



# Tecnologias Emergentes

Documento elaborado no âmbito do projeto InovEnergy



dezembro de 2014

## Índice

<b>1. Introdução.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Revisão histórica e tecnológica.....</b>	<b>4</b>
<b>3. Tecnologias convencionais e emergentes.....</b>	<b>5</b>
<b>3.1. Sistemas de refrigeração por compressão .....</b>	<b>5</b>
<b>3.2. Sistemas de refrigeração por absorção .....</b>	<b>6</b>
<b>3.3. Sistemas de refrigeração por adsorção .....</b>	<b>9</b>
<b>4. Outras tecnologias e equipamentos – motores elétricos .....</b>	<b>13</b>
<b>4.1. Motores elétricos de alto rendimento.....</b>	<b>13</b>
<b>4.2. Variadores eletrônicos de velocidade (VEVs) .....</b>	<b>14</b>
<b>5. Investigação em tecnologias emergentes e ferramentas de análise de desempenho energético .....</b>	<b>15</b>
<b>5.1. Arrefecimento solar .....</b>	<b>16</b>
<b>5.2. Processos para aumento da taxa de arrefecimento.....</b>	<b>16</b>
<b>5.3. Avaliação de processos de cogeração/trigeração.....</b>	<b>17</b>
<b>5.4. Ferramentas avançadas para avaliação do desempenho energético.....</b>	<b>17</b>
<b>5.5. Avaliação de condições de trabalho .....</b>	<b>17</b>
<b>6. Referências Bibliográficas .....</b>	<b>18</b>

## 1. Introdução

O Projeto InovEnergy tem como objetivos principais quantificar, caracterizar e preconizar medidas de eficiência energética especificamente dirigidas para 6 fileiras do sector Agroindustrial nacional, nomeadamente carne, peixe, lacticínios, hortofrutícolas, vinhos e distribuição de bens alimentares, dadas as elevadas exigências de refrigeração existentes neste sector.

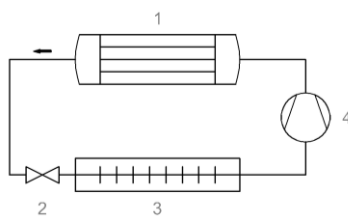
De acordo com o relatório especial do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2005), elaborado em colaboração com o *Montreal Protocol's Technology and Economic Assessment Panel* (TEAP) - a aplicação de refrigeração com maior impacto está associada ao processamento e conservação bens alimentares, sendo extremamente importante do ponto de vista económico, em países desenvolvidos e em desenvolvimento. Note-se que durante a primeira metade da década passada, o consumo mundial de alimentos congelados foi de cerca de 30 Mton/ano (representando um consumo de 63 kg per capita nos EUA, 56 kg na UE e 16 kg no Japão), tendo crescido no início deste milênio mais de 50% e continuado a crescer, e que a quantidade armazenada de alimentos congelados foi, em 1995, cerca de 350 Mton/ano.

A partir do mesmo relatório e sobre as tecnologias utilizadas, a maioria dos sistemas de refrigeração utilizados no processamento e conservação de alimentos são baseados em sistemas de compressão de vapor do tipo expansão direta, que transportam o fluido refrigerante para permutadores de calor nas câmaras de conservação, ou para outros equipamentos. Os sistemas indiretos, com base em *chillers* ou bancos de gelo líquido também são comumente usados, especialmente para produtos hortofrutícolas (fruta e vegetais), processamento de carnes, *etc.* A capacidade térmica do sistema é variável, a partir de 3 kW para pequenas câmaras, até vários megawatts em grandes instalações. Os tipos de compressores mais utilizados são os alternativos e de parafuso: para a gama de menores potências, o compressor alternativo é o mais utilizado, enquanto que para sistemas maiores, o compressor parafuso é o mais comum. As tecnologias de absorção de vapor são uma alternativa viável, mas muitas vezes limitadas a locais onde o calor residual possa ser utilizado, como em sistemas de produção combinada de calor e eletricidade (cogeração). O sistema de compressão-absorção é uma tecnologia emergente promissora, mas ainda em um estágio de desenvolvimento e, portanto, com custos excessivamente elevados de investimento.

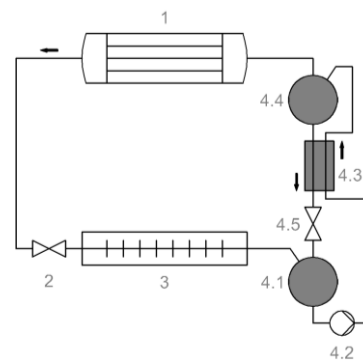
## 2. Revisão histórica e tecnológica

Os processos de refrigeração naturais têm sido utilizados para produção de gelo ou de arrefecimento (arrefecimento evaporativo) durante milhares de anos, mas foi apenas na segunda metade do século XIX que a refrigeração mecânica teve um desenvolvimento substancial. Em 1755, William Cullen, docente na Universidade de Edimburgo, produziu uma pequena quantidade de gelo, induzindo o contacto térmico de água com éter foi evaporado sob vácuo (Arora, 2010). A partir deste dispositivo muitos outros surgiram com novas configurações, resolvendo o processo de continuidade, (utilizando evaporadores, substituindo bombas de vácuo por compressores), compreendendo o fenómeno de condensação (usando os condensadores de forma adequada), implementando válvulas de expansão e empregando / testando vários refrigerantes (*e.g.*, dióxido de enxofre - SO<sub>2</sub>, dióxido de carbono - CO<sub>2</sub>, isobutano - R-600a) (Arora, 2010), tendo evoluído para as configurações atuais dos sistemas de refrigeração de compressão de vapor.

Outra corrente de equipamentos foi desenvolvida com base na capacidade de uma substância para absorver a outra, por exemplo: água (H<sub>2</sub>O) tem uma grande afinidade para absorver o amoníaco (NH<sub>3</sub>), o qual é evaporado enquanto está a ser absorvido pela água. O calor latente necessário neste processo é retirado do calor sensível do meio a ser arrefecido. O mesmo efeito pode ser observado na absorção de água pelo brometo de lítio (LiBr) (Goribar, 2003). Este é o princípio básico da refrigeração por absorção. No que diz respeito à transferência de calor entre a fonte quente e a fonte fria, o ciclo de absorção é semelhante ao ciclo de compressão de vapor. No entanto, no ciclo de absorção, o compressor é substituído por um grupo de equipamentos: um absorvedor, um gerador, um permutador de calor, uma bomba e um mecanismo de expansão adicional, como evidenciado pelas seguintes figuras (Fig. 1 e a Fig. 2) e tabela (Tab. 1).



**Fig. 1 - Sistema de refrigeração por compressão de vapor (estrutura base)**



**Fig. 2 - Sistema de refrigeração por absorção de vapor (estrutura base)**

<b>Sistema de compressão de vapor</b>	<b>Sistema de absorção de vapor</b>
Condensador (1)	Condensador (1)
Mecanismo de expansão (2)	Mecanismo de expansão (2)
Evaporador (3)	Evaporador (3)
	Absorvedor (4.1)
	Bomba (4.2)
Compressor (4)	Permutador de calor (4.3)
	Gerador (4.4)
	Mecanismo de expansão adicional (4.5)

**Tab. 1 - Comparação entre componentes de sistemas de compressão e absorção de vapor, adaptado de (Goribar, 2003)**

### **3. Tecnologias convencionais e emergentes**

#### **3.1. Sistemas de refrigeração por compressão**

Existem várias configurações para sistemas de refrigeração de compressão de vapor, no entanto, o ciclo de refrigeração mais simples e comum, só precisa de quatro componentes descritos na tabela anterior (coluna sistema de compressão de vapor). O seu princípio de funcionamento pode ser descrito em quatro fases (Sustainability Victoria, 2009):

- Num circuito fechado, o calor transferido a partir do meio e absorvido pelo refrigerante irá fornecer a sua energia de mudança de fase a partir do estado líquido para o gasoso, aumentando o efeito de arrefecimento do processo de refrigeração;
- À saída do compressor, o refrigerante é descarregado sob a forma de gás quente, e inicia o processo de libertação do seu calor latente de evaporação, para outro meio, assim que entra no condensador (voltando novamente para no fase líquida). O calor libertado é equivalente ao calor absorvido pelo refrigerante no evaporador acrescido do calor produzido pela compressão;
- Depois de deixar o condensador no estado líquido a alta temperatura, o refrigerante vai expandir, arrefecendo, durante a passagem através de um mecanismo de expansão (normalmente uma válvula de expansão);
- O ciclo irá reiniciar assim que o refrigerante entra no evaporador, onde vai ser vaporizar a baixa temperatura, devido no ganho de calor a partir do meio.

Em resumo, a evolução do ciclo (teórico) desta estrutura básica tem quatro evoluções sequenciais a uma determinada propriedade constante (pressão – entropia – pressão – entalpia), (Roriz, 2006):

- uma evolução correspondente a uma compressão isentrópica - evolução no compressor (1-2);
- outra que corresponde a um arrefecimento com mudança de fase - evolução no condensador (2-3);
- outra que corresponde a uma expansão isentálpica - evolução no mecanismo de expansão (3-4);
- e a última correspondendo a um aquecimento com mudança de fase - evolução no evaporador (4-1).

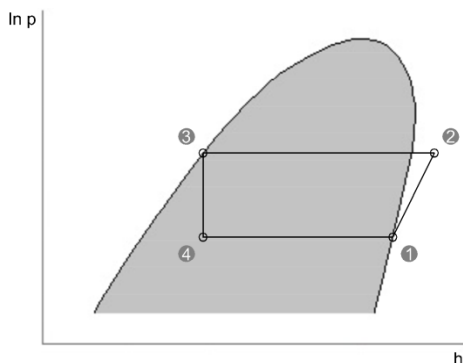


Fig. 3 – Ciclo de compressão de vapor teórico

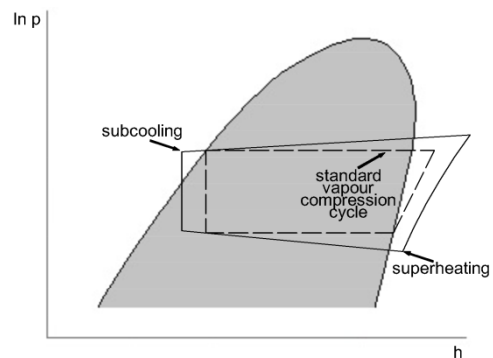


Fig. 4 - Ciclo de compressão de vapor real

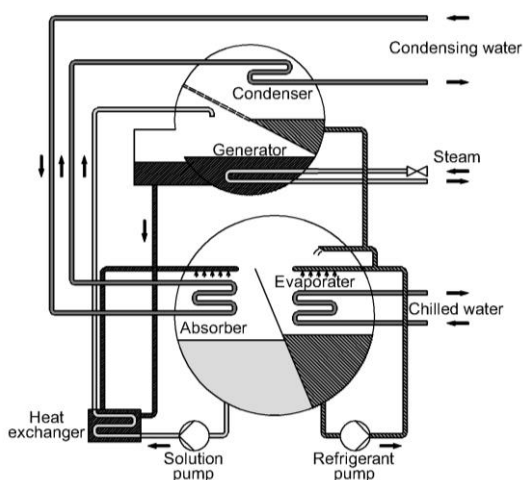
### 3.2. Sistemas de refrigeração por absorção

Os sistemas de refrigeração por absorção são basicamente divididos em duas categorias principais: os que usam a água ( $H_2O$ ) como refrigerante e os sistemas em que o refrigerante é o amoníaco ( $NH_3$ ). Desta forma a mistura pode ser sal-líquido ( $LiBr - H_2O$ ) ou líquido-líquido ( $H_2O - NH_3$ ). No primeiro caso o refrigerante é a água e o brometo de lítio ( $LiBr$ ) o absorvente, no segundo caso o fluido refrigerante é o amoníaco e a água o absorvente (Roriz, 2006). Os sistemas são ativados por uma fonte de calor, fornecendo a energia necessária à ativação do sistema, através de combustão efetuada direta ou indiretamente, por aquecimento por fluidos com calor residual (de um processo fabril, por exemplo), ou ainda por vapor ou água quente proveniente de outra fonte de calor.

Na breve descrição feita na introdução do capítulo 2, o princípio básico dos sistemas de refrigeração por absorção (Fig. 5) baseia-se na capacidade de uma substância para

absorver outra. É num dos componentes, o absorvedor, que o vapor saturado proveniente do evaporador é misturado com a solução absorvente proveniente do gerador (em gotas ou pulverizada sobre a tubagem do absorvedor), libertando o calor de condensação e de diluição (que é removido pelo arrefecimento da água que circula no interior dos do absorvedor), contraindo o volume a uma pressão de cerca de 0.7 kPa, resultando no processo designado por absorção.

O líquido formado no absorvedor é encaminhado para o cárter do absorvedor onde é acumulado e, em seguida, bombeado para o gerador através da bomba da solução aquosa, aumentando a sua pressão. Durante este percurso, esta solução aquosa é aquecida pela solução absorvente proveniente do gerador, num permutador de calor, aumentando a eficiência total do sistema (na medida em que reduz a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura da solução que entra no gerador, pela fonte de calor primária, antes de começar a ebulir no gerador). À medida que o calor é fornecido ao gerador, a solução de absorvente diluída entra em ebulição. De seguida, o vapor do refrigerante desorvido é encaminhado para a superfície exterior dos tubos do condensador, onde condensa ao ser arrefecido. O calor da água no condensador é removido por um dissipador de calor (por exemplo, uma torre de arrefecimento). Este processo ocorre num depósito à pressão de cerca de 6 kPa. O resto do ciclo é equivalente ao ciclo de refrigeração por compressão de vapor: o refrigerante condensado passa através de um orifício ou retentor de líquido na parte inferior do condensador e entra no evaporador. Em alguns casos, existe uma bomba de refrigerante para reintroduzir o refrigerante não evaporado, pulverizando-o sobre o evaporador (ASHRAE, 2006).

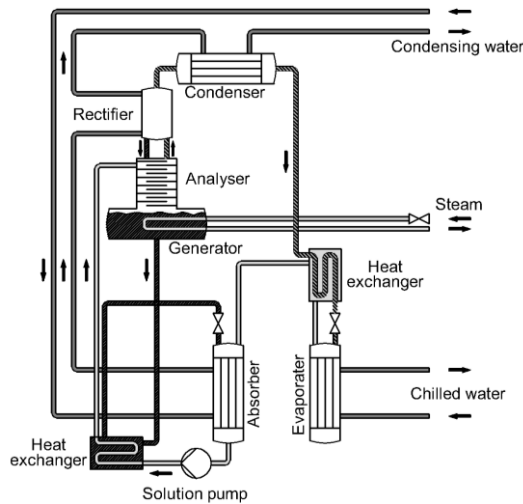


**Fig. 5 – Esquema de sistema a LiBr-H<sub>2</sub>O, adaptado de (ASHRAE, 2006)**

No caso específico da tecnologia de absorção de brometo de lítio em água, a solução absorvente que entra no gerador é diluída, isto é, fraca (ou pobre) em capacidade de absorção de energia, uma vez que a concentração do absorvente na água é muito baixa. Embora, quando começa a ebulir e a libertar o vapor de água (vapor refrigerante dessorvido), a solução, que mais tarde vai deixar o gerador, tornar-se numa solução de elevada concentração de sal, resultando numa solução absorvente forte (ou rica). Sendo a água o refrigerante, estes sistemas não são aplicados no processamento e conservação de bens alimentares, uma vez que a temperatura do refrigerante não pode ser inferior a 0°C (Roriz, 2006).

Para ultrapassar este problema são utilizados sistemas de absorção de amoníaco-água (H<sub>2</sub>O - NH<sub>3</sub>), onde as temperaturas são da ordem dos -57°C, embora sejam normalmente projetados para uma gama compreendida entre -29°C e -46°C. Devido à variabilidade na capacidade de ventilação, nos *set-points* da temperatura de refrigeração, o modo de rejeição de calor e outros parâmetros chave de operação, estes sistemas são concebidos à medida das instalações (ASHRAE, 2006), como se de unidades personalizadas se tratassem. Neste caso, sendo a água o absorvente (e muito volátil), é necessário purificar o vapor formado no gerador (processo de retificação) e assegurar que a evolução no circuito condensador-mecanismo de expansão- evaporador é feita com (quase) amoníaco puro. Na verdade, a retificação nunca é um processo completo, diminuindo portanto a eficiência do ciclo (Roriz, 2006). Contrariamente aos sistemas de brometo de lítio em água, a solução absorvente forte é aquela que vai para o gerador e a solução diluída é aquela que flui a partir do gerador para o absorvedor, embora o seu funcionamento seja praticamente o mesmo: o refrigerante a alta pressão do condensador é expandido e, em seguida, é evaporado no evaporador. Resultando da compressão termoquímica, o vapor é absorvido por uma solução com uma concentração muito baixa em amoníaco no absorvedor e, em seguida, é bombeado (aumentando a sua pressão) para o gerador / analisador. No percurso esta solução recebe calor da solução diluída que vem do gerador, diminuindo o calor que é necessário fornecer ao gerador e o calor que é necessário remover a partir do absorvedor. No equipamento gerador, o amoníaco e a água separam-se assim que solução receber a energia térmica proveniente da fonte de calor (Le Lostec, et al., 2013).





**Fig. 6** – Esquema de sistema a H<sub>2</sub>O-NH<sub>3</sub>, adaptado de (Le Lostec, et al., 2013) e (Chua, et al., 2002)

Os sistemas de refrigeração por absorção poderão ser uma opção viável sempre que esteja disponível calor ou fluidos residuais. Esta tecnologia tem sido mais adotada na refrigeração solar, o que significa que a fonte de calor é alimentada através de energia solar. Enquanto os *chillers* a brometo de lítio-água podem chegar a um coeficiente de desempenho (COP) em torno de 1.2, para equipamentos de duplo efeito, os *chillers* com permutador de calor gerador/absorvedor de amoníaco-água (GAX) têm COPs em torno de 0.8 (Kim, et al., 2008). Outra opção para estes equipamentos é a sua integração em centrais de ciclo combinado (cogeração). A baixa eficiência é o principal constrangimento desta tecnologia, mas numa perspectiva de conservação de energia, com a queima de gás natural e uma unidade de absorção de calor residual, a eficiência global aumentará exponencialmente (ASHRAE, 2006), enquanto a energia térmica sob a forma de calor seja necessária e o calor residual disponível no processo industrial.

### 3.3. Sistemas de refrigeração por adsorção

De forma análoga aos sistemas de refrigeração por absorção, os sistemas de adsorção podem ser alimentados por calor residual ou energia solar. O seu princípio de funcionamento é muito semelhante e a principal diferença é que, em sistemas de adsorção, o sorvente é um sólido e não um líquido. O ciclo de adsorvente convencional inclui duas fases (Wang, et al., 2006):

- Arrefecimento adsorvente com processo de adsorção (fase de arrefecimento-adsorção-evaporação), levando à evaporação do refrigerante dentro do evaporador, ou por outras palavras, o efeito de refrigeração desejado. O calor

sensível e de adsorção são transferidos para um meio de arrefecimento (água ou ar, geralmente);

- Aquecimento adsorvente com processo de dessorção, ou geração (fase de aquecimento-dessorção-condensação), resultando na condensação do refrigerante (no condensador) e libertação de calor para o ambiente. No processo de geração, o calor necessário pode ser fornecido por uma fonte de calor de baixa energia.

A adsorção pode ser dividida em adsorção física e química. A primeira é causada pela força de van der Waals entre as moléculas do adsorvente (fibra de carbono ativado, gel de sílica, zeólito ou óxido de alumínio, também conhecido como alumina) e o adsorvato (refrigerantes como amoníaco, água, metanol, etanol ou cloreto de cálcio, são os mais comuns). Estes adsorventes têm estruturas altamente porosas com razões de superfície/volume da ordem de várias centenas, tendo a capacidade de captar e manter seletivamente as moléculas de refrigerante. Uma vez saturado, o adsorvente pode ser regenerado por aquecimento. A adsorção química é causada pela reação, uma forte ligação química, entre o contacto das moléculas de adsorção e as moléculas de superfície adsorvente. Este processo é difícil de inverter, necessitando de mais energia para remover as moléculas adsorvidas em que a adsorção física (Kim, et al., 2008; Wang, et al., 2009).

Os pares de trabalho adsorvente-adsorvato foram testados e documentado através de vários estudos. A característica principal do par de trabalho (adsorvente-adsorbato) é a quantidade de refrigerante adsorvida por unidade de adsorvente seco. A carga  $x = m_{\text{refrigerante}}/m_{\text{adsorvente}}$  é função da pressão e temperatura do refrigerante,  $x = x(T, p)$ , e pode ser representado em diagramas isostéricos (International Energy Agency, 2010), ou seja numa relação de equilíbrio de adsorção<sup>1</sup>.

O ciclo de adsorção é realizado em quatro etapas (International Energy Agency, 2010):

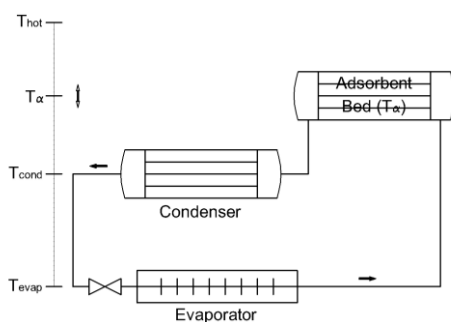
- Aquecimento isostérico ①: o adsorvente é aquecido à uma carga máxima constante  $x_{max}$ . A pressão de equilíbrio no sistema aumenta até à pressão de condensação ( $p_{cond}$ ) do refrigerante (à temperatura de condensação,  $T_{cond}$ ) seja atingida;

---

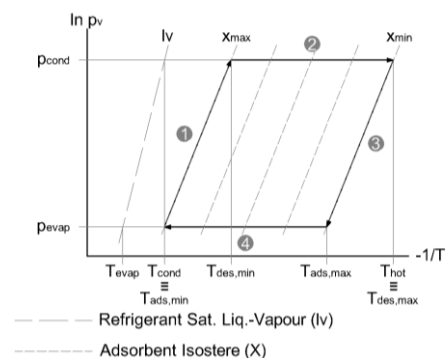
<sup>1</sup> O isostérico é um gráfico  $\ln(p)$  vs  $(1/T)$  a uma quantidade de vapor adsorvido constante. As linhas de adsorção isostéricas são geralmente retas para a maioria dos sistemas de adsorbato-adsorvente. O isostérico é importante na medida em que a sua inclinação da sua reta corresponde (aproximadamente) ao calor (entalpia) de adsorção (Theodore, et al., 2010).

- Dessorção isobárica ②: o adsorvente está ainda a ser aquecido e, consequentemente, dessorvido a uma pressão constante. Este processo termina assim que seja alcançada a temperatura máxima fornecida pela fonte de calor externa ( $T_{hot}$ ). Este processo é endotérmico, aproveitando o calor de dessorção e o refrigerante condensado é então liberado no condensador.
- Arrefecimento isostérico ③: o material adsorvente é arrefecido, até a pressão de equilíbrio no sistema atinge a pressão de evaporação do refrigerante no evaporador ( $p_{evap}$ ).
- Adsorção isobárica ④: o adsorvente ainda está a ser arrefecido, ocorrendo o processo de adsorção. O refrigerante evapora-se no evaporador, produzindo assim o efeito de arrefecimento desejado e é recolhido pelo adsorvente. Este processo termina assim que a temperatura do adsorvente atinja a temperatura de rejeição de calor.

O ciclo de adsorção é um processo intermitente porque o adsorvente deve ser regenerado quando está saturado. O adsorvedor, contendo o adsorvente, é alternativamente ligado a um condensador e um evaporador (Figura 2.29). O ciclo é uma sucessão de dois períodos: um período de aquecimento adsorvente com dessorção (aquecimento-dessorção-condensação: ①-②-③) a alta pressão ( $p_{cond}$ ) e um período de arrefecimento de adsorvente com adsorção (arrefecimento-adsorção-evaporação: ③-④-①) a baixa pressão ( $p_{evap}$ ) (Tashtoush, 2012).



**Fig. 7: Esquema sistema com ciclo de adsorção ideal, adaptado de (Tashtoush, 2012)**



**Fig. 8: Diagrama de Clapeyron para ciclo de adsorção ideal, adaptado de (Tashtoush, 2012) e (International Energy Agency, 2010)**

Para superar o problema da intermitência, e proporcionando um funcionamento contínuo, são utilizados leitos adsorventes múltiplos (sistemas multicamada), que envolvem o adsorvente com refrigerante emanado de um ou vários evaporadores (Yong, et al., 2007).

As maiores vantagens do sistema de refrigeração por adsorção são, de acordo com (Wang, et al., 2009) e (International Energy Agency, 2010):

- Operacionalidade através fontes de calor com um grande intervalo de temperatura, podendo ser utilizadas fontes com temperaturas tão baixas quanto os 50°C (os sistemas de absorção exigem, pelo menos, 70°C) até aos 500°C, sem causar quaisquer problemas de corrosão (nos sistemas de absorção, a corrosão severa começa a ocorrer para temperaturas acima de 200°C);
- Aptidão para condições de vibração: os sistemas de adsorção podem ser utilizados em barcos de pesca e locomotivas, uma vez que as vibrações produzem grande instabilidade em sistemas de absorção;
- Simplicidade e robustez: os sistemas de adsorção são menos complexos do que os sistemas de absorção, por exemplo, não é necessário para remover o adsorvente, por evaporação ou destilação, como sucede com água de um sistema de absorção de amoníaco-água. Não existe o risco de cristalização;
- Os materiais utilizados comuns são “amigos” do ambiente (zeolite, gel de sílica);
- Baixo número de peças em movimento, diminuindo os custos e ações de manutenção;
- Alto potencial de redução de custos na produção em série, devido ao pequeno número de peças individuais.

As suas maiores desvantagens são os COPs baixos e o baixo poder de arrefecimento específico, que pode ser melhorado através do aumento das propriedades de adsorção dos pares de trabalho e por uma melhor gestão do calor durante o ciclo de adsorção, resultando no aumento das propriedades de transferência de calor e de massa no adsorvedor (Wang, et al., 2006), ou se a geração de calor for fornecida por um grande sistema de energia solar, em que a sua baixa densidade de energia não seja um problema. A tecnologia de adsorção tem elevados custos de investimento, especialmente em sistemas de pequeno e médio porte (Kim, et al., 2008), tendo elevadas exigências do controlo do vácuo no recipiente e o dimensionamento dos circuitos hidráulicos externos deverá ser

extremamente cuidadoso, devido à variação cíclica de temperatura nos circuitos hidráulicos internos (International Energy Agency, 2010).

#### **4. Outras tecnologias e equipamentos – motores elétricos**

De todos os tipos de motores, os motores elétricos são os mais utilizados, pois combinam as vantagens da utilização de energia elétrica – transporte fácil, limpeza e simplicidade de comando – com a sua construção simples e uma grande versatilidade de adaptação às mais variadas cargas.

Existe uma forte dependência nos motores elétricos por parte das atividades e dos processos da indústria, incluindo para a compactação, corte, moagem, mistura, ventiladores, bombas, transporte de materiais, compressores de ar e refrigeração (Abdelaziz et al., 2011). Em Portugal, os motores elétricos são responsáveis por mais de 70% do consumo de energia elétrica da indústria, e por cerca de 30% do consumo elétrico global do País (Magueijo et al., 2010).

Para melhorar a eficiência dos sistemas de potência industriais têm sido desenvolvidas e aplicadas várias tecnologias, nas quais se incluem os motores elétricos de alto rendimento e os variadores eletrónicos de velocidade (VEVs).

##### **4.1. Motores elétricos de alto rendimento**

Um motor de alto rendimento, tal como o próprio nome indica, possui um rendimento e um fator de potência superiores ao motor convencional e, conseqüentemente, perdas mais reduzidas. Este desempenho é conseguido devido a mudanças no projeto de construção, materiais e melhores processos de fabrico.

As principais vantagens dos motores de alto rendimento, comparativamente aos motores convencionais, são as seguintes:

- Menores temperaturas de operação, que por sua vez permitem uma menor manutenção e uma maior vida útil;
- Custos operacionais inferiores;
- Maior fiabilidade devido a menores perdas, incluindo melhor tolerância a tensões térmicas resultantes de paragens e arranques sucessivos, maior resistência a condições anormais de funcionamento e ainda maior tolerância a formas de onda de corrente e tensão desadequadas.

Tipicamente, a melhoria de rendimento obtida pelos motores de elevado rendimento relativamente aos motores convencionais situa-se nos 3-4%. No entanto, este valor pode chegar a 8% (Magueijo et al., 2010).

Apesar de serem energeticamente mais eficientes, os motores de alto rendimento, pela sua conceção, exigem um investimento inicial 25% a 30% superior aos motores convencionais. No entanto, na maioria dos casos, a substituição de um motor convencional por um motor de elevado rendimento é justificada, sendo o investimento amortizado tipicamente entre 1 e 2 anos para períodos de funcionamento de 4000 horas por ano, e em 3 anos para 2000 horas de funcionamento anual (Magueijo et al., 2010).

Depreende-se que a substituição de motores elétricos convencionais por motores elétricos de alto desempenho é uma medida economicamente viável, que acarreta poupanças energéticas e monetárias significativas. Todavia, face ao acréscimo no investimento inicial, deve sempre ser feita uma análise técnico-económica do investimento através de uma análise prévia custo-benefício.

#### **4.2. Variadores eletrónicos de velocidade (VEVs)**

Na indústria portuguesa, o sobredimensionamento de motores de indução é uma situação bastante frequente devido à utilização sistemática de fatores de segurança muito elevados. O sobredimensionamento excessivo, isto é, superior a 30% dos motores acarreta três desvantagens principais (Magueijo et al., 2010):

- Diminuição do rendimento do motor, que por sua vez leva a maiores custos de operação;
- Maior investimento inicial na aquisição do motor e dos equipamentos associados;
- Diminuição do fator de potência do motor, levando assim ao aumento da fatura elétrica ou à necessidade de aquisição de equipamentos para compensar o fator de potência.

Deste modo, para a generalidade das aplicações, seria vantajoso em termos de consumo energético e de desempenho global, que a velocidade de motor fosse ajustada às cargas ou às necessidades do processo. Assim, a utilização de um variador eletrónico de velocidade nestas aplicações torna-se fundamental (Magueijo et al., 2010).

Um variador eletrónico de velocidade é um conversor eletrónico de potência que gera uma saída multi-fase e de frequência variável, que pode ser usada para acionar um motor de indução convencional, modulando e controlando a velocidade, o binário e a potência mecânica de saída do motor.

O controlo de velocidade com VEVs possui algumas desvantagens como a possibilidade de produção de interferências eletromagnéticas, injeção de harmónicos na rede e redução do tempo de vida dos motores, devido ao aumento da sua temperatura, ocorrência de descargas parciais no seu sistema de isolamento e circulação de correntes nos seus rolamentos (Almeida et al., 2006).

No entanto, este controlo pode conduzir à melhoria dos processos, menor desgaste no equipamento mecânico, menor desgaste do motor devido aos arranques/paragens suaves e poupanças de energia significativas. Estas características, juntamente com a melhoria do desempenho e da fiabilidade que tem ocorrido, tem tornado os VEVs mais atrativos do ponto de vista económico uma vez que permitem maiores economias energéticas e por conseguinte um retorno do investimento mais rápido (Almeida et al., 2006).

A rentabilidade dos VEVs depende principalmente do motor a controlar e do tipo de aplicação. No entanto, existem outros fatores importantes como o número de horas de funcionamento e o regime de carga do motor. Deste modo, deverá ser feita uma análise técnica-económica da aplicação através de uma análise prévia custo-benefício

## **5. Investigação em tecnologias emergentes e ferramentas de análise de desempenho energético**

No âmbito da problemática sobre a eficiência energética e de novas tecnologias a equipa de investigação da ADAI desenvolveu uma série de estudos de investigação de relevo para o sector da refrigeração. Algumas das abordagens são de interesse imediato para a melhoria da competitividade da indústria agroalimentar, outras apresentam resultados promissores e com potencialidade de desenvolvimento futuro e possível integração o tecido produtivo nacional.

Neste contexto, foram desenvolvidos trabalhos relacionados com: a tecnologia de *produção de frio a partir da energia solar*; os processos para promover o aumento da taxa de arrefecimento; estudos de *avaliação de sistemas de cogeração*; exploração de

*ferramentas avançadas de avaliação energética de instalações e sistemas de refrigeração; e avaliação de condições de trabalho em ambientes frios.*

Assim, resumem-se de seguida os vários assuntos explorados, indicando as publicações onde os leitores podem explorar as matérias com detalhe.

### **5.1. Arrefecimento solar**

Uma das mais promissoras tecnologias em termos de sustentabilidade energética é a refrigeração com energia solar. São conhecidas atualmente diferentes tecnologias que permitem produzir um efeito de refrigeração utilizando, direta ou indiretamente, a energia solar, podendo dividir-se em dois grandes grupos os sistemas deste tipo: sistemas exclusivamente térmicos e sistemas elétricos, com eletricidade produzida a partir de energia solar. O primeiro grupo de sistemas inclui as tecnologias de produção de frio por adsorção e por absorção, enquanto no segundo grupo podemos ter os sistemas mais comuns de produção de frio por compressão de vapor, ou sistemas do tipo Peltier, alimentados por eletricidade gerada por painéis fotovoltaicos.

Neste âmbito, estudaram-se os sistemas de produção de frio por adsorção, tendo sido construído e testado um protótipo de um frigorífico solar com ciclo de refrigeração por adsorção, cujos resultados se encontram descritos nos trabalhos de (Fernandes et al., 2014) e (Brites et al., 2013).

### **5.2. Processos para aumento da taxa de arrefecimento**

As tecnologias de arrefecimento rápido de produtos alimentares, em especial bebidas, têm como objetivo responder às solicitações da indústria hoteleira em termos de capacidade de resposta rápida a picos de consumo, ou como alternativa aos elevados consumos de energia para armazenagem permanente de grandes quantidades de bebidas refrigeradas.

De entre as várias tecnologias utilizadas, as mais comuns são a utilização de banhos de água fria ou misturas geladas, geralmente com movimento do invólucro da bebida ou, em alternativa, a vaporização a baixa pressão através de bombas de vácuo.

Neste sentido, realizou-se um estudo profundo sobre a segunda tecnologia. A descrição dos trabalhos realizados e as conclusões obtidas encontram-se detalhados em três artigos científicos de (Augusto et al., 2014, 2014a e 2014b).



### **5.3. Avaliação de processos de cogeração/trigeração**

Os sistemas de cogeração (produção simultânea de calor e energia elétrica) e, no caso de instalações que exijam refrigeração, os sistemas de trigeração (produção simultânea de calor, “frio” e energia elétrica), são opções que devem ser sempre consideradas em instalações de média/grande dimensão por forma promover a máxima racionalização das fontes de energia utilizadas. Contudo, a viabilidade energética e económica destes sistemas carecem quase sempre de uma análise cuidada às necessidades e fluxos de energia específicos de cada indústria ou instalação. Neste sentido, desenvolveram-se vários estudos, podendo encaminhar o leitor para o trabalho de (Ferreira e al., 2013 e 2014), em que estudou a viabilidade do uso da cogeração e da trigeração para aproveitar energia de processos térmicos, e o trabalho de (Gonçalves et al., 2013), onde o conceito de exergia foi aplicado para identificar os pontos críticos que limitam a eficiência destes sistemas.

### **5.4. Ferramentas avançadas para avaliação do desempenho energético**

Na caracterização energética de instalações, para além das campanhas de monitorização dos consumos de energia, é hoje fundamental o recurso a ferramentas avançadas de modelação de instalações e sistemas energéticos, seja para apoio à desagregação dos consumos, seja para o estudo do impacto da aplicação de medidas de racionalização energética. Para este fim, existem hoje em dia algumas ferramentas de avaliação energética de edifícios e sistemas energéticos com grandes potencialidades, nomeadamente o TRNSYS e o EnergyPlus. O trabalho de (Gonçalves et al., 2014) e um exemplo de estudo com o TRNSYS e o conceito de exergia, para estudar o desempenho de um sistema de arrefecimento dessicante. No trabalho de mestrado desenvolvidos por (Melo, 2014) o programa Therm foi usado no estudo de ganhos térmicos associados a pontes térmicas da envolvente de câmaras de refrigeração. (Silva, 2014), explorou os módulos avançados do EnergyPlus para estudar o desempenho energético de equipamentos de refrigeração e congelação.

### **5.5. Avaliação de condições de trabalho**

A melhoria das condições de trabalho em ambientes frios é um aspeto essencial para promover a saúde e bem-estar dos trabalhadores, contribuindo diretamente para o aumento da produtividade e, desta forma, para a competitividade das empresas do sector

agroindustrial. Neste assunto desenvolveu-se na ADAI um trabalho extenso de avaliação das condições de trabalho em ambientes frios, cujos resultados e conclusões se encontram detalhados em (Oliveira et al, 2014, 2014a).

## 6. Referências Bibliográficas

**(Abdelaziz et al., 2011):** Abdelaziz, E.A., Saidur, R., Mekhilef, S., *A review on energy saving strategies in industrial sector, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15, Issue 1, January 2011, pp.150-168, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.003>.

**(Almeida, 2006):** Almeida, A., Ferreira, F., Both, D., *Technical and Economical Considerations to Improve the Penetration of Variable Speed Drives for Electric Motor Systems, IEEE Transactions on Industry Applications*, Janeiro/Fevereiro 2005, pp.136-144.

**(Arora, 2010):** Arora Ramesh Chandra, *Refrigeration and Air Conditioning*. - New Delhi. PHI Learning Private Limited, 2010.

**(ASHRAE, 2006):** ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers 2006. *ASHRAE Handbook - Refrigeration (SI)*, 2006.

**(Augusto et al., 2014):** Augusto, C.M.; Ribeiro, J.B.; Gaspar, Adélio R; Costa, J.J.. 2014. "Low-pressure-vaporization of free water – Characterization of the boiling regimes", *International Journal of Thermal Sciences*, 77: 19 - 26. doi: [10.1016/j.ijthermalsci.2013.10.006](http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.10.006).

**(Augusto et al., 2014a):** Augusto, C.M.; Costa, J.J.; Gaspar, Adélio R; Ribeiro, J.B.. 2014. "Development, calibration and validation of a mathematical model for the low-pressure-vaporization of the water in porous media", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 73: 574 - 585. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.012](http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.012).

**(Augusto et al., 2014b):** Augusto, C.M.; Ribeiro, J.B.; Gaspar, Adélio R; Costa, J.J.. 2014. "Physical and experimental calibration of a mathematical model of the low-pressure-vaporization of free water", *Journal of Food Engineering*, 138: 23 - 34. doi: [10.1016/j.jfoodeng.2014.03.023](http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.03.023).

**(Brites et al., 2013):** G. Brites, J.J. Costa, V. Costa (2013), “Sustainable refrigeration based on the solar adsorption cycle”, Trabalho apresentado em 2nd IIR International Conference on Sustainability and the Cold Chain, Paris, 2013.

**(Chua, et al., 2002):** Chua H. T., Toh H. K. and Ng K. C. *Thermodynamic modeling of an ammonia-water absorption chiller*, International Journal of Refrigeration. - 2002. - Vol. 25. - pp. 896-906.

**(Fernandes et al., 2014):** Fernandes, Marco; Brites, Gonçalo; Costa, J.J.; Gaspar, Adélio R; Costa, V.A.F.. 2014. "Review and future trends of solar adsorption refrigeration systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39: 102 - 123. doi: [10.1016/j.rser.2014.07.081](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.081).

**(Ferreira et al., 2014):** Ferreira, Vitor A. R; Augusto, C.M.; Ribeiro, J.B.; Gaspar, Adélio R; Costa, J. J. 2014. "Increasing the efficiency of high temperature furnaces through a topping cycle cogeneration—a case study", *Energy Efficiency*. doi: [10.1007/s12053-014-9278-2](https://doi.org/10.1007/s12053-014-9278-2).

**(Ferreira et al., 2013):** Ferreira, Vitor A. R; Ribeiro, J.B.; Gaspar, Adélio R; Costa, J.J.; Oliveira, A. V. M. 2013. "Missing the “spark gap”: Feasibility study for a trigeneration system in a fish freezing industry in Portugal", Trabalho apresentado em Energy for Sustainability, In EfS - Sustainable Cities: designing for people and the planet, Coimbra.

**(Gonçalves et al., 2013):** Gonçalves, Pedro; Angrisani, Giovanni; Roselli, Carlo; Gaspar, Adélio R; Silva, Manuel G.. 2013. "Comparative energy and exergy performance assessments of a microcogenerator unit in different electricity mix scenarios", *Energy Conversion and Management*, 73: 195 - 206. doi: [10.1016/j.enconman.2013.04.015](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.04.015).

**(Gonçalves et al., 2014):** Gonçalves, Pedro; Angrisani, Giovanni; Sasso, Maurizio; Gaspar, Adélio R; Silva, Manuel G.. 2014. "Exergetic analysis of a desiccant cooling system: searching for performance improvement opportunities", *International Journal of Energy Research* 38, 6: 714 - 727.

**(Goribar, 2003):** Goribar Hernández Fundamentos de Aire Acondicionado y Rrefrigeración. - Balderas : Editorial Limusa, S.A. de C.V., 2003.

**(International Energy Agency, 2010):** International Energy Agency IEA SHC Task 38 Solar Air Conditioning and Refrigeration: C1 State of the art – Survey on new solar cooling developments. - [s.l.] : International Energy Agency, 2010.

**(IPCC, 2005):** *Intergovernmental Panel on Climate Change/ Montreal Protocol's Technology and Economic Assessment Panel Special Report: Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System.* - 2005.

**(Kim, et al., 2008):** Kim D.S. and Infante Ferreira C.A. *Solar refrigeration options – a state-of-the-art review // International Journal of Refrigeration.* - 2008. - Vol. 31. - pp. 3-15.

**(Le Lostec, et al., 2013):** Le Lostec Brice, Galanis Nicolas and Millette Jocelyn *Simulation of an ammoniaewater absorption chiller // Renewable Energy.* - 2013. - Vol. 60. - pp. 269-283.

**(Magueijo, 2010):** V. Magueijo, C. Fernandes e Outros, *Medidas de Eficiência Energética Aplicáveis à Indústria Portuguesa: Um Enquadramento Tecnológico Sucinto,* Julho, 2010.

**Oliveira et al (2014):** Oliveira, A.Virgílio M; Gaspar, Adélio R; André, Jorge S; Quintela, Divo A. 2014. "Subjective analysis of cold thermal environments", *Applied Ergonomics* 45, 3: 534 - 543. doi: [10.1016/j.apergo.2013.07.013](https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.07.013)

**Oliveira et al (2014a):** Oliveira, A. V. M; Gaspar, Adélio R; Raimundo, A. M; Quintela, D. A. 2014. "Evaluation of Occupational Cold Environments: Field Measurements and Subjective Analysis", *Industrial Health*, 52: 262 - 274. doi: [10.2486/indhealth.2012-0078](https://doi.org/10.2486/indhealth.2012-0078)

**(Roriz, 2006):** Roriz Luis *Climatização - Conceção, Instalação e Condução de Sistemas.* - Alfragide : Edições Orion, 2006.

**(Sustainability Victoria, 2009):** *Sustainability Victoria Energy Efficiency Best Practice Guide Industrial Refrigeration.* - Melbourne : Sustainability Victoria, 2009.

**(Tashtoush, 2012):** Tashtoush Ghassan M. *A Statistical Approach to Optimize the Solar Adsorption Refrigeration System // Energy Science and Technology*. - 2012. - Vol. 3. - pp. 18-28.

**(Theodore, et al., 2010):** Theodore Louis and Ricci Francesco. *Mass Transfer operations for the practicing engineer*. - Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2010.

**(Wang, et al., 2006):** Wang R.Z. and Oliveira R. G. *Adsorption refrigeration - An efficient way to make good use of waste heat and solar energy // Progress in Energy and Combustion Science*. - 2006. - Vol. 32. - pp. 424-458.

**(Wang, et al., 2009):** Wang L. W., Wang R. Z. and Oliveira R. G. *A review on adsorption working pairs for refrigeration // Renewable & Sustainable Energy Reviews*. - 2009. - Vol. 13. - pp. 518-534.

**(Yong, et al., 2007):** Yong Li and Z. Wang Ruzhu. *Adsorption Refrigeration: A Survey of Novel Technologies // Recent Patents on Engineering*. - 2007. - Vol. 1. - pp. 1-21.