



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Simão dos Santos Antunes

**INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLO DE UM
SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA
SOLAR TÉRMICA COM MÓDULO DE ADSORÇÃO**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, na
especialidade de Energia e Ambiente orientada pelo Professor Doutor Gonçalo
Jorge Vieira Nunes Brites, apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica
da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra**

Setembro de 2023

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Instrumentação e controlo de um sistema de armazenamento de energia solar térmica com módulo de adsorção

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Instrumentação e Controlo de um Sistema de Armazenamento de Energia Solar Térmica com Módulo de Adsorção

Autor

Simão dos Santos Antunes

Orientadores

Professor Doutor Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites

Júri

Presidente	Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor Marco Alexandre dos Santos Fernandes Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2023

Aos meus pais

“ Persistência é o caminho do êxito ”

Charlie Chaplin

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero deixar o meu maior agradecimento a todos os que me ajudaram e que fizeram com que a realização desta dissertação fosse possível.

Ao professor Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites, por toda a paciência que foi tendo ao longo de todo o trabalho e também toda a ajuda que me deu para que tudo isto fosse possível.

Aos meus pais por todo o apoio dado ao longo de todo este percurso, sem eles nada disto seria possível.

Aos meus amigos, Diogo Castanhas, Francisco Jesus, Rafael Assunção, Kevin Oliveira, Nuno Cavaleiro, Diogo Rosa, Telmo Vidas, Francisco Castanheira, Frederico Bravo, Carlos Santos, Gabriel Marques, os quais foram acompanhando toda esta caminhada e que acabaram, em determinadas fases, por tornar tudo um pouco mais fácil. E, por fim, ao Tiago Galiza, o companheiro de todas as horas e que do início ao fim foi um dos maiores apoios durante esta caminhada.

O trabalho apresentado está enquadrado nos seguintes projetos de pesquisa:

AdsorTech – Armazenamento de Energia Térmica Suplementar por Tecnologia de Adsorção (REF. POCI-01-0247-FEDER-047070, Portugal 2020/ANI), financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do COMPETE - Programa para Competitividade e Internacionalização (POCI).

AdsorSeason – Armazenamento de energia solar térmica por adsorção de longa duração, com referência 2022.03339.PTDC, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia. DOI: <https://doi.org/10.54499/2022.03339.PTDC>.



Resumo

O trabalho realizado tem como objetivo a elaboração de um programa computacional que permita tanto a aquisição de dados como o controlo de uma instalação experimental realizada com o intuito de testar um depósito com um módulo de adsorção e comparar o seu desempenho ao de um depósito convencional para sistemas de águas quentes sanitárias (AQS).

Sendo que não foi possível a fabricação de um depósito com modelo de adsorção funcional, é explicada a instalação experimental, dando a conhecer todos os seus constituintes para que o funcionamento seja o pretendido e futuramente de obtenham todos os dados pretendidos.

O programa *LabVIEW* foi utilizado para a realização do programa de controlo/aquisição de dados.

Palavras-chave: instalação experimental, adsorção, AQS, *LabVIEW*.

Abstract

The work carried out aims at the development of a computer program that allows both data acquisition and the control of an experimental setup designed to test a storage tank with an adsorption model and compare its performance to that of a conventional storage tank for Domestic Hot Water (DHW) systems.

As it was not possible to manufacture a functional adsorption model tank, the experimental setup is explained, detailing all its components to ensure that it operates as intended and that all the desired data can be obtained in the future.

The LabVIEW program was used for the development of the control/data acquisition program.

Keywords: experimental setup, adsorption, DHW, LabVIEW.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas.....	x
Simbologia e Siglas.....	xi
Simbologia	xi
Siglas	xi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Sistemas Solares Térmicos	3
2.2. Norma EN12975.....	7
2.3. Adsorção.....	8
3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL.....	15
3.1. Constituintes da instalação	15
3.1.1. AdsorTherm	16
Modo de funcionamento do sistema.....	17
3.1.2. Simulador Solar.....	19
3.1.3. Lauda.....	19
3.1.4. ST ₂	21
3.2. Sensores	23
3.3. Válvulas de controlo	25
3.3.1. Funcionamento das válvulas	26
4. SISTEMA DE AQUISIÇÃO E CONTROLO	29
4.1. Placas de Aquisição	29
4.2. Programa de controlo.....	30
4.2.1. Controlo das válvulas	30
4.2.2. Aquisição de dados.....	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. – Representação das várias fases do ciclo de adsorção.....	9
Figura 3.1. – Esquema da instalação experimental. 4 – Lauda, 5 – Esquema do módulo de adsorção.....	15
Figura 3.2. – Reservatório de AQS com módulo de adsorção	16
Figura 3.3. – Imagem de um LAUDA.....	19
Figura 3.4. – Painel principal do dispositivo ST2	22
Figura 3.6 – Esquema com a distribuição dos sensores de temperatura e pressão.....	23
Figura 3.7 – Sensor de pressão <i>Thyracont VSC43MV</i>	24
Figura 4.1 – Placa de aquisição Measurement Computing USB-2416	29
Figura 4.2 – Ambiente gráfico referente ao controlo das válvulas.....	31
Figura 4.3 – Interface principal do programa de aquisição de dados	33
Figura 4.4 – Interface referente ao adsorção	34
Figura 4.5 – Interface referente ao condensador	35
Figura 4.6 – Interface referente ao evaporador.....	35
Figura 4.7 – Ambiente gráfico referente ao evaporador.....	36
Figura 4.8 – Ambiente gráfico para explicar os Sub VI's.....	37
Figura 4.9 – Ambiente gráfico referente ao adsorção	38
Figura 4.10 – Ambiente gráfico referente ao condensador	39
Figura 4.11 – Ambiente gráfico referente à aquisição de pressões	39
Figura 4.12 – Ambiente gráfico da aquisição dos valores lidos para um ficheiro	40

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. – Tabela que representa as condições para os testes segundo EN 12975:2006....	8
Tabela 3.1. – Principais características do Lauda.	20
Tabela 3.2. – Principais características dos sensores de pressão	25
Tabela 3.3. - Principais características das válvulas	25
Tabela 4.1. – Para os canais de entrada.....	30

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

T_w – Temperatura da água em redor do adsorisor;

T_a – Temperatura do adsorisor;

T_{ac} – Setpoint de temperatura para abertura da válvula de ligação adsorisor-condensador;

T_{ea} – Setpoint de temperatura para abertura da válvula de ligação evaporador-adsorisor;

P_a – Pressão no adsorisor;

P_c – Pressão no condensador;

P_e – Pressão no evaporador.

Siglas

AQS – Águas quentes sanitárias

ICS – Coletor Integrado com Armazenamento

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Os sistemas de armazenamento de energia solar térmica para preparação de águas quentes sanitárias (AQS) do tipo “reservatório de água aquecida” são a solução mais comum para minimizar o problema do desfasamento entre a disponibilidade de energia solar e o consumo de água quente em edifícios de habitação. Estes sistemas apresentam algumas limitações práticas:

- Requerem a utilização de reservatórios com dimensões consideráveis, devido a funcionarem com armazenamento de calor sensível e temperaturas máximas limitadas pelo ponto de ebulição da água, ocupando muito espaço e originando perdas térmicas significativas.
- Se existir uma grande exposição solar e reduzido consumo de água quente, muita da energia captada será desperdiçada pois não existe capacidade de a armazenar toda. Nestas condições podem ocorrer sobreaquecimentos do coletor, que podem levar à deterioração precoce dos materiais e provocar anomalias no funcionamento do sistema.
- Quando a radiação solar disponível é baixa durante um período de tempo prolongado, a generalidade destes sistemas necessita de um sistema de apoio que permita aumentar a temperatura da água até aos valores necessários para o consumo.

Na Universidade de Coimbra estão a ser desenvolvidos novos sistemas de armazenamento térmico com elevada densidade de armazenamento de energia, como é o caso dos sistemas de adsorção, de modo a ultrapassar as limitações anteriores. Estes sistemas têm maior complexidade e exigem um sistema de controlo de modo a garantir um funcionamento otimizado.

O trabalho desenvolvido para esta dissertação consistiu no desenvolvimento de um software que permite controlar e monitorizar um protótipo de sistema de armazenamento térmico solar por adsorção.

1.2. Objetivos

Esta tese tem como principal objetivo o desenvolvimento de um programa em *LabVIEW*, com o objetivo de se conseguir não só a aquisição de dados como também de controlo do protótipo, tudo isto com o mesmo programa.

Outro dos objetivos seria testar o protótipo, o que por problemas na construção do mesmo impossibilitou que os testes pudessem ser realizados. Acabando assim a dissertação por ficar focada no programa desenvolvido e no seu total funcionamento, estando as suas várias funcionalidades explicadas.

No que respeita ao protótipo, mesmo não existindo um operacional, estão também demonstrados todos os seus componentes e também todo o material que foi adquirido e que vai ser utilizado para fazer a ligação com o programa desenvolvido (válvulas, placas de aquisição / controlo, e sensores).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sistemas Solares Térmicos

Um sistema solar térmico utiliza coletores solares para absorver a radiação solar e convertê-la em energia térmica, produzindo um significativo aumento da temperatura da placa absorvedora do coletor solar relativamente à temperatura ambiente. A energia térmica produzida no coletor é transferida para um reservatório através de um fluido térmico (geralmente água com uma percentagem de anti-congelante) que circula em circuito fechado.

Existem 5 tipos de sistemas de aquecimento solar de água:

- Sistemas por convecção natural, também designados por “termossifão”,
- Sistemas do tipo “Coletor Integrado com Armazenamento” (ICS),
- Sistemas de circulação direta,
- Sistemas de circulação indireta,
- Sistemas de aquecimento de ar.

Os dois primeiros são classificados como sistemas passivos, sem uso de bombas de circulação, enquanto os demais são chamados sistemas ativos, usando bombas ou ventiladores para circulação de fluido (respetivamente para líquidos e gases). [1]

Sistemas de Termossifão

O sistema de termossifão é um sistema passivo de aquecimento de água, que usa convecção natural para transportar o calor do coletor para o tanque de armazenamento. O sistema requer que o reservatório esteja colocado imediatamente acima do coletor, tubulações maiores e bom isolamento para evitar perdas de calor, e alguma inclinação para permitir que a circulação do fluido térmico se faça por diferença de densidade. As desvantagens destes sistemas são as maiores perdas térmicas pelas paredes do reservatório por este estar localizado no exterior da habitação e o (discutível) impacto visual na estética da habitação quando é instalado no telhado. Existe uma grande quantidade de estudos sobre o desempenho dos sistemas termossifão para aquecimento de água, tanto experimentais como teóricos, alguns dos quais apresentados de seguida para dar mais algum contexto à evolução deste tipo de sistemas solares térmicos. [1]

Gupta e Garg, em 1968, [2] desenvolveram um dos primeiros modelos para o desempenho térmico de um sistema de aquecimento de água solar com circulação natural sem carga. Eles representaram a radiação solar e a temperatura ambiente por séries de Fourier e foram capazes de prever o desempenho de um dia de forma que concordasse substancialmente com os resultados experimentais.

Ong realizou dois estudos, em 1974 e 1976, respetivamente [3], [4], para avaliar o desempenho térmico de um sistema de aquecimento de água por energia solar (SWH). Ele instrumentou um sistema relativamente pequeno com cinco termopares na superfície inferior dos tubos de água e seis termopares na superfície inferior da placa coletora. Ao todo, seis termopares foram inseridos no tanque de armazenamento e um medidor de fluxo de massa de traçador de cor foi empregado.

Kudish et al., em 1985, [5] estudaram o fluxo de termossifão diretamente, adaptando uma técnica de laboratório simples e conhecida, um dispositivo de nível constante, a um coletor solar. Os dados de fluxo adquiridos foram utilizados para construir uma curva padrão de eficiência de teste, mostrando que esta técnica pode ser aplicada para testar coletores do tipo termossifão. Além disso, eles determinaram a eficiência instantânea do coletor como uma função do tempo ao longo dia.

No seu estudo, Morrison e Braun, em 1985, [6] estudaram a modelação e as características de funcionamento de um sistema de aquecimento de água solar do tipo termossifão com tanques de armazenamento verticais ou horizontais. Eles descobriram que o desempenho do sistema é maximizado quando o volume diário de água recolhida é aproximadamente igual ao volume diário de carga, sendo que o sistema com tanque horizontal não teve o mesmo desempenho que o vertical.

Hobson e Norton, em 1989, [7] desenvolveram no seu estudo uma curva característica para um aquecedor de água solar de um sistema de termossifão diretamente aquecido, obtido a partir de dados de testes de 30 dias. Utilizando esta curva, a fração solar anual calculada concordou bem com o valor correspondente obtido a partir da simulação numérica. Além disso, a análise foi estendida, e os mesmos autores produziram um método de design simples mas relativamente preciso para aquecedores de água solar para sistemas de termossifão diretos.

Shariah e Shalabi, em 1997, [8] realizaram um estudo sobre a otimização dos parâmetros de design de um SWH termossifão para duas regiões na Jordânia representadas

por duas cidades, Amman e Aqaba, através do uso do programa de simulação TRNSYS. Os resultados indicam que a fração solar do sistema pode ser melhorada em 10-25% quando cada parâmetro estudado é escolhido adequadamente. Também se concluiu que a fração solar de um sistema instalado em Aqaba (clima quente) é menos sensível a alguns parâmetros do que a fração solar de um sistema semelhante instalado em Amman (clima moderado).

Sistemas de Coletor Integrado com Armazenamento

Os sistemas ICS utilizam o armazenamento de água quente como parte do coletor, ou seja, a superfície do tanque de armazenamento é usada também como um absorvedor. Assim como em todos os outros sistemas, para melhorar a estratificação, a água quente é retirada do topo do tanque e a água fria de reposição entra na parte inferior do tanque do lado oposto. A principal desvantagem dos sistemas ICS é a alta perda térmica do tanque de armazenamento para o ambiente, uma vez que a maior parte da área superficial do tanque de armazenamento não pode ser termicamente isolada, pois é intencionalmente exposta para a absorção da radiação solar. [1]

Sistemas de circulação direta

Sistemas de circulação direta consistem na utilização de uma bomba para que a circulação de água potável seja realizada até aos coletores solares quando existe energia suficiente para que a mesma seja aquecida. Estes sistemas podem ser utilizados em áreas onde o congelamento não é frequente. Já em zonas em que haja perigo de congelamento, normalmente a proteção realizada é a recirculação da água.

Os sistemas de circulação direta utilizam normalmente um único tanque de armazenamento equipado com um aquecedor de água auxiliar, mas também existem sistemas de armazenamento de dois tanques que podem ser usados. Os sistemas de circulação direta podem ser usados com água fornecida por um tanque de armazenamento de água fria ou conectados diretamente às redes de água da cidade. No entanto, são necessárias válvulas redutoras de pressão e válvulas de alívio de pressão quando a pressão da água da cidade é maior do que a pressão de trabalho dos coletores. [1]

Sistemas de Aquecimento de água indiretos

Os sistemas de aquecimento de água indiretos circulam um fluido de transferência de calor por meio de um circuito fechado do coletor até um permutador de calor, onde o seu calor é transferido para a água potável.

O permutador de calor pode estar localizado dentro do tanque de armazenamento, ao redor do tanque de armazenamento (casco do tanque), ou pode ser externo. Deve-se notar que o circuito do coletor é fechado e, portanto, um tanque de expansão e uma válvula de alívio de pressão são necessários. Proteção adicional contra sobreaquecimento pode ser necessária para evitar que o fluido de transferência de calor do coletor se decomponha ou se torne corrosivo.

Os sistemas de escoamento de retorno são geralmente sistemas de aquecimento de água indiretos que circulam água pelo circuito fechado do coletor até um permutador de calor, onde o calor é transferido para a água potável. A circulação continua enquanto houver energia utilizável disponível.

Como o circuito do coletor está isolado da água potável, não são necessárias válvulas para ativar o escoamento, e a formação de depósitos não é um problema. No entanto, o conjunto de coletores e a tubulação externa devem ter inclinação adequada para drenar completamente de volta para o tanque de drenagem. [1]

Sistemas a Ar (Aquecimento por Ar)

Os sistemas de ar são sistemas de aquecimento de água indiretos que circulam ar por meio de condutas através dos coletores até um permutador de calor ar-líquido. Neste permutador, o calor é transferido para a água potável, que também é circulada pelo permutador de calor e retornada ao tanque de armazenamento.

A principal vantagem do sistema é que o ar não precisa de ser protegido contra congelamento ou ebulição, não é corrosivo e é gratuito. As desvantagens são que os equipamentos de manuseamento de ar (condutas e ventiladores) precisam de mais espaço do que tubagens e bombas, fugas de ar são difíceis de detetar e o consumo de energia parasitária geralmente é maior do que o dos sistemas líquidos. [1]

2.2. Norma EN12975

A norma EN 12975 é a norma europeia definida para ser utilizada no controlo de todos os testes de sistemas solares térmicos. Esta norma contempla dois tipos de testes para os quais as condições que têm de ser cumpridas acabam por não ser as mesmas, sendo um mais abrangente que o outro, mas que no final podem ser comparados entre si, sendo esses o método estacionário e o método quasi-dinâmico. [9]

Método Estacionário

Este é um modelo apenas para utilizar com tempo limpo ou com um simulador solar interior. Para o teste apenas são aceites altos níveis de irradiância e, portanto, baixas frações difusas. É também um requisito que o ângulo de incidência seja perto do normal, para que o efeito deste ângulo possa ser desprezado. Tendo em conta que esta regulação limita o tempo viável do teste no exterior, isto torna o método estático no exterior muito caro.

Este modelo não tem termo de correção para a radiação difusa. Esta é necessária na grande maioria dos programas de simulação para cálculos de performance de longo termo. A radiação solar tem de ser dividida entre feixe e radiação difusa para a qual também tem de ser conhecido um ângulo de correção de incidência separado.

Método Quasi-Dinâmico

O modelo quase-dinâmico deriva do modelo estacionário adicionando alguns termos de correção que permitem uma descrição mais detalhada do coletor. A radiação solar agora é considerada nas suas duas componentes - direta e difusa - com IAMs correspondentes. A dependência da velocidade do vento é modelada por dois termos corretivos, o efeito do vento na performance óptica e a sua influência nas perdas térmicas. Por fim, a última correção descreve a dependência das perdas devido à radiação de comprimento de onda incidente no coletor. No teste quase-dinâmico (EN 12975-2:2006, cláusula 6.3), o coletor é sempre instalado numa posição fixa durante cada período de teste.

Na Tabela 2.1 estão representados os vários parâmetros que têm de ser tidos em conta na execução de ambos os testes, como também os valores que eles devem apresentar.

Tabela 2.1. – Tabela que representa as condições para os testes segundo EN 12975:2006

Table 2
Test conditions and maximum allowed deviations in EN12975:2006.

Variable	Steady-state		Quasi-dynamic	
	Value	Dev.	Value	Dev.
Hemispherical irradiance G (W/m^2)	>700	± 50	–	–
Incidence angle θ ($^\circ$)	<20	–	–	–
Diffuse fraction G_d/G (%)	<30	–	–	–
Ambient temperature t_a (K)	–	± 1.5	–	–
Wind speed u (m/s)	$2 < u < 4$	–	$1 < u < 4$	–
Inlet temperature t_{in} (K)	–	± 0.1	–	± 1
Mass flow rate \dot{m} (kg/sm^2)	0.02	$\pm 1\%$	0.02	$\pm 1\%$

2.3. Adsorção

O fenómeno de adsorção é resultado da interação entre um sólido e um fluido (refrigerante) com base numa reação física ou química. A adsorção física ocorre quando as moléculas do refrigerante (adsorvato) se fixam à superfície de um elemento sólido poroso (adsorvente) devido às forças de Van der Waals, levando assim à acumulação de uma substância na superfície de outra.

Já a adsorção química resulta das ligações iónicas ou covalentes formadas entre as moléculas do adsorvato e a substância sólida. As forças de ligação são muito maiores do que as da adsorção física, liberando mais calor. Além disso, esse tipo de ligação promove a alteração química da substância adsorvida, de modo que as moléculas do adsorvato e adsorvente nunca mantêm o seu estado original após a adsorção.[10]

Ciclo básico

A energia solar é a fonte de energia da maioria dos dispositivos de adsorção que operam com o ciclo básico. Um refrigerador de adsorção solar baseado no ciclo básico de refrigeração por adsorção não requer nenhuma energia mecânica ou elétrica, apenas energia térmica, e opera intermitentemente de acordo com o ciclo diário.

O conteúdo adsorvido do refrigerante varia ciclicamente, dependendo da temperatura do adsorvente e da pressão do sistema, que varia entre um limite máximo definido pela pressão de condensação e um limite mínimo imposto pela pressão de evaporação.

Coeficiente de Desempenho

O coeficiente de desempenho (COP) de um sistema de refrigeração é a razão entre sua capacidade de remover calor de uma fonte fria e a energia fornecida para sua operação.

Essa razão é uma medida de conversão da energia fornecida ao sistema em capacidade de arrefecimento de saída, ou seja, a eficiência do sistema de refrigeração. [11]

Na Figura 2.1, retirada de [12], está representado o ciclo básico de adsorção, em que as várias fases estão representadas por números:

- 1 – Dessorção,
- 2 – Condensação,
- 3 – Evaporação,
- 4 – Adsorção.

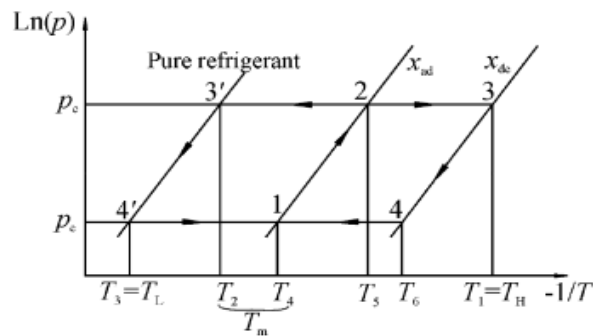


Fig. 7. Adsorption refrigeration cycle (Clapeyron diagram). In adsorber: 1–2, heat input (isosteric heating); 2–3, heat input (isobaric heating and desorption); 3–4, heat rejected (isosteric cooling) 3–4–1, heat rejected (isobaric cooling and adsorption). In evaporator–condensor: 2–3', heat rejected (isobaric condensation); 3'–4'–1, cooling effect (isosteric refrigerant self-cooling and isobaric evaporation).

Figura 2.1. – Representação das várias fases do ciclo de adsorção

Seleção do par de trabalho (adsorvente-adsorvato)

Existem várias combinações de adsorvente-adsorvato possíveis que podem ser usadas em sistemas de refrigeração por adsorção. A escolha deve ser feita cuidadosamente, uma vez que o desempenho do sistema difere de acordo com a combinação de trabalho escolhida. A seleção adequada depende da temperatura da fonte de calor, das características desejadas do sistema de refrigeração, das propriedades dos constituintes da combinação de trabalho e da afinidade entre eles (que depende das propriedades químicas, físicas e termodinâmicas das substâncias), e até mesmo do custo, disponibilidade e impacto ambiental das mesmas.

Com o estudo e pesquisa feito por docentes da Universidade de Coimbra em [10], vai estar explicado em baixo as condições a ter em conta para a escolha do adsorvato e de um adsorvente.

Escolha do Adsorvato[13], [14] :

- Temperatura de evaporação abaixo de 0 °C (para fins de refrigeração; pode ser maior no caso de aplicações de ar condicionado);
- Tamanho molecular pequeno para facilitar o efeito de adsorção;
- Alto calor latente de vaporização e baixo volume específico quando no estado líquido;
- Alta condutividade térmica;
- Baixa viscosidade;
- Termicamente estável com o adsorvente na faixa de temperatura de operação;
- Quimicamente estável na faixa de temperatura de operação;
- Não tóxico, não corrosivo e não inflamável;
- Pressões de saturação baixas (ligeiramente acima da pressão atmosférica) em temperatura de operação normal;
- Ausência de problemas ecológicos, ao contrário dos refrigerantes

Os refrigerantes naturais usados em sistemas de refrigeração por adsorção geralmente têm impacto ambiental zero. Os refrigerantes mais utilizados para estes casos são a amónia, o metanol e a água, que têm valores relativamente altos de calor latente (1368, 1160 e 2258 kJ/kg, respetivamente) e baixos volumes específicos (da ordem de 10^{-3} m³/kg).

A água e o metanol operam a pressões de saturação subatmosféricas nas temperaturas de operação necessárias, e qualquer infiltração de ar ambiente resulta imediatamente num mau funcionamento do sistema.

No caso da amónia, pequenas fugas podem ser toleradas por algum tempo, mas a sua pressão de saturação é de 13 bar a uma temperatura de condensação de 35 °C, o que é bastante exigente. A amónia é tóxica e corrosiva, enquanto a água e o metanol não são, mas este último é inflamável. A água é o adsorvato mais estável termicamente, seguida de perto pelo metanol e pela amónia, nesta ordem. No entanto, mesmo sendo o adsorvato mais barato, a água não pode ser usada para fins de arrefecimento abaixo de 0 °C.

Escolha do Adsorvente [14], [15] :

- Capacidade de adsorver uma grande quantidade de adsorvato quando arrefecido à temperatura ambiente, para fornecer um alto efeito de arrefecimento;
- Dessorção da maioria (idealmente, de todo) do adsorvato quando aquecido pela fonte de calor disponível;
- Baixo calor específico;
- Boa condutividade térmica, para reduzir o tempo do ciclo;
- Não deterioração e perdas de capacidade de adsorção ao longo do tempo ou com o uso;
- Não tóxico e não corrosivo;
- Compatibilidade química e física com o refrigerante escolhido;
- Baixo custo e ampla disponibilidade.

Os adsorventes mais comuns de serem utilizados são o carvão ativado, a zeólita e a sílica-gel.

O carvão ativado oferece um bom equilíbrio entre alta capacidade de adsorção e dessorção. Por sua vez, as zeólitas naturais precisam estar presentes em grandes quantidades, uma vez que apenas uma pequena quantidade de adsorvato é dessorvida durante o aumento de temperatura. No entanto, as isotermas de adsorção das zeólitas têm dependência de pressão extremamente não linear, o que é relevante para aplicações de refrigeração solar. Contrariamente, o carvão ativado e a sílica-gel apresentam isotermas com dependência de pressão quase linear.

A sílica-gel atende à maioria dos critérios listados acima, no entanto, é cara e pode não estar disponível na maioria dos países. Além disso, o fenómeno de deterioração da capacidade de adsorção e o envelhecimento da sílica-gel são questões atuais. [15]–[17].

Pares de Trabalho

Existem vários estudos sobre pares de trabalho adsorvente-adsorvato para sistemas de refrigeração por adsorção que descrevem suas características, desempenho, vantagens e desvantagens. Os pares de trabalho mais comuns de serem usados são: zeólita-água, sílica-gel-água, carvão ativado-metanol e carvão ativado-amônia. [10]

Sílica-gel-água

Este par é ideal para aplicações de energia solar devido à sua baixa temperatura de regeneração, que requer fontes de calor de baixa temperatura, geralmente abaixo de 85 °C. Além disso, a água tem a vantagem de possuir um calor latente maior do que outros refrigerantes convencionais.

No entanto, este par tem uma capacidade de adsorção baixa, bem como uma baixa pressão de vapor, o que pode dificultar a transferência de massa. Além disso, este par de trabalho requer condições de vácuo no sistema, e qualquer gás não condensável causará uma redução significativa no desempenho do sistema. [10], [18].

Carvão ativado-metanol

Este é um dos pares de trabalho mais comuns em sistemas de refrigeração por adsorção. Este par é caracterizado pela sua grande capacidade cíclica de adsorção, baixo calor de adsorção, baixo ponto de congelamento e alto calor latente de evaporação do metanol.

No entanto, existem limitações, como a decomposição do metanol em éter dimetílico a altas temperaturas, tornando-o adequado para temperaturas de dessorção de até 120 °C, e, para além disso, o metanol é altamente tóxico e requer vácuo para funcionar adequadamente, pois a presença de gases não condensáveis prejudica o desempenho.

Além disso, a pirólise lenta do metanol é inevitável, e o carvão ativado tem baixa condutividade térmica. Apesar destas limitações, o sistema carvão ativado-metanol é promissor em aplicações práticas.[10], [18].

Carvão ativado-amónia

O calor de adsorção conseguido por este par é semelhante ao do par carvão ativado-metanol, mas requer pressões operacionais mais elevadas, o que melhora o desempenho de transferência de calor e massa e reduz o tempo do ciclo, também prevenindo a infiltração de ar no sistema.

No entanto, o carvão ativado tem uma capacidade de adsorção menor com a amónia do que com o metanol; além disso, deve-se ter cuidado devido à toxicidade da amónia, odor irritante (mesmo em baixas concentrações) e natureza corrosiva, o que limita a sua utilização.

Trata-se de um par de trabalho que tem potencial para para aplicações de refrigeração eficiente, mas que obviamente vai exigir considerações cuidadosas sobre os materiais de construção usados e condições de segurança.[10], [18]

Zeólita-água

É um par que permanece estável a altas temperaturas, e, como já foi referido, a água tem um calor latente mais elevado que os outros refrigerantes convencionais (com a atualização mais comum). O par zeólita-água necessita de temperaturas de regeneração que podem ultrapassar os 200 °C, com uma elevação de temperatura de adsorção-evaporação de até 70 °C ou mais.

Para este par existem também algumas limitações, como a adequação principalmente para o condicionamento de ar, já que a água não pode evaporar a temperaturas abaixo de 0 °C, e um processo de adsorção mais lento devido à baixa pressão de evaporação da água.[10], [18].

3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

3.1. Constituintes da instalação

A montagem experimental completa será composta pelo protótipo do sistema de AQS com módulo de adsorção, com todos os seus constituintes, um aparelho que vai simular o trabalho de um painel solar para o aquecimento da água, um equipamento, *Lauda*, que vai fazer também o trabalho de um reservatório, ligado a este vamos também ter um outro equipamento, denominado ST2, para um melhor controlo das variáveis do *Lauda*.

O sistema vai estar também ligado a um chiller para caso seja necessária mais água, e isto também se deve ao facto de o sistema estar a trabalhar num circuito fechado, ou seja, vai ser realizada uma recirculação de água. O chiller poderá ser necessário para o arrefecimento da água antes de esta entrar novamente no equipamento de simulação solar para um novo ciclo.

Na Figura 3.1, está representado o esquema da instalação experimental, com todos os seus componentes, os mesmos explicados ao longo deste capítulo.

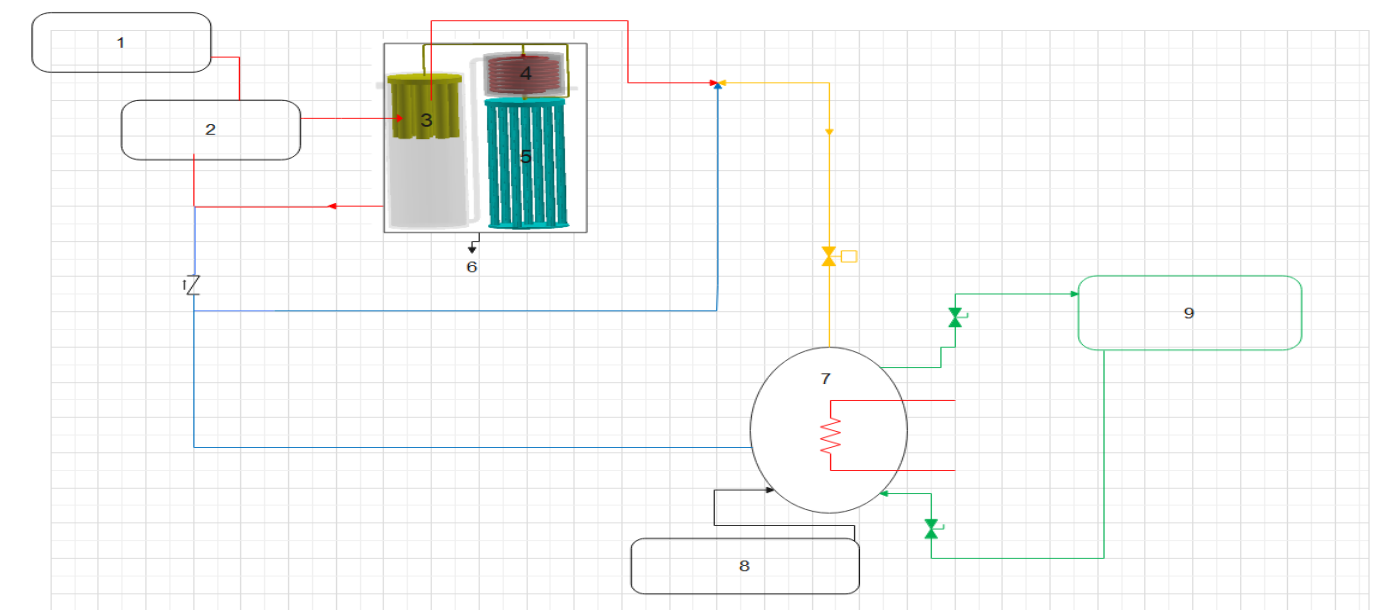


Figura 3.1. – Esquema da instalação experimental. 1- Coletor Solar, 2- Simulador Solar, 3- Adsorção, 4- Condensador, 5-Evaporador, 6- Adsortherm (módulo de adsorção), 7 – Lauda, 8 – ST2 (Sistema de Controlo), 9- Chiller

3.1.1. AdsorTherm

Trata-se de um sistema de acumulação de energia térmica por adsorção que é composto por um depósito de armazenamento de água quente, onde está localizado um adsorisor (contendo o adsorvente, sílica-gel), conectado por um tubo a um condensador e este, por sua vez, conectado por um outro tubo a um evaporador localizado fora do depósito. Na Figura 3.2 estão presentes as válvulas V1, V2 e V3 que separam o adsorisor do condensador, condensador do evaporador e o evaporador do adsorisor, respetivamente. O adsorisor é uma caixa fechada contendo sílica-gel, que possibilita a passagem de vapor de água. A camada de adsorvente deve ser calculada de acordo com as dimensões do sistema e possuir alhetas para melhorar a troca de calor com a água do depósito. O sistema é estanque a infiltrações de ar e todo o ar deve ser evacuado para que fique somente água líquida no evaporador e vapor de água no restante volume. [19]

Resumindo, o sistema de acumulação de energia térmica com módulo de adsorção consiste num depósito de acumulação, um reservatório de pré-aquecimento, um adsorisor, um condensador e um evaporador.

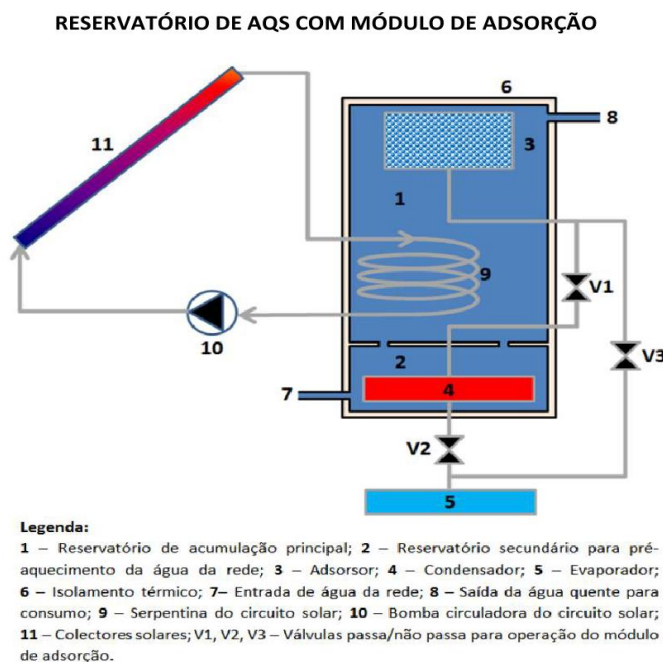


Figura 3.2. – Reservatório de AQS com módulo de adsorção

O adsorisor, localizado dentro do depósito, consiste numa caixa fechada cheia de material adsorvente, neste caso sílica-gel, que permite a passagem de vapor de água. O condensador é um permutador de calor responsável por mudar a fase do vapor desadsorvido durante a fase de acumulação (regeneração ou desadsorção). Já o evaporador serve para acumular a água líquida e para vaporizá-la através da absorção de calor do ambiente. Ambas as partes devem ter uma elevada área de superfície exterior para facilitar as trocas de calor, e isso pode ser melhorado com a utilização de alhetas ou outros mecanismos ativos ou passivos. Durante a fase de descarga (adsorção), o vapor adsorvido é gerado a partir da vaporização da água acumulada no evaporador.

O condensador é uma parte importante de um sistema de adsorção térmica, que é utilizado para mudar a fase do vapor desadsorvido para líquido durante a carga do sistema. Este precisa de uma grande área de superfície para trocar calor com a água do depósito de pré-aquecimento e armazenar a água condensada até que a válvula V2 seja aberta e a água seja encaminhada para o evaporador.

Modo de funcionamento do sistema

O sistema de acumulação de energia térmica com módulo de adsorção armazena o excesso de energia térmica gerada por fontes térmicas que funcionam de forma desfasada dos horários dos consumos de energia (solar, cogeração, geotermia, etc.), reduzindo assim o sobreaquecimento ou perdas de energia térmica por falta de capacidade de armazenamento. Quando há consumo de água quente, o sistema liberta a energia armazenada, dando-se a descarga do adsorisor. Por outro lado, quando há excesso de energia térmica, procede-se à carga do adsorisor através da regeneração do adsorvente, produzindo-se vapor que é condensado, sendo este calor de condensação aproveitável para pré-aquecer a água da rede.

O funcionamento do sistema é composto por três fases.

Fase 1

A fase 1 corresponde à carga do sistema, quando a temperatura da água quente atinge um determinado setpoint, continua a ser fornecido calor (em excesso), mas não existem consumos de água quente. A energia é armazenada através da regeneração do adsorvente, ou seja, o calor em excesso é utilizado para libertar o vapor de água contido no material adsorvente. O vapor produzido durante a regeneração é condensado e pode ser usado para pré-aquecimento da água da rede. Cada kg de água libertada do adsorvente resulta na acumulação de 2700 kJ de energia térmica, enquanto a condensação produz mais de 2000 kJ de calor por kg de água. Resumindo, o processo de carga envolve a liberação de vapor do adsorvente, condensação do vapor e pré-aquecimento da água da rede.

Fase 2

Se as válvulas V1, V2 e V3 estiverem fechadas, o processo de adsorção ficará bloqueado e o sistema continuará carregado por tempo indeterminado. Neste caso, o adsorção não poderá adsorver vapor, e o sistema não será capaz de liberar calor para a água do depósito, permitindo apenas que a água se aqueça rapidamente. Este modo de operação é adequado para dias com pouca radiação solar.

Fase 3

A descarga no sistema de acumulação de energia por adsorção ocorre quando existe uma grande necessidade de água quente e baixa produção de energia térmica, provocando uma queda na temperatura no depósito abaixo de um valor definido. Nesta situação, a válvula V3 é aberta, permitindo a passagem do vapor do evaporador para o adsorção, iniciando o processo de adsorção. O adsorção liberta para a água quente cerca de 2700 kJ de calor por cada kg de água adsorvida, enquanto o evaporador absorve mais de 2000 kJ de calor por kg de água evaporada, a partir do contacto com o ar atmosférico. Este calor será posteriormente rejeitado no condensador durante o processo de carga e será aproveitado para pré-aquecer a água da rede.

3.1.2. Simulador Solar

O simulador solar irá ser utilizado como fonte de energia, em substituição da radiação solar, permitindo assim a realização de testes sem haver a preocupação da altura do ano e de possíveis condições atmosféricas adversas.

3.1.3. Lauda

Vai também ser utilizado um aparelho denominado por LAUDA, representado na Figura 3.3, que funciona como reservatório do nosso circuito, para onde irá a água depois de passar todo o protótipo, simulando a água que chegaria a uma casa e também posteriormente a água que vai ser reposta no sistema, mas desta vez com temperaturas idênticas a água de rede. [20]



Figura 3.3. – Imagem de um LAUDA

Com este aparelho é-nos também permitido o controlo tanto de temperatura como de caudal (dados importantes para análise e posteriormente serem retiradas as conclusões pretendidas). Para isto temos um painel na própria máquina que nos permite tanto controlar como ler a temperatura e o caudal.

Para a utilização deste equipamento têm de ser tidos em conta vários parâmetros referentes ao seu funcionamento. Parâmetros esses que estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. – Principias características do Lauda.

Temperaturas de funcionamento	25 °C a 125 °C
Capacidade	40 L a 60 L
Voltagem	400 V
Frequência	50 Hz
Potência	12 KW
Pressão de trabalho	6 bar
Caudal mínimo	2.5 m ³ /h

Esta unidade de controlo de temperatura aquece a água com recurso a uma resistência, e é arrefecido graças a um permutador de calor.

No que toca aos componentes pelos quais o equipamento é composto temos:

1. Permutador de calor;
2. Resistência elétrica para aquecimento;
3. Bomba de circulação;
4. Tanque de expansão de membrana;
5. Válvula de controlo de três vias;
6. Sistema de controlo de temperatura;
7. Sistema de controlo de caudal;
8. Dispositivos de segurança.

Mas ao utilizar o painel do LAUDA o controlo ia ser um pouco limitado, por isso, vamos utilizar um outro equipamento (ST2), que nos vai permitir um melhor controlo dos parâmetros, neste caso de temperatura e caudal, podendo assim abordar o problema de diversas maneiras fazendo vários tipos de análises a possíveis variações que possam acontecer neste sistema, mas já num uso real.

3.1.4. ST₂

Este é o equipamento referido anteriormente como o que será ligado ao Lauda para um melhor controlo dos dados que nos interessam (neste caso, nestes equipamentos apenas o caudal e a temperatura). [21]

Esta é uma unidade de controlo de aquisição de dados para ensaios de painéis solares térmicos para efetuar testes com base na norma já referida anteriormente EN 12975-2.

O dispositivo possui um ecrã táctil que nos permite o ajuste e também a programação de parâmetros tanto de controlo como de funcionamento.

Este controlador é capaz de controlar um processo por um valor fixo desejado para cada uma das variáveis de processo que é denominado ‘set value’. Com a execução de programas, é possível alterar esse ‘set value’ ao longo do tempo gerando rampas de controlo.

No painel principal são apresentadas as 5 variáveis principais que podem ser controladas com este equipamento, neste caso específico apenas nos interessa aquelas que são lidas no LAUDA (Figura 3.4):

1. Irradiância global do simulador solar;
2. Temperatura da água quente;
3. Velocidade do ar;
4. Temperatura no Lauda;
5. Caudal de água no Lauda.

Para estas cinco variáveis seleccionáveis no painel principal vamos ter a opção de as utilizar para alterar o set point definido e que, por sua vez, está a ser utilizado. Isto só é possível caso nenhum destes dados esteja a ser fornecido por algum programa externo.

Para além destas variáveis, também é possível aceder a vários eventos com funções especiais.

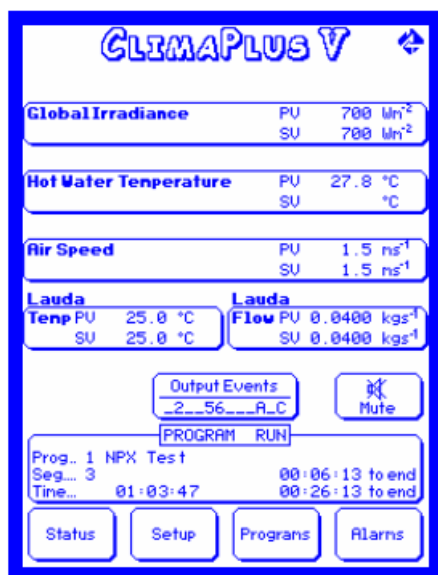


Figura 3.4. – Painel principal do dispositivo ST2

3.2. Sensores

Para a medição/aquisição dos dados pretendidos vão ser utilizados vários tipos de sensores como de temperatura, caudal e pressão. Na Figura 3.6 está representada a distribuição dos sensores de pressão e temperatura e a sua quantidade.

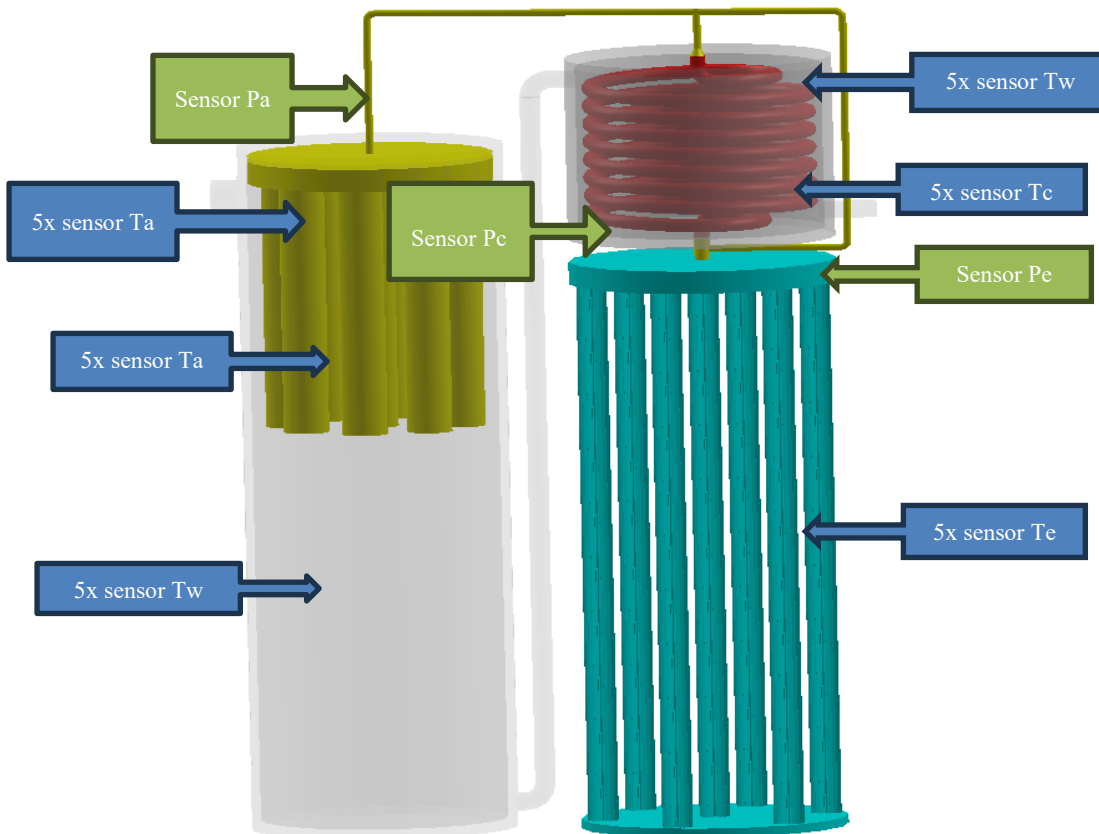


Figura 3.5 – Esquema com a distribuição dos sensores de temperatura e pressão

Temperatura

Vão ser utilizados 31 termopares do tipo K. Os termopares vão estar divididos pelo adsorção, pelo condensador e pelo evaporador. Na Figura 3.6 está representada a distribuição dos termopares e também a quantidade usada por componente, faltando 1 que estará a medir a temperatura ambiente.

Este tipo de termopares são os mais comuns pois permitem um maior intervalo de temperaturas em que é possível trabalhar. Os termopares de tipo K vão ser utilizados na

maioria das aplicações pelo facto da sua constituição ser baseada em níquel e de terem uma boa resistência à corrosão.

Pressão

Para medir pressões vão-se utilizar três sensores de pressão idênticos, *Thyracont - VSC43MV*, representado um exemplar na Figura 3.7. Irá ser colocado um sensor de pressão em cada elemento constituinte do protótipo (um no adsorção, um no evaporador e um no condensador), para a medição das pressões a que estão a trabalhar os componentes do protótipo.



Figura 3.6 – Sensor de pressão *Thyracont VSC43MV*

Este tipo específico de sensor é utilizado para medir pressões absolutas em vácuo. Devido ao seu sensor cerâmico com boa durabilidade, ele é praticamente imune quer a sujidades quer a possíveis contaminações.

Estes sensores são uma muito boa escolha tendo em conta algumas das suas principais características:

- Resistente quimicamente: Sensor de cerâmica com vedação FKM;
- Confiável: Alta confiabilidade e estabilidade a longo prazo;
- Independente: Medições independentes do tipo de gás;
- Rápido: Tempo de resposta curto de até 20 ms;
- Robusto: Resistente a sujidades.

Outras características importantes estão também representadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. – Principais características dos sensores de pressão

Temperatura de operação	5 as 60 °C
Temperatura de armazenamento	-40 até +70 °C
Sinal de saída	0 a 10 V
Tensão de alimentação	15 a 30 V AC
Classe de proteção	IP 40
Peso	120 g
Sobrecarga máxima	4 bar de pressão absoluta

3.3. Válvulas de controlo

Para além de todos estes aparelhos para medição de valores, vão existir também três válvulas, que vão controlar a circulação do adsorvato no protótipo.

Estas vão sendo abertas ou fechadas tendo em conta o que se pretende, isto tudo relacionado com as várias fases de funcionamento pelo modelo de adsorção já explicado. Todas as necessidades de abrir e fechar as válvulas vão estar relacionadas com as temperaturas e pressões que estão a ser medidas ao longo de todo o protótipo.

As válvulas a ser utilizadas são o modelo Leybold DN16 ISO-KF. Este tipo de válvulas é particularmente adequado para sistemas que funcionam sob condições de vácuo, nos quais as válvulas têm de ser remotamente controladas e onde o ar comprimido não está prontamente disponível. [22]

Na Tabela 3.3 encontram-se alguns dados importantes referentes às válvulas que vão ser utilizadas.

Tabela 3.3. - Principais características das válvulas

Pressão de trabalho	10 ⁻⁸ até 2 bar
Temperaturas ambiente/ de trabalho	0 até +50 °C
Tempo de fecho/ tempo de abertura	0.2 s
Potência elétrica consumida	Em atuação - 700 W Em espera - 10 W
Tensão de alimentação	100-115 / 200-240 V AC
Frequência	50/60 HZ

3.3.1. Funcionamento das válvulas

Nesta secção apresenta-se o algoritmo de controlo das válvulas do AdsorTherm.

Abaixo recorda-se a descrição das 3 válvulas, presentes também na Figura 3.2:

- V1 – Válvula entre o adsorção e o condensador
- V2 – Válvula entre o condensador e o evaporador
- V3 – Válvula entre o evaporador e o adsorção

$T_w > T_a$ -> fase de aquecimento ou dessorção -> Fecha V₃

$T_w > T_a$ & $P_a < P_c$ -> fase de aquecimento -> V₁ fechada

& $P_a \geq P_c$ & $T_w < T_{ac}$ -> fase de aquecimento -> V₁ fechada

& $P_a \geq P_c$ & $T_w \geq T_{ac}$ -> fase de dessorção -> V₁ aberta

V₁ apenas abre na fase de dessorção. Assim, se V₁ se encontrar aberta e depois se verificar que $T_w < T_a$, então avança para a fase de arrefecimento ou adsorção, abre V₂ por uns instantes, passado algum tempo do fecho de V₁ imposto por $T_w < T_a$ (ver abaixo).

$T_w < T_a$ -> fase de arrefecimento ou adsorção -> Fecha V₁

$T_w < T_a$ & $P_a > P_e$ -> fase de arrefecimento -> V₃ fechada

& $P_a \leq P_e$ & $T_w > T_{ea}$ -> fase de arrefecimento -> V₃ fechada

& $P_a \leq P_e$ & $T_w \leq T_{ea}$ -> fase de adsorção -> V₃ aberta (garantir que só ocorre após fechar V₂).

Em cima estão representados alguns parâmetros, os quais vão estar referidos com os seus nomes na lista a baixo:

- T_w – Temperatura da água em redor do adsorisor;
- T_a – Temperatura do adsorisor;
- T_{ac} – Setpoint de temperatura para abertura da válvula de ligação adsorisor-condensador;
- T_{ea} – Setpoint de temperatura para abertura da válvula de ligação evaporador-adsorisor;
- P_a – Pressão no adsorisor;
- P_c – Pressão no condensador;
- P_e – Pressão no evaporador.

4. SISTEMA DE AQUISIÇÃO E CONTROLO

Para que todo o sistema e seus constituintes referidos anteriormente realizem as ações pretendidas, foi desenvolvido um programa em *Labview*. Este vai servir para realizar o controlo das válvulas e também para a aquisição de dados.

Para além do programa desenvolvido, são necessárias placas de aquisição para que o programa se consiga ligar ao sistema.

4.1. Placas de Aquisição

Foram seleccionadas duas placas de aquisição/controlo USB-2416 series da MC Measurement Computing (Figura 4.1), com até 32 canais analógicos single-ended ou 16 canais diferenciais para entrada de dados. Os canais analógicos podem ser configurados através de um software específico (Instacal) para funcionarem com termopares ou com sinais analógicos em tensão.



Figura 4.1 – Placa de aquisição Measurement Computing USB-2416

Neste caso em específico, temos os termopares para a aquisição de dados de temperatura, para os quais tendo necessidade de um modo diferente, apenas conseguimos utilizar 16 dos 32 canais de entrada que existem em cada placa.

Vão existir também 8 canais de saídas digitais, que vão ser necessários para realizar o controlo das válvulas.

Na Tabela 4.1 apresentam-se algumas das características mais importantes que caracterizam as placas a ser utilizadas.

Tabela 4.1. – Características da placa Measurement Computing USB-2416 para os canais de entrada

Gamas de entrada	Termopares: 0.078125V Modo Voltagem: 20V; 10V; 5V; 2.5V; 1.25V; 0.625V; 0.3125V; 0.15625V; 0.078125V
Voltagem máxima de trabalho	Para 20V – 20.01 V max Para todas as outras gamas – 10.25 V max

4.2. Programa de controlo

O programa tem como objetivos monitorizar o funcionamento do sistema, registar os valores das variáveis e controlar o funcionamento das válvulas. Foi escolhido o ambiente de programação LabView por ser uma linguagem especialmente adequada para aquisição de dados e controlo de sistemas.

Em seguida serão explicados tanto para que servem cada parte da interface concebida, como também como as várias partes do ambiente gráfico de programação e para que serve cada uma.

4.2.1. Controlo das válvulas

A interface do programa concebido vai está dividida em duas partes: a que vai ser utilizada para o controlo das válvulas e a que é utilizada para a aquisição de valores de pressão, caudal e temperatura.

Interface

Numa primeira parte está representada a interface do controlo das válvulas, com três botões distintos, cada um correspondente a uma das três válvulas. Está também representado um sinal luminoso que nos ajuda a perceber se o botão foi ativado ou não.

Para além dos botões que vão realizar o controlo, temos também para cada válvula, um espaço em branco onde nos é possível escolher um canal de umas das placas, no caso o canal onde cada uma das válvulas está ligada.

O botão stop que está representado serve para parar a execução desta parte do programa. O controlo de cada válvula vai estar localizado nas tabs criadas que serão explicadas na parte da aquisição de dados.

Ambiente Gráfico

Existe também uma parte de código que permite que tudo isto esteja funcional. Como se pode ver na Figura 4.2, Figura 4.12 é a mesma sequência realizada 3 vezes. Logo, apenas é necessário explicar o que foi feito para o controlo de uma das válvulas.

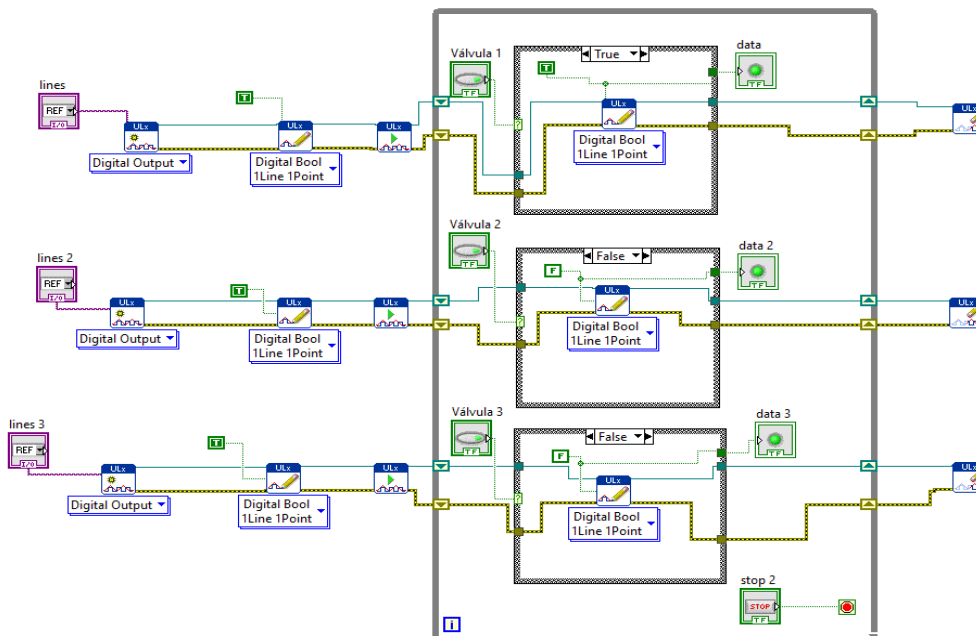


Figura 4.2 – Ambiente gráfico referente ao controlo das válvulas

Inicialmente, é necessário utilizar um canal de abertura, colocado em modo de saída digital (são as saídas a ser utilizadas para este controlo), após isto é utilizada uma função de escrita do sinal que vai ser enviado pela placa. Para finalizar esta fase, é utilizado um botão de *start* para que a partir daí comece o funcionamento do programa.

Após isto, o programa já está iniciado, sendo utilizado um *while loop* para que o programa esteja sempre em funcionamento, não fazendo apenas um ciclo. Com esta adição aparece automaticamente um botão de stop, com o qual podemos parar a execução do programa sempre que necessário.

Sendo que o que é pretendido é apenas abrir e fechar as válvulas, apenas será necessário implementar uma função *boolean*, ou seja, utilizar uma função de verdadeiro ou falso.

Dentro do *while loop* vai existir, para cada válvula, uma estrutura própria para quando se utiliza esta ferramenta, sendo ela dividida em duas secções: *True* e *False*. Ligado à estrutura vai existir um botão que vai controlar a abertura ou fecho da válvula.

Dentro da estrutura utilizada apenas irá existir uma função de escrita, no qual está ligado uma constante que vai definir se vai acontecer ou não, pois vai estar ligado a um *true* ou *false*. A esta constante vai estar ligada também um indicador luminoso

Por fim, já fora do *while loop*, é feita a ligação a uma função apagar, que faz com que, cada vez que o programa é parado, a informação vai voltar ao que se tinha no início.

Estes são os passos necessários para o controlo de uma válvula. As outras duas são controladas exatamente da mesma maneira.

4.2.2. Aquisição de dados

Numa segunda parte, temos a interface referente à aquisição de dados, na qual existirão vários gráficos para se conseguirem ver as evoluções das várias temperaturas e pressões ao longo do tempo. Cada gráfico vai corresponder a um componente do protótipo onde estarão a ser medidas temperaturas e pressões, ou seja, um referente ao evaporador, um ao condensador, um ao adsorção, e um ao depósito.

A decisão de utilizar todos estes gráficos serve para facilitar a leitura das temperaturas. Isto também se deve ao facto de na interface se ter optado pela utilização de um sistema de abas. Isto permite a existência de vários separadores, cada qual utilizado para um dos componentes onde estão a ser medidos os valores.

Interface

A primeira aba Figura 4.3, é composta por 4 barras em branco. Estas barras servem para ser colocados os canais das placas de aquisição que estão a ser utilizados para receber os sinais tanto de temperatura como de pressão.

Os sinais de temperatura foram separados em 3 barras para que se possa fazer a distinção das temperaturas que são lidas quer no adsoror, quer no condensador, quer no evaporador.

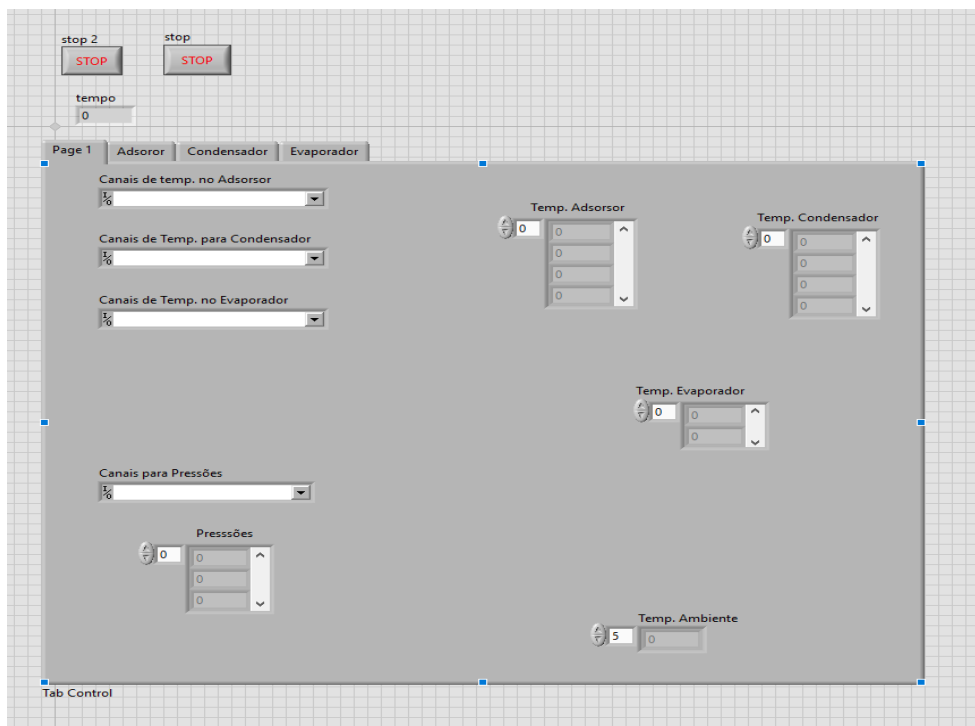


Figura 4.3 – Interface principal do programa de aquisição de dados

Para além disso, existem também 4 mostradores referentes às temperaturas que vão estar a ser lidas, para que nesta primeira aba, que é a página principal do programa, o utilizador consiga ver logo algumas das temperaturas que estão a ser lidas em todos os componentes do protótipo, juntado a essas a leitura também a da temperatura ambiente.

Para as pressões existe igualmente um mostrador, que vai apresentar as pressões que estão a ser lidas em cada componente, pois o objetivo é a presença de um sensor de pressão em cada um deles.

Por fim, existe novamente um botão de stop que está ligado apenas a esta parte do programa e um mostrador onde vai aparecer o tempo que passou durante todo o teste.

Como se consegue ainda ver pela Figura 4.3, a interface é composta por mais 3 separadores, cada um dedicado aos dados do adsorsor, do condensador e do evaporador, respetivamente.

Nas Figura 4.4, Figura 4.5, e Figura 4.6 é fácil de ver que a constituição de cada separador é a mesma.

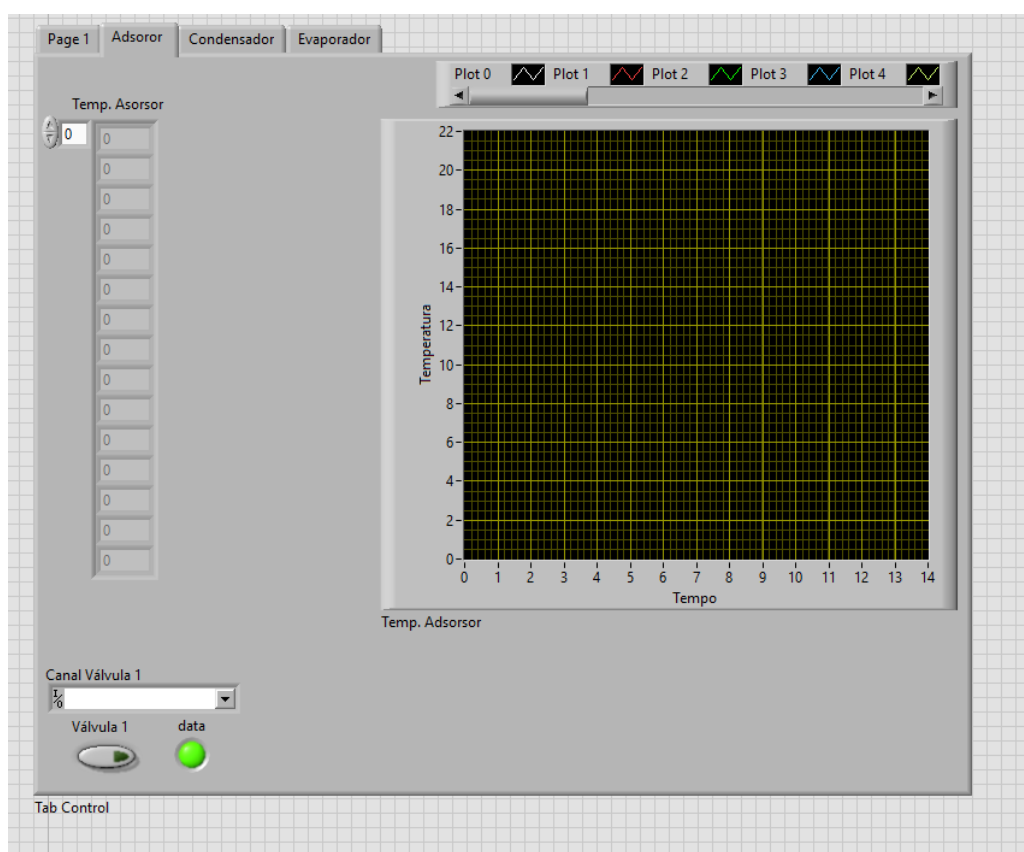


Figura 4.4 – Interface referente ao adsorsor

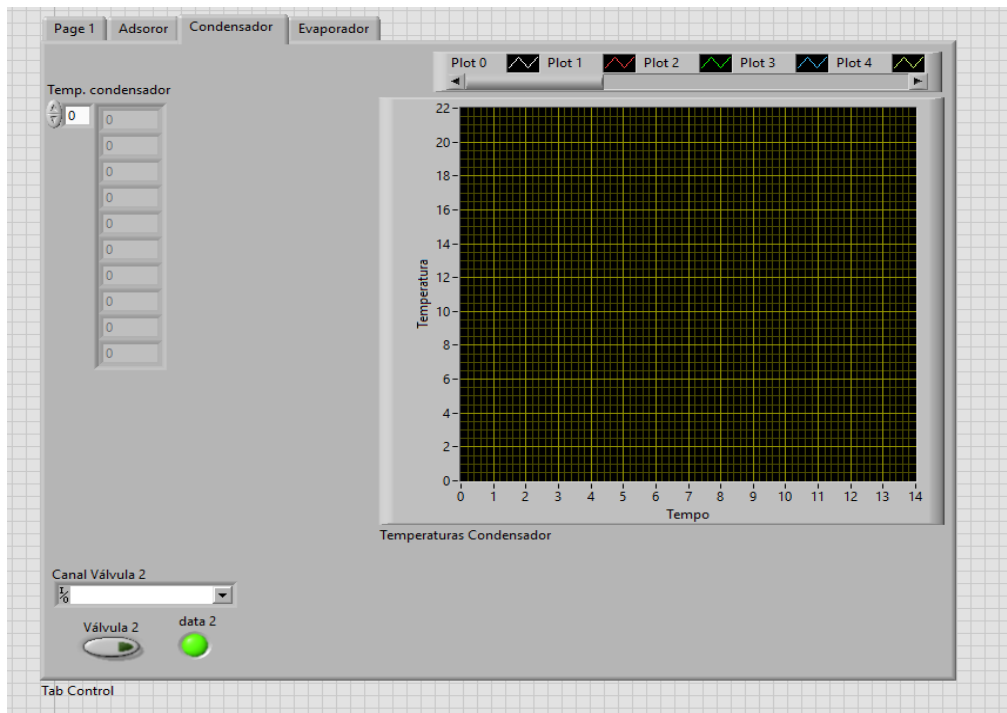


Figura 4.5 – Interface referente ao condensador

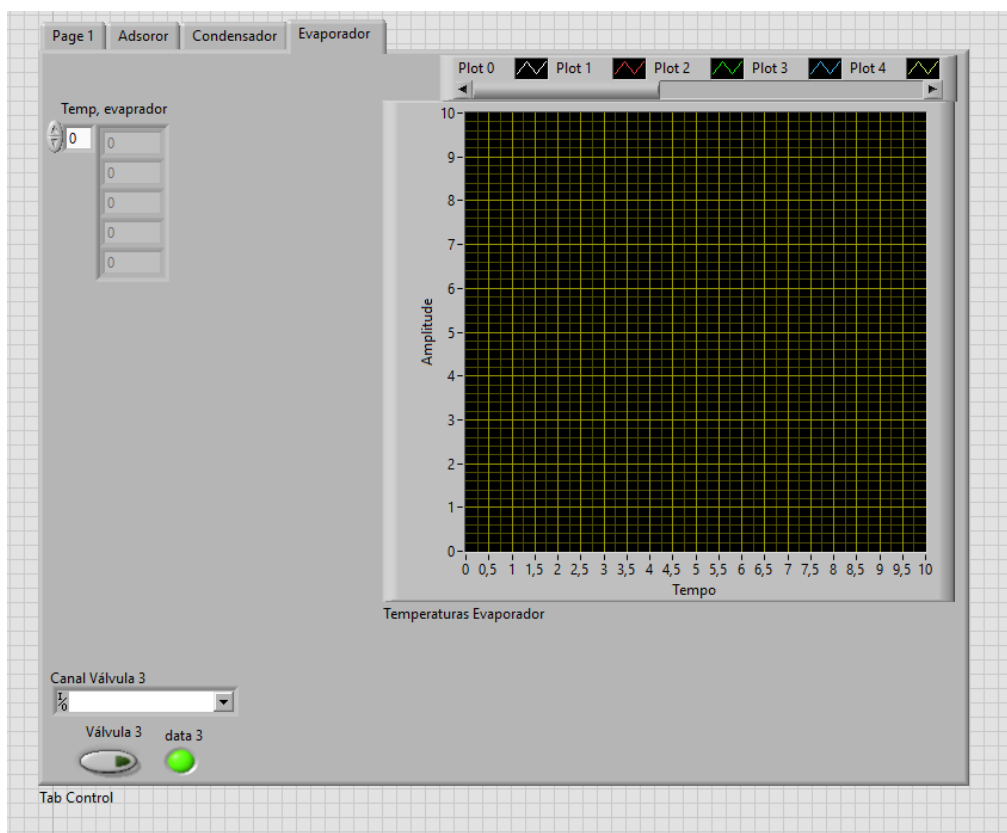


Figura 4.6 – Interface referente ao evaporador

Temos então nesta última parte da interface a presença em cada um dos separadores um gráfico onde se pode observar a evolução de todas as temperaturas ao longo do tempo, e um mostrador de todas as temperaturas que estão a ser registadas.

Ambiente Gráfico

Nas figuras Figura 4.7, Figura 4.9, e Figura 4.10, é perceptível que a forma de programar a leitura de temperaturas é a mesma para todos os 3 componentes do protótipo. Sendo assim basta uma explicação mais profunda de um dos casos.

Sendo a mais simples e por sua vez mais fácil de explicar, a figura referente a temperaturas lidas no evaporador é a que melhor vai ajudar na compreensão do que foi feito (Figura 4.7).

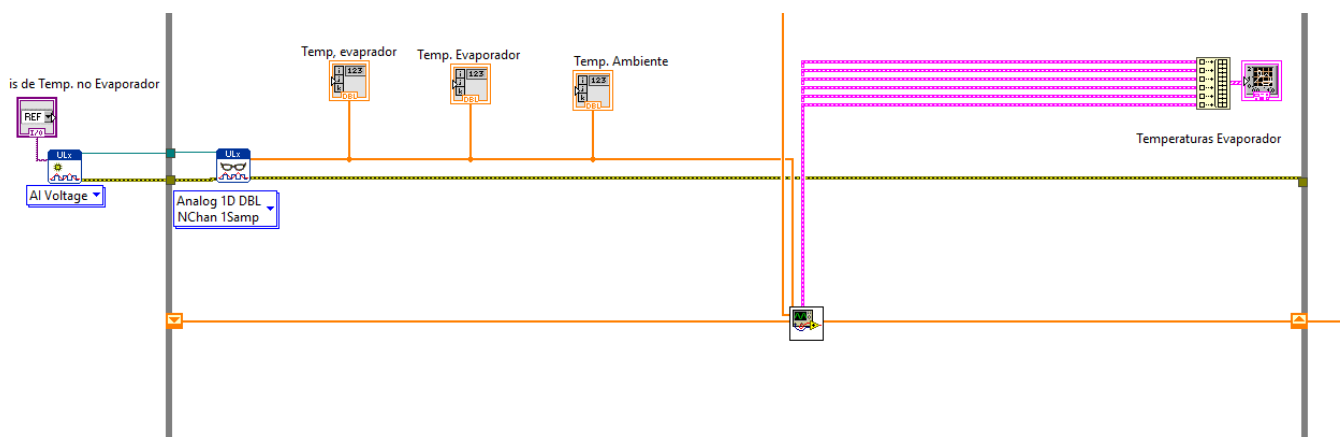


Figura 4.7 – Ambiente gráfico referente ao evaporador

Para a leitura dos valores que estão a ser captados pelas placas temos novamente de abrir um canal, que desta vez vai ser definido como uma entrada analógica, na qual vai ser criado um controlo com o qual se escolhem os canais de leitura que vão ser utilizados. Por sua vez, vai estar ligada a uma função de leitura que permite a leitura dos valores captados pelos termopares.

Partindo destes valores lidos, utilizam-se os indicadores que estão presentes na interface e onde vão aparecer os valores que estão a ser lidos ao longo do tempo.

Para que o ambiente gráfico não ficasse tão confuso foram realizados vários *Sub VI's*. Esta que é uma ferramenta utilizada para simplificar o ambiente gráfico. Na Figura 4.8 está representado um exemplo de um dos *Sub VI's* realizados. Estão representadas as ligações que são necessárias para que a se consigam representar todos os valores lidos. Para que isso seja possível é sempre utilizada uma função *Array Subset*, que permite a separação dos vários valores lidos. Após isto, torna a que seja possível ligar os vários canais a um gráfico para permitir a que seja avaliada a evolução das temperaturas.

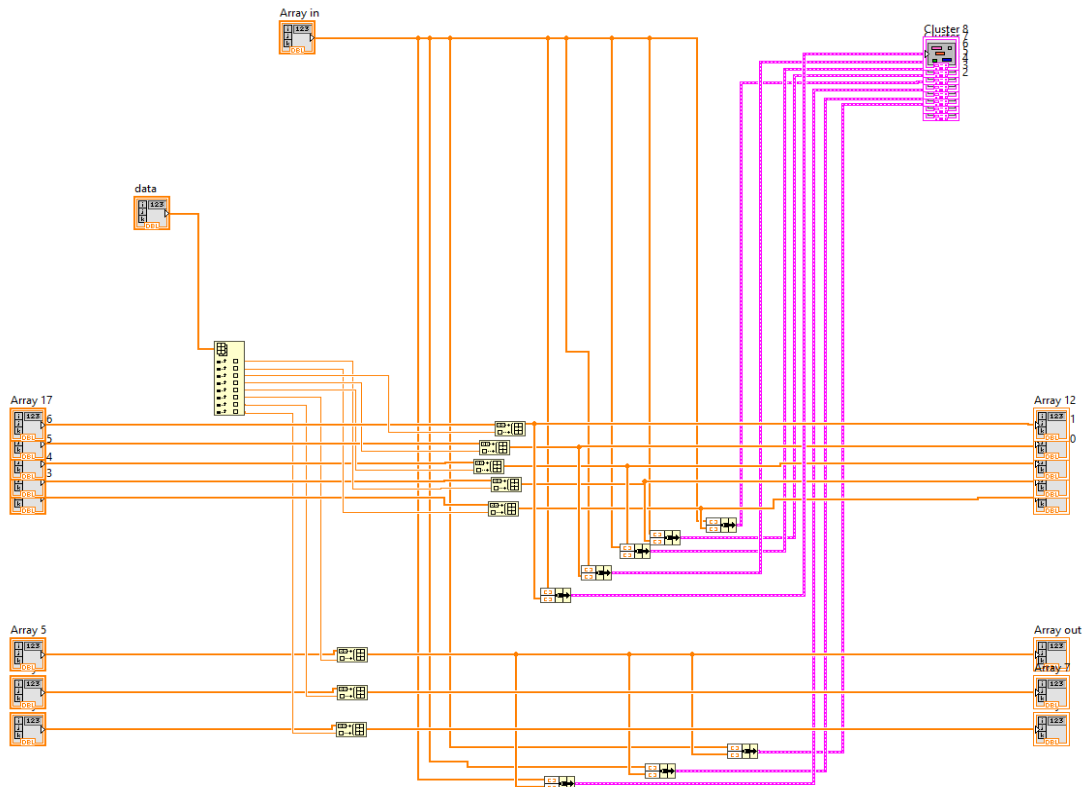


Figura 4.8 – Ambiente gráfico para explicar os Sub VI's

Na Figura 4.9 temos a parte explicada anteriormente, que é comum para a leitura das várias temperaturas. Mas temos, para além disso, uma parte referente à contagem do tempo no while loop (objeto novamente utilizado para que o programa consiga fazer leituras constantes até que seja ordenada a sua paragem). Esta contagem de tempo serve para marcar as leituras, ou seja, o tempo a ser determinado pelo programador que será o intervalo de tempo entre cada uma das leituras.

Esta função tempo é também utilizada para a entrada dos valores de temperatura no gráfico para que a evolução que esteja a ser observada seja ao longo do tempo.

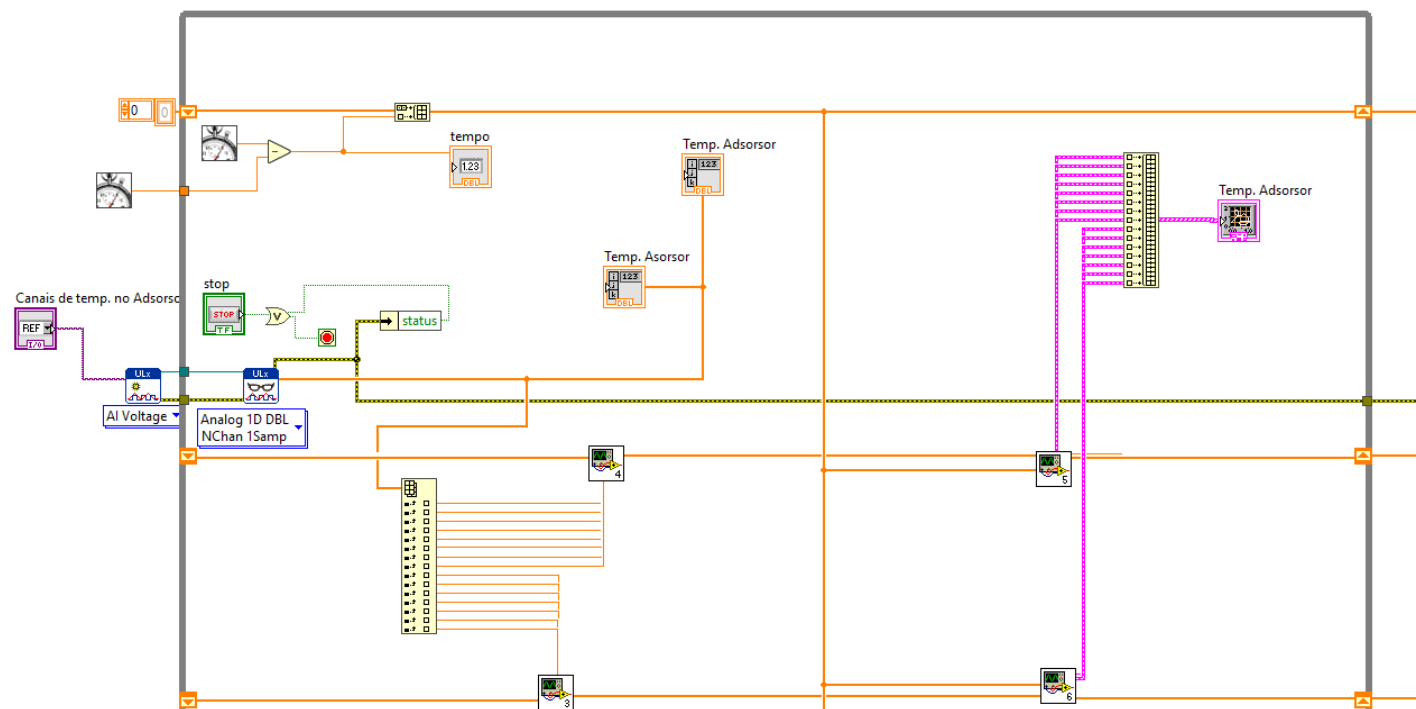


Figura 4.9 – Ambiente gráfico referente ao adsorcionador

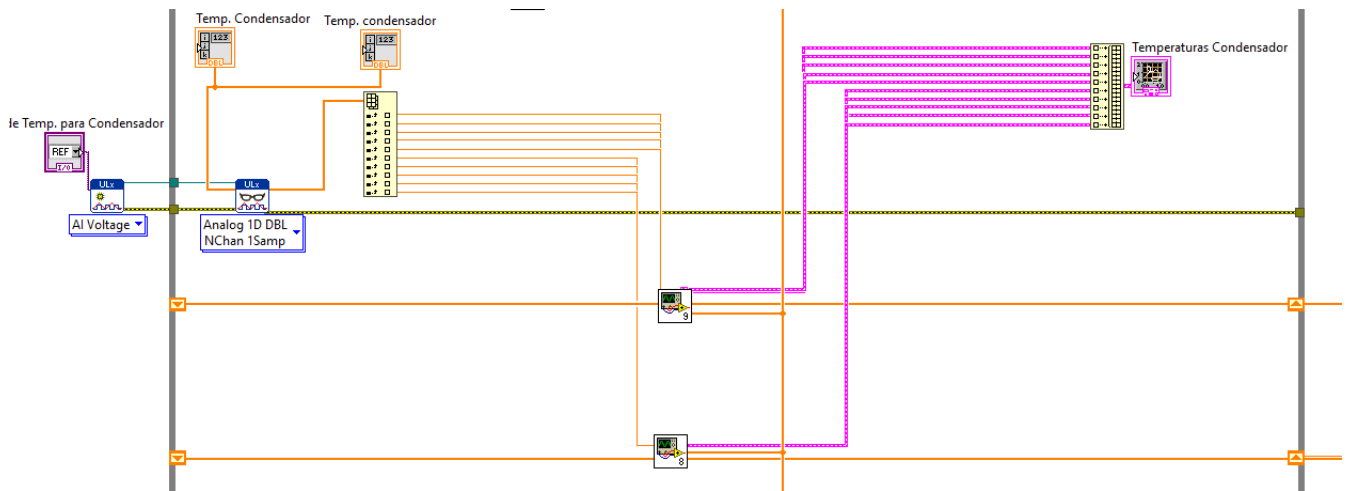


Figura 4.10 – Ambiente gráfico referente ao condensador

Para além de realizar a aquisição / leitura dos valores de temperatura, o programa realizado tem também a função de ler os valores de pressão. Na Figura 4.11 está representada a forma de fazer a leitura, que se percebe ser a mesma que para as temperaturas. A única diferença é para as pressões não se vai utilizar um gráfico, bastando apenas os indicadores na interface.

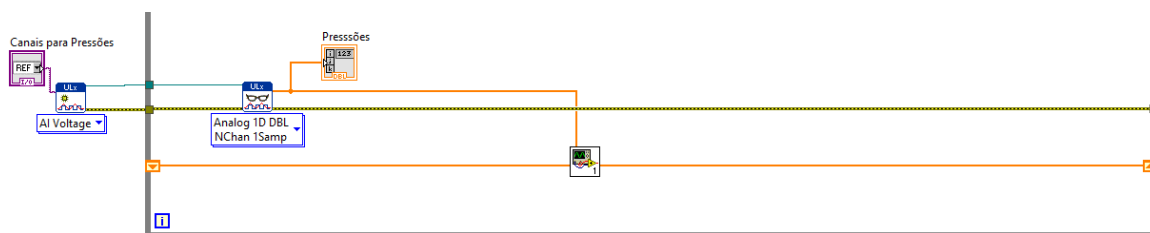


Figura 4.11 – Ambiente gráfico referente à aquisição de pressões

Para finalizar, vamos ter uma parte final representando na , as saídas dos valores lidos Figura 4.12, quer sejam os valores de temperatura e pressão, quer o da função do tempo que também já foi referida.

Todos estes valores vão ser ligados a uma função *Array*, permitindo assim ter só uma saída, que vai estar ligada a uma função de escrita. Está colocada fora do *while loop* propositadamente para que quando o programa for parado, ao utilizar o botão stop, todos os valores lidos sejam automaticamente transferidos para um ficheiro, o que facilitará a sua análise.

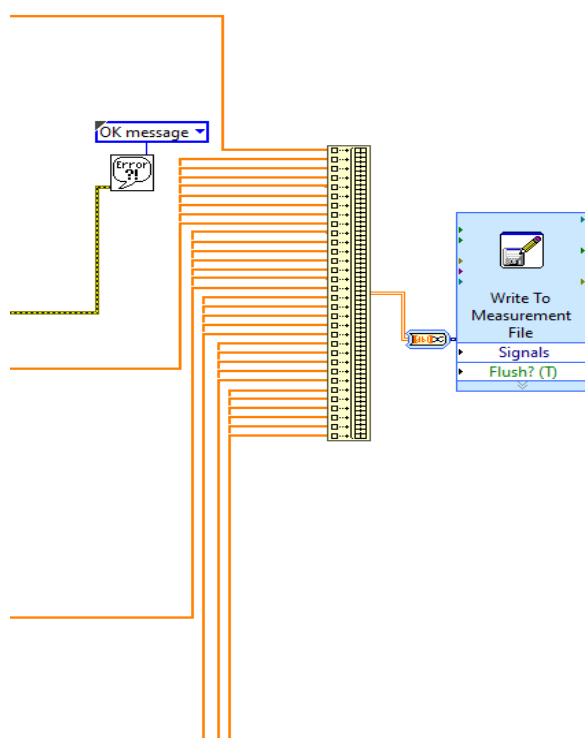


Figura 4.12 – Ambiente gráfico da aquisição dos valores lidos para um ficheiro.

O programa foi testado com a utilização das placas referidas e com a ajuda de termopares, o que demonstrou a funcionalidade do programa. Com isto pode-se concluir que o programa realizado pode ser uma opção válida para a aquisição de dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. A. Kalogirou, «Solar thermal collectors and applications», *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 30, n. 3. pp. 231–295, 2004. doi: 10.1016/j.peccs.2004.02.001.
- [2] Gupta GL e Garg HP, « System design in solar water heaters with natural circulation», *Solar Energy*, vol. 12, pp. 82–163, 1968.
- [3] Ong KS, «A finite difference method to evaluate the thermal performance of a solar water heater», *Solar Energy*, vol. 16, pp. 47–137, 1974.
- [4] Ong KS, «An improved computer program for the thermal performance of a solar water heater», *Solar Energy*, vol. 18, pp. 91–183, 1976.
- [5] Kudish AI, Santamura P, e Beaufort P, «Direct measurement and analysis of thermosyphon flow», *Solar Energy*, vol. 35, pp. 73–167, 1985.
- [6] Morrison GL e Braun JE, «System modelling and operation characteristics of thermosyphon solar water heaters», *Solar Energy*, vol. 34, pp. 389–405, 1985.
- [7] Hobson PA e Norton B, «A design nomogram for direct thermosyphon solar energy water heaters», *Solar Energy*, vol. 43, pp. 89–95, 1989.
- [8] Shariah AM e Shalabi B, «Optimal design for a thermosyphon solar water heater. Renewable Energy», *Renew Energy*, vol. 11, pp. 61–351, 1997.
- [9] S. Fischer, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen, B. Perers, P. Bergquist, e B. Hellström, «Collector test method under quasi-dynamic conditions according to the European Standard EN 12975-2», *Solar Energy*, vol. 76, n. 1–3, pp. 117–123, 2004, doi: 10.1016/j.solener.2003.07.021.
- [10] M. S. Fernandes, G. J. V. N. Brites, J. J. Costa, A. R. Gaspar, e V. A. F. Costa, «Review and future trends of solar adsorption refrigeration systems», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39. Elsevier Ltd, pp. 102–123, 2014. doi: 10.1016/j.rser.2014.07.081.
- [11] E. E. Anyanwu, «Review of solid adsorption solar refrigeration II:: An overview of the principles and theory», *Energy Convers Manag*, vol. 45, n. 7–8, pp. 1279–1295, 2004, doi: 10.1016/j.enconman.2003.08.003.

-
- [12] L. W. Wang, R. Z. Wang, e R. G. Oliveira, «A review on adsorption working pairs for refrigeration», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n. 3. pp. 518–534, Abril de 2009. doi: 10.1016/j.rser.2007.12.002.
- [13] Sur A. e Das R.K., «REVIEW ON SOLAR ADSORPTION REFRIGERATION CYCLE», *Int J Mech Eng Technol*, vol. 1, pp. 190–226, 2010.
- [14] D. B. Riffel e F. Antônio Belo, «Ar condicionado solar por adsorção: fundamentos e estado da arte Development of an embedded system for fault diagnosis in automobile engine using sound analysis View project Compressores temicos vs eletricos View project», 2007. [Em linha]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/258510931>
- [15] M. A. Alghoul, M. Y. Sulaiman, B. Z. Azmi, e M. A. Wahab, «Advances on multi-purpose solar adsorption systems for domestic refrigeration and water heating», *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, n. 5–6. pp. 813–822, Abril de 2007. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2006.09.008.
- [16] I. F. Odesola e A. James, «International Journal of Advanced Engineering Technology SOLAR ADSORPTION TECHNOLOGIES FOR ICE-MAKING AND RECENT DEVELOPMENTS IN SOLAR TECHNOLOGIES: A REVIEW», 2010.
- [17] D. Wang, J. Zhang, Y. Xia, Y. Han, e S. Wang, «Investigation of adsorption performance deterioration in silica gel-water adsorption refrigeration», *Energy Convers Manag*, vol. 58, pp. 157–162, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.enconman.2012.01.013.
- [18] D. C. Wang, Y. H. Li, D. Li, Y. Z. Xia, e J. P. Zhang, «A review on adsorption refrigeration technology and adsorption deterioration in physical adsorption systems», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, n. 1. pp. 344–353, Janeiro de 2010. doi: 10.1016/j.rser.2009.08.001.
- [19] M. S. Fernandes, G. J. V. N. Brites, J. J. Costa, A. R. Gaspar, e V. A. F. Costa, «A thermal energy storage system provided with an adsorption module – Dynamic modeling and viability study», *Energy Convers Manag*, vol. 126, pp. 548–560, Out. 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.08.032.
- [20] «INHALTSVERZEICHNIS ANLAGENDOKUMENTATION Index of documentation folder for the following unit INHALTSVERZEICHNIS KAPITEL (Chapter Index) 1 BETRIEBSANLEITUNG (Operating Instructions) 1.1 CE-KONFORMITÄTSERKLÄRUNG GESAMTANLAGE (Declaration of conformity)», 2012.
- [21] «ST2 - ZWorld TS» Manual.
- [22] L. GmbH, «Valves» Manual.
-

