

Aos meus Pais

Todo o meu Amor e Gratidão pela segunda oportunidade que me deram na vida

Agradecimentos

São diversas as pessoas e as instituições que, de uma forma ou de outra, contribuíram para o trabalho agora exposto, e a quem gostaria de prestar a minha homenagem e especial reconhecimento.

Em primeiro lugar à minha Família, o meu Porto de Abrigo. Representam tudo para mim. Em especial os meus Pais. O amor e a compreensão que por mim nutrem são incomensuráveis. Nunca são poucas as oportunidades de afirmar o meu amor e profunda admiração por eles.

Ao meu orientador científico, o Professor Doutor José Joaquim da Costa, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra pelo constante incentivo e pelo que aprendi com a sua postura científica, competência, espírito crítico e disponibilidade, o meu muito obrigado.

Ao Engenheiro Gonçalo Brites, companheiro de trabalho e amigo que aprendi a conhecer e a admirar durante a realização deste empreendimento. Foram muitas as horas de aventuras e desventuras que passámos. Representam uma imensidão de histórias que muito valorizo e em que muitos foram os conhecimentos e experiências que com ele descobri e assimilei.

Gostaria ainda de agradecer a todos os professores que, ao longo da vida, me instilaram uma profunda sede de conhecimento e paixão pela ciência e a todos os amigos que me encorajaram e de tantas formas ajudaram. Abstenho-me de os mencionar individualmente, mas não me esqueço do seu apoio.

Merecem ainda o meu apreço todos os funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica e Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial que directa ou indirectamente contribuíram com a sua simpatia e dedicação para esta empresa.

Estou também reconhecido a três instituições, a Universidade de Coimbra, a Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI) e à *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) cujo apoio logístico e financeiro foi fundamental para a prossecução dos objectivos deste trabalho.

Este trabalho foi financiado pelo 2007-2008 *Senior Undergraduate Project Grant Program* da *American Society of Heating, Refrigeration and Air-Contidioning Engineers* (ASHRAE).

Resumo

Foi construído, no período compreendido entre Outubro de 2007 e Agosto de 2008, no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC), um frigorífico solar funcionando segundo um ciclo de adsorção. A construção deste equipamento teve como objectivo principal o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio didáctico a aulas dos Mestrados Integrados em Engenharia Mecânica e Engenharia do Ambiente.

A máquina frigorífica, que utiliza sílica gel como adsorvente e água como adsorvato, funciona em vácuo e utiliza exclusivamente a energia solar. Foi instrumentada de forma a possibilitar a análise da sua performance global. É constituída por cinco elementos principais nomeadamente: colectador solar (com 1 m² de área e contendo 30 kg de sílica gel), condensador (convecção natural), reservatório de condensados, câmara frigorífica (com volume interno de 125 litros) e evaporador (capacidade para 2 litros). A unidade foi projectada e dimensionada para produzir aproximadamente três quilogramas de gelo por dia.

Neste trabalho são descritos o ciclo termodinâmico e os principais componentes do frigorífico solar construído, bem como testes preliminares para avaliação da construção do protótipo. Estes consistiram na realização de testes para avaliação da estanquicidade do seu circuito frigorífico, um elemento essencial da máquina. Os resultados obtidos apontam para que algumas opções de construção do circuito não tenham sido as mais adequadas, por implicarem a ocorrência de numerosos pontos de fuga, cuja eliminação se revelou muito complicada. Conclui-se assim que, apesar de constituir uma adequada ferramenta de aprendizagem, a construção do protótipo deverá ser revista, de forma a permitir eliminar dificuldades que, embora em reduzido número, se revelaram tão significativas que impediram a conclusão da totalidade do projecto.

Palavras-chave: Energia solar; Sílica gel; Água; Adsorção; Refrigeração.

Abstract

An adsorption solar refrigerator was built, between October 2007 and August 2008, in the Mechanical Engineering Department (DEM) of the Faculty of Sciences and Technology of University of Coimbra (FCTUC), intended to develop an educational tool to be used in several graduation classes. The machine, working with the silica gel and water adsorption pair, operates under vacuum and is powered only by solar energy. It was instrumented so that its global performance could be determined. Its main components are: a solar collector (with an area of 1m^2 and 30 kg of silica gel), a condenser (operating by natural convection), a reservoir for condensed water, a cold cabinet (with an internal volume of 125 liters) and an evaporator (with a capacity of 20 liters). The unit was designed so that it could produce at least three kilograms of ice per day.

This thesis describes the thermodynamic cycle and the main components of the solar refrigerator. Moreover, the preliminary tests conducted to evaluate its vacuum capabilities are presented. Results indicate that some components employed in the construction of the circuit are not suited to this task, as they originate several leakage points difficult to eliminate. Therefore, although the prototype can be used in learning activities, several structural aspects deserve reevaluation, as they prevent the successful completion of the work.

Keywords: Solar energy; Silica gel; Water; Adsorption; Refrigeration.

Índice

Lista de figuras	7
Abreviaturas	8
Capítulo I - Introdução	9
I.1. Refrigeração solar.....	9
I.2. Adsorção	11
I.3. Adsorventes e adsorvatos.....	12
I.4. Princípio de funcionamento do frigorífico solar a adsorção	13
I.4.1. Componentes principais.....	13
I.4.2. Ciclo de funcionamento	14
I.5. Objectivos do trabalho	18
Capítulo II - Frigorífico solar	19
II.1. Descrição geral.....	19
II.2. Colector Solar	21
II.3. Condensador	23
II.4. Reservatório	25
II.5. Evaporador.....	26
II.6. Câmara frigorífica	28
II.7. Elementos de conexão e estrutura de suporte da máquina	29
II.8. Instrumentação	30
Capítulo III - Testes experimentais de estanquicidade	31
III.1. Protocolo dos testes.....	31
III.2. Resultados obtidos	33
Capítulo IV - Discussão e Conclusões.....	34
IV.1. Discussão.....	34
IV.2. Conclusão e desenvolvimentos futuros.....	37
Anexos	39
Bibliografia.....	44

Lista de figuras

Figura 1	Classificação dos frigoríficos solares e ciclos de refrigeração	10
Figura 2	Representação simplificada de um frigorífico solar funcionando a adsorção	14
Figura 3	Ciclo ideal de refrigeração por adsorção representado num diagrama de <i>Dühring</i>	14
Figura 4	Fase de aquecimento isostérico representada num diagrama de <i>Dühring</i>	15
Figura 5	Fase de dessorção e condensação representada num diagrama de <i>Dühring</i>	16
Figura 6	Fase de arrefecimento isostérico representada num diagrama de <i>Dühring</i>	17
Figura 7	Fase de adsorção representada num diagrama de <i>Dühring</i>	18
Figura 8	Frigorífico solar	19
Figura 9	Vista em corte do frigorífico solar	20
Figura 10	Ciclo teórico de funcionamento do frigorífico solar	21
Figura 11	Colector do frigorífico solar	21
Figura 12	Vista em corte do colector solar	22
Figura 13	Condensador do frigorífico solar	24
Figura 14	Vista do condensador evidenciando alguns dos seus componentes	25
Figura 15	Reservatório de condensados do frigorífico solar	25
Figura 16	Vista em corte do reservatório	26
Figura 17	Evaporador do frigorífico solar montado no suporte	27
Figura 18	Vista em corte do evaporador	27
Figura 19	Câmara frigorífica do frigorífico solar	28
Figura 20	Vista da Câmara frigorífica evidenciando alguns dos seus elementos estruturais	29
Figura 21	Exemplo de fuga detectada durante a realização dos testes de estanquicidade	32

Abreviaturas

ADAI Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

TIG *Tungsten Inert Gas*

Capítulo I - Introdução

I.1. Refrigeração solar

A refrigeração representa um processo de transferência de calor de uma região a uma temperatura inferior para outra a uma temperatura superior [1]. O seu papel nas sociedades modernas revela-se fundamental, sendo utilizada em áreas tão distintas como a agricultura, pescas, medicina e construção civil. Dentro destas destaca-se o papel crucial que desempenha na conservação de géneros alimentícios, produtos farmacêuticos e biológicos e em conforto térmico. Os dispositivos que efectuam a refrigeração denominam-se máquinas frigoríficas, que podem funcionar segundo diversos tipos de ciclos termodinâmicos e utilizar diferentes tipos de energia, como a eléctrica, a mecânica ou a térmica. No caso particular da energia térmica esta pode ser obtida a partir de combustíveis fósseis, biomassa ou radiação solar [2].

Nos países industrializados a refrigeração depende fortemente da electricidade fornecida pela rede eléctrica, proporcionada de uma forma contínua e fiável [3]. Os ciclos de refrigeração tradicionalmente utilizados, como o de compressão de vapor, contribuem negativamente para o tão desejável desenvolvimento sustentável [4]: tal deve-se ao facto de conduzirem, com a sua crescente procura e utilização, para um aumento do nível do consumo de electricidade e de combustíveis fósseis. Associado a este facto, a utilização de fluidos operantes, como por exemplo cloro fluorcarbonetos (CFC's), contribui para o agravamento de problemas ambientais como o aquecimento global e a degradação da camada de ozono [4]. Em países em vias de desenvolvimento, onde a distribuição contínua e fiável de energia pode revelar-se uma tarefa complicada, a procura de refrigeração, de forma a estimular a agricultura e o comércio, torna necessário o desenvolvimento de métodos alternativos que não dependam do fornecimento de electricidade [3]. A utilização de sistemas solares de refrigeração permite eliminar alguns dos problemas associados ao funcionamento das máquinas frigoríficas tradicionais, descritos anteriormente. Tal circunstância, aliada ao facto da necessidade de refrigeração coincidir, na maior parte das vezes, com uma maior disponibilidade de radiação solar, tornou o desenvolvimento da tecnologia de refrigeração solar num novo desafio ao nível global [4].

A energia solar pode ser convertida em electricidade ou em calor de forma a possibilitar o funcionamento de uma máquina frigorífica [4]. Tal facto constitui o ponto de partida para a elaboração de uma possível classificação dos frigoríficos solares e dos ciclos termodinâmicos segundo os quais operam [2] (fig. 1). Os métodos passíveis de serem utilizados em refrigeração solar apresentam diversas vantagens e inconvenientes, tal como descrito por Anyanwu em [2].

No decorrer dos anos 80 do século passado as instalações de refrigeração solares predominantes operavam com energia eléctrica. Nos últimos anos, porém, a conversão solar térmica ganhou um novo ascendente, em especial os sistemas baseados em sorção solar (absorção e adsorção). Esta alteração deveu-se a diversas razões, destacando-se entre estas o facto do rendimento dos painéis fotovoltaicos comercializados não aumentar significativamente ao fim de diversos anos (entre 10 a 15%) [5].

Os sistemas frigoríficos baseados em adsorção solar, no âmbito dos quais o presente trabalho se insere, foram desenvolvidos principalmente para serem utilizados em regiões remotas de países em vias de desenvolvimento sem fornecimento de energia eléctrica [6, 7]. São completamente autónomos e podem ser fabricados sem quaisquer partes móveis, utilizando tecnologia disponível localmente [2]. Além disso são sistemas amigos do ambiente e de baixo custo [7], não requerendo a importação de peças sobressalentes [2]. Este tipo de sistemas apresenta, no entanto, algumas desvantagens, destacando-se a baixa performance global (cerca de 10%) dos sistemas até agora produzidos [2]. O grande interesse nesta tecnologia levou ao desenvolvimento de um grande número de unidades de refrigeração solar por adsorção, construídas e testadas por inúmeros autores ao longo dos últimos anos [4].

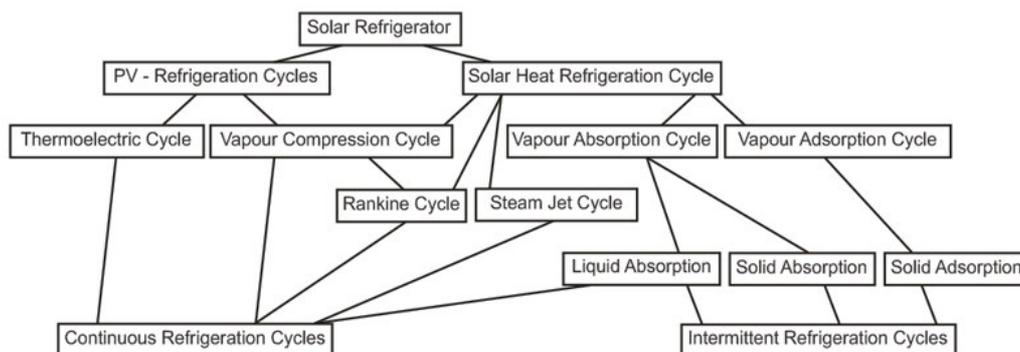


Fig. 1. Classificação dos frigoríficos solares e ciclos de refrigeração [2].

I.2. Adsorção

A adsorção é um processo de fixação das moléculas de um fluido (adsorvato) à superfície de um sólido poroso (adsorvente) [7, 8]. Distingue-se da absorção na medida em que, nesta última, um fluido se mistura com uma fase absorvente (líquida ou sólida), formando uma “solução”. Os processos agora descritos são referidos, de uma forma geral, como processos de sorção [7].

As ligações estabelecidas na fixação das moléculas do adsorvato podem resultar de interacções de natureza física ou química, pelo que se distingue a adsorção física da adsorção química [8]. A adsorção física é um fenómeno de superfície envolvendo o estabelecimento de ligações intermoleculares relativamente fracas (de *Van der Waals* e electrostáticas) entre as moléculas do adsorvato e a superfície do adsorvente [7, 8]. Nesta circunstância não ocorre qualquer tipo de reacção química, pelo que não ocorre dissociação das moléculas adsorvidas [8]. Este fenómeno é reversível e, uma vez que o estabelecimento destas ligações ocorre com perda de energia, é também exotérmico [6, 8]. A adsorção química, como transparece da própria designação, envolve a formação de ligações químicas entre as moléculas do adsorvato e a superfície do adsorvente. Pode por isso envolver dissociação das espécies adsorvidas e ser irreversível [8].

A adsorção física é a mais indicada em aplicações de refrigeração e ar condicionado [7], pelo que o trabalho realizado no âmbito da presente tese se baseia na aplicação deste processo.

I.3. Adsorventes e adsorvatos

Os frigoríficos solares que funcionam segundo um ciclo de adsorção podem utilizar diferentes pares adsorvente/adsorvato. Entre os mais comuns destacam-se a sílica gel/água, zeólito/água e carvão activado/metanol, entre outros [7]. A selecção de um determinado par depende do tipo de aplicação [9] e das características de ambos os constituintes, incluindo a afinidade entre ambos. Tais características vão desde as propriedades químicas, físicas e termodinâmicas, passando ainda pela disponibilidade dos materiais e seu custo [2]. Em termos gerais o adsorvato deve possuir um elevado calor latente por unidade de volume e uma boa estabilidade térmica. O adsorvente, enquanto material poroso, para além possibilitar a adsorção de uma elevada quantidade de adsorvato na fase gasosa, deve apresentar uma elevada variação de concentração numa reduzida variação de temperatura. Além disso deve apresentar uma boa condutividade térmica, um baixo custo e ainda possibilitar a reversibilidade do processo de adsorção durante um número elevado de ciclos [7].

Para a realização do trabalho apresentado nesta tese foi escolhido o par sílica gel/água. As razões para tal escolha são várias, destacando-se entre elas o facto de apresentar uma elevada segurança na sua utilização. Refira-se, a título informativo, que o par carvão activado/metanol é tóxico e inflamável. Outras razões prendem-se, por exemplo, com motivações ecológicas, já que este possibilita um maior respeito pelo meio ambiente.

A sílica gel é uma substância cuja composição química pode ser expressa como $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ [8], onde n corresponde ao estado de hidratação do dióxido de silício (SiO_2), tratando-se de uma substância quimicamente inerte e não tóxica [10]. Os grãos de sílica gel possuem uma teia interna de poros microscópicos ligados entre si a que corresponde uma área superficial típica de cerca de 700 a 800 m^2 por grama. Por outras palavras, a área superficial interna de uma colher de chá de sílica gel é equivalente à de um campo de futebol. A sílica gel foi patenteada em 1919 durante a primeira guerra mundial como adsorvente de vapores e gases tóxicos em máscaras de gás. Durante a segunda grande guerra foi utilizada como agente desumidificador para a protecção de medicamentos, entre outras aplicações [10].

I.4. Princípio de funcionamento do frigorífico solar a adsorção

I.4.1. Componentes principais

Uma máquina frigorífica solar funcionando segundo um ciclo de adsorção (fig. 2) dispensa qualquer tipo de energia mecânica, funcionando apenas com recurso a energia solar.

É constituída por diversos componentes, onde se destacam os seguintes:

Colector solar - estrutura que contém o adsorvente (sílica gel tipo TS6¹) e que capta a radiação nele incidente, proveniente do sol, causando a dessorção do adsorvato (água).

Condensador - permutador de calor onde o vapor do adsorvato, dessorvido no colector solar, condensa.

Reservatório - recipiente que permite o armazenamento do fluido condensado, caso seja necessário.

Câmara frigorífica - Dispositivo cujas paredes, formadas por um revestimento isolante, delimitam o espaço físico a refrigerar.

Evaporador - contém no seu interior o adsorvato no estado líquido e/ou sólido. Encontra-se colocado no interior da câmara frigorífica e é através dele que se realiza a refrigeração do espaço por ela delimitado.

Os elementos agora descritos encontram-se interligados entre si por condutas, nas quais se encontram inseridas diversas válvulas de esfera e tomadas para sensores de pressão.

O frigorífico solar, de cujos principais componentes se deu uma breve descrição, funciona segundo um ciclo térmico de adsorção com a duração total de vinte e quatro horas. Devido ao facto de utilizar um adsorvente sólido este ciclo é intermitente, ou seja, a produção de frio não é contínua, ocorrendo apenas durante parte do mesmo. A produção de frio poderia ser quasi-contínua mas neste caso teriam de existir dois adsorventes na unidade frigorífica, a operar em fases opostas [11].

¹ Produto comercializado pela empresa espanhola *Bolaseca S.A.*

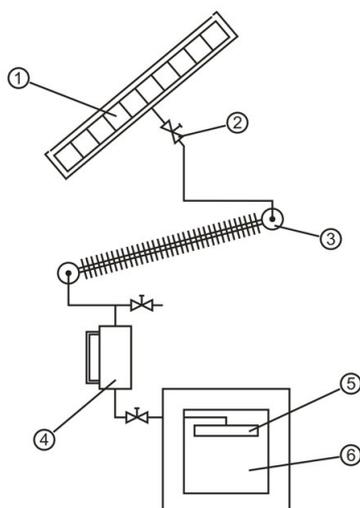


Fig. 2. Representação simplificada de um frigorífico solar funcionando a adsorção.
 (1 - Colector solar; 2 - Válvula de esfera; 3 - Condensador; 4 - Reservatório;
 5 - Evaporador; 6 - Câmara frigorífica).

I.4.2. Ciclo de funcionamento

Em termos teóricos o ciclo desenrola-se ao longo de duas evoluções isostéricas, onde a concentração do adsorvato no seio do adsorvente se mantém constante, e duas evoluções isobáricas (fig. 3) [6, 11-13]. Pode assim ser decomposto em quatro fases distintas, que se descrevem em seguida.

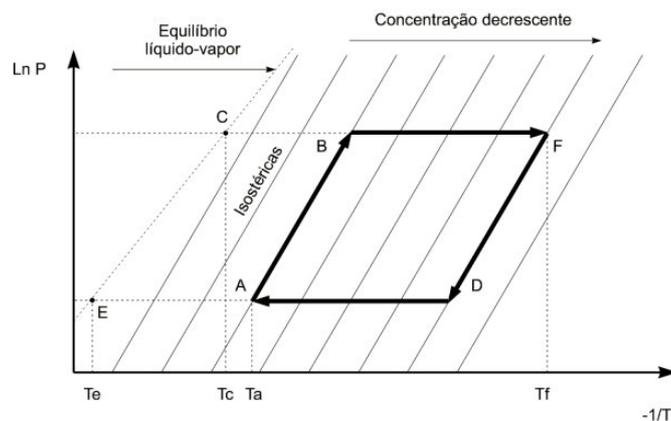


Fig. 3. Ciclo ideal de refrigeração por adsorção representado num diagrama de *Dühring* [6].
 (EC - curva de saturação líquido-vapor; AB - Aquecimento isostérico; BF - Dessorção e condensação;
 FD - Arrefecimento isostérico; DA - Adsorção e evaporação)

Fase 1 - Aquecimento isostérico (A-B)

Esta fase ocorre ao nascer do dia e dura aproximadamente até meio da manhã (fig. 4). O colector encontra-se inicialmente a uma temperatura reduzida, onde a pressão no interior do sistema corresponde à pressão de saturação do adsorvato à temperatura do evaporador. Os primeiros raios solares do dia aquecem o colector solar e consequentemente o adsorvente, provocando um aumento da temperatura e da pressão do sistema. Esta evolução é isostérica, isto é, a concentração do adsorvato no adsorvente mantém-se constante [12].

Este período é equivalente à fase de compressão num ciclo frigorífico por compressão [11].

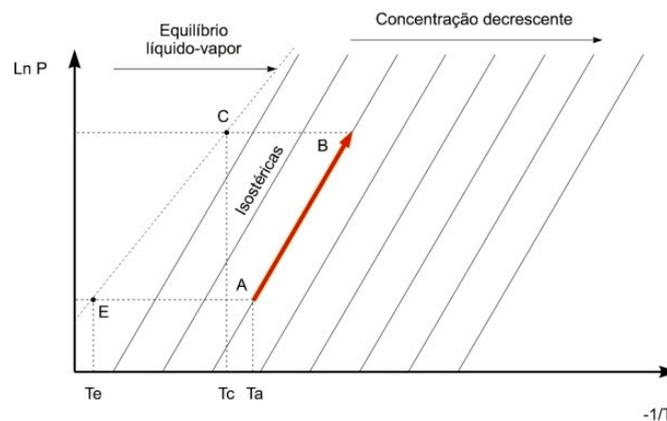


Fig. 4. Fase de aquecimento isostérico representada num diagrama de *Dühring*.

Fase 2 - Dessorção e condensação (B-F)

A segunda fase ocorre durante a segunda metade da manhã e prolonga-se até meio da tarde (fig. 5). Uma vez atingida, no interior do sistema, a pressão de saturação correspondente à temperatura do condensador, inicia-se a condensação do fluido. A temperatura no interior do colector aumenta como consequência da irradiação solar, o que induz a dessorção do fluido [12].

Durante o decorrer desta fase a concentração do adsorvato no adsorvente diminui progressivamente. A quantidade de fluido dessorvido corresponde à quantidade de fluido condensado que escoar para o reservatório, e deste para o evaporador [12].

Este período é equivalente à fase de condensação num ciclo frigorífico por compressão [11].

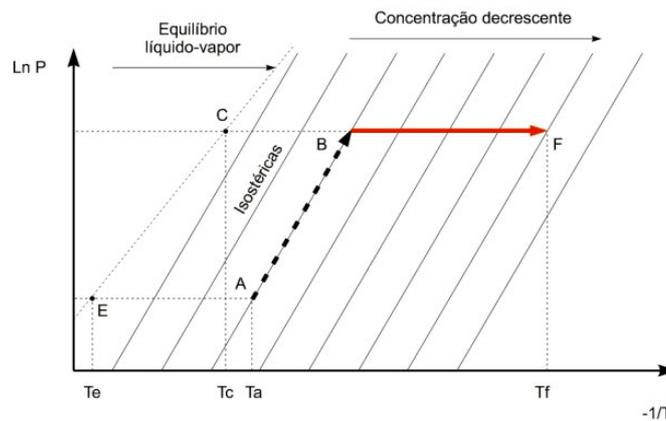


Fig. 5. Fase de dessorção e condensação representada num diagrama de *Dühring*.

Fase 3 - Arrefecimento isostérico (F-D)

A terceira fase do ciclo decorre entre o meio da tarde e o início da noite (fig. 6). O início da mesma ocorre no instante em que as perdas térmicas do sistema compensam os ganhos devidos à irradiação solar [12].

A temperatura máxima do colector é atingida nesse momento, verificando-se o fim da fase de condensação. Nesta altura a concentração do fluido no adsorvente é mínima. Com a diminuição gradual da irradiância solar a temperatura do colector decresce isostericamente, provocando uma diminuição da pressão do sistema [12].

Este período é equivalente à fase de expansão num ciclo frigorífico por compressão [11].

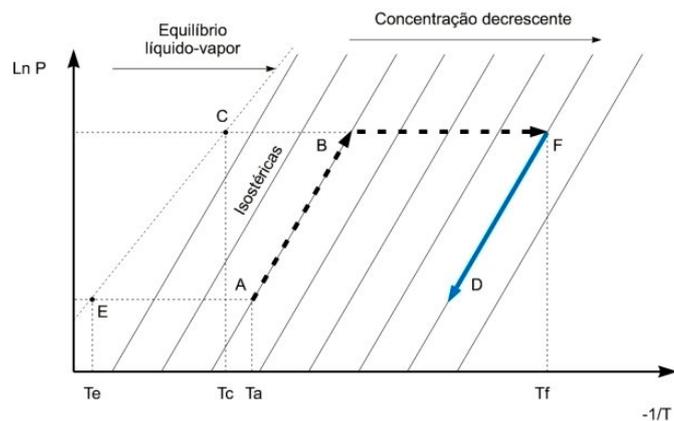


Fig. 6. Fase de arrefecimento isostérico representada num diagrama de *Dühring*.

Fase 4 - Adsorção e evaporação (D-A)

O período em causa ocorre durante a noite e dura até ao nascer do dia (fig. 7), correspondendo à fase onde é produzido o frio.

Com o arrefecimento do adsorvente a pressão do colector diminui até atingir o valor da pressão de saturação correspondente à temperatura do evaporador. Verifica-se nesta altura o fim da fase de arrefecimento. A temperatura do colector continua progressivamente a diminuir, mantendo-se constante a pressão. Tal situação induz o processo de adsorção, ocorrendo a aspiração do vapor do adsorvato, produzido por evaporação de parte da água contida no interior do evaporador. Essa evaporação produz frio, na medida em que retira calor ao fluido remanescente (calor latente de vaporização). Assim que a temperatura no evaporador atinge o ponto de congelação da água é produzido gelo no seu interior. Isto permite que a câmara frigorífica permaneça a uma temperatura reduzida durante o dia seguinte, e eventualmente durante os dias subsequentes, em caso de condições meteorológicas desfavoráveis. Ao nascer do dia a temperatura do colector é mínima e atinge o valor do ponto A, dando-se início a um novo ciclo de refrigeração [12].

Este período é equivalente à fase de evaporação num ciclo frigorífico por compressão [11].

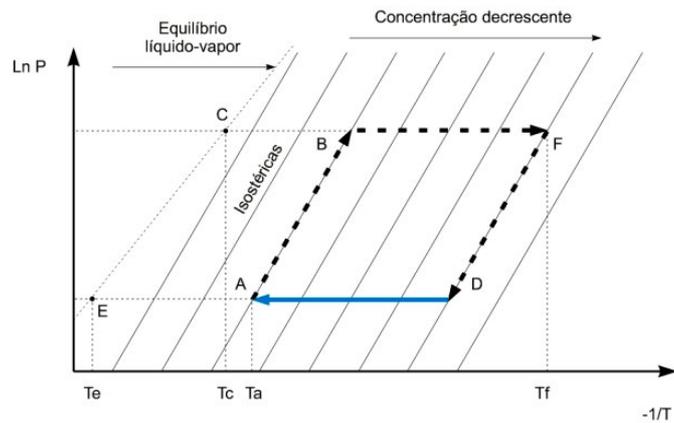


Fig. 7. Fase de adsorção representada num diagrama de *Dühring*.

1.5. Objectivos do trabalho

O trabalho desenvolvido teve como objectivo central construir uma ferramenta de apoio didáctico a aulas dos Mestrados Integrados em Engenharia Mecânica e Engenharia do Ambiente, que posteriormente permitisse demonstrar o ciclo termodinâmico da refrigeração por adsorção solar.

Para atingir este objectivo o trabalho foi dividido em três etapas distintas:

1. Construção do protótipo, composto por cinco elementos fundamentais interligados: colector, condensador, reservatório de condensados, evaporador e câmara frigorífica;
2. Instrumentação da máquina, de forma a permitir a medição contínua de temperaturas e pressões em diversos pontos do circuito, usando um sistema de aquisição de dados para monitorização dos diversos parâmetros em estudo (como sejam temperaturas e pressões);
3. Avaliação do desempenho do protótipo, visando testar o seu funcionamento.

Capítulo II - Frigorífico solar

II.1. Descrição geral

Com base no exposto anteriormente, foi realizada a construção do protótipo destinado à demonstração da refrigeração por adsorção solar, a usar futuramente para apoio a aulas dos Mestrados Integrados em Engenharia Mecânica e em Ambiente. A figura 8 apresenta uma reprodução fotográfica do frigorífico solar construído. O mesmo dispositivo encontra-se representado na figura 9, onde se destacam os seus principais componentes. Uma descrição pormenorizada desses componentes é apresentada nas secções posteriores deste capítulo.



Fig. 8. Frigorífico solar.

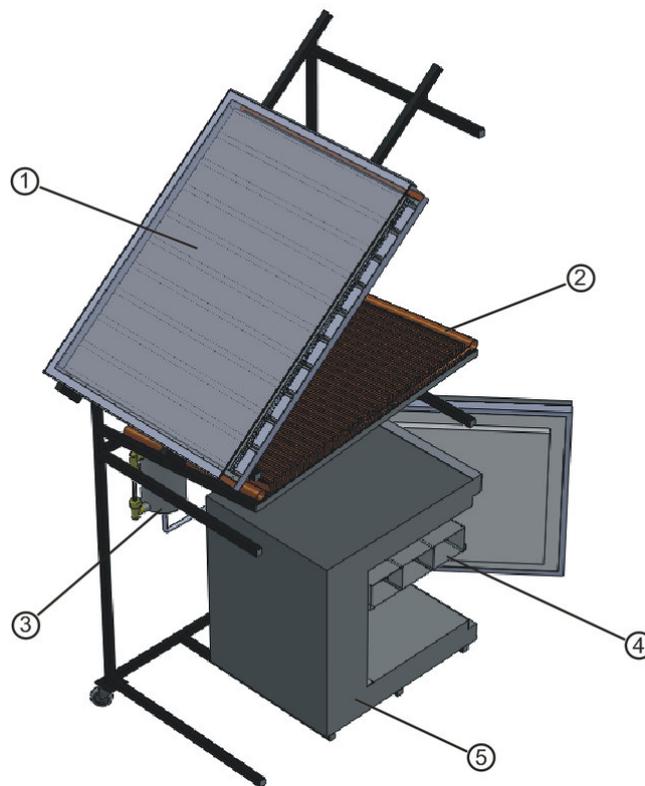


Fig. 9. Vista em corte do frigorífico solar.

(1 - Colector solar; 2 - Condensador; 3 - Reservatório de condensados; 4 - Evaporador; 5 - Caixa frigorífica)

O ciclo teórico de funcionamento para o qual a máquina foi projectada encontra-se representado na figura 10. Verifica-se nesta que a temperatura máxima a atingir no interior do colector será de aproximadamente 100°C. A temperatura mínima, que corresponde à temperatura ambiente mínima de um dia de verão, considerou-se próxima dos 17°C. Por aproximação, os valores de pressão esperados consideraram-se variáveis entre os 600 Pa, imposto pelo evaporador, e o valor máximo de 9600 Pa, correspondente à pressão de saturação no condensador. Finalmente, a concentração de água na sílica gel assumiu-se como variável entre os 5% e 16%.

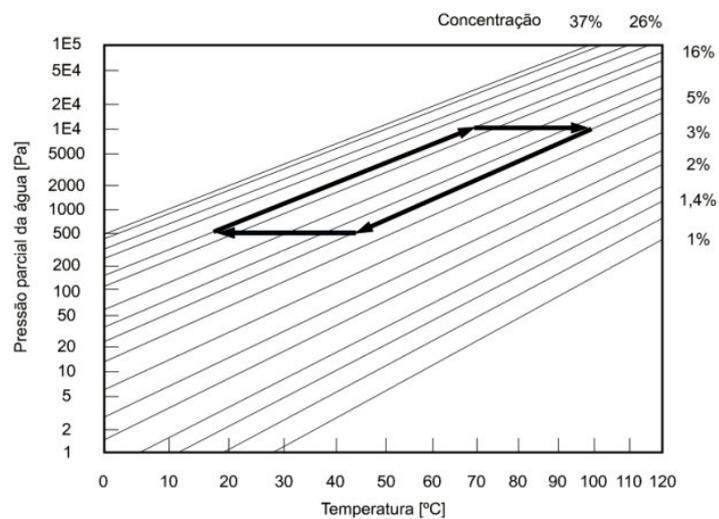


Fig. 10. Ciclo teórico de funcionamento do frigorífico solar.

II.2. Colector Solar

Na figura 11 encontra-se representado fotograficamente o colector solar construído. Um esquema das diferentes partes que o compõem é ainda apresentado na figura 12.



Fig. 11. Colector do frigorífico solar.

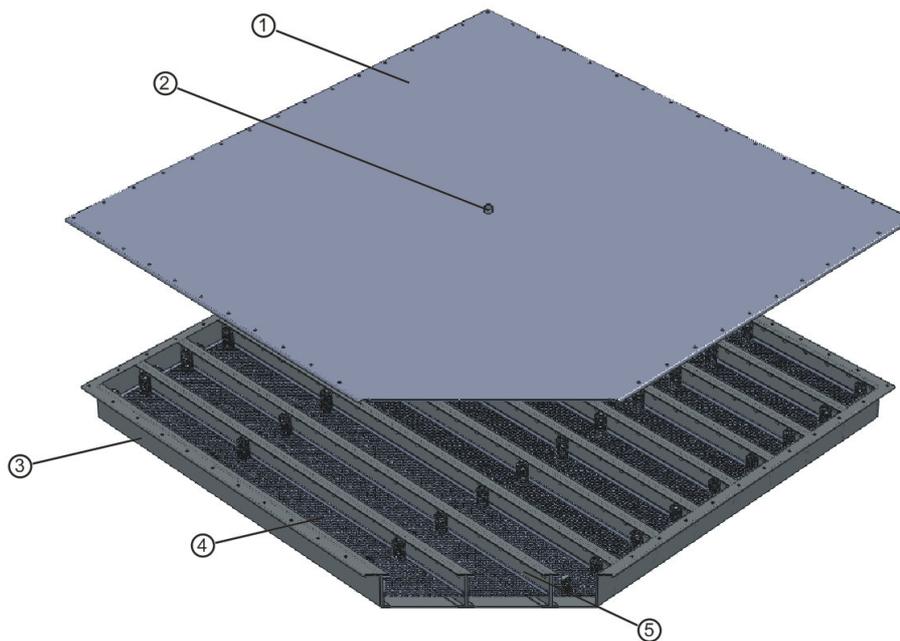


Fig. 12. Vista em corte do coletor solar.

(1 - Tampo inferior; 2 - Flange; 3 - Tampo inferior; 4 - Base rectangular; 5 - Alheta)

O coletor solar, que contém cerca de 30 kg de sílica gel no seu interior, apresenta um formato paralelepípedo com 1000 mm de aresta de base e 70 mm de altura. Foi fabricado em aço inox de 2 mm de espessura e é desmontável, uma vez que a sua base é constituída por um tampo que pode ser desacoplado do corpo principal. A união entre as duas partes é garantida pela utilização de 60 parafusos de fenda, com cabeça cilíndrica M5x12, e por um vedante resistente a elevadas temperaturas². A utilização deste último justifica-se pela necessidade de garantir a perfeita estanquicidade do coletor. As paredes laterais do corpo principal do coletor foram unidas entre si através de cordões de soldadura, realizados pelo processo *Tungsten Inert Gas* (TIG). A utilização deste método permitiu a obtenção de cordões de soldadura de elevada qualidade, isentos de porosidades. Este último aspecto revela-se de extrema importância devido à necessidade de garantir o funcionamento do sistema em vácuo.

O interior do coletor possui 20 alhetas rectangulares em alumínio com 1000 mm x 70 mm e uma espessura de 2 mm, com uma ligeira dobra em ambas as bases. A colocação das alhetas destinou-se não só a reforçar a estrutura mas também a facilitar a

² Würth® saBesto® silicone RTV super preto (art. n.º 0893 321 1-F) fabricado pela empresa alemã Adolf Würth GmbH & Co.

transmissão de calor entre o colector e o adsorvente. Os furos presentes neste componente destinam-se a permitir a circulação do vapor no interior do colector.

Entre cada par de alhetas colocou-se uma base rectangular amplamente perfurada de dimensões 1000 mm x 100 mm e espessura de 2 mm, com duas funções distintas: em primeiro lugar permitir a compactação do adsorvente contra o topo do colector, e em segundo garantir a criação de um espaço vazio de cerca de 20 mm de altura entre a base do colector e a sílica gel. A finalidade deste espaço foi o de permitir a circulação do vapor de água durante a fase de dessorção. Estas funções agora descritas foram asseguradas mediante a utilização, em cada uma das 10 bases utilizadas, de 8 molas helicoidais especialmente fabricadas para o efeito.

Na parte inferior do colector (tampo) foi colocada uma flange, com diâmetro interior de 15 mm, destinada a permitir a ligação do colector ao condensador.

De forma a incrementar a absorção dos raios solares a parte frontal do colector foi pintada com uma tinta comum de cor preta³.

Após o fecho o colector foi colocado no interior de um suporte de formato paralelepípedo, com 1080 mm de aresta de base e 120 mm de altura. A base e as paredes laterais internas do mesmo foram revestidas com um material isolante (cortiça), formando uma parede de aproximadamente 30 mm de espessura. A finalidade deste revestimento foi o de reduzir as perdas térmicas do colector. Na parte superior do suporte foi ainda acoplado um vidro de 5 mm de espessura.

O conjunto formado pelo colector e pelo seu receptáculo foi montado na estrutura de suporte do frigorífico e orientado para sul, com uma inclinação de cerca de 40 graus em relação à horizontal. O valor agora referenciado corresponde aproximadamente à latitude da cidade de Coimbra (40° 12' N).

II.3. Condensador

O condensador que equipa o frigorífico solar tem como finalidade garantir a condensação do vapor de água previamente dessorvido no colector (figuras 13 e 14). Trata-se de um permutador de calor, exposto ao ar ambiente, com um formato global paralelepípedo de dimensões aproximadas de 1000 mm x 800 mm x 55 mm. O

³ *Pluricolor*[®] Preto fosco Ral 9017 fabricado pela empresa portuguesa *Plurifil*[®] *produtos químicos Lda*.

dispositivo, fabricado sob medida, foi integralmente construído em cobre, sendo composto por sete tubos de 16 mm de diâmetro. Os mesmos encontram-se unidos, em ambas as extremidades, a dois colectores tubulares de 38 mm de diâmetro.

Entre os tubos do condensador foram montadas noventa e oito alhetas corrugadas de formato rectangular, com dimensão aproximada de 800 mm x 55 mm e espessura de 0,4 mm.

A ligação do condensador ao circuito da máquina foi garantida mediante a colocação de duas uniões roscadas de 18 mm de diâmetro, uma em cada colector das extremidades.

O condensador foi montado num plano ligeiramente inclinado em relação à horizontal. Tal disposição construtiva destinou-se a garantir o escoamento integral do fluido condensado para o reservatório, evitando a sua acumulação no interior do componente.

O dimensionamento deste dispositivo foi realizado de forma a garantir uma diferença máxima de temperatura de 10 °C entre o fluido a condensar no seu interior e o ar ambiente.



Fig. 13. Condensador do frigorífico solar.



Fig. 14. Vista do condensador evidenciando alguns dos seus componentes.
(1 - Tubo colector; 2 - Alhetas corrugadas)

II.4. Reservatório

O reservatório de condensados (figuras 15 e 16) foi dimensionado de forma a possibilitar a medição da totalidade do fluido condensado correspondente a um ciclo diário de refrigeração (aproximadamente 3,5 litros).



Fig. 15. Reservatório de condensados do frigorífico solar.

Apresenta um formato cilíndrico com 250 mm de altura e 150 mm de diâmetro na base e foi integralmente construído em aço inox com 2 mm de espessura, excepto a parte referente ao indicador de nível do fluido condensado, fabricado em latão. Possui duas flanges localizadas no topo e na base, com 15 mm de diâmetro interno, para ligação ao circuito. A união dos diversos elementos que compõem o seu corpo foi realizada através de cordões de soldadura, realizados pelo processo TIG.

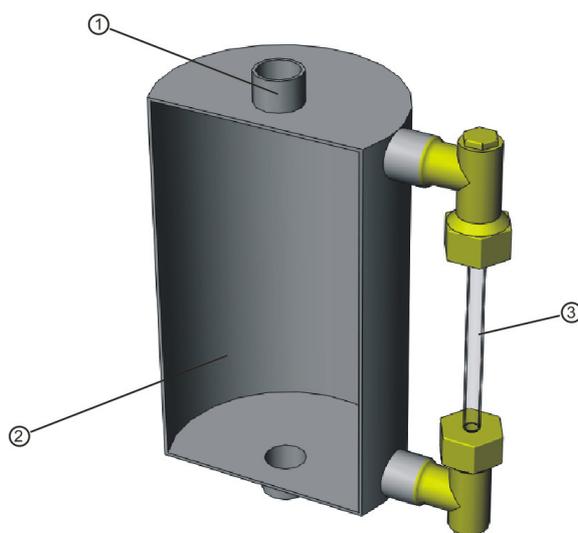


Fig. 16. Vista em corte do reservatório.

(1 - Flange de união; 2 - Região Interior; 3 - Indicador de nível do fluido)

II.5. Evaporador

O evaporador (figuras 17 e 18) constitui o componente da máquina onde se realiza a produção de frio, através da evaporação da água durante a fase de adsorção. No seu interior acumula-se permanentemente parte do fluido refrigerante (água) nos estados líquido e sólido.

O evaporador, fabricado em aço inox de 2 mm de espessura, apresenta um formato paralelepípedo com 450 mm de aresta de base e 100 mm de altura. Encontra-se munido de duas estruturas internas de reforço, uma vez que estará sujeito a vácuo, e possui na parte superior uma flange, com diâmetro interno de 15 mm, para ligação ao circuito. O projecto deste componente, que se pretendeu de formato simples e que não

ocupasse demasiado espaço dentro da câmara frigorífica, foi realizado de forma a dispor de um volume interior de 20 litros. Tal característica encontra justificação na necessidade de garantir a permanência de uma certa quantidade de água fria e gelo no seu interior, que serviria de reserva energética para períodos de ausência de sol. Esta reserva permitiria ainda que, em condições nominais de funcionamento, a temperatura do evaporador permaneça constante e igual a 0 °C.



Fig. 17. Evaporador do frigorífico solar montado no suporte.

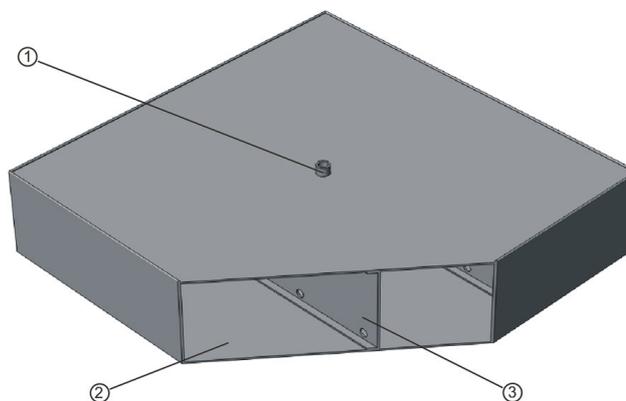


Fig. 18. Vista em corte do evaporador.

(1 - Flange de união; 2 - Região interior; 3 - Estrutura de reforço)

O evaporador foi colocado na proximidade do tecto da câmara frigorífica tendo sido necessária, devido ao seu considerável peso, a construção de um suporte apropriado.

II.6. Câmara frigorífica

A câmara frigorífica projectada possui um formato paralelepípedo (figuras 19 e 20), com uma base de 720 mm x 800 mm e altura de 720 mm. O volume interno da câmara é igual a 125 litros.

O isolamento da câmara revelou-se um aspecto crucial na sua construção. As particularidades inerentes ao ciclo intermitente conduzem à necessidade de garantir a permanência, no interior do evaporador, de uma quantidade suficiente de água fria no estado líquido e gelo, para que fosse possível conservar o frio no interior da câmara durante o dia, e eventualmente durante alguns dias de ausência de sol. Para tal utilizou-se, nas paredes da câmara, um revestimento de 110 mm de *WallmateTM CW-A⁴*.



Fig. 19. Câmara frigorífica do frigorífico solar podendo visualizar-se, no seu interior, o evaporador.

⁴ Produto fabricado pela empresa norte-americana *The Dow Chemical Company*[®].

A vedação entre a porta e o corpo principal da câmara foi assegurado por uma junta em borracha de 28 mm de largura⁵. Foi ainda utilizado um revestimento em acrílico para que o acoplamento entre as duas estruturas fosse perfeito.

De forma a conferir à câmara uma maior resistência estrutural e protecção contra as adversidades ambientais foi utilizado um revestimento em chapa zincada em toda a sua volta, de 0,25 mm de espessura.

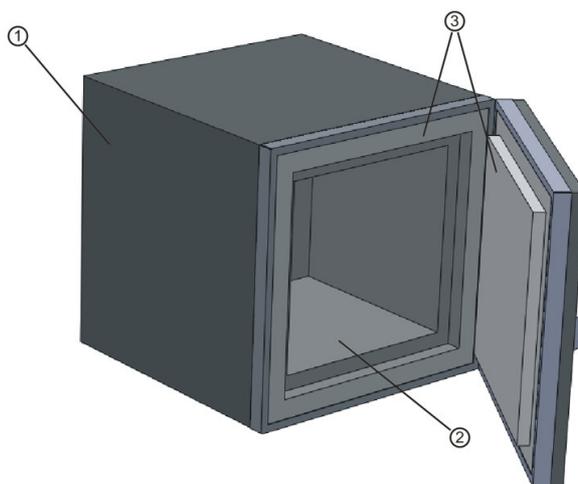


Fig. 20. Vista da Câmara frigorífica evidenciando alguns dos seus elementos estruturais.
(1 - Revestimento em chapa zincada; 2 - Revestimento em *Wallmate™ CW-A*; 3 - Acrílico)

II.7. Elementos de conexão e estrutura de suporte da máquina

As conexões entre os diversos componentes atrás descritos foram realizadas através de tubo em aço inox *AISI 304*, de 15 mm de diâmetro e 0,6 mm de espessura, e diversos acessórios *bicône* (tês e joelhos, entre outros). Foram ainda intercaladas no circuito três válvulas de esfera manuais. Uma destinou-se a possibilitar a ligação da bomba de vácuo ao circuito, sendo que as restantes foram utilizadas para possibilitar, caso fosse necessário, o isolamento de algumas partes do circuito.

⁵ *Tesamol® perfil P* fabricado pela empresa alemã *Tesa® A.G.*

A estanquicidade das condutas foi garantida através da utilização de um vedante apropriado⁶. Em zonas onde a mesma se revelou particularmente difícil de obter optou-se pela utilização do mesmo vedante utilizado no colector solar⁷.

O suporte da máquina, que alberga todos os elementos descritos nas secções anteriores, foi construído em perfil de aço de dimensões 25 mm x 25 mm. Possui aproximadamente 2200 mm de altura e apresenta uma base quadrada de 1000 mm de aresta. Encontra-se munido de rodas que asseguram a mobilidade da máquina.

II.8. Instrumentação

De forma a possibilitar a recolha de medições experimentais durante o normal funcionamento da máquina foram colocados dois transdutores de pressão *General Electric*[®] *Druck* PMP 1400 (*vide* Anexo A) no circuito do frigorífico. Um foi colocado entre o colector solar e o condensador, tendo o outro sido instalado entre o evaporador e o reservatório. A aquisição do sinal proveniente de ambos os instrumentos de medida foi realizada com recurso a um conversor analógico para digital *National Instruments*[®] USB-6009.

Foram utilizados oito termopares do tipo *k* para a medição das temperaturas (um para medição da temperatura do ar ambiente, três no interior e um no exterior do colector solar e os restantes no condensador, evaporador e câmara frigorífica). A aquisição dos dados provenientes dos mesmos foi realizada através de um *PICO*[®] TC-08.

A medição da irradiação solar foi realizada com recurso a um piranómetro *Kipp & Zonen*[®] CM11 (*vide* Anexo B), acoplado a um *Kipp & Zonen*[®] CC42 *Solar Integrator*, colocado nas proximidades do colector.

Para a recolha dos dados provenientes dos diferentes sistemas de medida foi utilizado um computador pessoal com processador *Intel*[®] *Pentium III*.

O vácuo do circuito foi obtido através da utilização de uma bomba de palhetas *Elmo Rietschle*[®] VGD 10 (*vide* Anexo C).

⁶ *Würth*[®] *saBesto*[®] frenador para tubagens (art. n.º 0893 511 050-F/P) fabricado pela empresa alemã *Adolf Würth GmbH & Co.*

⁷ *Würth*[®] *saBesto*[®] silicone RTV super preto (art. n.º 0893 321 1-F) fabricado pela empresa alemã *Adolf Würth GmbH & Co.*

Capítulo III - Testes experimentais de estanquicidade

III.1. Protocolo dos testes

Tal como descrito no Capítulo II, para que se verifique o correcto funcionamento do frigorífico solar torna-se indispensável garantir a ausência de ar ambiente no interior do seu circuito. Isto implica a manutenção de baixas pressões no sistema, num mínimo de 600 Pa. Este aspecto foi levado em consideração desde o início da construção da máquina, nomeadamente ao nível dos vedantes e soldaduras, presentes em diversos componentes, que se exigia serem de superior qualidade. Com o intuito de verificar esta característica do protótipo foram levados a cabo testes de estanquicidade, descritos de seguida.

No decorrer da fase inicial de construção do frigorífico solar foram testados separadamente alguns dos principais componentes que o incorporam. Nestes se incluíram o evaporador, o colector e o reservatório de condensados, tendo esta operação sido realizada com o objectivo de verificar a ausência de defeitos nos cordões de soldadura. Os testes foram efectuados recorrendo a um compressor, que permitiu que os diferentes componentes fossem insuflados com ar ambiente, tendo ficado submetidos a uma pressão superior à atmosférica. Após isto, a existência de porosidades e/ou furos nos cordões de soldadura foi detectada visualmente com o auxílio de um spray detector de fugas⁸. O colector solar foi testado completamente montado, de forma a verificar a resistência da junta à penetração do ar. Alguns dos componentes de menores dimensões, onde se incluía o evaporador, foram imersos em água de forma a facilitar a tarefa de detecção.

Os resultados observados permitiram concluir que todos os componentes se encontravam estanques. O condensador não foi alvo de testes por o fabricante apresentar garantias em relação aos níveis de pressão projectados para a operação do protótipo.

Após verificação da estanquicidade dos diferentes componentes o frigorífico solar foi integralmente montado, incluindo os transdutores de pressão, tendo-se procedido à realização de testes ao circuito de refrigeração integral. A realização dos mesmos seguiu

⁸ Würth[®] saBesto[®] detector de fugas art. n.º 0890 20-F e Griffon[®] detector de fugas de gás.

a metodologia descrita anteriormente, recorrendo mais uma vez à introdução de ar no sistema com auxílio do compressor e verificação visual de fugas com o spray detector. Este procedimento foi posteriormente complementado com a realização de vácuo no circuito e visualização do sinal de saída, em voltagem, dos transdutores de pressão. Tal monitorização foi realizada inicialmente, para controlo instantâneo do sinal, com recurso a um multímetro digital⁹. Este equipamento permitiu o controlo de existência de fugas grosseiras no sistema, que, a existirem, implicariam voltar à fase de insuflação de ar no sistema. Esta situação encontra-se evidenciada na figura 21, que demonstra a existência deste tipo de defeito num ponto do circuito. Contudo, e uma vez que esta verificação apenas permitia uma análise instantânea, utilizou-se posteriormente um computador pessoal, utilizado na montagem experimental para registo de dados, para observar a evolução da pressão interna do sistema ao longo de mais de 48 horas. A detecção de uma fuga implicou a sua eliminação, quer reapertando os acessórios em questão quer colocando mais material vedante.



Fig. 21 - Exemplo de fuga detectada durante a realização dos testes de estanquidade.

⁹ Philips® PM 2718.

III.2. Resultados obtidos

A realização dos testes descritos permitiu detectar diversas debilidades presentes no circuito de refrigeração. Numa fase inicial detectaram-se fugas grosseiras em diversos pontos do sistema, tal como apresentado na figura 21. Estas foram eliminadas tal como descrito acima; porém, a persistência destes problemas tornou necessário a desmontagem e montagem da totalidade das condutas, o que foi efectuado pelo menos 3 vezes. Em todas foi necessário proceder à repetição dos testes previamente realizados, sendo de referir que a avaliação das pressões ao longo de 48 horas foi realizada duas vezes.

Capítulo IV - Discussão e Conclusões

IV.1. Discussão

Com a realização do trabalho atrás exposto foi possível construir e instrumentar um protótipo de um frigorífico solar a adsorção. A sua construção teve início no mês de Outubro de 2007, altura em que foi introduzido o tema subjacente à elaboração desta tese e apresentado o projecto do protótipo elaborado para demonstração do ciclo de refrigeração por adsorção solar. Em virtude da máquina ser composta por elementos adquiridos separadamente torna-se relevante detalhar a aquisição de cada um, para melhor compreensão de algumas das dificuldades observadas na preparação deste protótipo.

A primeira fase do trabalho teve início no mês de Novembro com a construção do colector. O projecto deste componente encontrava-se praticamente concluído, pelo que apenas se procedeu a ajustes nos aspectos construtivos. Uma das dificuldades encontradas prendeu-se com o facto de, naquela altura, não se encontrar definida a empresa que iria construí-lo. Foi por isso necessário realizar diversos contactos, que se prolongaram pelos meses de Novembro e Dezembro, no sentido de solucionar este problema de acordo com as características exigidas e explicitadas no projecto. Uma vez seleccionada uma oficina (em Pombal) capaz de cumprir estes requisitos este componente foi encomendado e entregue no final de Janeiro, tendo sido realizadas várias deslocações à mesma para acompanhar a evolução do trabalho. O componente foi entregue no final de Março.

Durante o mês de Janeiro procedeu-se à discussão e finalização do projecto do reservatório de condensados, de cuja construção foi encarregada a oficina mencionada anteriormente. Após deslocação para acompanhamento dos trabalhos, à semelhança do colector, este componente foi entregue durante o mês de Março.

A discussão do projecto do condensador processou-se durante o mês de Fevereiro, tendo-se posteriormente procedido à selecção de uma empresa capaz de o fornecer. Esta fase revelou-se difícil, já que foram necessárias várias deslocações a empresas do distrito de Coimbra durante o mês de Fevereiro. A construção do componente foi atribuída a uma empresa de Cantanhede, que o entregou em Abril.

A discussão do projecto do evaporador processou-se igualmente durante o mês de Fevereiro. A construção foi adjudicada à empresa de Pombal descrita anteriormente, mas a sua entrega só se concretizou em Maio. Este atraso, fruto do funcionamento da empresa, condicionou o início da construção do protótipo já entregue, já que este foi o componente entregue em último lugar. Por este facto, o dimensionamento inicial da estrutura de suporte da máquina, realizada em *SolidWorks*[®], foi apenas completado em Maio. Esse facto justifica-se não por indefinições no projecto mas por incertezas quanto às dimensões finais dos componentes, precavendo desta maneira eventuais reajustes às suas dimensões durante a construção.

Obtidos os componentes descritos acima, a montagem do protótipo teve início durante o mês de Maio com a construção da estrutura de suporte. Esta prolongou-se até Junho, e foi dificultada por várias razões. Em primeiro lugar, a falta de conhecimentos práticos na área de serralharia civil impediu a execução célere de algumas tarefas, como soldaduras e corte dos materiais. Em segundo lugar, alguns dos materiais usados foram entregues com atraso, como foi o caso dos perfis de aço. Finalmente, as elevadas dimensões da estrutura tornavam difícil o seu manuseio, e aumentaram significativamente o número de tarefas a realizar.

No mês de Julho foi concluída a construção do suporte do evaporador e a caixa de suporte do colector, tendo a sua construção sido demorada pelas razões referidas anteriormente. Acresce contudo o facto de não estar disponível, na ADAI, uma quinadeira que permitisse uma dobragem rápida da chapa que serviu de revestimento à caixa de suporte do colector. A mesma dificuldade foi sentida durante a construção da câmara frigorífica, que decorreu durante o mesmo mês. A existência daquele tipo de equipamento teria permitido uma maior eficácia na execução destes trabalhos, e consequentemente poupar tempo de forma significativa. Ainda relacionado com a câmara frigorífica importa referir que, devido à eventualidade de poder ficar directamente exposta à radiação solar, como consequência da elevada altura da máquina, o revestimento isolante da parede traseira foi reforçado em cerca de 80 mm.

O protótipo foi concluído durante o mês de Julho com a instalação e montagem de todos os componentes, bem como o circuito de refrigeração. Durante esta fase o colector foi revestido com uma tinta preta comum. Este facto deveu-se a dificuldades verificadas na aquisição de uma tinta selectiva apropriada, pelo que pode ser um ponto a melhorar futuramente.

A ligação entre os componentes, descrita anteriormente, mereceu especial atenção, já que determinaria a estanquicidade da máquina. Na actualidade o frigorífico solar construído encontra-se ainda em fase de testes de verificação de estanquicidade nas instalações da ADAI. Tratou-se de uma etapa que, devido a particularidades inerentes à vedação dos principais componentes da máquina, se revelou bastante difícil e morosa. Para o acoplamento das condutas em aço inox *AISI 304* aos diversos acessórios *bicone* e componentes do sistema foi utilizado inicialmente um vedante à base de *teflon*¹⁰. Este revelou-se, contudo, desadequado para a eficaz vedação das ligações. Isto mesmo foi observado sempre que se tornou necessário efectuar reajustes em zonas já vedadas ou na proximidade destas: várias vezes um ligeiro reaperto ou toque no circuito acarretou a quebra e/ou deslocação do vedante, causando a penetração de ar no sistema. Desta forma não foi possível usá-lo com garantias de total eficácia, pelo que se optou por recobrir diversas uniões com silicone¹¹. Adicionalmente, a utilização de ligações do tipo já descrito pretendeu garantir a possibilidade de uma eventual desmontagem do equipamento em caso de necessidade, mas dificultou a montagem do frigorífico, fruto do uso de uma solução de junção dos componentes menos apropriada para o equipamento em questão. Os testes de estanquicidade já efectuados, pelo tempo que consumiram e por ainda não se encontrarem concluídos, demonstram este facto, e sugerem claramente a necessidade de reavaliar o uso desta solução em máquinas desta natureza. Deverá considerar-se a possibilidade de substituir aquele tipo condutas por outras mais flexíveis, bem como soldar os diversos elementos do circuito uns aos outros, de forma a eliminar pontos de entrada de ar.

A instrumentação da máquina, realizada durante o mês de Agosto, apesar de não ter sido usada na realização de medições experimentais por força das dificuldades de vedação, merece, ainda assim, algumas notas. Os sensores de pressão foram úteis para verificação da estanquicidade do sistema, permitindo, juntamente com as válvulas de esfera montadas, dividir o circuito em vários sectores, o que facilitou a detecção de fugas. Além disso, dados preliminares (ainda não verificados) apontam para que os sensores instalados se encontrem funcionais, e aptos a recolha de dados assim que seja garantida a vacuidade do sistema.

¹⁰ Würth® *saBesto*® frenador para tubagens (art. n.º 0893 511 050-F/P) fabricado pela empresa alemã *Adolf Würth GmbH & Co.*

¹¹ Würth® *saBesto*® silicone RTV super preto (art. n.º 0893 321 1-F) fabricado pela empresa alemã *Adolf Würth GmbH & Co.*

Para além de permitir o ganho de competências numa área de conhecimento cada vez mais importante na sociedade actual, como seja a utilização de fontes de energia renováveis, a construção do frigorífico solar permitiu a obtenção de uma ferramenta útil para apoio didáctico a diversas disciplinas dos cursos de Engenharia Mecânica e de Engenharia do Ambiente. Esta observação encontra a sua justificação nos seguintes factos: 1) permitir demonstrar uma tecnologia alternativa de produção de frio através de um ciclo termodinâmico de adsorção, o qual pode ser analisado no âmbito de disciplinas da área da termodinâmica e transmissão de calor; 2) permitir verificar, na prática, a importância da fase de projecto no desenvolvimento de novos equipamentos, permitindo antever dificuldades e antecipar soluções; 3) ilustrar a importância de uma correcta execução dos mais variados passos de construção, sob pena de comprometer o resultado final desejado; 4) facultar o desenvolvimento do espírito crítico dos discentes, através da observação e resolução dos variadíssimos problemas que a construção de um protótipo acarreta.

IV.2. Conclusão e desenvolvimentos futuros

Do trabalho desenvolvido e agora apresentado podem retirar-se as seguintes conclusões:

1. Foi construída uma unidade de refrigeração para demonstração do conceito de adsorção solar, passível de ser utilizada em acções didácticas futuras;
2. Na fase de construção a maior dificuldade sentida prendeu-se com a aquisição dos diferentes componentes em tempo útil, fruto da falta de fornecedores previamente estabelecidos;
3. Ao nível da montagem do protótipo, a ausência de algum equipamento e conhecimentos práticos na área de serralharia civil impediu a prossecução célere dos trabalhos;
4. A utilização de condutas em aço inox *AISI 304* de 15 mm, normalmente utilizadas em canalizações de águas sanitárias, juntamente com os vedantes utilizados, aparenta não ser a solução mais adequada para aplicações envolvendo vácuo.

5. A fase de instrumentação da máquina foi cumprida com sucesso, tendo alguns dos sensores sido usados em testes de estanquicidade.

6. A fase de testes de avaliação do desempenho do protótipo não foi cumprida por falta de tempo, motivada pelas dificuldades e atrasos ocorridos durante a fase de construção.

Futuramente, e uma vez concluídos os testes de estanquicidade, tornar-se-á possível iniciar os testes de avaliação de desempenho do frigorífico solar. A partir desse momento, e mediante a recolha de dados relativos a temperaturas, pressões e valores de irradiação solar, será possível comparar o funcionamento real do frigorífico com o esperado tanto a nível teórico, como também com os resultados apresentados em artigos publicados.

Na eventual construção de uma futura máquina deverá também considerar-se alterar a colocação do evaporador e/ou dispensar a utilização do reservatório. Estes elementos são responsáveis pelo posicionamento elevado a que o condensador fica sujeito, sendo fortemente responsáveis pela elevada altura da máquina. A redução do peso, mediante a utilização de materiais mais leves, deverá também ser um aspecto a considerar, de forma a facilitar a mobilidade do dispositivo.

Anexos

Anexo A

GE
Sensing

PTX/PMP 1400 Specifications

Pressure Measurement

Operating Pressure Ranges

- 0, to 1.5, 3.75, 6, 9, 15, 24, 37.5, 60, 90, 160, 240, 375, 600, 900 psi (0 to 100, 250, 400, 600 mbar, 1, 1.6, 2.5, 4, 6, 10, 16, 25, 40, 60 bar) gauge and absolute
- 0 to 1500, 2400, 3750, 6000, 9000, psi (0 to 100, 160, 250, 400, 600 bar) sealed gauge and absolute
- Barometric
 - 12 to 18 psia (800 to 1200 mbar); PTX 1400 only
 - -15 to 24 psig (-1 to 1.6 bar); compound
 - -15 to 37.5 psig (-1 to 2.5 bar); compound
 - -15 to 60 psig (-1 to 4 bar); compound

Overpressure

The rated pressure range can be exceeded by the following without degrading performance:

- 4 x FS for ranges up to 15 psi (1 bar)
- 2 x FS (2700 psi/180 bar maximum) for ranges 15 to 1500 psi (1 to 100 bar)
- 2 x FS (13,500 psi/900 bar maximum) for ranges 2400 to 9000 psi (160 to 600 bar)

Containment

- 6 x FS for ranges up to 15 psi (1 bar)
- 3 x FS for ranges up to 1500 up to 2700 psi (100 bar to 180 bar) max
- 20,000 psi (1400 bar) max above 1500 psi (100 bar).

Pressure Media

Fluids compatible with a fully welded assembly of:

- 316L stainless steel for ranges 3.75 psi (250 mbar) and below
- 316L stainless steel and Hastelloy C276 for all other ranges

Supply Voltage

PMP 1400: 9 to 30 VDC

PTX 1400: 9 to 28 VDC

Minimum supply voltage that must appear across transmitter terminals is 9V and is given by

$V_{min} = V_s - (0.02 \times RL)$

Where V_s = supply volts

RL = total loop Ohms

Supply voltage reversal—units will withstand reversed polarity without damage.

Output Voltage

PMP 1400: 0 to 5V - calibrated between 5 to 100% full scale (FS) (three-wire pedestal configuration)

PTX 1400: 4 to 20mA (two-wire configuration)

Load Impedance (PMP version)

Greater than 100 k ohms for quoted performance

Performance

Accuracy

Combined non-linearity, hysteresis and repeatability: $\pm 0.15\%$ typical, $\pm 0.25\%$ maximum best straight line (BSL) definition

Zero Offset and Span Setting

Factory set to 0.5% FS, then $\pm 5\%$ site adjustable by sealed, non-interacting potentiometers

Long Term Stability

0.2% FS range per annum typical

Operating Temperature Range

-4°F to 176°F (-20°C to 80°C)

Temperature Effects

- Total error band (TEB) 1.5% FS typical, 2% FS maximum, -4°F to 176°F (-20°C to 80°C)
- For ranges below 6 psi (400 mbar) values increase pro-rata with calibrated span

Physical

Pressure Connection

G 1/4 female

Electrical Connection

DIN 43650 plug supplied with mating socket

Weight

0.4 lb (200 g) nominal

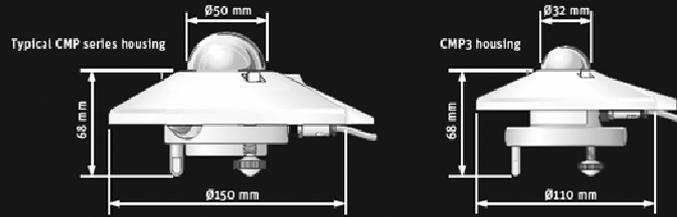
Ingress Protection

Sealed to IP65

CE marking

CE marked for use in potentially explosive atmospheres, pressure equipment directive and electromagnetic compatibility

Anexo B



Specifications	CMP 3	CMP 6	CMP 11	CMP 21	CMP 22
ISO CLASSIFICATION	Second Class	First Class	Secondary Standard	Secondary Standard	Secondary Standard
Response time (95%)	18 s	18 s	5 s	5 s	5 s
Zero offsets (a) thermal radiation (200 W/m ²) (b) temperature change (5 K/hr)	± 15 W/m ² ± 5 W/m ²	± 15 W/m ² ± 4 W/m ²	± 7 W/m ² ± 2 W/m ²	± 7 W/m ² ± 2 W/m ²	± 3 W/m ² ± 1 W/m ²
Non-stability (change/year)	± 1%	± 1%	± 0.5%	± 0.5%	± 0.5%
Non-linearity (0 to 1000 W/m ²)	± 2.5%	± 1%	± 0.2%	± 0.2%	± 0.2%
Directional error (at 80° with 1000 W/m ² beam)	± 20 W/m ²	± 20 W/m ²	± 10 W/m ²	± 10 W/m ²	± 5 W/m ²
Temperature dependence of sensitivity	± 5% (-10 to +40°C)	± 4% (-10 to +40°C)	± 1% (-10 to +40°C)	± 0.5% (-20 to +50°C)	± 0.5% (-20 to +50°C)
Tilt error (at 1000 W/m ²)	± 3%	± 1%	± 0.2%	± 0.2%	± 0.2%
Other specifications					
Sensitivity	5 to 20 µV/W/m ²	5 to 20 µV/W/m ²	7 to 14 µV/W/m ²	7 to 14 µV/W/m ²	7 to 14 µV/W/m ²
Impedance	20 to 200 Ω	20 to 200 Ω	10 to 100 Ω	10 to 100 Ω	10 to 100 Ω
Level accuracy	1°	0.5°	0.1°	0.1°	0.1°
Operating temperature	-40 to +80°C	-40 to +80°C	-40 to +80°C	-40 to +80°C	-40 to +80°C
Spectral range (50% points)	310 to 2800 nm	310 to 2800 nm	310 to 2800 nm	310 to 2800 nm	200 to 3600 nm
Typical signal output for atmospheric applications	0 to 15 mV	0 to 15 mV	0 to 15 mV	0 to 15 mV	0 to 15 mV
Maximum irradiance	2000 W/m ²	2000 W/m ²	4000 W/m ²	4000 W/m ²	4000 W/m ²
Expected daily uncertainty	± 10%	± 5%	± 2%	± 2%	± 1%
Recommended applications	Economical solution for routine measurements in weather stations, field testing	Good quality measurements for hydrology networks, greenhouse climate control	Meteorological networks, PV panel and thermal collector testing, materials testing	Meteorological networks, reference measurements in extreme climates, polar or arid	Scientific research requiring the highest level of measurement accuracy and reliability
CMP instruments have a standard cable length of 10 m. Optional cable lengths 25 m and 50 m					
Standard 10k Thermistor or optional Pt-100 temperature sensor with CMP 21 and CMP 22					
Individual directional response and temperature dependence test data with CMP 21 and CMP 22					
Note: The performance specifications quoted are worst-case and/or maximum values					



Go to www.kippzonen.com for your local distributor

HEAD OFFICE

Kipp & Zonen B.V.
 Delftechpark 36, 2628 XH Delft
 P.O. Box 507, 2600 AM Delft
 The Netherlands
 T: +31 (0) 15 2755 210
 F: +31 (0) 15 2620 351
 Info@kippzonen.com

Kipp & Zonen B.V. reserve the right to alter specifications of the equipment described in this documentation without prior notice

4414470-0806

Anexo C

Daten



Vakuumpumpen

Vacuum pumps

Pompes à vide

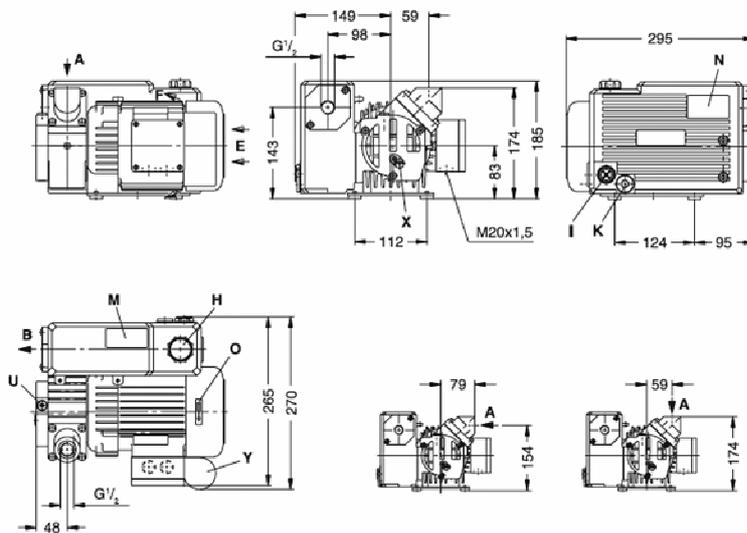
Pompe per vuoto

V-VGD

VACFOX

V-VGD 10

V-VGD 15



[mm]

A	Vakuum-Anschluss	Vacuum connection	Raccord du vide	Attacco vuoto
B	Abluft-Austritt	Exhaust	Refoulement	Scarico aria
E	Kühlluft-Eintritt	Cooling air entry	Entrée air refroidissement	Entrata aria di raffreddamento
F	Kühlluft-Austritt	Cooling air ext	Sortie air refroidissement	Uscita aria di raffreddamento
H	Öleinfüllstelle	Oil filling point	Point de remplissage d'huile	Punto di riempimento olio
I	Ölkontrolle	Oil check	Contrôle d'huile	Spia controllo olio
K	Ölablassstelle	Oil drain point	Point de vidange d'huile	Punto scarico olio
M	Ölempfehlungsschild	Oil type plate	Plaque recommand. d'huile	Targhetta oli consigliati
N	Datenschild	Data plate	Étiquette caractéristique	Targhetta dati
O	Drehrichtungsschild	Direction of rotation	Flèche sens rotation	Targhetta senso rotazione
U	Gasballastventil (wahlweise)	Gas ballast valve (optional)	Clapet lost d'air (option)	Valvola zavorra gas (opzione)
X	Vakuum-Schalter	Vacuum switch	Commutateur vide	Interruttore a vuoto
Y	Kondensator (1-)	Capacitor (1-)	Condensateur (1-)	Condensatore (1-)

Die Abmessungen können je nach Motorausführung von den hier aufgeführten Angaben abweichen./ Depending on the motor variant, the dimensions can differ when compared to the data shown./ Les dimensions peuvent différer des données indiquées ci-dessus, selon l'exécution moteur./ Le dimensioni possono scostarsi leggermente dai dati qui riportati a seconda dell'esecuzione motore.

D 230

1.6.2006

Gardner Denver

Schopfheim GmbH

Postfach 1260

79642 SCHOPFHEIM

GERMANY

Fon +49 7622 / 302-0

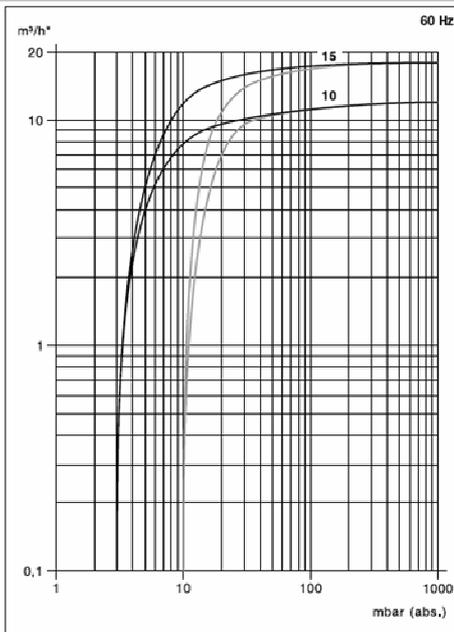
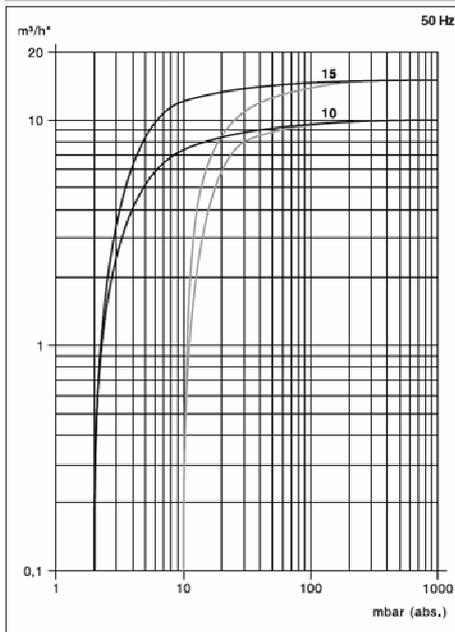
Fax +49 7622 / 302-300

e-mail: er.de@gardnerdenver.com

www.gardnerdenver.com

www.gd-elmorietschle.com

V-VGD (01)		10		15		10		15	
		50 Hz				60 Hz			
m ³ /h		10		15		12		18	
mbar (abs.)*		2 / 10				3 / 10			
	3~	200-255/346-440V ± 5%							
	1~	230V ± 10%							
kW	3~	0,37		0,55		0,44		0,65	
	1~	0,37		0,55		0,44		0,65	
A	3~	2,4/1,4		2,8/1,6		1,8/1,05		2,7/1,5	
	1~	2,8		3,5		3,0		4,2	
min ⁻¹		2850				3420			
dB(A)		59		60		62		63	
kg		19							
l		0,4							
ZSA		13 (18)							
ZMS	3~	25/16		40/16		25/16		40/16	
	1~	40		40		40		60	
m ³ /h	Saugvermögen	Capacity		Débit		Portata			
mbar (abs.)*	Enddruck	Ultimate vacuum		Pression limite		Pressione finale			
mbar (abs.)	Feinvakuum / Grobvakuum	Fine vacuum / Coarse vacuum		Vide fin / Vide grossier		Medio fine / Basso vuoto			
3~ / 1~	Ansaugdruck	Suction pressure		Pression d'aspiration		Pressione di aspirazione			
kW	Motorausführung	Motor version		Exécution moteur		Esecuzione motore			
A	Motorleistung	Motor rating		Puissance moteur		Potenza motore			
	Stromaufnahme	Current draw n		Intensité absorbée		Corrente nominale			
min ⁻¹	Drehzahl	Speed		Vitesse rotation		Numero giri			
dB(A) → DIN 45635	Mittlerer Schalldruckpegel	Average noise level		Niveau sonore moyen		Rumorosità media			
kg	Max. Gewicht	Maximum weight		Poids maxi.		Peso massimo			
l	Ölfüllmenge	Oil capacity		Charge d'huile		Quantità olio			
ZSA	Zubehör	Optional extras		Accessoires		Accessori			
ZMS	Schlauchanschluß	Hose connection		Raccord tuyau		Attacco portagomma			
	Motorschutzschalter	Motor starter		Disjoncteur moteur		Interruttore magnetotermico			



—	Feinvakuum	Fine vacuum	Vide fin	Medio fine
—	Grobvakuum	Coarse vacuum	Vide grossier	Basso vuoto

* bezogen auf den Zustand im Sauganschluß./ related to suction conditions at inlet connection./ relatif à l'état régnant à l'aspiration./ riferito alle condizioni in aspirazione.
 Kennlinien und Tabellenangaben beziehen sich auf betriebswarme Vakuumpumpen./ Curves and tables refer to vacuum pump at normal operating temperature./ Les courbes et tableaux sont établies, pompe à température de fonctionnement./ Le curve caratteristiche ed i dati riportati nelle tabelle si riferiscono alle pompe per vuoto con funzionamento a regime.
 Technische Änderungen vorbehalten! We reserve the right to alter technical information! Sous réserve de modification technique! Salvo modifiche tecniche!
 # auf Anfrage # on request # sur demande # a richiesta
 Wasserdampftoleranz siehe Info 1200./ Water vapour tolerance, see information 1200./ Pression de vapeur d'eau voir l'Info 1200./ Tolleranza al vapore acqua vedere Info 1200.

Bibliografia

1. Çengel, Y. and M. Boles, *Termodinâmica*. 3^a ed. 2001: McGraw-Hill.
2. Anyanwu, E.E., *Review of solid adsorption refrigeration II: An overview of the principles and theory*. Energy Conversion & Management 45, 2004: p. 1279-1295.
3. Intermediate Technology Development Group Ltd. *Refrigeration for developing countries*. [cited 11-08-2008]; Available from: http://practicalaction.org/docs/technical_information_service/refrigeration_for_dev_countries.pdf.
4. Fan, Y., L. Luo, and B. Souyri, *Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications*. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2006.
5. Dind, P., et al. *La réfrigération solaire a adsorption*. [cited 18-08-2008]; Available from: http://www.nrjrealiste.fr/solaire/la_refrigeration_solaire_a_adsorption.pdf.
6. Hildbrand, C., et al., *A new solar powered adsorption refrigerator with high performance*. Solar Energy, 2002. 77(3): p. 311-318.
7. Dieng, A.O. and R.Z. Wang, *Literature review on solar adsorption technologies for ice-making and air-conditioning purposes and recent developments in solar technology*. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2001. 5: p. 313-342.
8. Ruthven, D.M., *Principles of adsorption and adsorption processes* 1984: John Wiley & Sons, Inc.
9. Anyanwu, E.E. and N.V. Ogueke, *Thermodynamic design procedure for solid adsorption solar refrigerator*. Renewable Energy, 2005. 30: p. 81-96.
10. Weintraub, S., *Demystifying Silica Gel*. Object Specialty Group Postprints. Vol. 9. 2002.
11. Pons, M. *Principle of adsorption cycles for refrigeration or heat pumping*. [cited 11-07-2008]; Available from: <http://www.limsi.fr/Individu/mpons/pricyc.htm>.
12. Mayor, J. and P. Dind, *Construction et test d'un réfrigérateur solaire à adsorption transportable*. 2002, Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud / HES-SO / LESBAT - EIVD: Yverdon-les-Bains.
13. Lemmini, F. and A. Errougani, *Building and experimentation of a solar powered adsorption refrigerator*. Renewable Energy, 2005. 30: p. 1989-2003.