manutenção desempenha um papel muito importante para que o sistema de refrigeração tenha uma eficiência elevada.

**Controlo da alta pressão por meio de válvula de boia:** O controlo da pressão de descarga do compressor através de uma válvula de boia, controlada por termóstato ou pressóstato, possibilita que a pressão de descarga do compressor se ajuste à variação das condições exteriores (dia-noite e verão-inverno), resultando daí significativa redução no consumo de energia. Também conduz a diminuição do desgaste mecânico do sistema e conseqüentemente a um aumento no seu tempo de vida útil. Este tipo de controlo aparece atualmente, muitas vezes, já incorporado nos sistemas novos, se bem que possa também aplicar-se a sistemas reformulados. A subida de 1 K na temperatura de evaporação traduz-se numa economia de energia de cerca de 1%, e uma diminuição de 1 K na temperatura de condensação traduz-se numa melhoria da eficiência de 1 a 1,5%.

**Controlo das descongelações:** Os sistemas de descongelação energeticamente eficientes introduzem melhoria na realização dos ciclos de descongelação. Os sistemas de controlo mais eficazes não iniciam uma descongelação sem que haja uma ordem proveniente de um dispositivo que, por assim dizer, lê o estado de obstrução das alhetas do evaporador com gelo. Essa *leitura* pode ser feita de variadas maneiras, por medição do diferencial de temperatura ou da queda de pressão entre a entrada e a saída do ar do evaporador, ou por medição (apalpação) da espessura do gelo acumulado ou, ainda, a partir da indicação de um sensor de humidade. Todos estes métodos, desde que utilizados corretamente, são mais eficientes do que o recurso a um relógio temporizado para iniciar a descongelação. Estima-se que as economias de energia correspondentes se situem entre 1% e 6% da energia consumida pelo sistema de refrigeração.

**Controlo do evaporador:** Deve assegurar-se que a temperatura não é nem demasiado elevada, nem demasiado baixa à saída dos evaporadores: deverá localizar-se entre 3 K e 8 K acima da temperatura de evaporação.

**Fugas de fluido frigorigéneo:** Um desempenho correto só será possível se for mantido um nível mínimo de refrigerante no interior do sistema. Fugas de fluido frigorigéneo não só são prejudiciais para o ambiente, como também contribuem para a diminuição do rendimento da instalação. Recomenda-se a verificação regular dos níveis do fluido frigorigéneo no interior dos sistemas de refrigeração. Também **não deve ser esquecido o ter que se purgar o ar do circuito após o serviço de manutenção.**

**Melhoria do isolamento térmico:** O reforço do isolamento pode reduzir as entradas de calor e, portanto, diminuir muito eficientemente o pedido de frio. **O isolamento térmico deve ser considerado não só para os equipamentos de frio, mas também para as tubagens onde circula fluido frigorífero.** Merece também algum destaque o que deve ser feito em termos de **isolamento térmico eficiente em estruturas de armazenamento de frio** e sobre o qual são tecidas as considerações seguintes.

A capacidade das câmaras de frio quando devidamente ajustadas às necessidades é um dos aspetos mais determinantes para a operação eficiente de um sistema de refrigeração. Assim, e para uma dada temperatura do ar ambiente, só é possível economizar energia através da utilização correta do volume da câmara frigorífica e da armazenagem dos produtos à temperatura mais elevada permissível. Deve-se aproveitar ao máximo o espaço disponível nesse tipo de instalações, quer assegurando que, em todas as situações, aquelas se encontrem completamente cheias de produtos, quer instalando uma cortina de plástico ajustável, de forma a envolver apenas os produtos armazenados e o(s) ventilador(es) da bateria de arrefecimento.

Por outro lado, a energia necessária à armazenagem de produtos em ambiente refrigerado depende principalmente da temperatura de armazenagem, do isolamento térmico instalado, da temperatura do ar atmosférico e, em menor escala, da velocidade do vento, da precipitação e da incidência dos raios solares. Daí que, sempre que possível, as câmaras frigoríficas devam localizar-se em áreas abrigadas da incidência de raios solares e o seu isolamento térmico seja adequado e suficientemente espesso, interna e externamente, com um material impermeável à água. As portas e vedações devem ser eficientes, evitando a entrada do ar exterior mais quente.

Como a transferência de calor se verifica no sentido das zonas quentes (a uma temperatura mais elevada) para as zonas frias (a menores temperaturas), haverá sempre um fluxo de calor através de qualquer área refrigerada. Esta quantidade de calor transferida,  $Q$  (em kW), através das paredes de um espaço refrigerado, é dada pela expressão  $Q = U \cdot A \cdot \Delta T$ , em que  $U$  é o coeficiente global de transferência de calor (em kW/m<sup>2</sup>.°C),  $A$  é a área da superfície da parede (em m<sup>2</sup>) e  $\Delta T$  é a diferença de temperaturas entre as superfícies externa e interna da parede. Deste modo, desde que  $A$  e  $\Delta T$  sejam constantes,  $Q$  pode ser minimizado fazendo com que  $U$  tenha um valor tão baixo quanto possível, com as conseqüentes repercussões em termos de redução da capacidade de refrigeração necessária e do consumo de energia da instalação. Isto explica a necessidade de se ter um nível de isolamento térmico adequado nessas estruturas de refrigeração (não só em câmaras, mas também em tanques, tubagens, etc.).

Uma maneira prática de determinar o estado de eficiência do isolamento térmico de, por exemplo, uma câmara frigorífica, consiste em analisar o seguinte:

- A diferença entre a temperatura da superfície interna das paredes da câmara e a temperatura (de armazenagem) que deve ser mantida no interior da câmara (dada pelo controlo termostático existente);
- A diferença entre a temperatura da superfície externa das paredes da câmara e a temperatura do ar ambiente envolvente (desde que não seja uma superfície exposta a incidência de raios solares ou a radiações de outros equipamentos térmicos).



É óbvio que se o isolamento térmico estiver num bom estado de conservação aquelas diferenças de temperaturas serão pequenas. Para efeitos práticos e como “regra de ouro” a seguir, dever-se-á ter sempre os isolamentos num estado tal que aquelas diferenças de temperaturas expressas em percentagens da diferença entre a temperatura do ar ambiente e a temperatura mantida no interior da câmara se incluam nos seguintes valores:

- Para câmaras de congelação e túneis de arrefecimento/congelação: 10-13%;
- Para câmaras de conservação de temperatura a cerca de 0 °C: 14-17%.

Se as percentagens encontradas forem superiores a estas, deverá ser analisada de imediato a possibilidade de substituição/melhoria do isolamento térmico.

Um outro método de determinação das perdas de calor pelas estruturas dos sistemas de refrigeração (câmaras, tanques e tubagens) e da eficiência dos respetivos isolamentos é através do uso da análise termográfica. Esta técnica instrumental de teledeteção por infravermelhos, permite a visualização de todos os fluxos de calor já que a distribuição das radiações térmicas é convertida numa imagem visível. Permite a determinação da temperatura de qualquer superfície sem necessidade de “tocar” na respetiva superfície, não necessita de qualquer fonte luminosa exterior, podendo as medições ser efetuadas de dia ou de noite, e deteta facilmente as perdas de calor tais como as que se verificam através de materiais isolantes em mau estado de conservação ou que são devidas a infiltrações de ar (p. ex., através de sistemas de vedações - portas, cortinas, etc.). Inclusive fugas de refrigerante podem ser detetadas com esta técnica.

Uma vez detetadas perdas de calor importantes devido a um isolamento térmico deficiente há que alterar esta situação. Tradicionalmente, o isolamento é reparado substituindo o material deteriorado por material novo. Contudo, este procedimento para além de ser dispendioso em termos de mão-de-obra de que necessita, implica também grandes perdas de tempo até que a instalação possa ser usada de novo. Todas estas desvantagens podem ser ultrapassadas se se recorrer a uma técnica alternativa, que consiste em instalar o novo isolamento, na forma de poliuretano injetado, sobre o material antigo. Esta técnica tanto pode ser executada em câmaras com paredes em alvenaria, como em câmaras construídas com painéis auto-sustentáveis. Primeiramente, são efetuados orifícios nas paredes, onde são introduzidos pequenos tubos em PVC que têm por função aguentar os perfis metálicos que suportam os painéis de proteção interna. Depois os orifícios são vedados com poliuretano de modo a evitar a formação de “pontes térmicas”. São típicas economias de energia de 70-85% com esta técnica (com uma espessura de poliuretano de 5 cm), comparativamente à situação anterior de isolamento em mau estado de conservação. O período de retorno do investimento necessário é normalmente de cerca de 2 a 3 anos.

Outros métodos de isolamento térmico eficaz podem fazer uso para além de um nível de isolamento de uma película de polietileno que, por exemplo, vai desde o nível térreo às paredes e teto. Esta película é destinada a resistir a qualquer infiltração de ar ou humidade através da estrutura principal que possa reduzir assim o isolamento térmico, constituindo a vulgarmente designada *barreira ao vapor*. O polietileno de 0,25 mm de espessura tem sido aplicado nos últimos tempos, com resultados positivos, embora em Portugal a aplicação das camadas de *flint coat* para o mesmo fim tenha sido prática corrente. É uma técnica a considerar quando existem espaços não condicionados adjacentes às câmaras de frio, havendo a possibilidade de se criarem condições de humidade em redor das paredes no caso de falta de ventilação.



É necessário, portanto, não só uma boa qualidade dos materiais isolantes térmicos, como também a aplicação da película envolvente de material de proteção contra a migração do vapor, de modo que os materiais isolantes aplicados no piso, nas paredes e no teto não sejam deteriorados ao longo do tempo. Pode mesmo dizer-se que, na construção de estruturas para câmaras de frio, onde o isolamento térmico é de vital importância para a eficiência energética, a incorporação eficaz da película de *barreira ao vapor* deve ser uma das primeiras preocupações dos projetistas e construtores.

São exemplos de alguns tipos de materiais isolantes térmicos eficientes que são adequados para aplicação os seguintes:

- Painéis de poliestireno e poliuretano, cortiça e lã de vidro, que têm provado satisfatoriamente quando instalados com a devida película de proteção; tradicionalmente esta película era implementada a partir da aplicação de uma ou mais camadas de *flint coat*, mas modernamente, a película de polietileno de 0,25 mm de espessura tem provado vantagens técnicas em relação ao *flint coat*;
- Isolamento térmico aplicado por *spray*, à base de poliuretano.

Os valores de resistência térmica dos materiais isolantes a incorporar variam com a temperatura pretendida nos espaços a refrigerar e também com as condições térmicas dos espaços adjacentes não condicionados. Na Tabela seguinte indicam-se alguns valores de resistência térmica adequada às diferentes condições ambientais interiores, os quais são considerados valores ótimos tomando em consideração custos do investimento de capital e a futura economia de energia.

**Tabela 7** – Valores de resistência térmica recomendados para estruturas de armazenamento de frio

Tipo de câmara	Temperaturas (°C)	Valores recomendados de resistência térmica (m <sup>2</sup> .°C/W)		
		Isolamento no perímetro	Paredes / Teto falso	Placa
Refrigerados	4 a 10	1,1 - 2,3	2,1 - 3,5	3,0 - 4,2
Conservação de congelados	-2 a -12	1,8 - 2,3	3,0 - 4,2	2,5 - 4,6
	-23 a -29	3,5 - 4,2	4,2 - 6,0	4,6 - 6,0
Temperaturas extremas	-40	4,2 - 4,6	6,0 - 7,0	6,0 - 7,0

Fonte: ADENE

É importante não só a eficiência dos materiais isolantes incorporados na construção das câmaras de frio mas também a funcionalidade dos componentes de acesso às mesmas (portas e rampas) de modo a que as perdas térmicas sejam minimizadas. Também no que concerne às portas de acesso deverão ser no menor número possível e com a melhor qualidade de isolamento térmico. As cortinas de ar e de plástico devem ser usadas pelos benefícios consideráveis que apresentam na minimização dos consumos de energia, principalmente quando as portas de acesso à câmara funcionam várias vezes ao dia e atendendo a que uma vedação eficiente pode conduzir a reduções das entradas de ar da ordem de 70%. Em câmaras de congelação deve dar-se preferência a portas duplas e se possível com abertura e fecho automatizados.

Para além das perdas de frio, as infiltrações de ar do exterior, que transportam também alguma humidade, podem causar a formação de gelo nos evaporadores e aumentar assim o consumo de energia. Daí que devam ser evitadas a todo o custo por meio de técnicas como as atrás referidas.

Também no que concerne aos circuitos de distribuição de frio é importante que se tenham os mesmos cuidados para as tubagens e válvulas, em termos de um adequado isolamento térmico, o qual poderá resultar em economias de energia significativas comparativamente a situações em que tal não se verifique. O ganho de calor numa válvula não isolada é equivalente ao que se verifica em 1 metro de tubagem não isolada com o mesmo diâmetro.

### **Equipamentos e iluminação energeticamente eficientes na armazenagem frigorífica:**

Todo o calor dissipado por outros equipamentos no interior das instalações de armazenagem frigorífica necessita de ser retirado pelo sistema. Quanto mais eficientes forem esses equipamentos, menor será o calor libertado e menor o seu contributo para a carga térmica total a que o sistema tem de responder. Se, por exemplo, o sistema de iluminação for otimizado através do recurso a lâmpadas LED adaptadas para baixas temperaturas, a carga térmica interna e conseqüentemente a potência frigorífica vêm reduzidas. Mais correto ainda será desligar a iluminação quando não é necessária. Deve também ser verificado se determinados equipamentos ou partes dos mesmos, responsáveis por significativas libertações de calor, podem ser removidos dos locais a refrigerar.

**Redução da distância de transporte de frio:** Deve-se minimizar as distâncias entre os equipamentos produtores de frio e as utilizações finais de frio. Maiores distâncias de transporte de frio originam maiores perdas de carga e ganhos de calor. Deve também ser considerada a possibilidade de melhoria com a repartição do sistema frigorífico por vários sistemas descentralizados.

**Distribuição das cargas de refrigeração / Acumulação de frio:** O recurso a sistemas de acumulação térmica com mudança de fase, como os *bancos de gelo* ou as *placas ou bolas eutécticas*, pode conduzir a uma reserva de frio durante o período noturno em que o custo do kWh é bem menor, para posterior utilização durante os períodos diários de maior solicitação, otimizando-se dessa forma a operação do sistema. Contudo, devido ao facto de que o sistema de acumulação de frio também acrescenta perdas energéticas adicionais, o recurso a este tipo de sistema deve ser cuidadosamente ponderado, quer do ponto de vista energético quer do ponto de vista económico.

Ainda que as economias no consumo de energia possam ser bastante limitadas, podem conseguir-se reduções consideráveis nos custos globais das instalações de frio distribuindo a carga frigorífica através do uso de uma reserva ou armazenagem de frio durante determinados períodos. Em muitas unidades as maiores necessidades de refrigeração estão limitadas a algumas horas durante a parte da manhã, que correspondem precisamente ao período em que o custo do kWh de energia elétrica é maior. Através do recurso a um sistema de acumulação térmica com mudança de fase, como um *banco de gelo*, pode ser constituída uma reserva de frio durante o período noturno em que o custo do kWh de energia elétrica é bem menor, para posterior utilização durante os períodos diários de maior solicitação.

Ou seja, utiliza-se a energia do gelo produzido e acumulada durante a noite para satisfazer as necessidades em frio pontuais durante o dia. Deste modo a carga do compressor é mais equitativamente distribuída, e a carga total de refrigeração pode ser conseguida à custa de um compressor de menor potência.

Esta tecnologia já existe em muitas unidades fabris do Setor Industrial em Portugal, mas pode e deve ter uma implementação maior naquelas que ainda não a possuem, sobretudo se em algumas das suas aplicações a carga frigorífica atingir valores muito elevados exclusivamente em determinados momentos e se reduzir nas restantes horas do dia. Um banco de gelo, portanto, mais não é do que um evaporador, que estabelece (preferencialmente durante os períodos de “horas de vazio” e de “horas de super vazio”) uma reserva de frio sob a forma de gelo acumulado em volta de tubos no interior de um banho situado num tanque, constituindo aquilo que se designa por “água gelada”, que se encontra normalmente a uma temperatura entre 0 °C e 2 °C à saída do tanque. Este tipo de evaporador é concebido exatamente da mesma forma como as conhecidas serpentinas arrefecedoras de líquido (água ou salmoura) de uma instalação de arrefecimento indireto, mas em que é estabelecida uma maior separação entre tubos, permitindo a formação de uma manga de gelo com cerca de 3 ou 5 centímetros de espessura à sua volta, sem nunca chegar a juntar-se, a fim de tornar possível a devida circulação do banho de água. O controlo dos compressores da instalação frigorífica de um banco de gelo é normalmente assegurado através da temperatura da “água gelada” obtida.

Salienta-se que as razões para a utilização de gelo como meio de armazenagem de energia em vez de água líquida prendem-se com o facto de o calor latente de fusão do gelo ter o valor de 335 kJ/kg. Isto significa que cada quilograma de água ao congelar em gelo pode constituir uma reserva de frio de 335 kJ, o que é bem superior ao que se verifica com a “água gelada” que tem apenas uma capacidade de 25 a 35 kJ por quilograma. A água líquida requer 105 litros por kW/hora de armazenagem, enquanto uma reserva de gelo requer apenas 25,8 litros por kWh, isto é, 1/4 do volume de água líquida para armazenagem. Logo, também o custo de um banco de gelo é substancialmente inferior (da ordem de 1/3) comparativamente ao dos tanques para armazenagem de “água gelada” de capacidade equivalente.

Em instalações deste tipo é importante também, na medida em que se podem obter economias de custos, a instalação de um controlador automático da espessura do gelo nos evaporadores dos bancos de gelo, conjugada com um controlador de paragem/ arranque dos compressores, que pode ser um simples relógio, de modo a evitar que estes funcionem durante os períodos tarifários de energia elétrica de “horas de ponta”.

São possíveis em instalações deste tipo, com medidas que conduzam também à diminuição da temperatura de condensação para além do aumento da temperatura de evaporação, melhorias do rendimento do sistema de refrigeração da ordem dos 30–40% que, a par da transferência de consumos (kWh) do período diurno para o período noturno e da redução também significativa dos encargos de potência, podem conduzir a economias de custos globais de cerca de 70% comparativamente a instalações convencionais sem banco de gelo. Os correspondentes períodos de retorno do investimento situam-se normalmente entre 3 e 4 anos.

Uma variante desta tecnologia de armazenagem de frio, particularmente interessante para aquelas indústrias onde sejam necessárias temperaturas negativas muito baixas (por exemplo, entre  $-10^{\circ}\text{C}$  e  $-20^{\circ}\text{C}$ , para determinadas soluções de salmouras utilizadas como refrigerantes secundários), consiste em utilizar, como meio de mudança de fase e de armazenagem de energia, materiais eutéticos, geralmente à base de sais de metais hidratados. Nestes sistemas a energia pode ser armazenada num volume bastante menor do que o requerido para a salmoura gelada que seria a única alternativa viável.

O valor do calor latente (em  $\text{kWh}/\text{m}^3$ ) associado à mudança de estado (sólido / líquido) destes materiais, é muito elevado e largamente superior ao do calor sensível da salmoura medido em  $\text{kW}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ . O resultado é uma redução, que pode ir até 75%, do volume de armazenagem, sendo possíveis valores de acumulação de frio da ordem dos  $60 \text{ kWh}/\text{m}^3$ . Estes materiais normalmente são acondicionados em pequenas bolas construídas em polipropileno de alta densidade, cujo diâmetro não ultrapassa os 80 mm, e que irão revestir o interior dos tanques de armazenagem. São assim possíveis temperaturas de armazenagem, por exemplo, da ordem dos  $-25^{\circ}\text{C}$ . Do mesmo modo que foi referido para os bancos de gelo, também estas instalações, se acompanhadas de medidas que conduzam a acréscimos da eficiência das respetivas instalações frigoríficas, poderão por efeito combinado proporcionar reduções de  $\text{kWh}_{\text{elétr.}}/\text{kW}_{\text{refrigeração}}$  da ordem dos 50%. Com a redução global de custos que se obtém, o investimento necessário é normalmente amortizável em cerca de 4 a 5 anos.

**Turbina de expansão:** Deve ser avaliada a possibilidade de, na alimentação dos evaporadores, em vez da expansão do fluido frigorígeno ser feita através de uma válvula de expansão, se é possível fazê-la numa pequena turbina que gera energia mecânica a partir da diminuição de pressão do fluido frigorígeno. Contudo, este tipo de sistema é bastante dispendioso e, portanto, apenas é economicamente rentável em grandes sistemas de refrigeração, com elevado número de horas de operação.

**Sistemas de refrigeração por absorção:** No caso de haver disponibilidade de calor de rejeição, a utilização de sistemas frigoríficos por absorção pode conduzir a melhoria do rendimento global. Este tipo de sistemas consome energia térmica e não eletricidade, para a produção de frio.

Em qualquer máquina frigorífica verifica-se transferência de calor de um meio para outro a uma temperatura mais elevada. A segunda lei da termodinâmica exige que se forneça energia a um sistema que processe tal transferência. Numa máquina convencional, funcionando segundo o ciclo de compressão de vapor, essa energia é consumida sob a forma de energia mecânica (trabalho do compressor), e estão envolvidas duas fontes de calor - uma fonte fria a uma temperatura  $T_e$  (temperatura do evaporador, em graus Kelvin) e uma fonte quente a uma temperatura  $T_c$  (temperatura do condensador, em graus Kelvin). O rendimento da máquina (COP), definido pelo quociente entre a energia removida no evaporador (efeito de refrigeração) e a energia fornecida ao compressor, pode ser aproximado, como já foi visto atrás, pelo seu valor teórico (correspondente a um ciclo ideal) dado pela expressão  $T_e / (T_c - T_e)$ . Na prática, os ciclos reais apresentam eficiências de cerca de 60% do valor teórico atrás referido, sendo típicos valores de COP compreendidos entre 2 (para instalações com  $T_e$  de cerca de  $-40^{\circ}\text{C}$ ) e 5 (para instalações com  $T_e$  de cerca de  $0^{\circ}\text{C}$ ).

Contudo, existe um outro tipo de sistema de refrigeração que consome energia térmica para produzir frio. Este sistema, conhecido como sistema de *absorção*, recorre a três fontes de calor - uma a  $T_e$  (evaporador), outra a  $T_c$  (condensador) e uma terceira a  $T_m$  (correspondente à fonte de calor que alimenta e faz funcionar o sistema). Num sistema deste tipo é necessário que se verifique a seguinte relação entre temperaturas:  $T_m > T_c > T_e$ , atendendo a que o respetivo COP, definido como o quociente entre a energia removida no evaporador (efeito de refrigeração) e a energia térmica consumida, é dado em termos teóricos pela expressão  $(T_e / (T_c - T_e)) \times ((T_m - T_c) / T_m)$ . Logo, o COP destes sistemas é inferior ao dos sistemas de compressão mecânica, sendo típico a obtenção de valores próximos de 0,60-0,70. Contudo, têm a vantagem de utilizar como “força motriz” energia térmica, por exemplo produzida por simples combustão ou aproveitada de qualquer fonte residual, em vez de energia mecânica que é mais onerosa em termos de custos. As possíveis fontes de calor residual para um sistema de absorção podem ser de natureza vária, nomeadamente:

- Excedentes de vapor e água quente a baixa, média e alta pressão, provenientes do processo;
- Calor descarregado de um sistema de cogeração ou produção combinada de energia elétrica e energia térmica - por exemplo, vapor produzido numa caldeira de recuperação acoplada a um motor alternativo ou gases de escape de uma turbina a gás;
- Calor recuperado de fornos, secadores, etc.;
- Sistemas de energia solar que produzam temperaturas superiores a 80 °C;
- etc.

São basicamente dois os tipos de sistemas de absorção mais conhecidos:

- Os que normalmente são utilizados para obtenção de níveis de frio correspondentes a temperaturas entre 2 e 5 °C (“água gelada”), utilizando água como fluido refrigerante e uma solução de brometo de lítio (LiBr) como absorvente, podendo a fonte de calor alimentadora do sistema ter uma temperatura da ordem dos 60-80 °C; oferecem rendimentos satisfatórios e soluções específicas para todas as aplicações; e,
- Os mais adequados para níveis de frio correspondentes a temperaturas negativas (salmouras) que podem ir até valores tão baixos como -60 °C, utilizando amoníaco como fluido refrigerante e uma solução aquosa amoniacal como absorvente, devendo a fonte de calor alimentadora do sistema ter uma temperatura não inferior a 100-120 °C.

Qualquer destes tipos de sistemas de absorção pode ser utilizado na Indústria. Os principais componentes de uma máquina de absorção, por exemplo do segundo tipo referido atrás, destinada ao arrefecimento de água glicolada e utilizando amoníaco como fluido refrigerante (vide Figura 15), são normalmente os seguintes:

- a. *Evaporador* (permutador de calor tubular ou de placas), onde é arrefecida a água glicolada por evaporação do refrigerante.
- b. *Refrigerador ou "subcooler"* (permutador de calor tubular ou de placas), onde os vapores de amoníaco provenientes do evaporador são sobreaquecidos através do subarrefecimento do amoníaco líquido vindo do condensador.
- c. *Absorvedor*, onde os vapores de amoníaco provenientes do permutador anterior, a uma pressão próxima da de evaporação, são absorvidos pela solução "pobre" de absorvente. O calor de absorção é dissipado por circulação de água (vinda de uma torre de arrefecimento) no condensador desta secção.
- d. *Bomba de solução*, que aumenta a pressão desde o valor da zona do absorvedor para a pressão de condensação e transfere a solução "rica" em amoníaco para o gerador/separador.
- e. *Recuperador de soluções* (permutador de calor), onde a solução "rica" em amoníaco que é bombeada desde o absorvedor até à coluna de retificação é pré-aquecida em contracorrente pela solução quente de fraca concentração em amoníaco, vinda do gerador, que retorna ao absorvedor.
- f. *Gerador/separador*: no gerador propriamente dito, que funciona como "reboiler" de uma coluna de destilação, dá entrada a energia térmica que alimenta o sistema, sob a forma de vapor ou de água quente ou de gases quentes; a solução "rica" em amoníaco, pré-aquecida, dá entrada na coluna de retificação pela sua parte inferior, donde reflui para o gerador num processo de transferência de massa simultâneo ao da formação de vapor de amoníaco que ascende ao longo da coluna. No gerador (permutador tubular ou de placas) dá-se a ebulição e vaporização parcial da solução "rica", pelo aquecimento com a energia térmica introduzida. Como o amoníaco tem um ponto de ebulição inferior ao da água, forma-se uma solução "pobre" que posteriormente é arrefecida no recuperador de soluções e daí segue para o absorvedor. O vapor que ascende ao longo da coluna de retificação consiste de amoníaco e de uma parte de vapor de água. A retificação resulta da transferência de massa na parte intermédia da coluna com solução "rica" fria e na parte superior da coluna com amoníaco líquido (refluxo). A concentração em amoníaco no topo da coluna pode ser da ordem dos 99,8%.
- g. *Condensador evaporativo*, onde o vapor de amoníaco é liquefeito (condensado) e daí segue para o permutador de calor referido em b.. Um fluxo parcial retorna à coluna de retificação, com o auxílio de uma bomba de refluxo. Em algumas instalações este refluxo poderá verificar-se num *condensador de refluxo* situado antes do condensador evaporativo.
- h. Na expansão do amoníaco líquido desde a pressão de condensação até à pressão de evaporação, poderá haver um outro *permutador* para além do referido em b., para um arrefecimento suplementar do amoníaco antes da sua entrada no evaporador.



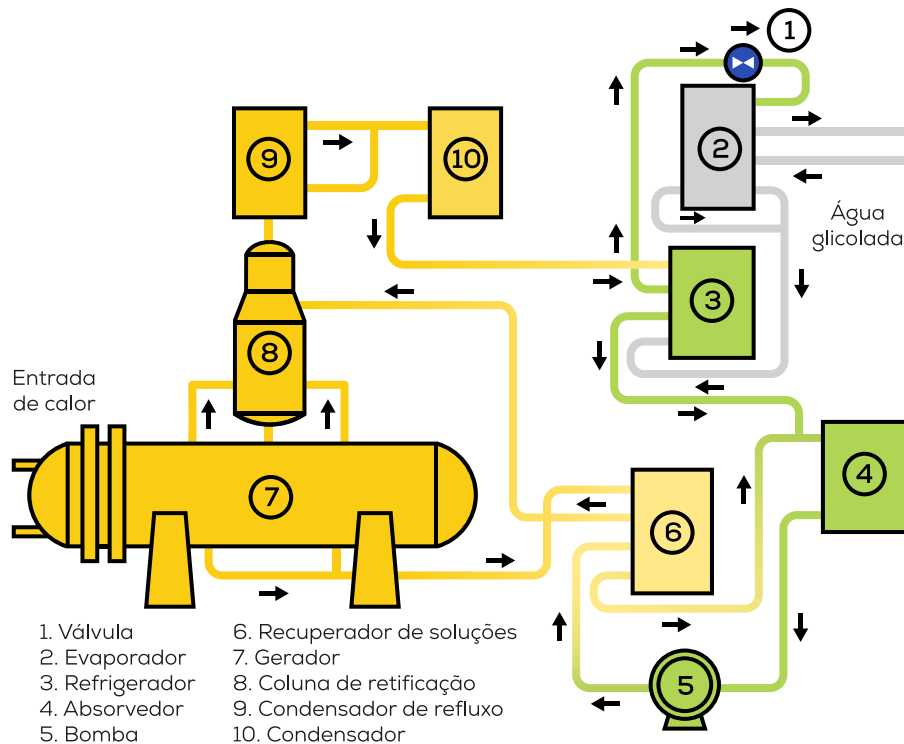


Figura 15 – Esquema de um sistema de refrigeração por absorção

Em qualquer dos tipos de máquina de absorção referidos é possível ter-se mais do que um nível de temperatura de evaporação na mesma máquina, isto é, podem ser concebidas para fazer face a quaisquer variações das cargas de frio exigidas pelos processos, com variações proporcionais das necessidades térmicas, bem como a variações das temperaturas da água de arrefecimento e das condições ambientais. O seu funcionamento é simples e pode ser completamente automatizado, e as únicas partes móveis são as bombas de circulação de solução, de refluxo e de circulação do refrigerante líquido para o evaporador, cujos consumos energéticos são insignificantes. Logo, as exigências de manutenção são mínimas, além de que o impacto ambiental é óbvio - eliminação de HFCs ao substituir-se a compressão mecânica por compressão térmica via ciclo de absorção, economia de energia primária e conseqüentes reduções de emissões de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}_x$  se utilizada conjuntamente com cogeração. E pode ter uma configuração tão compacta como a ilustrada na Figura seguinte.



Figura 16 – Aspeto de uma instalação de refrigeração por absorção



A refrigeração por absorção é, assim, uma tecnologia que deve ser encarada seriamente, sobretudo pelas empresas que já tenham uma instalação de cogeração ou que reúnam condições para a ter, e que assim poderia constituir a fonte de calor para alimentação do grupo de frio por absorção, pois doutro modo um sistema destes não é normalmente viável sob o ponto de vista económico devido ao seu menor rendimento. São conhecidos exemplos bem sucedidos na vizinha Espanha, em empresas agroalimentares, de implementação de grupos de frio por absorção utilizando amoníaco como refrigerante, acoplados a instalações de cogeração criadas de propósito para fornecerem a energia térmica necessária àqueles grupos, advindo a rentabilidade destes projetos, não só das vantagens da refrigeração por absorção comparativamente à produção de frio por compressão mecânica, mas também dos excedentes de produção de energia elétrica pelo sistema de cogeração vendidos para a rede da empresa distribuidora local daquela forma de energia.

Outro aspeto particularmente interessante é que, até há poucos anos, a produção de frio a baixas temperaturas (isto é, entre  $-5^{\circ}\text{C}$  e  $-35^{\circ}\text{C}$ ), baseada no princípio de absorção e na utilização de amoníaco como fluido refrigerante, não era uma tecnologia satisfatória para aplicações de refrigeração industrial de pequena e média potência ( $< 2$  MW). Efetivamente, para aquela gama de temperaturas e de potências frigoríficas, as prestações daquela tecnologia afastavam-se claramente dos valores ótimos, no que respeita a rendimentos, flexibilidade e adequação das curvas de carga, ao contrário do que sucedia para grandes potências frigoríficas ( $> 2$  MW). Mas hoje em dia, já existe uma tecnologia, desenvolvida conjuntamente na Espanha e na Holanda e recorrendo aos mesmos princípios, mas assente numa conceção totalmente modular que permite otimizar o rendimento energético e a resposta do equipamento a distintos níveis de frio (temperatura de evaporação) e de solicitação de potência, adequando a todo o momento o seu funcionamento às curvas de carga, para aquela gama de pequenas e médias potências frigoríficas ( $< 2$  MW) de particular interesse para muitas empresas de indústrias do setor agroalimentar.

Esta nova tecnologia de absorção com amoníaco integra um sistema de controle distribuído das distintas variáveis de trabalho para a regulação e controlo da instalação, com registo de operações num computador central e telegestão em tempo real, o que permite minimizar a variação dos valores de distribuição do processo, ao mesmo tempo que diminui o consumo energético do equipamento. Por outro lado, o sistema também é concebido de forma a ser compatível com o aproveitamento de calores residuais, do processo ou de sistemas de recuperação de energia, para potenciar a competitividade da tecnologia sob o ponto de vista do utilizador aplicador. São, assim, possíveis para instalações de poucas centenas de kW de potência frigorífica, rendimentos energéticos para os distintos níveis de frio como os que se indicam a seguir:

**Tabela 8** – Rendimentos obtidos numa máquina de absorção com amoníaco, com uma potência frigorífica  $< 1$  MW (valores indicativos) (Fonte: Projeto em Espanha, co-financiado pela Comissão Europeia)

Temperatura de evaporação ( $^{\circ}\text{C}$ )	COP
-10	0,58
-20	0,53
-30	0,46
-40	0,35

## Novas tendências na utilização de fluidos secundários em sistemas de refrigeração:

Não obstante não serem claras, em termos energéticos, as vantagens da substituição dos fluidos refrigerantes convencionais por novos fluidos como os que foram referidos no subcapítulo 2.2 deste Guia, com exceção talvez do amoníaco, ainda assim são possíveis economias de energia nas instalações de refrigeração pela utilização de novos fluidos refrigerantes, particularmente naquelas em que o arrefecimento não é obtido por meio de expansão direta do refrigerante evaporado, mas antes por forma indireta através da circulação de uma salmoura ou outro refrigerante secundário previamente arrefecidos.

Existem no mercado alguns fluidos deste tipo, com diferentes designações comerciais, como por exemplo o PEKASOL 50 que foi desenvolvido na Alemanha e que se baseia numa solução salina à base de sais orgânicos e que pode ser usada em qualquer instalação de refrigeração que anteriormente operasse por arrefecimento indireto com glicol, cloreto de cálcio ou qualquer outra solução salina convencional. A combinação das boas características de refrigeração e da resistência à corrosão, entre outras, permite a utilização destes fluidos refrigerantes numa enorme gama de aplicações. Têm como vantagem principal sobre os refrigerantes convencionais a sua baixa viscosidade a temperaturas reduzidas (até  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), daí resultando a possibilidade de conceção de novas instalações com tubagens de diâmetros menores e conseqüentemente mais económicas, ou de ampliação da capacidade dos sistemas existentes que até aqui funcionavam, por exemplo, com soluções à base de glicol, sem ter que substituir ou modificar partes dessas instalações.

As necessidades de bombagem destes fluidos são francamente menores comparativamente com as que se verificam nas instalações convencionais, daí resultando economias de energia elétrica significativas e as conseqüentes reduções dos custos de operação, que podem ser da ordem dos 30% ou superiores. Acresce a tudo isto o facto de estar confirmado com testes laboratoriais que estes fluidos não têm quaisquer efeitos tóxicos associados, ao contrário do que normalmente sucede com os refrigerantes convencionais como os derivados de glicol, pelo que não há qualquer objeção à sua utilização em sistemas fechados da indústria agroalimentar. Na Tabela seguinte são indicadas, a título de curiosidade, algumas propriedades físicas de um fluido deste tipo.

Tabela 9 – Principais propriedades físicas do fluido refrigerante PEKASOL 50

Densidade (a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	Aparência	Ponto de ebulição	Ponto de solidificação	pH (a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	Capacidade calorífica (a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	Condutividade térmica (a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	Viscosidade
1,290 g/cm <sup>3</sup>	Líquido azul claro	100 $^{\circ}\text{C}$	-56 $^{\circ}\text{C}$	11,5-12,5	3,19 kJ/kg.K	0,50 W/m.K	4,1 mPa.s

De qualquer modo, mesmo entre os refrigerantes convencionais do tipo *salmoura* (solução salina) existentes no mercado, sempre que possível a sua seleção para determinadas aplicações deverá atender, para além da sua compatibilidade com o ambiente físico local, regulamentos de segurança definidos e viabilidade económica, também à sua natureza química diversa, de que resultará uma determinada eficiência energética ótima, dependendo das temperaturas de refrigeração utilizadas.

Na Tabela 10 indicam-se os valores comparativos na transferência de calor para diferentes tipos de solução, para uma velocidade do fluido de 2,13 m/s. Também na mesma Tabela é possível verificar que, entre os diversos refrigerantes deste tipo, existem diferenças no consumo de energia elétrica necessária à bombagem da mesma quantidade de fluido, sendo essas diferenças indicadas para temperaturas de refrigeração entre -6,7 °C e 5,6 °C, tomando como referência o metanol.

**Tabela 10** – Valores comparativos na transferência de calor e nos consumos energéticos de bombagem entre diversos refrigerantes convencionais do tipo *salmoura*

TRANSFERÊNCIA DE CALOR		ENERGIA DE BOMBAGEM	
Refrigerante	Fator de transferência de calor (relativamente ao glicol propileno)	Refrigerante	Fator de energia de bombagem (relativamente ao metanol)
Glicol propileno	1,00	Metanol	1,00
Glicol etileno	1,98	Glicol propileno	1,02
Metanol	2,08	Glicol etileno	1,12
Cloreto de sódio	2,11	Cloreto de sódio	1,16
Cloreto de cálcio	2,30	Cloreto de cálcio	1,29
Tricloroetileno	2,72	Cloreto de metileno	3,35

**Resumindo**, pelo exposto atrás, fica evidente que há uma diversidade enorme de possibilidades de economizar energia em sistemas de refrigeração. Evidentemente, a aplicabilidade de determinadas medidas e o alcance das economias de custos que as mesmas possibilitam, dependem da dimensão e da natureza específica da instalação que esteja a ser analisada. Apenas uma avaliação do sistema e das necessidades da empresa pode determinar quais as medidas que são aplicáveis e rentáveis.

As conclusões da avaliação identificarão as medidas que são aplicáveis ao sistema em questão e deverão incluir uma estimativa das economias e dos investimentos necessários, bem como dos períodos de retorno dos mesmos.

A Tabela 11 sintetiza as medidas de economia de energia potencialmente significativas que podem ser aplicáveis ao sistema em análise. Nesta Tabela as medidas são apresentadas, começando-se por aquelas que têm um maior impacto potencial e que são as mais fáceis de serem implementadas.

**Tabela 11** – Principais medidas de eficiência energética que podem ser aplicadas em sistemas de refrigeração

MEDIDA	POTENCIAL DE ECONOMIA
<b>Redução das necessidades de refrigeração</b>	
Otimização do sistema	8 – 10%
Medidas de operação e manutenção	4 – 8%
Melhoria (reforço) dos isolamentos térmicos	5 – 10%
Recuperação de calor	80% (en. térmica)
Equipamentos e iluminação mais eficientes na armazenagem frigorífica	2%
<b>Utilização de equipamento eficiente</b>	
Variadores eletrónicos de velocidade em compressores, ventiladores e bombas	4 – 6%
Motores de alto rendimento em ventiladores de evaporadores	2 – 5%
Sistemas com compressor equipado com motor de alto rendimento	2 – 5%
Motores de alto rendimento em ventiladores do condensador	2 – 5%
Equipamentos e iluminação mais eficientes na armazenagem frigorífica	2%
Condensadores evaporativos	(2 - 4%) / °C de redução de $T_c$
<b>Operação adequada de modo a evitar temperaturas desnecessariamente baixas</b>	
Limpeza de permutadores de calor	3%
Controlo no lado de alta pressão por válvula de boia	10 – 15%
Controlo das descongelações	5%

Fonte: Programa Motor Challenge da Comissão Europeia

4

# Con clu sões

Como se viu no capítulo anterior, existe uma grande diversidade de medidas (quer por alterações de procedimentos, quer por via do recurso a inúmeras tecnologias, algumas delas inovadoras) com possibilidades de aplicação nos sistemas de refrigeração do Setor Industrial.

Se acrescentarmos a estas medidas outras que não foram aqui abordadas exaustivamente, como por exemplo a racionalização das instalações de frio existentes por meio da redução das necessidades de refrigeração e do aumento da eficiência dessas instalações, a implementação de um programa adequado de rotina de inspeção e manutenção de todos os componentes que constituem essas instalações, etc., facilmente se conclui que existem grandes possibilidades de se obterem economias de energia significativas.

Para além das vantagens energéticas e ambientais inerentes a todas estas medidas, também são importantes os correspondentes benefícios económicos, permitindo uma boa margem para a redução dos custos de produção, mediante investimentos que geralmente se amortizam rapidamente graças às economias obtidas.

Em síntese, é justificado e necessário o crescente interesse pelas questões energéticas. O interesse deve ser geral e não apenas dos Poderes Públicos. As empresas industriais devem envidar todos os seus esforços para conseguirem reduzir a elasticidade do consumo de energia em relação à produção, isto é, procurar reduzir os consumos específicos de energia, sem prejuízo da produção, e a área dos Sistemas de Refrigeração poderá dar um contributo significativo para esse esforço, facto que concorrerá certamente para o aumento da competitividade dessas empresas. A economia de combustíveis e de energia eléctrica, por via de uma utilização mais racional dessas formas de energia ou maior eficiência energética, é, neste momento, o meio mais eficaz para que os resultados possam ser obtidos em menor prazo, com vista a diminuir a dependência energética do País em relação ao exterior e a contribuir para o tão desejado aumento da competitividade das empresas, para fazerem face às "ameaças" da concorrência. Acresce a tudo isto as vantagens que implica em termos de evitar a deterioração do meio ambiente.

O potencial de economia de energia associado a sistemas de refrigeração que é evidente, é bem ilustrativo de que também é possível economizar energia e custos nesta área, a partir de medidas na sua maioria de fácil implementação e com reduzidos investimentos, que se recuperam em períodos relativamente curtos, dentro dos parâmetros típicos admissíveis pela Indústria, deitando por terra alegadas "dificuldades" de viabilidade técnico-económica muitas vezes invocadas pelas empresas para não se fazer nada nesta e noutras áreas. Muitas das vezes tais economias passam apenas por um controlo mais apertado e permanente destes equipamentos. É também importante que determinados "mitos" ou até desconhecimento sobre estas matérias, no que concerne a medidas recomendadas e viabilidade dos investimentos associados, sejam contrariados com campanhas de informação, como os resultados pretendidos com a elaboração e divulgação do presente Guia, para que se estimule alterações de práticas e com isso se recolham benefícios para a economia e para o ambiente.

A Figura seguinte resume bem muito do que se descreveu atrás, deixando pistas de reflexão sobre as melhores ações a serem desencadeadas para o aumento da eficiência energética em sistemas de refrigeração da Indústria.



SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO					
PISTAS DE REFLEXÃO	❖ PRODUÇÃO	○ REDE	➤ UTILIZAÇÃO	✓ CONTROLO	■ MANUTENÇÃO
	Utilização de um compressor frigorífico mais eficiente	Isolamento térmico da rede de distribuição de frio	Redução dos ganhos de calor na zona de utilização de frio	Controlo da produção de frio ao nível do compressor, em função das necessidades	Otimização da manutenção dos circuitos
	Utilização de condensadores/evaporadores mais eficientes			Otimização do rendimento energético da instalação em função das condições exteriores e das necessidades	
	Recuperação e utilização do calor dissipado pelos compressores			Otimização do armazenamento de frio	
				Controlo da regulação dos diferentes caudais	
			Otimização do funcionamento das baterias de frio		

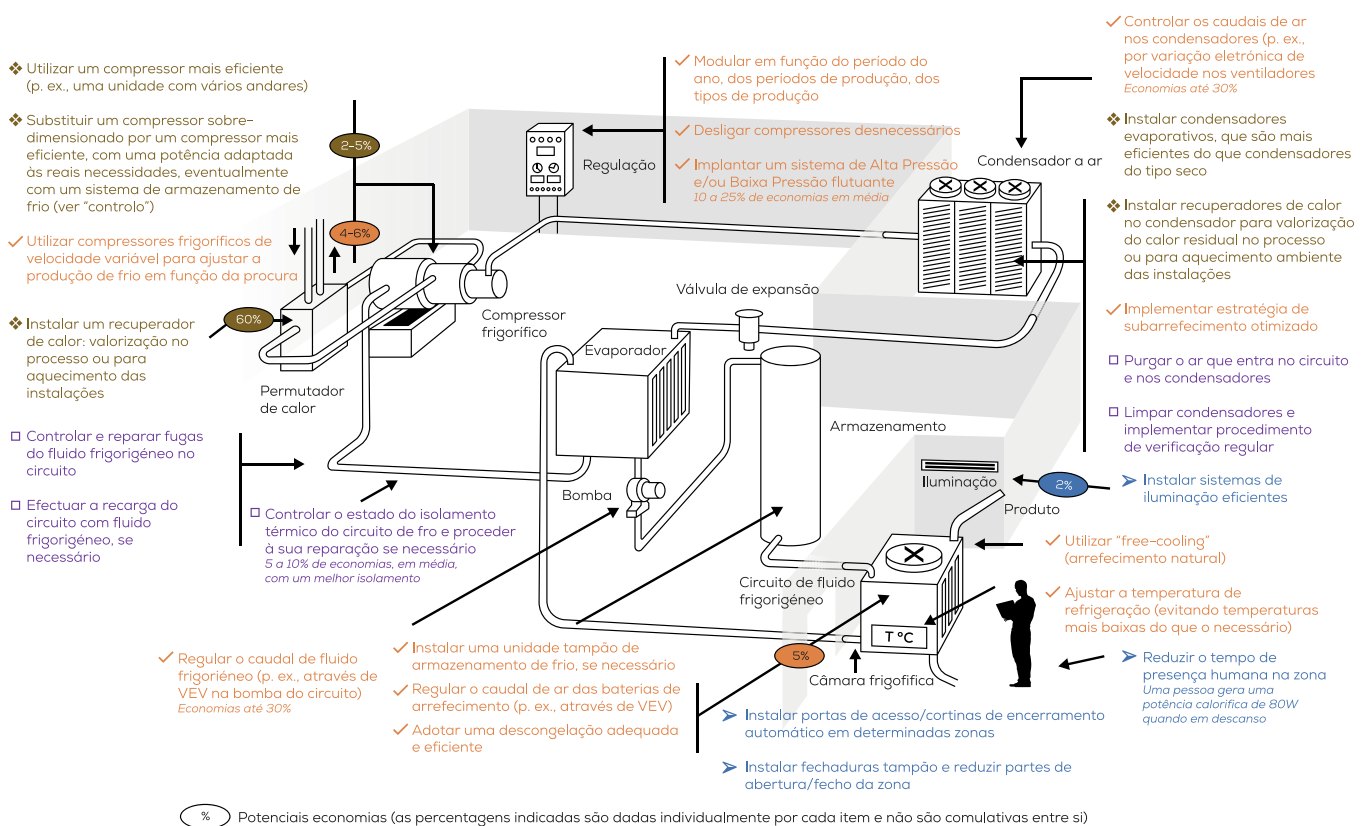


Figura 17 – Pistas de reflexão sobre como aumentar a eficiência energética em sistemas de refrigeração

Fonte: Programa Motor Challenge

# Referências Bibliográficas

5

- [1] "REFRIGERANT REPORT 20" – BITZER Kühlmaschinenbau GmbH - 2018.
- [2] "Diversos Relatórios de Auditorias Energéticas analisados pela ADENE – Agência para a Energia, no âmbito do SGCIE – Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia" – 2008-2018.
- [3] "REFRIGERAÇÃO | Técnicas e Competências Ambientais – Bases e Fundamentos" – Monteiro, Victor – ETEP – Edições Técnicas e Profissionais – 2015.
- [4] "Energy Efficiency Best Practice Guide Industrial Refrigeration" – Sustainability Victoria – 2009.
- [5] "Módulo de Sistemas Frigoríficos" – PROGRAMA MOTOR CHALLENGE da Comissão Europeia – 2007.
- [6] "Guia Técnico – Soluções para melhorar os sistemas acionados por motores elétricos" – PROGRAMA MOTOR CHALLENGE da Comissão Europeia – Tradução portuguesa, feita por ADENE – Agência para a Energia e ISR – Instituto de Sistemas e Robótica da Universidade de Coimbra, de Brochura Técnica produzida em Inglês por ADEME – Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, com o apoio do programa Energia Inteligente – Europa (EIE) – 2007.
- [7] "Tecnologias de Refrigeração Energeticamente Eficientes no Setor Agro-Alimentar" – Oliveira, Fernando (ADENE – Agência para a Energia) – Versão revista de comunicação apresentada em Encontro Empresarial sobre Sistemas de Refrigeração Energeticamente Eficientes no Setor Agro-Alimentar (Porto, 1997) e publicada na Revista Técnica "O Instalador" – 2007.
- [8] "Review of Energy Efficient Technologies in the Refrigeration Systems of the Agrofood Industry" - European Commission / Directorate-General for Energy (DG XVII) – Institut Català d'Energia – THERMIE Programme Action N° I 185 – 1995.
- [9] "Frio Industrial" – Brochura elaborada pelo CCE – Centro para a Conservação de Energia para a EDP – Eletricidade de Portugal, S.A. – 1991.

## **Ficha Técnica**

**Título:** Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração na Indústria - Guia de Boas Práticas

**Edição:** ADENE – Agência para a Energia

**ISBN:** 978-972-8646-85-1

**Suporte:** Eletrónico / PDF

**Data:** Dezembro, 2022 (1ª edição)

### **Para mais informações contactar:**

ADENE- Agência para a Energia  
Av. 5 de Outubro, 208, piso 2  
1050-065 Lisboa- Portugal

geral@adene.pt  
www.adene.pt

Todos os direitos reservados  
Publicação gratuita



Agência para a Energia