

1 2 9 0



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Leonardo Dias de Albuquerque

Sistema de Acumulação de Energia  
Térmica Solar com Módulo de  
Adsorção: Comparação do Desempenho  
em Edifícios de Diferentes Dimensões

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica,  
no ramo de Energia e Ambiente, orientada pelo Professor Doutor Adélio  
Manuel Rodrigues Gaspar e pelo Professor Doutor Marco Alexandre dos  
Santos Fernandes e apresentada ao Departamento de Engenharia  
Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de  
Coimbra

Janeiro de 2022



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

# Sistema de Acumulação de Energia Térmica Solar com Módulo de Adsorção: Comparação do Desempenho em Edifícios de Diferentes Dimensões

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

**Autor**

**Leonardo Dias de Albuquerque**

**Orientadores**

**Adélio Manuel Rodrigues Gaspar**

**Marco Alexandre dos Santos Fernandes**

**Júri**

**Presidente**

**Professor Doutor José Joaquim da Costa**

**Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra**

**Vogais**

**Professor Doutor Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites**

**Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Coimbra**

**Professor Doutor Marco Alexandre dos Santos Fernandes**

**Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Coimbra**

**Colaboração Institucional**

---



UNIÃO EUROPEIA  
Fundo Europeu  
de Desenvolvimento Regional

Este trabalho tem o apoio do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) via COMPETE – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI), no âmbito do projeto AdsorTech – Tecnologia de adsorção para armazenamento suplementar de energia térmica (47070).

**Coimbra, Janeiro, 2022**



*"The road to success and the road to failure are almost exactly the same" - Colin R. Davis*



## Agradecimentos

Aos meus orientadores, Profs. Doutores Adélio Gaspar e Marco Fernandes, um grande agradecimento pelo apoio, pelo incentivo e pela disponibilidade que demonstraram ao longo deste período e que tornaram possível a realização desta dissertação.

Aos meus colegas e amigos, obrigado. Obrigado pela motivação, pela partilha, pela vivência e por me ensinarem o verdadeiro espírito académico de Coimbra. Afinal é mesmo verdade, "Coimbra tem mais encanto na hora da despedida".

À minha família, particularmente aos meus pais, um agradecimento especial e com muito carinho, pelo apoio incansável, por acreditarem em mim em todos os momentos e pelo amor demonstrado ao longo da vida.





## Resumo

A transição energética urge num momento em que as alterações climáticas e o previsto aumento do consumo global de energia figuram como uma ameaça ao planeta. Esta mudança foca-se na descarbonização, sendo o desenvolvimento de novas tecnologias de armazenamento de energia de fonte renovável fulcral neste processo. O gás é o combustível mais utilizado para a preparação de Águas Quentes Sanitárias (AQS) no setor residencial, representando uma parcela considerável da energia final consumida na União Europeia (UE). De modo a reduzir, ou mesmo substituir, o uso dessa fonte de energia por fontes de cariz renovável, como é o caso da energia solar, os sistemas de acumulação de energia térmica desempenham um papel importante. Neste contexto, tem-se vindo a estudar a contribuição que a integração da tecnologia de sorção possa vir a ter neste tipo de sistemas, uma vez que apresenta valores de densidade de armazenamento e eficiência superiores aos sistemas convencionais (armazenamento sensível e latente).

Neste trabalho, um sistema de armazenamento de energia térmica com módulo de adsorção, anteriormente desenvolvido com recurso aos programas TRNSYS e MATLAB para o caso de uma moradia unifamiliar (4 pessoas), foi usado para analisar a influência da gama de consumo de AQS no desempenho do sistema. No estudo, consideram-se edifícios com 25, 50, 75 e 100 pessoas e é estudada a influência dos parâmetros geométricos dos vários componentes do sistema.

Para os vários níveis de consumo estudados, verificou-se que um condensador mais longo, um evaporador com tubos de menor diâmetro e alhetas mais longas, bem como um adsorção mais comprido, de menor diâmetro e com um maior número de alhetas interiores melhoram a eficiência do sistema. Em contrapartida, a utilização de alhetas exteriores no adsorção não melhora o desempenho do sistema, pelo que podem ser desprezadas. A utilização de reservatórios de pré-aquecimento de maiores dimensões aumenta o desempenho, embora tenha que se ter em conta o custo e o espaço adicionais necessários.

As configurações finais dos sistemas estudados com módulo de adsorção permitem obter poupanças relativas de energia de 15,0%; 16,0%; 13,3%; 10,8% e 8,9% em relação aos sistemas convencionais para os casos estudados de 4, 25, 50, 75 e 100 pessoas, respetivamente. As correspondentes frações renováveis dos sistemas com adsorção foram de 79,8%; 78,7%; 80,0%; 80,8% e 81,5%, cerca de 2 a 4% superior às frações renováveis obtidas para os sistemas convencionais. Tendo em conta apenas o meio adsorvente, as respetivas densidades de armazenamento de energia ponderada durante os períodos de descarga obtidas foram 38,8 kWh/m<sup>3</sup>; 40,1 kWh/m<sup>3</sup>; 38,9 kWh/m<sup>3</sup>; 40,2 kWh/m<sup>3</sup> e 41,5 kWh/m<sup>3</sup>. Em síntese, à medida que a dimensão do sistema aumenta por causa de um maior consumo diário de AQS, a poupança relativa de energia tende a diminuir. Por outro lado, a fração renovável e a densidade de armazenamento tendem a aumentar ligeiramente.

**Palavras Chave:** Água Quente Sanitária, Armazenamento de Energia Térmica, Adsorção, TRNSYS



## Abstract

The energy transition is urgent at a time when climate change and the predicted increase in global energy consumption pose a threat to the planet. This shift focuses on decarbonization, being the development of new renewable energy storage technologies essential to this process. Gas is the most widely used fuel for Domestic Hot Water (DHW) preparation in the residential sector, representing a considerable share of the final energy consumed in the European Union (EU). In order to reduce, or even replace, the use of this energy source with renewable sources, such as solar energy, thermal energy storage systems play an important role. In this context, it has been studied the contribution that the integration of sorption technology may have in this type of systems, since it presents higher values of storage density and efficiency than conventional systems (sensitive and latent storage).

In this work, a thermal energy storage system with adsorption module, previously developed using TRNSYS and MATLAB programs for the case of a single family house (4 people), was used to analyze the influence of the DHW consumption range on the system performance. In the study buildings with 25, 50, 75 and 100 people are considered, and the influence of the geometric parameters of the various system components is studied.

For the various levels of consumption studied, it was found that a longer condenser, an evaporator with smaller diameter tubes and lengthy fins, as well as a longer, smaller diameter adsorber with a greater number of inner fins improve the efficiency of the system. In contrast, the use of outer fins on the adsorber doesn't improve the performance of the system and can therefore be disregarded. The use of larger preheat tanks increases performance, although the additional cost and space required must be considered.

The final configurations of the systems studied with adsorption module allow relative energy savings of 15.0%, 16.0%, 13.3%, 10.8% and 8.9% compared to conventional systems for the cases studied of 4, 25, 50, 75 and 100 people, respectively. The corresponding renewable fractions of the systems with adsorber were 79.8%, 78.7%, 80.0%, 80.8% and 81.5%, about 2 to 4% higher than the renewable fractions obtained for the conventional systems. Taking into account only the adsorptive medium, the respective weighted energy storage densities during the discharge periods obtained were 38.8 kWh/m<sup>3</sup>, 40.1 kWh/m<sup>3</sup>, 38.9 kWh/m<sup>3</sup>, 40.2 kWh/m<sup>3</sup> and 41.5 kWh/m<sup>3</sup>. In summary, as the system size increases because of higher daily DHW consumption, the relative energy savings tend to decrease, on the other hand, the renewable fraction and storage density tend to increase slightly.

**Keywords:** Domestic Hot Water, Thermal Energy Storage, Adsorption, TRNSYS



## Índice

<b>Agradecimentos</b>	<b>vii</b>
<b>Resumo</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xix</b>
<b>Lista de Abreviações e Acrónimos</b>	<b>xxi</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>xxiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento . . . . .	1
1.2 Objetivos e Motivação . . . . .	3
<b>2 Estado da Arte</b>	<b>5</b>
2.1 Armazenamento de energia térmica . . . . .	5
2.1.1 Armazenamento de calor sensível . . . . .	6
2.1.2 Armazenamento de calor latente . . . . .	7
2.1.3 Armazenamento de calor termoquímico . . . . .	7
2.2 Sistemas de adsorção . . . . .	8
2.2.1 Descrição do processo de armazenamento por adsorção . . . . .	10
2.2.2 Pares de trabalho . . . . .	12
2.2.3 Breve história sobre sistemas desenvolvidos . . . . .	13
<b>3 Modelação de um Sistema de Armazenamento de Energia Térmica com Módulo de Adsorção</b>	<b>17</b>
3.1 Descrição e funcionamento do sistema e dos respetivos componentes . . . . .	17
3.1.1 Reservatórios . . . . .	19
3.1.2 Adsorção . . . . .	19
3.1.3 Condensador . . . . .	20
3.1.4 Evaporador . . . . .	21
3.2 Modelação Dinâmica do Sistema de Armazenamento por Adsorção . . . . .	21
3.3 Perfil de consumo . . . . .	23
3.4 Configuração inicial dos sistemas . . . . .	24

<b>4 Resultados e Discussão</b>	<b>27</b>
4.1 Análise da dimensão dos componentes do sistema . . . . .	27
4.2 Análise da dimensão global do sistema . . . . .	33
<b>5 Conclusão</b>	<b>39</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>41</b>
<b>Apêndice A Perfis de consumo</b>	<b>45</b>
<b>Apêndice B Evolução anual da energia libertada pelo adsorção para a água no final de cada período de descarga</b>	<b>47</b>
<b>Anexo A Parâmetros geométricos dos componentes do sistema de adsorção</b>	<b>49</b>

## Lista de Figuras

1.1	Consumo de energia final por setor [Adaptado de Pordata (3/11/2021)]. . . . .	2
1.2	Consumo de energia final no setor doméstico por utilização final [Adaptado de Eurostat (3/11/2021)]. . . . .	2
1.3	Consumo de energia final no setor doméstico por uso [Adaptado de Eurostat (3/11/2021)]. . . . .	2
2.1	Sistemas de armazenamento de energia térmica [Adaptado de Yang <i>et al.</i> 2021]. . . . .	5
2.2	Diagrama P-T de um ciclo básico de adsorção [Fernandes 2017]. . . . .	9
2.3	Princípio de funcionamento de um sistema de armazenamento de energia térmica por adsorção [Fernandes 2017]. . . . .	11
2.4	Sistema de armazenamento de energia térmica sazonal [Núñez <i>et al.</i> 2003].	13
2.5	Sistema compacto de armazenamento de energia térmica [Jaehnig <i>et al.</i> 2006]. . . . .	14
2.6	Diagrama esquemático de um sistema MCES [Kantima Iammak & Kiatsiriroj 2004]. . . . .	14
2.7	<i>Layout</i> esquemático de um micro sistema CCHP [Lombardo <i>et al.</i> 2021].	15
2.8	Diagrama em bloco da configuração experimental [Chaudhari & Desai 2021].	15
2.9	Esquema de um sistema de armazenamento de energia térmica para produção de AQS com módulo de adsorção [Fernandes 2017]. . . . .	16
3.1	Esquema de princípio do sistema de armazenamento de energia térmica com módulo de adsorção [Fernandes 2017]. . . . .	18
3.2	Reservatórios (a) principal e (b) secundário do sistema. $V$ - Volume; $A_c$ - Área de secção transversal; $h$ - Altura; 1 - Reservatório principal; 2 - Reservatório secundário. . . . .	19
3.3	Adsorisor. $L$ - Comprimento do adsorisor; $D_{o,ads}$ - Diâmetro exterior; $D_{i,ads}$ - Diâmetro interior; $D_{h,ads}$ - Diâmetro do furo; $e_m$ - Espessura do metal; $e_a$ - Espessura do adsorvente; $D_{f,ads}$ - Diâmetro limitado pelas alhetas interiores; $h_{f,ads}$ - Altura das alhetas interiores; $e_{f,ads}$ - Espessura das alhetas interiores; $S_{f,ads}$ - Espaçamento entre as alhetas interiores; $D_{fext,ads}$ - Diâmetro das alhetas exteriores; $h_{fext,ads}$ - Altura das alhetas exteriores; $e_{fext,ads}$ - Espessura das alhetas exteriores; $S_{fext,ads}$ - Espaçamento entre as alhetas exteriores. . . . .	20

3.4	Condensador imerso no reservatório de pré-aquecimento. $D$ - Diâmetro dos reservatórios; $h_2$ - Altura do reservatório secundário; $D_{o,cond}$ - Diâmetro externo; $h_{cond}$ - Altura; $e_{cond}$ - Espessura; $p_{cond}$ - Passo das voltas; $d_{x,i}$ - Distância horizontal entre os tubos do condensador; $d_{x,t-par}$ - Distância horizontal condensador - parede reservatório; $d_{y,t-par}$ - Distância vertical condensador - parede reservatório; $d_{y,t-t}$ - Distância vertical entre fiadas do condensador; $\alpha_{cond}$ - Ângulo das fiadas do condensador. . . . .	20
3.5	Evaporador. $L_{t,evap}$ - Altura de cada tubo; $D_{o,evap}$ - Diâmetro externo dos tubos; $D_{i,evap}$ - Diâmetro interno; $e_{evap}$ - Espessura do tubo; $L_{f,evap}$ - Altura das alhetas; $D_{f,evap}$ - Diâmetro de cada tubo incluindo alhetas; $e_{fext,evap}$ - Espessura das alhetas; $S_{fext,tevap}$ - Espaçamento entre as alhetas.	21
3.6	Sistema solar térmico modelado no TRNSYS. . . . .	22
3.7	Perfis de consumo diário para (a) uma moradia com 4 pessoas, (b) um edifício com 100 pessoas. . . . .	23
4.1	Energia consumida num ano pelo aquecedor de apoio nos sistemas convencional e com módulo de adsorção para a configuração inicial (poupança relativa de energia no topo das barras). . . . .	27
4.2	Influência do volume do reservatório secundário na eficiência do sistema.	28
4.3	Influência do diâmetro do condensador na eficiência do sistema. . . . .	29
4.4	Variação da poupança anual com o diâmetro dos tubos do evaporador. . . . .	31
4.5	Influência da espessura dos tubos do evaporador na eficiência do sistema.	31
4.6	Variação da poupança anual com o número de alhetas do evaporador. . . . .	31
4.7	Influência do diâmetro do adsorção na poupança anual. . . . .	32
4.8	Influência das alhetas exteriores do adsorção na poupança relativa anual de energia. . . . .	33
4.9	Energia consumida num ano pelo aquecedor de apoio nos sistemas convencional e com módulo de adsorção para a configuração final (poupança relativa de energia no topo das barras). . . . .	34
4.10	Fração renovável dos sistemas com e sem módulo de adsorção. . . . .	35
4.11	Evolução anual da temperatura da água no nodo superior do reservatório para os sistemas convencional e com módulo de adsorção para o caso de estudo de 50 pessoas. . . . .	37
4.12	Evolução anual da energia libertada pelo adsorção para a água no final de cada período de descarga para caso de estudo de 50 pessoas. . . . .	38
Ap.1	Perfil de consumo considerado para 4 pessoas. . . . .	45
Ap.2	Perfil de consumo considerado para 25 pessoas. . . . .	45
Ap.3	Perfil de consumo considerado para 50 pessoas. . . . .	46
Ap.4	Perfil de consumo considerado para 75 pessoas. . . . .	46
Ap.5	Perfil de consumo considerado para 100 pessoas. . . . .	46
Ap.6	Evolução anual da energia libertada pelo adsorção para a água no final de cada período de descarga no caso de estudo para 4 pessoas. . . . .	47
Ap.7	Evolução anual da energia libertada pelo adsorção para a água no final de cada período de descarga no caso de estudo para 25 pessoas. . . . .	47
Ap.8	Evolução anual da energia libertada pelo adsorção para a água no final de cada período de descarga no caso de estudo para 50 pessoas. . . . .	48



Ap.9 Evolução anual da energia libertada pelo adsorção para a água no final de cada período de descarga no caso de estudo 75 pessoas. . . . .	48
Ap.10 Evolução anual da energia libertada pelo adsorção para a água no final de cada período de descarga no caso de estudo para 100 pessoas. . . . .	48
An.1 Reservatório principal. . . . .	49
An.2 Reservatório secundário. . . . .	50
An.3 Adsorção. . . . .	51
An.4 Representação de uma alheta longitudinal [Adaptado de Çengel 2006]. . . . .	52
An.5 Representação de uma alheta anelar [Adaptado de Çengel 2006]. . . . .	52
An.6 Evaporador. . . . .	53
An.7 Representação das alhetas do evaporador. . . . .	54
An.8 Condensador imerso no reservatório de pré-aquecimento. . . . .	55



## Lista de Tabelas

3.1	Configuração inicial do sistema para as diferentes volumetrias. . . . .	25
4.1	Parâmetros do reservatório secundário analisados. . . . .	28
4.2	Parâmetros do condensador analisados. . . . .	29
4.3	Parâmetros finais do condensador. . . . .	30
4.4	Parâmetros do evaporador analisados. . . . .	30
4.5	Parâmetros do adsorção analisados. . . . .	32
4.6	Variáveis alteradas com a remoção das alhetas exteriores do adsorção. . .	33
4.7	Configuração final do sistema. . . . .	34
4.8	Consumo médio mensal do aquecedor de apoio para os sistemas convenci- onal e com módulo de adsorção para o caso de 50 pessoas. . . . .	36
4.9	Temperaturas médias mensais da água: do reservatório principal (nodo superior) para os sistemas convencional e com módulo de adsorção, do reservatório secundário e da rede, para o caso de 50 pessoas. . . . .	36
4.10	Densidade de armazenamento de energia no adsorção. . . . .	38
An.1	Parâmetros geométricos do reservatório principal. . . . .	49
An.2	Parâmetros geométricos do reservatório secundário. . . . .	50
An.3	Parâmetros geométricos do adsorção. . . . .	51
An.4	Propriedades do adsorvente. . . . .	51
An.5	Parâmetros geométricos das alhetas interiores com secção longitudinal do adsorção. . . . .	52
An.6	Parâmetros geométricos das alhetas exteriores com secção anelar do adsorção. . . . .	52
An.7	Parâmetros geométricos do evaporador. . . . .	53
An.8	Parâmetros geométricos das alhetas do evaporador. . . . .	54
An.9	Parâmetros geométricos do condensador. . . . .	55



## Lista de Abreviações e Acrónimos

**AQS** Águas Quentes Sanitárias

**ATES** *Aquifer Thermal Energy Storage*/ Armazenamento de Energia Térmica em Aquífero

**BTES** *Borehole Thermal Energy Storage*/ Armazenamento de Energia Térmica em Furo

**LHS** *Latent Heat Storage*/ Armazenamento de Calor Latente

**PCM** *Phase Change Material*/ Material de Mudança de Fase

**PTES** *Pit Thermal Energy Storage*/ Armazenamento de Energia Térmica em Poço

**SHS** *Sensible Heat Storage*/ Armazenamento de Calor Sensível

**STES** *Seasonal Thermal Energy Storage*/ Armazenamento de Energia Térmica Sazonal

**THS** *Thermochemical Heat Storage*/ Armazenamento de Calor Termoquímico

**TTES** *Tank Thermal Energy Storage*/ Armazenamento de Energia Térmica em Tanque

**UE** União Europeia



## Nomenclatura

$A$	Área [m <sup>2</sup> ]
$b_{tr}$	Coefficiente que representa a relação de temperatura entre espaços climatizados e não climatizados [-]
$c_p$	Calor específico a pressão constante [J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]
$D$	Diâmetro [m]
$d$	Distância [m]
$E$	Porosidade [-]
$e$	Espessura [m]
$E_d$	Densidade de armazenamento de energia [kWh/m <sup>3</sup> ]
$f$	Fração [-]
$L$	Calor específico latente [J · kg <sup>-1</sup> ]; Comprimento [m]
$m$	Massa [kg]
$P$	Pressão [Pa]; Perdas térmicas [J]; Poupança de energia [J ou %]
$p$	Passo [m]
$Q$	Energia térmica [J]
$S$	Espaçamento [m]
$T$	Temperatura [K; °C]
$t$	Tempo [h]
$V$	Volume [m <sup>3</sup> ]
$X$	Teor de adsorvato adsorvido [kg <sub>adsorvato</sub> /kg <sub>adsorvente seco</sub> ]

## Símbolos gregos

$\alpha$	Ângulo [°]
$\Delta$	Intervalo, variação [-]

$\rho$  Massa específica [kg/m<sup>3</sup>]

### Índices inferiores

*a* Adsorvente

*abs* Absoluta

*ads* Adsorção; Adsorção; Sistema com módulo de adsorção

*c* Condensação

*col* Coletores solares

*cond* Condensador

*conv* Sistema convencional

*cor* Corrigido

*des* Dessorção

*e* Vaporização

*f* Alhetas interiores

*fext* Alhetas exteriores

*h* Furo

*hx* Serpentina solar

*i* Interior

*m* Metálica

*max* Máximo

*med* Médio

*min* Mínimo

*o* Exterior

*par* Parede

*rel* Relativa

*ren* Renovável

*t* Tubo; Total

*w* Água

*x* Horizontal

*y* Vertical

1 Reservatório principal

2 Reservatório secundário



# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

O setor da energia é responsável por cerca de 75% das emissões que provocaram o aumento da temperatura média global em 1,1 °C, desde a época pré-industrial [WEO 2021]. O aquecimento global é uma das alterações climáticas que constitui, de forma evidente e cada vez mais frequente, uma ameaça planetária, sendo responsável pelo acontecimento de fenómenos prejudiciais, tais como: condições meteorológicas extremas (secas, inundações), subida do nível médio do mar, perda de biodiversidade, entre outras. A *World Energy Outlook 2021* (WEO-21) prevê um aumento da população global em cerca 26% (2 mil milhões de pessoas) até 2050 e, com isso, um aumento no consumo global de energia, o que implica uma maior emissão de gases com efeito de estufa, colocando o planeta em risco.

Segundo a *Global Energy Review 2021*, o consumo de energia global vai aumentar 4,6% em 2021, mais 0,5% do que em 2019, antes do início da pandemia de COVID19, e prevê-se um aumento de 4,8% da emissão global de CO<sub>2</sub>, menos 1,2% relativamente ao pico de 2019. É, contudo, o maior aumento anual da última década. Assim, é urgente tomar medidas, para combater os problemas ambientais, para contrariar a emissão deste gás para a atmosfera, nomeadamente uma maior utilização de energias renováveis. Ainda neste âmbito, de acordo com a organização *International Energy Agency* (IEA), para além do crescimento de 3% registado na utilização de energias renováveis em 2020 e com projeções para aumentar em 2021, a percentagem de energias renováveis, para a produção de eletricidade, também deve aumentar para 30% em 2021.

A Comissão Europeia apresentou o plano Pacto Ecológico Europeu que, através da Lei Europeia do Clima, pretende atingir a neutralidade climática até 2050 e a redução da emissão de gases com efeito de estufa em 55% até 2030 face aos níveis registados em 1990. Um dos objetivos estabelecidos na revisão da DIRETIVA 2018/2001 é a utilização de energias renováveis em pelo menos 32% da energia total consumida até 2030. Tendo em conta estas imposições, a utilização de sistemas de armazenamento de energia térmica apresenta-se como uma boa solução, permitindo a acumulação da energia solar (fonte intermitente renovável), de modo a que esta esteja disponível nos períodos em que seja necessária.

A energia final consumida é dividida entre vários setores, entre eles agricultura, indústria, transportes e residencial. Segundo dados recolhidos em Pordata e Eurostat, a energia utilizada no setor doméstico em 2019 representa uma parcela de 17,7% e 26,3% da energia final consumida em Portugal e na União Europeia (UE), respetivamente. No setor residencial, a fração de energia usada para a produção de Águas Quentes Sanitárias (AQS) é de 17,6% em Portugal e de 14,8% na UE, sendo que 19,2% da energia provém de fontes renováveis em Portugal e 13,1% na UE. O gás é o combustível mais utilizado na UE para o aquecimento de água e o segundo mais utilizado em Portugal, sendo o pe-

## I. Introdução

tróleo e os produtos petrolíferos os mais usados para este fim a nível nacional. Ou seja, a utilização de energias renováveis para a produção de AQS apenas representa uma parcela de 0,6% e 0,5% da energia final consumida em Portugal e na UE, na devida ordem. Estas informações podem ser consultadas nos gráficos das Figuras 1.1, 1.2 e 1.3.

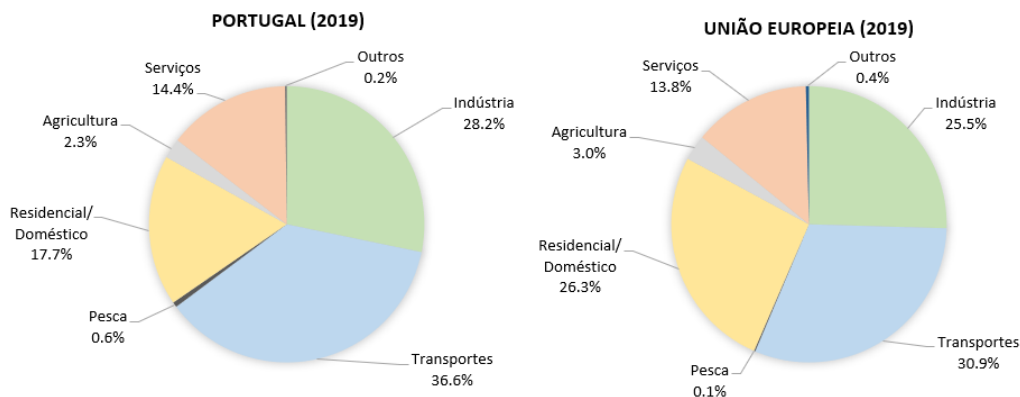


Figura 1.1: Consumo de energia final por setor [Adaptado de Pordata (3/11/2021)].

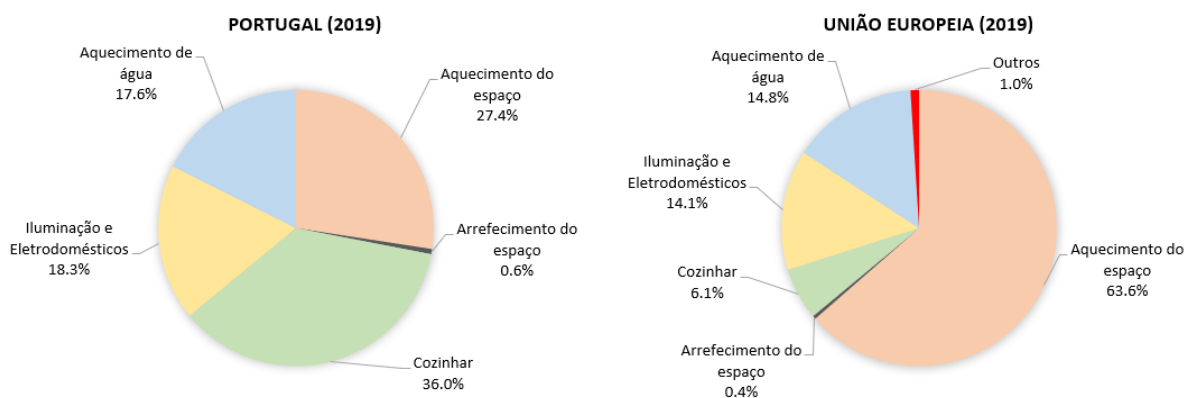


Figura 1.2: Consumo de energia final no setor doméstico por utilização final [Adaptado de Eurostat (3/11/2021)].

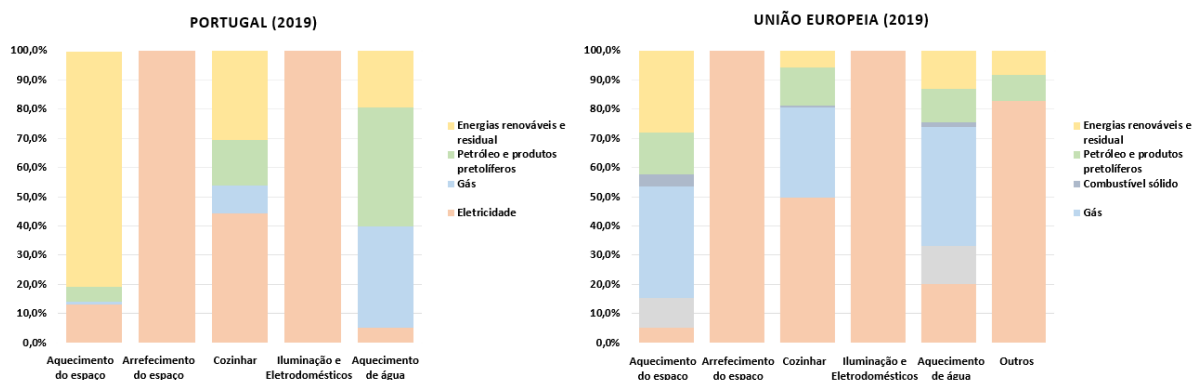


Figura 1.3: Consumo de energia final no setor doméstico por uso [Adaptado de Eurostat (3/11/2021)].

Para atingir as metas estabelecidas para os países da UE é necessário encontrar soluções, e neste contexto a implementação de tecnologias de armazenamento de energia

térmica em sistemas AQS apresenta-se como uma excelente hipótese para cumprir esses objetivos. Os sistemas de armazenamento de energia térmica podem ser divididos em 3 categorias: armazenamento de calor sensível (SHS), armazenamento de calor latente (LHS) e armazenamento de calor termoquímico (THS). Nos sistemas SHS, o aumento da energia interna do sistema é devido ao aumento da temperatura do meio de armazenamento. Os sistemas LHS aproveitam o calor libertado durante a mudança de fase dos materiais, como, por exemplo, materiais de mudança de fase (PCMs). Por último, os sistemas THS utilizam o calor libertado resultante de reações reversíveis entre duas substâncias para promover o armazenamento de energia.

Os sistemas convencionais de produção de AQS necessitam de reservatórios de grandes dimensões e têm uma eficiência aquém da desejada. Neste sentido, o armazenamento de energia térmica através do processo de adsorção (tipo armazenamento THS), uma tecnologia que tem sido pesquisada e desenvolvida nos últimos anos, aparece como uma alternativa promissora para a produção de AQS [Köll *et al.* 2017, Fernandes 2017, Meister & Beausoleil-Morrison 2021].

## 1.2. Objetivos e Motivação

O mundo atravessa um período de transição energética para fontes de energia menos poluentes, de modo a combater as alterações climáticas. Nesta perspetiva, na 26<sup>a</sup> Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP26) reuniram-se países de todo o mundo com o intuito de chegar a acordo sobre a melhor forma de intensificar a ação a nível global para resolver a crise climática, num ambiente modificado pela pandemia COVID19, de modo a implementar todas as metas definidas no Acordo de Paris. Perante este cenário, agravado pela escassez e pelo elevado preço dos combustíveis fósseis, bem como pelo aumento global do consumo de energia, torna-se imperativo arranjar tecnologias sustentáveis e eficientes para a produção de energia.

Na tentativa de aumentar a eficiência energética em sistemas de AQS, Fernandes (2017) desenvolveu e otimizou o modelo de simulação de um sistema de armazenamento de energia térmica com módulo de adsorção, obtendo poupanças significativas no sistema de apoio, em relação a um sistema de armazenamento convencional. O sistema foi desenvolvido para um consumo típico de uma moradia unifamiliar. O objetivo desta dissertação é dar continuidade a este trabalho, estudando a possibilidade de adaptar o sistema para a produção de AQS para moradias e edifícios multifamiliares que envolvam consumos mais elevados, de forma a reduzir os seus consumos de energia não renovável. Para isso, é necessário definir os perfis de consumo, assim como, o consumo diário para os casos de estudo (moradia de 4 pessoas, edifícios multifamiliares com 25, 50, 75 e 100 pessoas), escolher e quantificar os painéis solares a utilizar no sistema solar térmico, proceder a estudos paramétricos relativo às alterações das dimensões dos componentes, de forma a que o sistema tenha um bom funcionamento e, por último, comparar o desempenho do sistema com módulo de adsorção com o sistema convencional equivalente.

Este trabalho enquadra-se no projeto AdsorTech, liderado pela empresa TANKPOR, que tem como objetivo desenvolver sistemas de armazenamento inovadores e com capacidade de armazenar a energia excedentária fornecida por um sistema solar térmico, através da integração de um módulo de adsorção, mantendo a simplicidade do sistema e aumentando a sua eficiência.



## 2. Estado da Arte

### 2.1. Armazenamento de energia térmica

Restrições impostas à quantidade de combustíveis fósseis a serem usados, assim como a crescente preocupação sobre as alterações climáticas motivam a transição do consumo de energia para formas de energia com origem renovável (energia hídrica, energia eólica, energia geotérmica, energia da biomassa ou energia solar), a fim de combater o impacto ambiental. Porém, quando se utilizam fontes renováveis para a obtenção de energia, um dos grandes obstáculos é a sua dependência em relação às condições ambientais.

A energia solar é uma fonte de energia sem poluição, acessível e inesgotável, com inúmeras aplicações no mundo inteiro. Contudo, o desalinhamento entre o fornecimento de energia e o consumo desta é um entrave para o uso das tecnologias de energia solar, como os coletores solares. O conceito de armazenamento de energia é proposto para ultrapassar esta barreira. O armazenamento de energia pode ser classificado como armazenamento de energia a curto ou a longo prazo, consoante os diferentes tempos de armazenamento. O armazenamento de energia térmica sazonal (STES), também conhecido como armazenamento de energia a longo prazo, tem por base a acumulação do excesso de energia no verão para compensar as insuficiências no fornecimento de energia no inverno [Xu *et al.* 2014].

Os sistemas de armazenamento de energia térmica, tal como a Figura 2.1 demonstra, podem ser divididos em três categorias: armazenamento de calor sensível (SHS), armazenamento de calor latente (LHS) e armazenamento de calor termoquímico (THS), os quais vão ser abordados nas subsecções 2.1.1, 2.1.2 e 2.1.3, respetivamente.

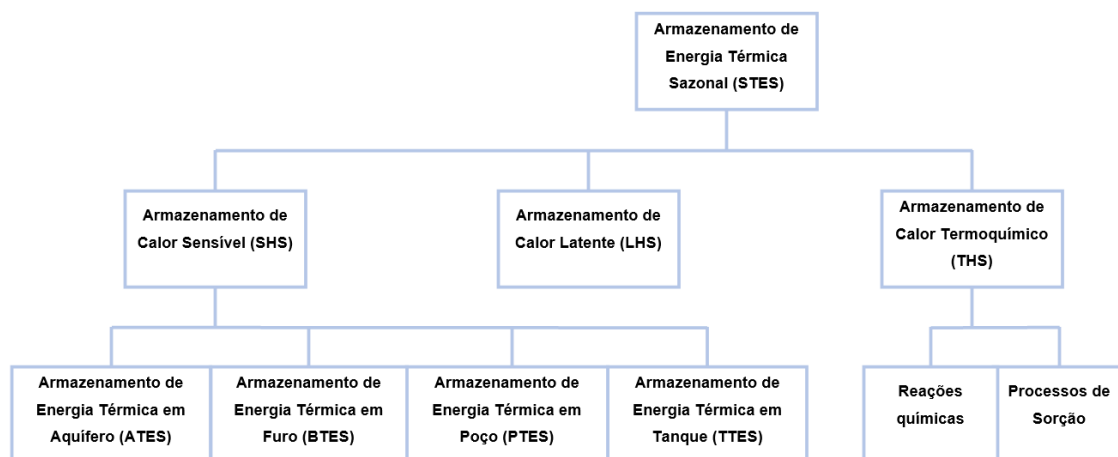


Figura 2.1: Sistemas de armazenamento de energia térmica [Adaptado de Yang *et al.* 2021].

### 2.1.1. Armazenamento de calor sensível

O método de armazenamento de energia sensível tem por base a conversão da energia solar acumulada em energia sensível. A energia nestes sistemas é armazenada como energia interna induzida pelas variações de temperatura no material. A energia térmica armazenada pode ser calculada através da Equação 2.1.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

onde  $m$  representa a massa,  $c_p$  representa o calor específico a pressão constante e  $\Delta T$  representa o aumento de temperatura durante o processo de carga. A quantidade de energia armazenada é proporcional à massa específica, ao volume e à variação de temperatura do material armazenado [Alva *et al.* 2018, Xu *et al.* 2014].

Na Figura 2.1 estão representadas várias formas de armazenamento de energia e tal como se pode verificar o armazenamento de energia sensível pode ser dividido em quatro categorias:

- Armazenamento de Energia Térmica em Aquífero (ATES) - Um aquífero é um reservatório de água subterrâneo. Um sistema ATES utiliza a mistura entre a água e o solo, como pedra ou areia, para armazenar a energia numa camada subterrânea. O aquífero é constituído, pelo menos, por dois poços, um quente e outro frio, para a extração e injeção da água. A água é normalmente utilizada como meio de armazenamento nestes sistemas para evitar o risco de contaminação por químicos perigosos, visto que os aquíferos nestes sistemas são permeáveis. Outro problema é que estes sistemas não podem ser isolados, logo as perdas de energia para a vizinhança são grandes. Também é necessário um bom conhecimento da geoquímica, mineralogia e microbiologia do solo para impedir o entupimento dos poços, especialmente em armazenamentos térmicos de alta temperatura [Pavlov & Olesen 2012, Dahash *et al.* 2019].
- Armazenamento de Energia Térmica em Furo (BTES) - Neste tipo de sistemas o calor é armazenado diretamente no terreno, tipicamente em solos com água saturada ou rochas. O terreno é perfurado com uma certa profundidade para, posteriormente, inserir tubos com a função de permutadores de calor onde a água vai atravessar como fluido de transferência. A principal vantagem é que outros furos podem ser adicionados e ligados ao sistema *a posteriori*. No entanto, encontra limitações quanto às condições geológicas e apresenta densidade de energia e eficiência baixas [Xu *et al.* 2014, Schmidt *et al.* 2004].
- Armazenamento de Energia Térmica em Poço (PTES) - O armazenamento é feito debaixo do solo num poço impermeável e isolado, ou numa superfície subterrânea feita de betão armado ou aço inoxidável [Dahash *et al.* 2019]. PTES é um sistema com grande densidade de energia e eficiência. A questão mais preocupante está relacionada com a degradação devido à condensação do vapor, bem como a dificuldade na manutenção deste tipo de sistemas.
- Armazenamento de Energia Térmica em Tanque (TTES) - TTES é um tanque construído com betão armado ou aço inoxidável no solo, em que a água é o meio de armazenamento [Mangold 2007]. Este sistema usa a estratificação como método de operação, em que na parte superior do tanque a água é mais quente e na parte

inferior a água é mais fria. Isto acontece naturalmente, visto que a densidade aumenta com a diminuição da temperatura [Li 2016].

### 2.1.2. Armazenamento de calor latente

O armazenamento de calor latente consiste no aquecimento dum material até que este experiencie uma mudança de fase a temperatura constante. A energia absorvida é conhecida por energia latente de vaporização ou de fusão, dependendo do caso. A transformação de líquido para gás é a que envolve mais energia latente, ocorrendo, contudo, uma expansão volumétrica muito grande que torna o armazenamento de energia complexo. A mudança de fase de sólido para líquido é a que tem sido mais estudada e usada em sistemas LHS, pois apesar da energia latente ser inferior, a mudança do volume do material é menor e não se opõe como um problema [Cárdenas & León 2013].

A Equação 2.2 permite calcular a energia latente armazenada.

$$Q = m \cdot L \quad (2.2)$$

onde  $m$  representa a massa do material de mudança de fase e  $L$  representa o calor específico latente [Alva *et al.* 2018].

Os sistemas LHS são compostos, normalmente, por três componentes:

- Superfície permutadora de calor;
- Material de mudança de fase (PCM) onde o calor é armazenado;
- Recipiente para conter o PCM.

Os PCMs podem ser classificados como orgânicos (parafinas, não parafinas) e inorgânicos (sais, metais, alumínio) [Hasnain 1998].

A principal vantagem dos sistemas LHS é a energia ser armazenada a uma temperatura quase constante devido ao processo de mudança de fase ser isotérmico. Para além deste aspeto, é possível armazenar a mesma quantidade de energia num volume menor em relação aos sistemas SHS porque o calor latente é superior ao calor específico, ou seja, a densidade de energia é maior. Em contrapartida, os materiais utilizados neste tipo de armazenamento têm baixa condutibilidade térmica, são inflamáveis ou são corrosivos, motivos pelo qual o uso deste tipo de sistemas é reduzido [Alva *et al.* 2018, Yang *et al.* 2021].

### 2.1.3. Armazenamento de calor termoquímico

O armazenamento de calor termoquímico é uma tecnologia emergente que pode ultrapassar as barreiras presentes nos armazenamentos de calor sensível e latente. Este pode ser dividido em reações químicas e processos de sorção, sendo a energia obtida através de uma fonte de calor em ambas as categorias.

Nas reações químicas a energia é armazenada através de uma reação de dissociação reversível entre duas moléculas e, posteriormente, recuperada através da reação inversa.



Este tipo de sistema, apesar de fornecer densidades de energia elevadas, necessita habitualmente de um catalisador para libertar o calor e controlar a reação, o que por vezes não é desejado.

Os processos de sorção incluem a absorção e a adsorção. A absorção ocorre quando um líquido ou gás penetra num material incorporando o seu volume. Para aplicações de armazenamento, normalmente, envolve um gás a entrar num líquido. A energia térmica é armazenada como energia potencial, o que torna a utilização deste tipo de sistemas apropriado para aplicações a longo prazo, visto que não existem perdas de energia [Lefebvre & Tezel 2017]. Alguns dos pares de trabalho utilizados para processos de armazenamento para absorção são NaOH/H<sub>2</sub>O, LiCl/H<sub>2</sub>O, LiBr/H<sub>2</sub>O, CaCl<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O. LiCl/H<sub>2</sub>O é o que apresenta melhor eficiência e capacidade de armazenamento, mas o preço alto é um entrave à sua utilização. CaCl<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O é o mais adequado em termos de preço e de temperatura de regeneração, mas tem uma capacidade de armazenamento baixa [Xu *et al.* 2014].

A adsorção é o fenómeno que consiste na aderência das moléculas de um gás/ líquido (adsorvato) à superfície de um material poroso ou sólido (adsorvente), através de uma reação física ou química.

- **Adsorção física** - ocorre quando as moléculas do adsorvato se fixam na superfície do adsorvente devido a forças de *Van der Waals* e eletrostáticas. A energia libertada, neste caso, é da ordem de grandeza do calor latente de vaporização. Este processo é reversível, uma vez que as moléculas do adsorvato podem ser separadas da superfície do adsorvente quando é aplicado calor.
- **Adsorção química** - resulta das ligações iónicas ou covalentes formadas entre as moléculas do adsorvato e a superfície sólida. Normalmente, a quantidade de energia libertada neste processo é maior porque as forças de ligação são muito maiores do que na adsorção física. Contudo, não é um processo facilmente reversível, pois para além de ser necessário fornecer uma grande quantidade de energia para a fase de dessorção, as reações químicas também promovem a alteração química da substância do adsorvato. Por estes motivos, grande parte dos sistemas de adsorção baseia-se na adsorção física [Fernandes *et al.* 2014, Fernandes 2017].

No processo de adsorção a energia é libertada durante a fase de adsorção (processo exotérmico) e armazenada durante a fase de dessorção/ regeneração (processo endotérmico), onde vai ser fornecido calor ao adsorvente que vai promover a separação do par de trabalho. O adsorvato e o adsorvente serão armazenados separadamente promovendo um potencial de armazenamento praticamente sem perdas, o que torna este tipo de processo interessante para o armazenamento a longo prazo [Lefebvre & Tezel 2017]. Os pares de trabalho mais clássicos são: sílica gel/água, zeolites/água e carvão ativado/metanol [Shmroukh *et al.* 2015].

Neste trabalho, o tema adsorção, assim como sistemas que utilizam este fenómeno, vão ser abordados e analisados com mais detalhe nas secções seguintes.

### 2.2. Sistemas de adsorção

Os sistemas de adsorção podem ser divididos em duas categorias: sistemas fechados e sistemas abertos. Nos sistemas abertos, a passagem do ar que transporta o vapor de água é responsável pela transferência de calor e de massa no sistema. Logo, apenas a água pode



ser utilizada como fluido de trabalho, que é libertada diretamente para o ambiente sob a forma de vapor. Os sistemas fechados são constituídos por um circuito fechado, o qual é isolado da atmosfera. São necessários uma fonte e um dissipador de calor em que apenas o calor de condensação é libertado para o exterior do sistema, e não o fluido de trabalho [Bales 2005, Fernandes 2017]. Os componentes responsáveis pela mudança de fase do adsorvato são o adsorisor, o condensador e o evaporador que se encontram ligados por tubagens, em que cada ligação contém uma válvula que permite ou impede a passagem do fluido de trabalho.

O adsorisor é alimentado com energia térmica na fase de dessorção (fase inversa à adsorção, onde ocorre a libertação do adsorvato do material adsorvente devido ao fornecimento de calor). O efeito de adsorção é conseguido através da vaporização do adsorvato no evaporador, que é adsorvido pelo material adsorvente no adsorisor, acompanhado pela libertação do calor de adsorção. O teor de adsorvato adsorvido varia em cada ciclo de funcionamento, em função da temperatura do adsorvente e da pressão no sistema, que varia entre um limite máximo imposto pela pressão de condensação e um limite mínimo imposto pela pressão de vaporização. O teor de adsorvato adsorvido depende também, substancialmente, do par de trabalho em causa.

Os sistemas de adsorção são compostos por um ciclo que envolve quatro fases, duas isostéricas e duas isobáricas, ilustrado através do diagrama de *Clapeyron*, Figura 2.2.

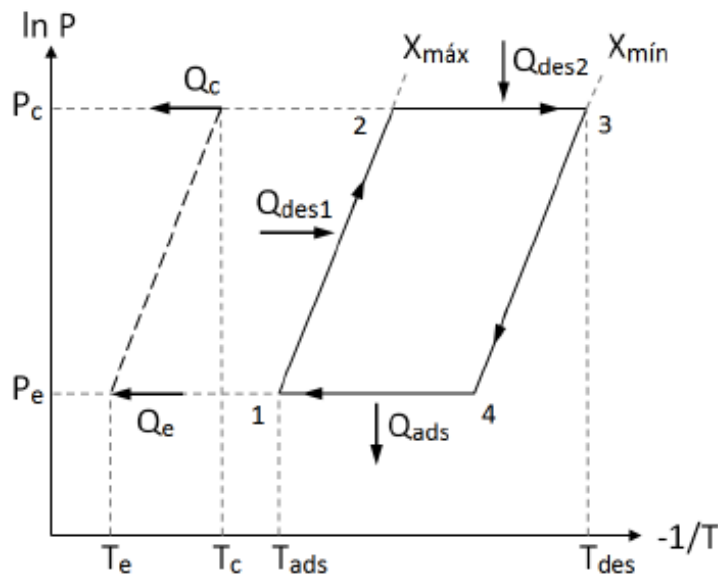


Figura 2.2: Diagrama P-T de um ciclo básico de adsorção [Fernandes 2017].

Dusane & Ghuge (2016), Goyal *et al.* (2016) e Fernandes (2017) apresentam uma descrição pormenorizada dos quatro processos do ciclo:

### 1. Fase de aquecimento isostérico (1-2)

O processo tem início no ponto 1, no qual o adsorvente se encontra a uma baixa pressão [pressão de vaporização ( $P_e$ )], à temperatura de adsorção ( $T_{ads}$ ) e a concentração de adsorvato no adsorvente é máxima ( $X_{max}$ ). Nesta fase, também conhecida como processo de aquecimento e de pressurização, tanto a temperatura como a pressão aumentam ao longo da linha isostérica 1-2 ( $X$  é constante) devido à energia térmica fornecida ( $Q_{des1}$ ), até se atingir a pressão de condensação ( $P_c$ ).

### 2. Fase de aquecimento isobárico (2-3)

No ponto 2 é alcançada a  $P_c$  e inicia-se a fase de dessorção. Na linha isobárica 2-3 ( $P$  é constante) o aquecimento progressivo ( $Q_{des2}$ ) do adsorvente é responsável pela libertação do adsorvato do adsorvente sob a forma de vapor. O vapor libertado pelo adsorvente é liquefeito pelo condensador, libertando o calor de condensação ( $Q_c$ ) à temperatura de condensação, ( $T_c$ ). O processo acaba quando o adsorvente atinge a temperatura máxima de regeneração ( $T_{des}$ ) e o teor de adsorvato no adsorvente o valor mínimo ( $X_{min}$ ).

### 3. Fase de arrefecimento isostérico (3-4)

Nesta fase, o teor de adsorvato no adsorvente é mínimo ( $X_{min}$ ). O adsorvente arrefece ao longo da linha isostérica 3-4 até atingir a pressão de vaporização ( $P_e$ ) no ponto 4.

### 4. Fase de arrefecimento isobárico (4-1)

Neste processo ocorre a fase de adsorção e vaporização (4-1) ao promover-se a ligação entre o evaporador e o adsorisor. A energia necessária para a vaporização do adsorvato líquido ( $Q_e$ ), à temperatura  $T_e$  e pressão  $P_e$ , é recolhida da vizinhança do evaporador. Posteriormente, o vapor vai fluir para o adsorisor, onde é adsorvido, libertando o calor de adsorção ( $Q_{ads}$ ) até que a concentração de adsorvato no adsorvente seja máxima,  $X_{max}$ , novamente. No final, a ligação entre o evaporador e o restante sistema é novamente interrompida (para prevenir a ocorrência de condensação) e o ciclo é reiniciado.

## 2.2.1. Descrição do processo de armazenamento por adsorção

Os sistemas de armazenamento de energia térmica, ao contrário dos sistemas SHS e LHS, armazenam a energia sob a forma de potencial químico, não necessitando, por isso, de isolamento térmico para o armazenamento de energia. Um sistema de armazenamento de energia por adsorção é constituído por um adsorisor (componente onde se encontra o adsorvente), um permutador de calor (que funciona como condensador ou evaporador), a tubagem de ligação entre ambos e uma válvula. O princípio do armazenamento de energia por adsorção é a libertação do vapor de adsorvato do material adsorvente, após fornecimento de calor, e a libertação de calor quando o vapor é novamente adsorvido, tratando-se de um processo reversível. A energia associada aos processos de adsorção e dessorção está relacionada com a soma da energia de mudança de fase do fluido de trabalho (calor latente de vaporização e de condensação) e da energia de ligação entre as moléculas do par de trabalho. Esta energia de ligação depende de vários fatores, como a temperatura, a pressão, ou a concentração de adsorvato no material adsorvente, em que o último fator é considerado o mais significativo. Durante a fase de carga do sistema ainda é necessário fornecer a energia (calor sensível) para aquecer o adsorisor até à temperatura de dessorção.

Um facto muito importante neste tipo de sistemas é que adsorção não ocorre enquanto o adsorvente e o adsorvato não entrarem em contacto, pelo que a energia pode ser armazenada por um período de tempo indeterminado. Por esta razão, o armazenamento de energia por adsorção é definido como um armazenamento 'indireto'. Outra vantagem é

que permite obter uma elevada densidade energética (quantidade de energia armazenada no sistema por unidade de volume ou de massa), normalmente superior à dos sistemas de armazenamento de energia sensível ou latente [Fernandes 2017].

A Figura 2.3 demonstra o princípio de funcionamento do sistema, que se pode dividir em três fases distintas: carga, armazenamento e descarga [Jaehnig *et al.* 2006, Fernandes 2017]:

### 1. Fase de carga (dessorção)

Durante o processo de carga ocorre uma reação endotérmica, no qual o adsorisor recebe energia térmica de uma fonte quente, o que promove a libertação, sob a forma de vapor, do adsorvato contido no adsorvente. Quando é atingida no adsorisor a pressão de condensação, a válvula entre o adsorisor e o condensador é aberta. O vapor dessorvido é arrefecido e liquefeito no condensador, sendo o calor de condensação libertado para o exterior. A válvula é posteriormente fechada de novo.

### 2. Armazenamento de energia térmica

Nesta fase, o adsorvato líquido encontra-se armazenado no condensador/evaporador. A ligação ao adsorisor permanece fechada, o que impede a ocorrência do processo de adsorção, e o sistema permanece carregado sob a forma de um ‘potencial de adsorção’. Assim, desde que o adsorvente e o adsorvato sejam mantidos separados, é possível armazenar energia com poucas (ou nenhuma) perdas, mesmo durante longos períodos de tempo.

### 3. Fase de descarga

Perante a necessidade de recuperar o calor armazenado, a ligação entre o condensador/evaporador e o adsorisor é novamente estabelecida (a válvula é aberta), o que promove, instantaneamente, a adsorção do vapor de adsorvato produzido no evaporador, a baixas pressão e temperatura, sendo a energia necessária para a mudança de fase recebida da vizinhança do evaporador (normalmente o ar ambiente). A adsorção é um processo exotérmico, com a libertação do calor de adsorção, e ocorre quando a vizinhança do adsorisor se encontra a uma temperatura mais baixa do que este. No final desta fase, a válvula é novamente fechada.

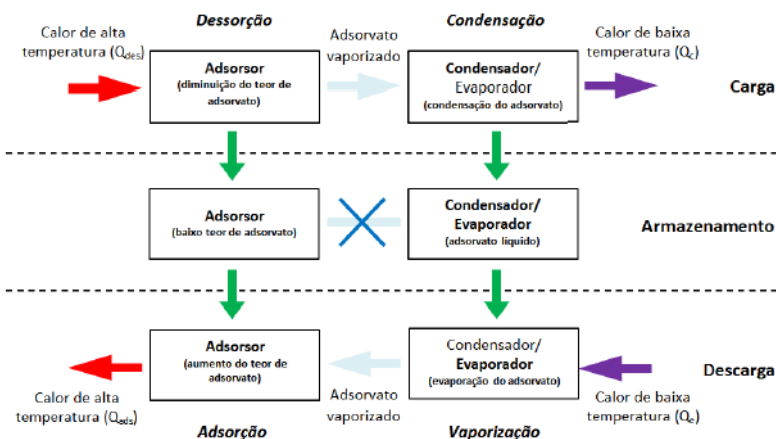


Figura 2.3: Princípio de funcionamento de um sistema de armazenamento de energia térmica por adsorção [Fernandes 2017].

### 2.2.2. Pares de trabalho

O par de trabalho adsorvente/adsorvato é um elemento crucial para um bom desempenho em aplicações de armazenamento de energia. A escolha deste depende de fatores como a temperatura da fonte de calor e as características do sistema de armazenamento.

As propriedades que um par de trabalho deve possuir são as seguintes [Scapino *et al.* 2017, Palomba & Frazzica 2019]:

- Elevada densidade de energia;
- Alta energia de adsorção;
- Baixa temperatura de dessorção (regeneração);
- Baixo tempo de regeneração;
- Boas propriedades de transporte de massa e calor;
- Elevada afinidade entre o adsorvente e o adsorvato;
- Elevada captação de adsorvato por parte do adsorvente;
- Estabilidade térmica;
- Elevada condutibilidade térmica;
- Fácil manuseamento;
- Não corrosivo;
- Não tóxico e não inflamável;
- Disponível no mercado e baixo custo.

Não é possível conciliar todos os critérios mencionados acima num par de trabalho. Por exemplo, a libertação de uma grande quantidade de energia térmica durante o processo de adsorção implica uma elevada densidade de armazenamento, o que provoca temperaturas de dessorção elevadas, pelo que tem que haver "bom senso" na escolha dos materiais.

Apesar de existirem vários adsorvatos para aplicações STES, a água é o adsorvato mais utilizado por ser uma substância fácil de obter, ter baixo custo, não ser perigosa e ter boas propriedades térmicas. Os adsorventes mais utilizados com este adsorvato são a sílica gel e a zeolite.

A sílica gel apresenta uma estrutura amorfa, granular e porosa e é composta em mais de 99% por dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) feito sinteticamente a partir de silicato de sódio. Tem uma grande superfície de área específica e, portanto, uma grande capacidade de adsorção. A aplicação mais conhecida da sílica gel é para o controlo da humidade relativa, mas também é amplamente usada na indústria química e em laboratórios [Brites 2013, Allouhi *et al.* 2015].

A zeolite apresenta uma estrutura cristalina, constituída por aluminossilicatos associados a elementos do Grupo I e II da Tabela Periódica, nomeadamente sódio, potássio, magnésio e cálcio. Devido à sua estrutura cristalina, a dimensão dos poros é muito bem definida, ao contrário dos materiais amorfos, que apresentam uma distribuição não uniforme do tamanho dos poros. Por causa desta característica, a zeolite permite apenas

a passagem e conseqüente adsorção (ou dessorção) de moléculas com tamanho inferior à dimensão desses mesmos poros, tamanho que pode ser controlado a partir da variação da estrutura cristalina. A sua principal aplicação é na indústria química, sendo utilizada para efetuar a secagem, purificação e separação de gases [Brites 2013].

Existem outros pares de trabalho que têm sido estudados para aplicações de armazenamento, tais como: carvão ativado/metanol, carvão ativado/etanol, carvão ativado/amônia.

### 2.2.3. Breve história sobre sistemas desenvolvidos

A crise de petróleo nos anos 70 desencadeou o interesse na técnica de armazenamento de energia térmica por sorção. Contudo, só recentemente, com o aumento do interesse no armazenamento de energia solar, surgiu um maior crescimento no estudo deste tipo de sistemas, devido à sua elevada densidade de armazenamento térmico e à sua capacidade de armazenamento de energia a longo prazo [Yu *et al.* 2013]. De seguida, vão ser abordados alguns dos trabalhos relacionados com este tipo de armazenamento.

*High Energy Density Sorption Heat Storage for Solar Space Heating (HYDES)* - Este projeto foi financiado pela União Europeia entre 1998 e 2001, com o intuito de desenvolver um sistema de armazenamento térmico sazonal por adsorção com elevada densidade energética, para aquecimento e produção de AQS, operando com o par sílica gel/água. A Figura 2.4 representa o sistema de adsorção fechado que utiliza, durante o verão, coletores solares como fonte de calor, em que o calor é transportado para três leitos adsorventes, promovendo a carga do sistema, sendo o calor de condensação libertado para o ambiente. No inverno, ocorre a vaporização da água nos evaporadores/condensadores, sendo o calor de adsorção fornecido ao sistema de aquecimento do edifício. O prazo para a realização do projeto não permitiu uma monitorização durante todo o período de sorção, mas o resultado obtido sobre a densidade de armazenamento, para o carregamento parcial do sistema, foi 20% menor do que o esperado ( $0,43 \text{ GJ/m}^3$ ) [Núñez *et al.* 2003].

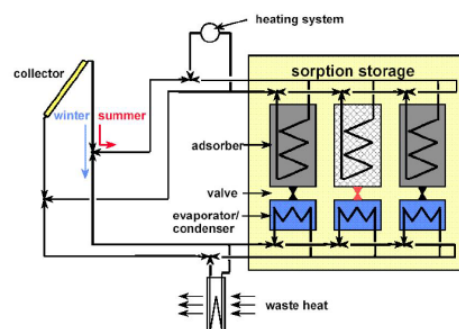


Figura 2.4: Sistema de armazenamento de energia térmica sazonal [Núñez *et al.* 2003].

*Modular High Energy Density Heat Storage (MODESTORE)* - No âmbito deste projeto europeu foi desenvolvido um protótipo de um módulo de armazenamento. A Figura 2.5 mostra o sistema, constituído por um reservatório com cerca de 200 kg de sílica gel, que se encontra ligado a um evaporador/condensador na sua base. O reservatório é atravessado por um permutador de calor em espiral para aquecer o fluido de trabalho que se encontra no topo do reservatório (adsorção). A vantagem do novo protótipo é

a sua capacidade. Contudo, para o par de trabalho sílica gel/água, o aumento de temperatura conseguido apenas permite dessorver entre 2-12% da água contida na sílica gel, valores significativamente mais baixos do que o potencial de adsorção da sílica gel, aproximadamente 35%. Portanto, os autores concluíram que este sistema não é eficiente para o armazenamento de energia térmica a curto prazo [Jaehnig *et al.* 2006].

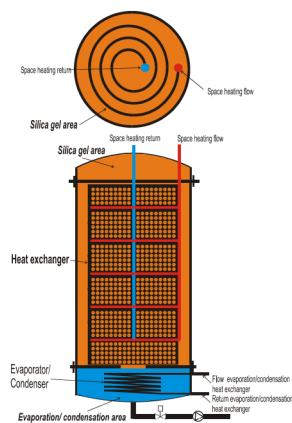


Figura 2.5: Sistema compacto de armazenamento de energia térmica [Jaehnig *et al.* 2006].

*Modular Chemical Energy Storage* (MCES) - O protótipo experimental representado na Figura 2.6 é formado por um reator de tubo anular feito de aço inoxidável, um evaporador, um condensador e um circuito de refrigeração e aquecimento. Os materiais utilizados para este armazenamento de sorção sólida são o sulfureto de sódio nano hidratado ( $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) e, como aditivo, a grafite. Os resultados obtidos para a temperatura de dessorção requerida foi entre o intervalo de 80–95 °C, enquanto a temperatura de adsorção máxima obtida foi de 65,1 °C. A densidade de armazenamento de energia medida foi aproximadamente de 8 MJ/kg. Para além disso, os autores concluíram que o coeficiente geral de transferência de calor e o coeficiente de desempenho (COP) aumentaram em relação às configurações anteriores [Kantima Iammak & Kiatsiriroy 2004, Yu *et al.* 2013].

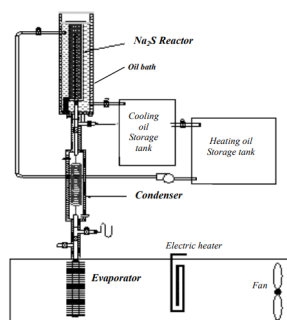


Figura 2.6: Diagrama esquemático de um sistema MCES [Kantima Iammak & Kiatsiriroy 2004].

*Combined Cooling, Heating And Power (CCHP)* - A Figura 2.7 exemplifica o *layout* do sistema acoplado Ciclo Orgânico de *Rankine* - *Chiller* de Adsorção (ORC-AC). O protótipo analisado é constituído por 60 m<sup>2</sup> de coletores solares planos, uma instalação solar fotovoltaica de 10 kWe, uma unidade de energia com o ciclo orgânico de *Rankine* de 3 kWe, um *chiller* de adsorção de 4,4 kWc e uma bomba de calor auxiliar reversível de 6 kWc. É ainda utilizado um armazenamento térmico de energia de 2 m<sup>3</sup> como buffer de calor. Este sistema trabalha uma média de 2400 horas por ano com diferentes perfis de consumo e consegue atingir uma eficiência global no intervalo entre 32-42% [Lombardo *et al.* 2021].

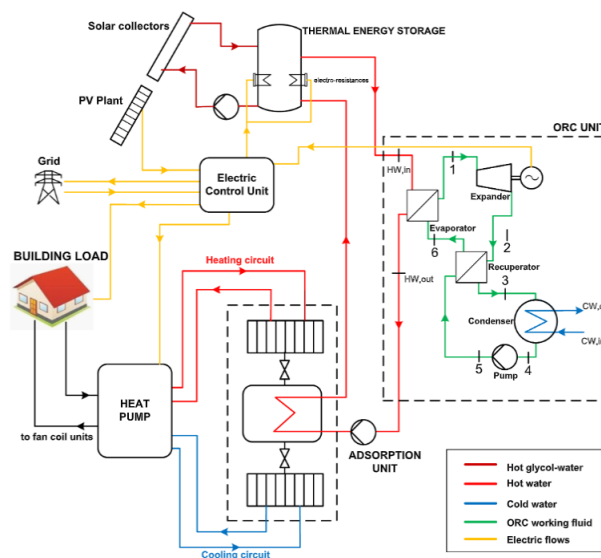


Figura 2.7: *Layout* esquemático de um micro sistema CCHP [Lombardo *et al.* 2021].

Unidade de Refrigeração por Adsorção de Leito Único utilizando Energia Térmica Residual - O protótipo utiliza carvão ativado/amónia como par de trabalho. Este sistema, apresentado na Figura 2.8, é constituído por um coletor de carregamento de amónia com tubagem de aço inoxidável, uma bomba de vácuo, um cilindro que contenha uma quantidade suficiente de amónia, um condensador, um leito de adsorção, uma válvula de expansão, um evaporador e um controlador de válvulas. Para o par de trabalho usado, a capacidade de adsorção obtida foi de 0,22 kg de amónia por kg de carvão ativado. Os autores concluíram que foi desenvolvido um protótipo eficiente e ecológico [Chaudhari & Desai 2021].

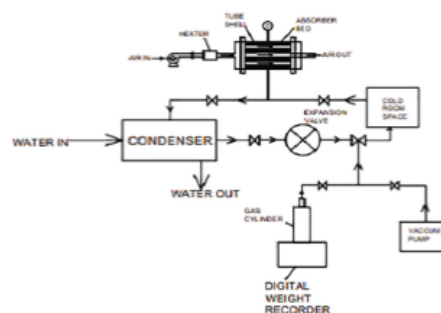


Figura 2.8: Diagrama em bloco da configuração experimental [Chaudhari & Desai 2021].



Sistema de Armazenamento Térmico com Módulo de Adsorção - O sistema, representado na Figura 2.9, é constituído por um módulo de adsorção (adsorisor, condensador e evaporador) que permite o armazenamento suplementar de energia térmica num reservatório de AQS convencional, através do processo de adsorção. O par de trabalho é a sílica gel/água.

O trabalho desenvolvido na presente dissertação é baseado neste sistema, desenvolvido por Fernandes (2017), em que a energia solar é utilizada para aquecer a água do reservatório, sendo que o excesso de energia é armazenada no adsorisor. A localização do adsorisor no interior do tanque de AQS permite recuperar possíveis perdas de calor sensível desse componente para promover a carga do adsorisor, libertando a energia térmica armazenada para a água aquando da fase adsorção. Além disso, a libertação de energia térmica no condensador permite o pré-aquecimento da água fria que entra no reservatório. Para uma configuração e com um reservatório de AQS de 250 L, 37 kg de sílica gel, e um consumo típico de 4 pessoas, o sistema permite alcançar uma poupança anual de 16% no consumo de energia de apoio em relação a um sistema convencional.

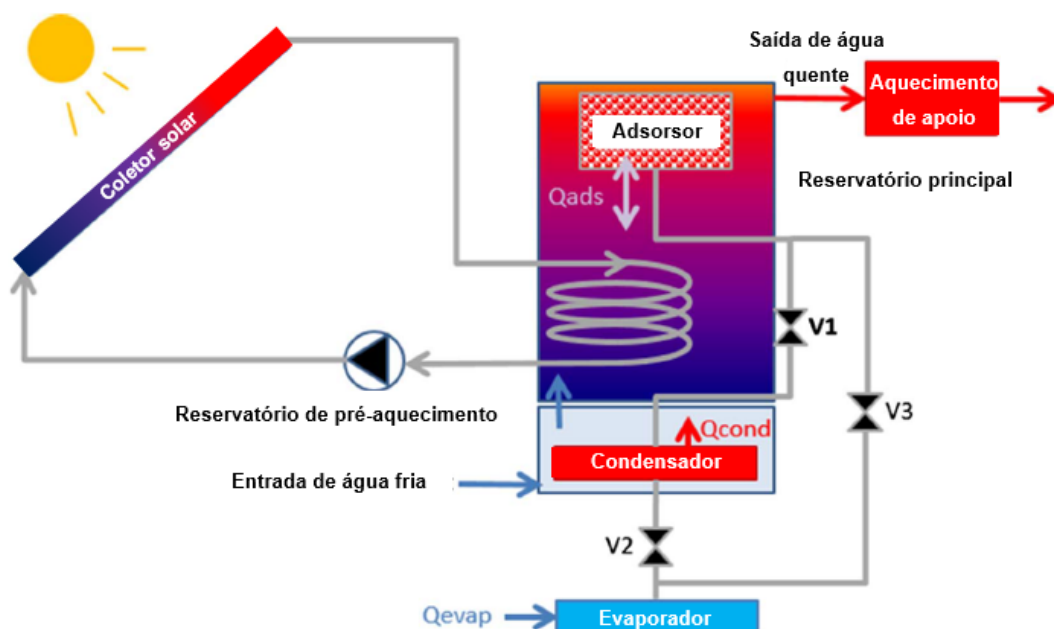


Figura 2.9: Esquema de um sistema de armazenamento de energia térmica para produção de AQS com módulo de adsorção [Fernandes 2017].



### 3. Modelação de um Sistema de Armazenamento de Energia Térmica com Módulo de Adsorção

O sistema de armazenamento de energia térmica com módulo de adsorção para produção de AQS apresentado na secção anterior tem o objetivo de aumentar a capacidade de armazenamento de energia térmica e possibilitar a redução do consumo de energia de apoio do sistema de preparação de AQS. O módulo de adsorção é composto por um adsorisor imerso no reservatório principal, um condensador no reservatório secundário e um evaporador em contacto com o ar ambiente. O sistema possibilita armazenar a energia térmica no adsorisor, por tempo indeterminado e sem perdas, libertando-a para a água do reservatório de AQS sempre que a sua temperatura desce abaixo de um *setpoint*. Também permite efetuar o pré-aquecimento da água fria proveniente da rede, aproveitando a energia libertada no condensador.

A prioridade do sistema é o aquecimento da água do reservatório principal até uma temperatura estabelecida como *setpoint*, sendo o excesso de energia armazenado no adsorisor. Ou seja, o sistema solar térmico tem como principal objetivo armazenar o excesso de energia captada pelos painéis solares nos períodos em que esta está mais disponível, através da regeneração do adsorvente, para posteriormente utilizar nos períodos com menor disponibilidade e assim minimizar o uso da energia proveniente do aquecimento de apoio.

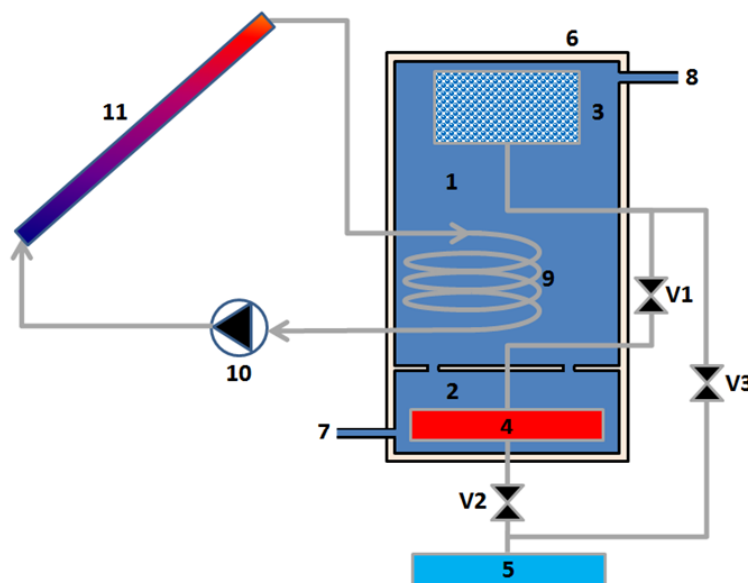
Na secção seguinte, a descrição do sistema, bem como a dos seus componentes, vai ser analisada com mais detalhe.

#### 3.1. Descrição e funcionamento do sistema e dos respetivos componentes

O sistema, como ilustra a Figura 3.1, é constituído por um conjunto de painéis solares (11), um adsorisor (3) colocado na parte superior do reservatório principal (1), um condensador (4) no interior do reservatório secundário (2), que serve para o pré-aquecimento da água fria da rede (7), um evaporador (5) localizado no exterior dos tanques a extrair energia da 'vizinhança' e as válvulas V1, V2 e V3 que permitem a ligação entre os componentes do sistema de adsorção. O módulo de adsorção é composto pelo adsorisor, o condensador e o evaporador. O adsorisor, que permite trocas de calor com a água do reservatório, é colocado na parte superior do reservatório principal de modo a aproveitar o efeito de estratificação e aumentar a eficiência do sistema. O condensador funciona como dissipador de calor e serve para pré-aquecer a água do reservatório secundário. O evaporador, situado fora dos tanques, capta energia do meio envolvente para promover a vaporização do adsorvato e consequente adsorção no adsorisor. Estes três elementos são responsáveis pela mudança de fase do fluido de trabalho. O módulo de adsorção integra-se no reservatório de AQS convencional de um sistema solar térmico com o intuito de aumentar a capacidade de armazenamento e eficiência.

### 3. Modelação de um Sistema de Armazenamento de Energia Térmica com Módulo de Adsorção

O funcionamento do sistema baseia-se em três processos: carga, armazenamento e descarga. Durante a carga todas as válvulas permanecem fechadas até que a temperatura da água do reservatório principal atinge o *setpoint* estabelecido para consumo. A partir desse momento, a válvula V1 é aberta e o vapor do adsorvato é libertado do adsorvente (dessorção). No condensador, que funciona como dissipador de calor, o vapor dessorvido é arrefecido e liquefeito, e o calor de condensação é utilizado para pré-aquecer a água fria do reservatório secundário. A válvula V2 é aberta e permite o escoamento de condensados para o evaporador. Assim que o adsorisor estiver carregado, a válvula V1 é fechada e o par de trabalho (sílica gel/água) encontra-se separado, o que permite o armazenamento de energia por longos períodos, sob a forma de potencial de adsorção. Nesta fase só é possível acumular energia sensível. Quando a temperatura do reservatório ficar abaixo da temperatura de consumo, a válvula V3 é aberta e começa a adsorção. Inicia-se a vaporização do adsorvato líquido contido no evaporador, promovida pela energia captada pelo evaporador do ambiente, sendo o vapor formado adsorvido pelo adsorvente. O calor de adsorção é libertado para a água até que a temperatura do reservatório seja novamente igual ou superior à temperatura do adsorisor. Quando a temperatura da água à saída do reservatório não atinge o *setpoint*, um componente que funciona como aquecimento de apoio, localizado a jusante, aquece a água.



**Legenda:**

1 – Reservatório de acumulação principal; 2 – Reservatório secundário para pré-aquecimento da água da rede; 3 – Adsorisor; 4 – Condensador; 5 – Evaporador; 6 – Isolamento térmico; 7– Entrada de água da rede; 8 – Saída da água quente para consumo; 9 – Serpentina do circuito solar; 10 – Bomba circuladora do circuito solar; 11 – Colectores solares; V1, V2, V3 – Válvulas passa/não passa para operação do módulo de adsorção.

Figura 3.1: Esquema de princípio do sistema de armazenamento de energia térmica com módulo de adsorção [Fernandes 2017].

### 3.1.1. Reservatórios

O reservatório principal consiste num reservatório convencional para AQS. No seu interior contém uma serpentina (ligada ao circuito solar), o adsorção e as ligações necessárias. A serpentina solar serve para aquecer a água do reservatório principal, de modo a que atinja o *setpoint* estabelecido para a temperatura de consumo. Debaixo deste encontra-se um reservatório secundário onde a água fria proveniente da rede vai ser pré-aquecida pelo condensador, que funciona como dissipador de calor (Figura 3.2).

O reservatório secundário, que serve para o pré-aquecimento da água, é um reservatório de água convencional com menores dimensões do que o principal. Contém uma entrada para a água fria da rede e, pelo menos, uma saída para o reservatório principal. No seu interior encontra-se apenas o condensador.

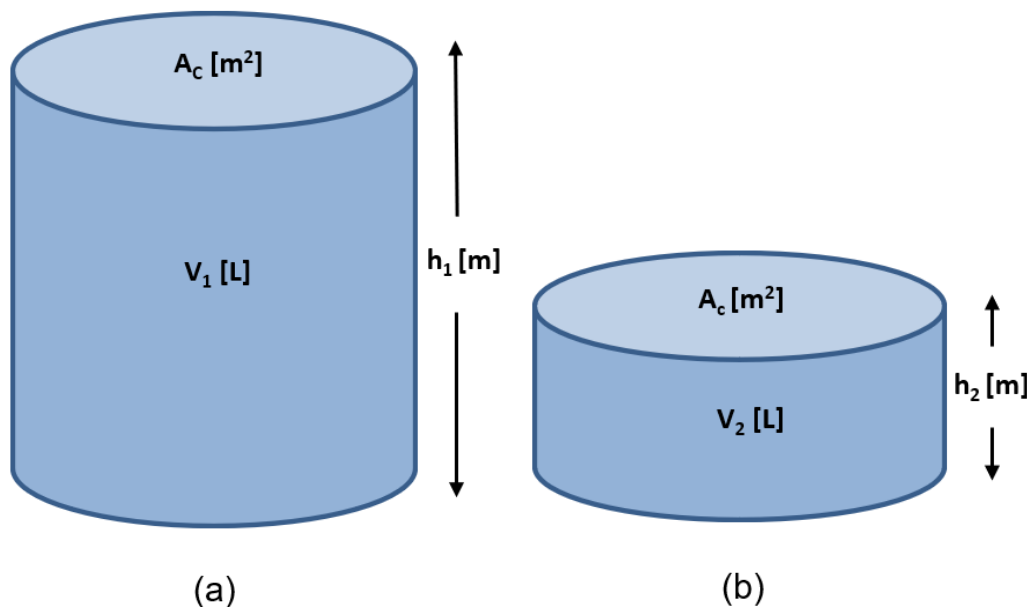


Figura 3.2: Reservatórios (a) principal e (b) secundário do sistema.

$V$  - Volume;  $A_c$  - Área de secção transversal;  $h$  - Altura; 1 - Reservatório principal; 2 - Reservatório secundário.

### 3.1.2. Adsorção

A Figura 3.3 representa uma ilustração do adsorção, que consiste num cilindro metálico com alhetas. O adsorvente (sílica gel) situa-se no seu interior e é atravessado por alhetas longitudinais que têm como objetivo aumentar a área de transferência de calor entre a parede cilíndrica e a substância. A parte central tem um tubo por onde o vapor de adsorvato flui. Este tubo é constituído por uma chapa metálica perfurada e tem a função de fixar o adsorvente.

O adsorção está ligado a um tubo metálico que permite a passagem do adsorvato entre os componentes do sistema de adsorção (adsorção, condensador e evaporador). De maneira a aproveitar o efeito de estratificação o adsorção está localizado horizontalmente no topo do reservatório principal.

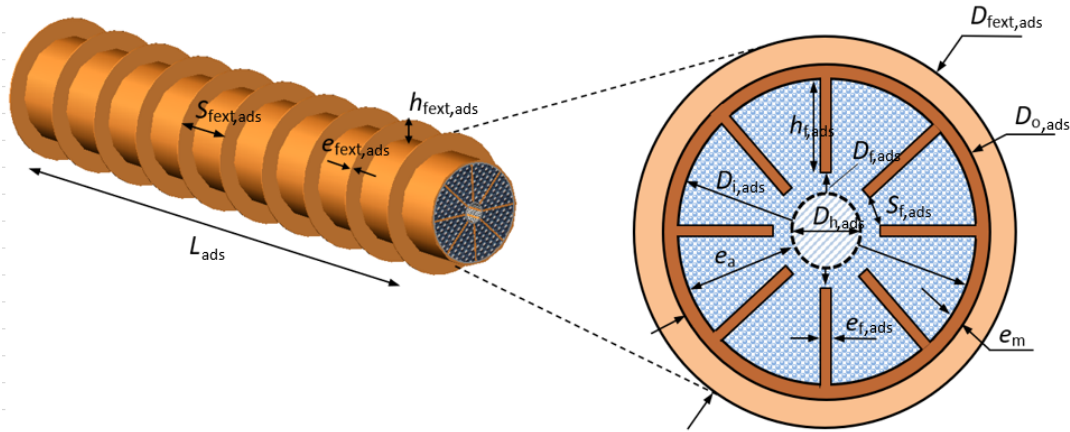


Figura 3.3: Adsorisor.

$L$  - Comprimento do adsorisor;  $D_{o,ads}$  - Diâmetro exterior;  $D_{i,ads}$  - Diâmetro interior;  $D_{h,ads}$  - Diâmetro do furo;  $e_m$  - Espessura do metal;  $e_a$  - Espessura do adsorvente;  $D_{f,ads}$  - Diâmetro limitado pelas alhetas interiores;  $h_{f,ads}$  - Altura das alhetas interiores;  $e_{f,ads}$  - Espessura das alhetas interiores;  $S_{f,ads}$  - Espaçamento entre as alhetas interiores;  $D_{fext,ads}$  - Diâmetro das alhetas exteriores;  $h_{fext,ads}$  - Altura das alhetas exteriores;  $e_{fext,ads}$  - Espessura das alhetas exteriores;  $S_{fext,ads}$  - Espaçamento entre as alhetas exteriores.

### 3.1.3. Condensador

O condensador é um tubo metálico enrolado de forma helicoidal e funciona como dissipador de calor (Figura 3.4). Este componente encontra-se imerso no reservatório de pré-aquecimento, estando separado do adsorisor pela válvula V1 e do evaporador pela válvula V3. O calor de condensação libertado é utilizado para pré-aquecer a água da rede que se encontra no reservatório secundário, aumentando a eficiência do sistema.

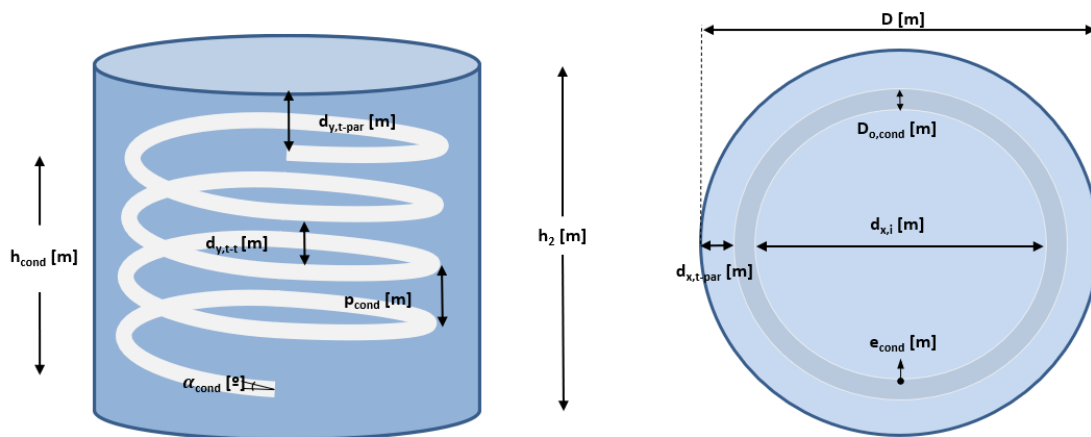


Figura 3.4: Condensador imerso no reservatório de pré-aquecimento.

$D$  - Diâmetro dos reservatórios;  $h_2$  - Altura do reservatório secundário;  $D_{o,cond}$  - Diâmetro externo;  $h_{cond}$  - Altura;  $e_{cond}$  - Espessura;  $p_{cond}$  - Passo das voltas;  $d_{x,i}$  - Distância horizontal entre os tubos do condensador;  $d_{x,t-par}$  - Distância horizontal condensador - parede reservatório;  $d_{y,t-par}$  - Distância vertical condensador - parede reservatório;  $d_{y,t-t}$  - Distância vertical entre fiadas do condensador;  $\alpha_{cond}$  - Ângulo das fiadas do condensador.

### 3.1.4. Evaporador

O evaporador, ilustrado na Figura 3.5, é composto por um conjunto de tubos verticais com alhetas longitudinais de perfil retangular, que têm por objetivo aumentar a área de transferência de calor com o ar ambiente. As alhetas não atingem as extremidades do tubo, de forma a facilitar a passagem do ar na base e no topo do permutador de calor. O diâmetro total deste permutador de calor equivale ao diâmetro dos reservatórios. O seu volume tem de conseguir armazenar todo o adsorvato (máximo teórico) dessorvido do adsorvente. As válvulas V2 e V3 separam o evaporador do condensador e do adsorção, respetivamente. No evaporador ocorre a vaporização do adsorvato líquido, durante a fase de adsorção. Este processo ocorre a baixa pressão, promovido pelo calor extraído do ambiente.

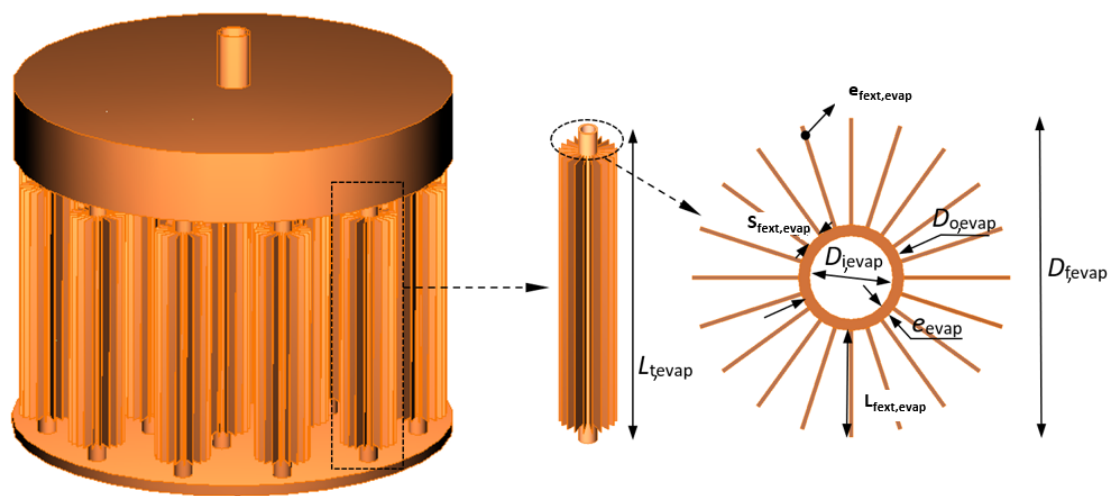


Figura 3.5: Evaporador.

$L_{t,evap}$  - Altura de cada tubo;  $D_{o,evap}$  - Diâmetro externo dos tubos;  $D_{i,evap}$  - Diâmetro interno;  $e_{evap}$  - Espessura do tubo;  $L_{f,evap}$  - Altura das alhetas;  $D_{f,evap}$  - Diâmetro de cada tubo incluindo alhetas;  $e_{f,ext,evap}$  - Espessura das alhetas;  $S_{f,ext,tevap}$  - Espaçamento entre as alhetas.

## 3.2. Modelação Dinâmica do Sistema de Armazenamento por Adsorção

O sistema de armazenamento é baseado no sistema desenvolvido por Fernandes (2017) que foi modelado no *software* TRNSYS com recurso ao MATLAB. O TRNSYS é um programa de simulações focado, maioritariamente, em avaliar o desempenho de sistemas de energia térmica e elétrica. É composto por duas partes: a primeira lê e processa os dados inseridos, resolve iterativamente o sistema e determina a convergência do sistema; a segunda é uma biblioteca que inclui uma extensa lista de componentes (equipamentos de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC), coletores solares, tanques de armazenamento, entre outros), processadores de dados meteorológicos e está construído de maneira a que os utilizadores possam modificar os componentes existentes, assim como as ligações entre eles (TRNSYS).

A Figura 3.6 ilustra a modelação do sistema no TRNSYS, em que as linhas contínuas representam o fluxo de água e as linhas a tracejado representam o fluxo de informação.

### 3. Modelação de um Sistema de Armazenamento de Energia Térmica com Módulo de Adsorção

O TRNSYS é um *software* programado em FORTRAN e não possui funcionalidades que permitam incluir o fenómeno de adsorção. De modo a simular um reservatório com módulo de adsorção, Fernandes (2017) desenvolveu um código em MATLAB que interage com o TRNSYS através da função "Call MATLAB". O modelo numérico e matemático dos componentes do sistema estão descritos pormenorizadamente em Fernandes (2017).

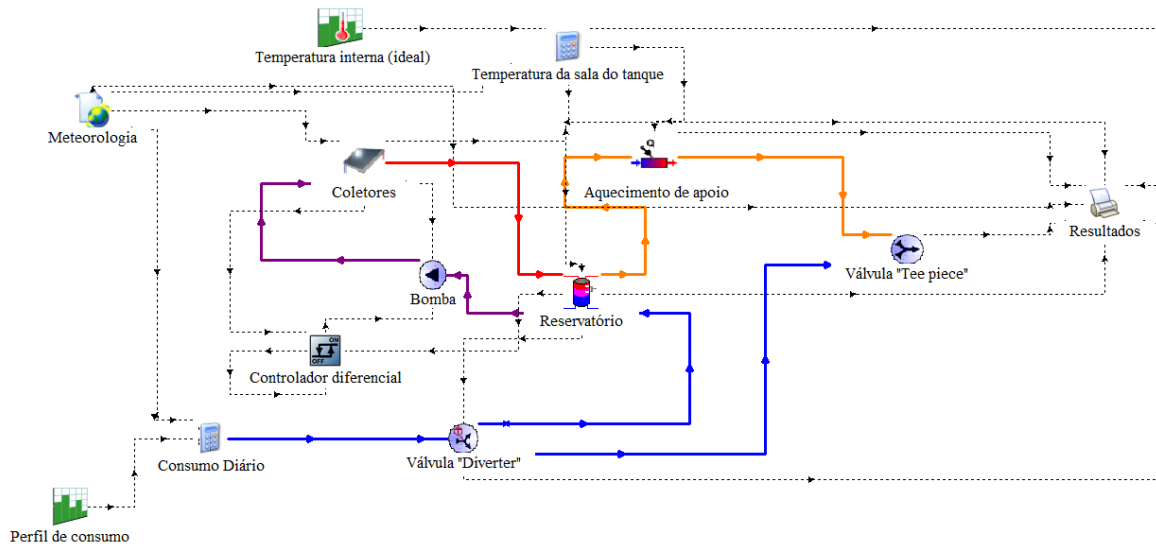


Figura 3.6: Sistema solar térmico modelado no TRNSYS.

Os coletores utilizados são planos (Type 1b), nos quais se utilizaram as características do coletor FKT-2S da Vulcano:

- Área de cada coletor =  $2,43 \text{ m}^2$
- Eficiência = 0,794
- Coeficiente de perdas térmicas  $a_1 = 3,863 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
- Coeficiente de perdas térmicas  $a_2 = 0,013 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
- Modificador de ângulo de incidência (IAM) = 0,94

O reservatório (Type 463, código desenvolvido em MATLAB) foi dimensionado segundo as características dos depósitos de acumulação com uma serpentina solar MVV-SB da Vulcano para vários volumes.

O caudal mássico máximo que atravessa a bomba de circulação (Type 3b) foi obtido através do programa SolTerm 5.3. A bomba é controlada por um controlador diferencial (Type 2b), que recebe informações das temperaturas da água à saída do coletor solar ( $T_{max}$ ) e a meio do reservatório AQS ( $T_{min}$ ) e, consoante os dados obtidos, acciona ou não a bomba de circulação. No caso de não haver circulação, a bomba começa a trabalhar quando a diferença de temperaturas ( $T_{max} - T_{min}$ ) for superior a  $6 \text{ }^\circ\text{C}$ , e continua em funcionamento até que a diferença de temperaturas ( $T_{max} - T_{min}$ ) seja inferior a  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Por segurança, o controlador também interrompe a bomba se a temperatura à saída do reservatório for superior a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

A jusante do reservatório principal encontra-se um aquecimento de apoio (Type 6) que aumenta a temperatura da água até  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  (*setpoint* de consumo considerado), caso



a temperatura da água à saída do reservatório seja inferior. Se a temperatura à saída do reservatório for superior ao *setpoint* definido, parte do caudal da água fria da rede é desviado para a temperar, através das válvulas "Diverter" (Type 11b) e "Tee piece" (Type 11h).

O ficheiro "Weather data" permite determinar as condições climáticas da zona onde vai ser implementado o sistema, neste caso, Coimbra. Considera-se que o reservatório vai ser inserido no interior de um espaço não climatizado, em que a temperatura é calculada através da Equação 3.1, segundo o RCCTE (2013).

$$T_{ENC} = T_{env} + (1 - b_{tr}) \cdot (T_{EC} - T_{env}) \quad (3.1)$$

$T_{ENC}$  é a temperatura no interior de um espaço não climatizado,  $T_{env}$  é a temperatura ambiente,  $b_{tr}$  é o coeficiente que representa a relação de temperatura entre espaços climatizados e não climatizados (foi considerado um valor intermédio de 0,5) e  $T_{EC}$  é a temperatura no interior de um espaço climatizado.

No trabalho desenvolvido, os componentes do módulo de adsorção (adsorção, evaporador, condensador) foram analisados com mais detalhe, de forma ajustarem-se aos diferentes perfis de consumo estudados e, por conseguinte, às diferentes volumetrias do reservatório de AQS. O sistema foi simulado, de forma paramétrica, para conciliar as dimensões destes componentes e obter a melhor eficiência. O diâmetro, a altura/ comprimento e a adição de alhetas foram os parâmetros geométricos mais analisados. Para uma melhor compreensão da relação entre estes e outros parâmetros, consultar o Anexo A.

### 3.3. Perfil de consumo

O sistema de acumulação de energia térmica é dimensionado consoante a quantidade de água que o reservatório tem que armazenar. Para tal, o primeiro passo é definir os perfis de consumo para os vários casos de estudo. Foi considerado que o consumo diário típico para uma pessoa são 40 litros. Assim o consumo diário total para os diferentes casos foi obtido através da Equação 3.2.

$$\text{Consumo diário} = 40 \cdot N_{pessoas} \quad (3.2)$$

Na Figura 3.7 estão representados os perfis de consumo para o caso de estudo com menor consumo (4 pessoas) e com maior consumo (100 pessoas).

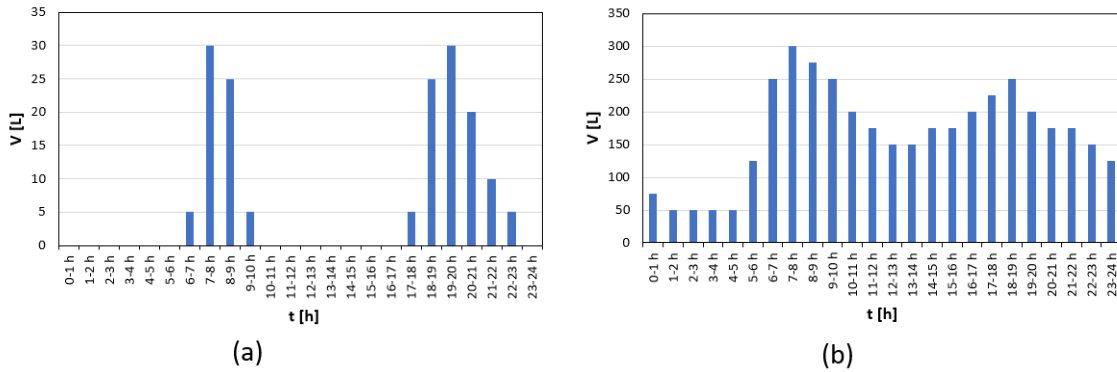


Figura 3.7: Perfis de consumo diário para (a) uma moradia com 4 pessoas, (b) um edifício com 100 pessoas.

No Apêndice A apresentam-se os perfis de consumo para os sistemas analisados. O critério utilizado para a elaboração destes perfis teve em conta o consumo de AQS. À medida que o consumo diário vai aumentando, o perfil de consumo passa de um perfil com picos de consumo em determinadas horas do dia, no qual existem várias horas sem necessidades, para um perfil mais distribuído, no qual há consumo em todas as horas do dia e os picos são menos acentuados. Este critério teve em conta o número de pessoas nas habitações, visto que um maior número de pessoas implica uma maior diversidade de estilos de vida e de horários, o que leva à utilização de água ao longo de todas as horas do dia.

#### 3.4. Configuração inicial dos sistemas

Na secção anterior, foi apresentada a Equação 3.2 que representa o cálculo do consumo diário de AQS. Através dessa fórmula foram obtidos os seguintes resultados:

- 160 L para 4 pessoas;
- 1000 L para 25 pessoas;
- 2000 L para 50 pessoas;
- 3000 L para 75 pessoas;
- 4000 L para 100 pessoas.

A partir destes valores foi calculado o volume do reservatório principal. De modo a prevenir os dias em que o consumo seja maior, a capacidade do tanque foi dimensionada para conseguir armazenar 150% do consumo diário, como se pode conferir na Tabela 3.1.

Os painéis solares captam a energia renovável utilizada pelo sistema, estando directamente relacionados com a energia que o aquecimento de apoio vai utilizar. De modo a compreender qual a configuração que permite um melhor aproveitamento foram feitas simulações no *software* TRNSYS, para duas diferentes: todos os painéis ligados em série e uma configuração mista [um conjunto de painéis ligados em série (máximo 10) e os conjuntos de painéis estão ligados em paralelo]. Através desta análise verificou-se que a configuração dos painéis não provocou grandes alterações nos resultados obtidos. Assim sendo, a configuração escolhida foi em série, por resultar num sistema menos complexo e por permitir apresentar uma interface mais simples. A área dos coletores para os diferentes casos estudados está apresentada na Tabela 3.1. Este parâmetro foi obtido a partir do volume do reservatório principal e da área de um coletor solar de forma a corresponder à Equação 3.3.

$$\frac{V_1 [L]}{A_{col} [m^2]} \approx 50 \quad (3.3)$$

A configuração inicial do sistema está apresentada na Tabela 3.1, a qual vai ser gradualmente alterada na secção 4.1 como consequência dos resultados do estudo paramétrico.



Tabela 3.1: Configuração inicial do sistema para as diferentes volumetrias.

	4 pessoas	25 pessoas	50 pessoas	75 pessoas	100 pessoas
$V_1$ [L]	250	1500	3000	4500	6000
$V_2$ [L]	62,5	375	750	1125	1500
$h_2$ [m]	0,200	0,428	0,581	0,628	0,813
$A_{col}$ [m <sup>2</sup> ]	4,56	29,16	58,32	87,48	116,64
$D_{o,cond}$ [mm]	10,26	10,26	10,26	10,26	10,26
$L_{cond}$ [m]	19,77	77,08	129,61	165,93	220,09
$e_{cond}$ [mm]	1,727	1,727	1,727	1,727	1,727
$p_{cond}$ [mm]	17	17	17	17	17
$\alpha_{cond}$ [°]	0,51	0,30	0,25	0,21	0,21
$D_{o,evap}$ [mm]	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05
$e_{evap}$ [mm]	2,11	2,11	2,11	2,11	2,11
$N_{t,evap}$	95	278	415	581	597
$N_{fext,evap}$	16	16	16	16	16
$D_{o,ads}$ [cm]	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16
$L_{ads}$ [m]	7,65	45,87	91,74	137,61	183,49
$N_{f,ads}$	10	10	10	10	10
$N_{fext,ads}$	695	695	695	695	695
$m_a$ [kg]	36,90	221,38	442,75	664,13	885,50



## 4. Resultados e Discussão

### 4.1. Análise da dimensão dos componentes do sistema

Nesta secção apresentam-se os resultados do estudo paramétrico dos componentes do sistema, obtidos através de simulações no programa TRNSYS com recurso ao *software* MATLAB. A ordem de apresentação segue a sequência do estudo paramétrico realizado aos diferentes componentes do sistema, de forma a estudar a influência de cada componente no desempenho global.

O trabalho teve um especial ênfase na poupança de energia obtida com a utilização do sistema com módulo de adsorção. As Equações 4.1 e 4.2 exemplificam como é que as poupanças, absoluta e relativa, foram calculadas, respetivamente.

$$P_{abs}[MJ/ano] = Q_{apoio,conv} - Q_{apoio,ads} \quad (4.1)$$

$$P_{rel}[\%] = \frac{Q_{apoio,conv} - Q_{apoio,ads}}{Q_{apoio,conv}} \quad (4.2)$$

Na Figura 4.1 é apresentada a energia consumida pelo aquecedor de apoio num ano para o sistema convencional ( $Q_{apoio,conv}$ ) e o sistema com módulo de adsorção ( $Q_{apoio,ads}$ ), nas suas configurações de base (consultar Tabela 3.1). A poupança relativa também é apresentada no gráfico.

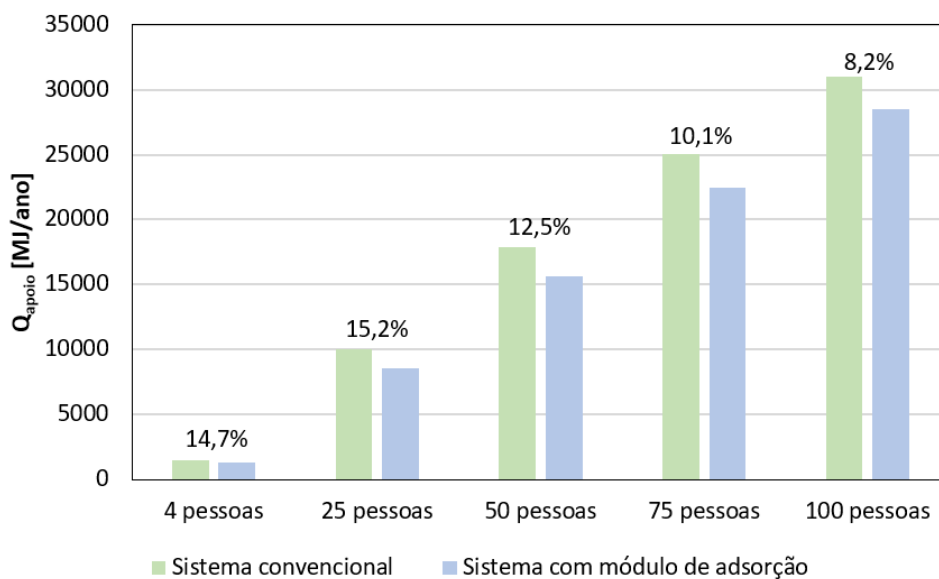


Figura 4.1: Energia consumida num ano pelo aquecedor de apoio nos sistemas convencional e com módulo de adsorção para a configuração inicial (poupança relativa de energia no topo das barras).

## 4. Resultados e Discussão

As tabelas apresentadas de seguida mostram os parâmetros principais de cada componente que são alterados. As células preenchidas a verde representam os resultados considerados mais adequados para cada parâmetro em estudo, e que serão utilizados nas análises paramétricas subsequentes.

O reservatório de pré-aquecimento tem o mesmo diâmetro que o reservatório principal, pelo que importa analisar o seu volume, no qual a água fria proveniente da rede vai ser pré-aquecida através do calor de condensação. A Tabela 4.1 mostra as dimensões das quatro configurações estudadas, consoante o volume do reservatório principal (difere de caso para caso): estudou-se a hipótese do volume do reservatório secundário ser 2, 3, 4 ou 6 vezes inferior ao volume do reservatório principal.

Tabela 4.1: Parâmetros do reservatório secundário analisados.

	4 pessoas	25 pessoas	50 pessoas	75 pessoas	100 pessoas
<b>Volume Reservatório secundário = 1/6 Volume Reservatório Principal</b>					
$V_2$ [L]	41,67	250	500	750	1000
$h_2$ [m]	0,133	0,285	0,388	0,418	0,542
$L_{cond}$ [m]	12,30	49,88	84,57	108,44	144,52
<b>Volume Reservatório secundário = 1/4 Volume Reservatório Principal</b>					
$V_2$ [L]	62,5	375	750	1125	1500
$h_2$ [m]	0,200	0,428	0,581	0,628	0,813
$L_{cond}$ [m]	19,77	77,08	129,61	165,93	220,09
<b>Volume Reservatório secundário = 1/3 Volume Reservatório Principal</b>					
$V_2$ [L]	83,33	500	1000	1500	2000
$h_2$ [m]	0,267	0,570	0,775	0,837	1,084
$L_{cond}$ [m]	27,25	104,29	174,66	223,41	295,66
<b>Volume Reservatório secundário = 1/2 Volume Reservatório Principal</b>					
$V_2$ [L]	125	750	1500	2250	3000
$h_2$ [m]	0,400	0,855	1,163	1,255	1,626
$L_{cond}$ [m]	42,21	158,70	264,74	338,38	446,80

Através da Figura 4.2 verifica-se que quanto maior o reservatório secundário, maior será a energia anual poupada. No entanto, o estudo prosseguiu considerando o volume do reservatório secundário igual a 25% do volume do reservatório principal, com o intuito de manter alguma compacidade no sistema e porque maiores dimensões acarretam maiores dificuldades quanto à montagem do sistema.

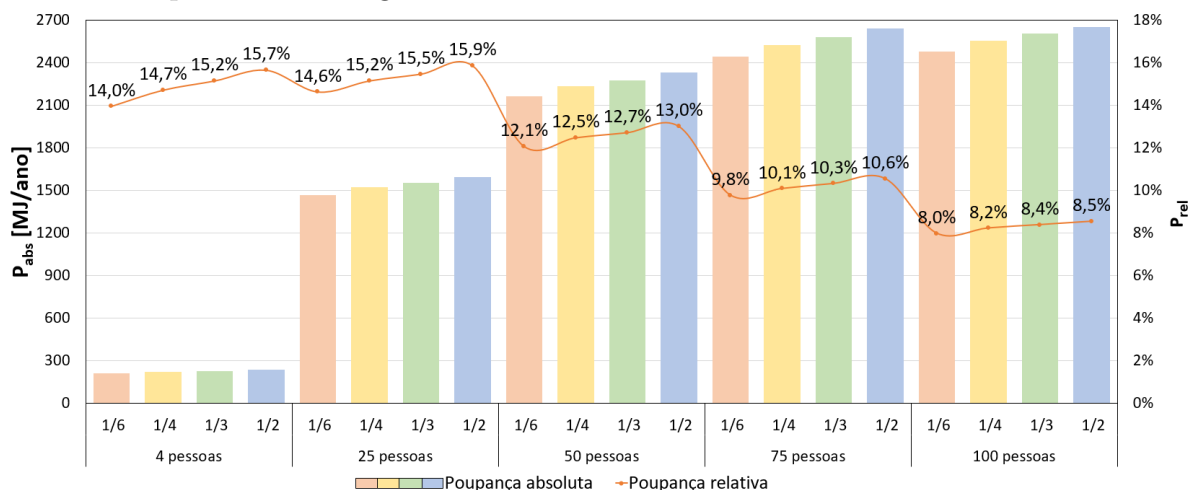


Figura 4.2: Influência do volume do reservatório secundário na eficiência do sistema.

O segundo componente a ser analisado foi o condensador, para o qual foram feitas simulações para três diâmetros nominais distintos (10,26 mm; 42,16 mm e 101,6 mm). A Tabela 4.2 mostra os principais parâmetros geométricos dos componentes estudados.

Tabela 4.2: Parâmetros do condensador analisados.

	4 pessoas	25 pessoas	50 pessoas	75 pessoas	100 pessoas
<b>Diâmetro do condensador (<math>D_{o,cond}</math>) = 10,26 mm</b>					
$L_{cond}$ [m]	19,77	77,08	129,61	165,93	220,09
$e_{cond}$ [mm]	1,727	1,727	1,727	1,727	1,727
$p_{cond}$ [mm]	17	17	17	17	17
$\alpha_{cond}$ [°]	0,51	0,30	0,25	0,21	0,21
<b>Diâmetro do condensador (<math>D_{o,cond}</math>) = 42,16 mm</b>					
$L_{cond}$ [m]	5,34	23,92	41,41	53,47	71,87
$e_{cond}$ [mm]	3,556	3,556	3,556	3,556	3,556
$p_{cond}$ [mm]	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9
$\alpha_{cond}$ [°]	1,55	0,89	0,73	0,61	0,60
<b>Diâmetro do condensador (<math>D_{o,cond}</math>) = 101,6 mm</b>					
$L_{cond}$ [m]	1,27	8,54	15,78	20,75	28,70
$e_{cond}$ [mm]	5,74	5,74	5,74	5,74	5,74
$p_{cond}$ [mm]	108,34	108,34	108,34	108,34	108,34
$\alpha_{cond}$ [°]	3,83	2,10	1,69	1,42	1,39

Através da análise da Figura 4.3, verifica-se que quanto maior o diâmetro do condensador, menor será a eficiência do sistema. Contudo, a escolha das dimensões do condensador teve por base o ângulo das fiadas do condensador ( $\alpha_{cond}$ ), até porque a influência do diâmetro é muito pequena. Este é o ângulo pelo qual a água escorre e a sua inclinação varia consoante a dimensão do diâmetro. De modo a garantir uma boa fluidez da água estipulou-se um ângulo mínimo de  $1,2^\circ$ . Nesse sentido, foram seleccionados, para cada caso, diâmetros nominais intermédios que verificam a condição  $\alpha_{cond} \approx 1,2^\circ$ , como indica a Tabela 4.3.

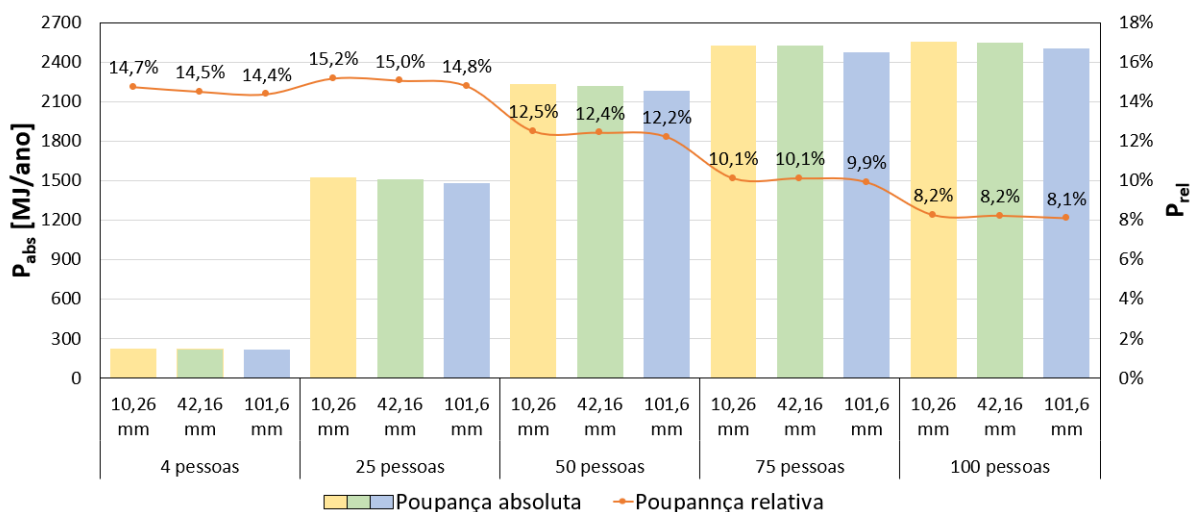


Figura 4.3: Influência do diâmetro do condensador na eficiência do sistema.

Tabela 4.3: Parâmetros finais do condensador.

	$D_{o,cond}$ [mm]	$L_{cond}$ [m]	$e_{cond}$ [mm]	$p_{cond}$ [mm]	$\alpha_{cond}$ [°]
4 pessoas	33,40	7,00	3,378	40,14	1,25
25 pessoas	60,33	16,29	3,912	67,07	1,24
50 pessoas	73,03	23,29	5,156	79,77	1,22
75 pessoas	88,90	24,30	5,486	95,64	1,24
100 pessoas	88,90	33,40	5,486	95,64	1,22

Com os parâmetros do condensador definidos, avançou-se para a análise do evaporador, que tem grande influência na eficiência do sistema. Neste componente, para além do diâmetro dos tubos também foi estudada a influência da espessura e do número de alhetas longitudinais exteriores no desempenho do sistema. Nas simulações realizadas, o diâmetro do evaporador foi testado para três diâmetros nominais diferentes (Tabela 4.4).

Tabela 4.4: Parâmetros do evaporador analisados.

	4 pessoas	25 pessoas	50 pessoas	75 pessoas	100 pessoas
<b>Diâmetro do evaporador (<math>D_{o,evap}</math>) = 19,05 mm</b>					
$e_{evap}$ [mm]	2,11	2,11	2,11	2,11	2,11
$N_{t,evap}$	95	278	415	581	597
$N_{fext,evap}$	16	16	16	16	16
<b>Diâmetro do evaporador (<math>D_{o,evap}</math>) = 60,325 mm</b>					
$e_{evap}$ [mm]	3,91	3,91	3,91	3,91	3,91
$N_{t,evap}$	31	92	137	193	199
$N_{fext,evap}$	40	40	40	40	40
<b>Diâmetro do evaporador (<math>D_{o,evap}</math>) = 88,9 mm</b>					
$e_{evap}$ [mm]	5,486	5,486	5,486	5,486	5,486
$N_{t,evap}$	18	55	81	114	118
$N_{fext,evap}$	56	56	56	56	56

Conforme os resultados ilustrados na Figura 4.4, a variação do diâmetro dos tubos do evaporador, e, por consequência, da sua espessura e do número de tubos e de alhetas, permite obter poupanças relativas entre 2 a 3% superiores entre o menor e o maior diâmetro analisados. Todavia, a escolha do menor diâmetro (19,05 mm) pode não ser a melhor opção para aplicações práticas, visto que implica uma maior altura do evaporador. Por exemplo, admitindo o menor diâmetro, a altura do evaporador para o sistema desenvolvido para 100 pessoas é de 4,39 m.

O estudo da espessura dos tubos (2,11 mm; 2,311 mm e 3,2 mm) e do número de alhetas exteriores (16 e 20 alhetas) (Figuras 4.5 e 4.6) foi realizado sem alterar qualquer outro parâmetro. Estas variáveis não têm tanto impacto como o diâmetro. No entanto, uma espessura maior, bem como um maior número de alhetas exteriores aumentam a eficiência do sistema. Para os estudos seguintes foram escolhidos os valores normalizados para o diâmetro do tubo do evaporador definido (**2,311 mm** como espessura do evaporador e **20 alhetas**) [Tubes 2013].

## Sistema de Acumulação de Energia Térmica Solar com Módulo de Adsorção: Comparação do Desempenho em Edifícios de Diferentes Dimensões

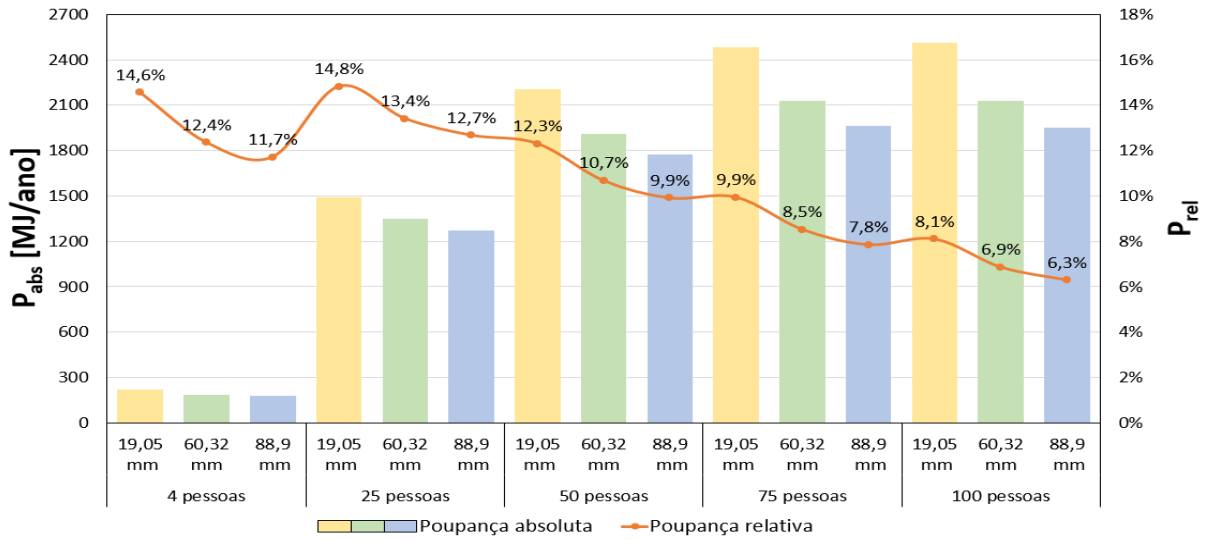


Figura 4.4: Variação da poupança anual com o diâmetro dos tubos do evaporador.

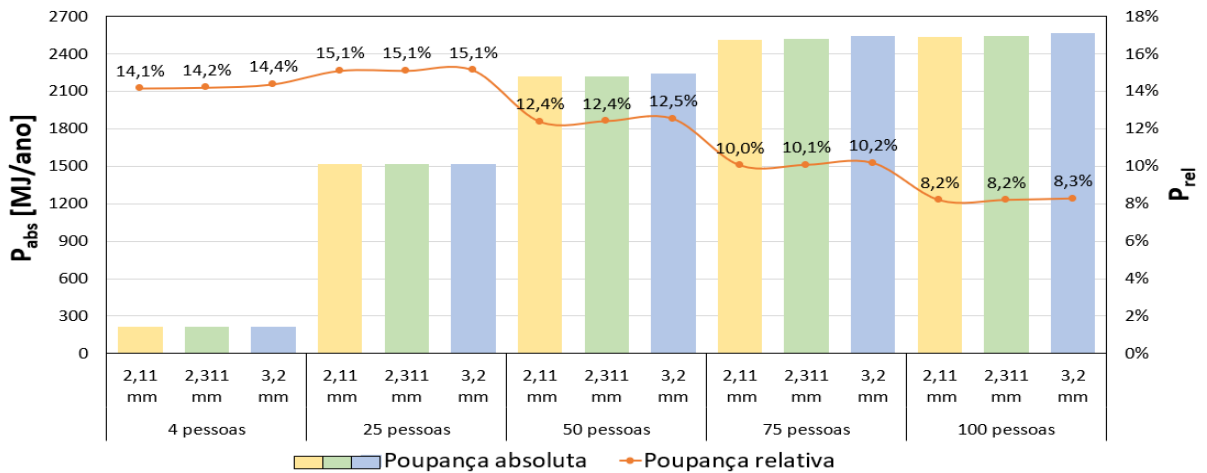


Figura 4.5: Influência da espessura dos tubos do evaporador na eficiência do sistema.

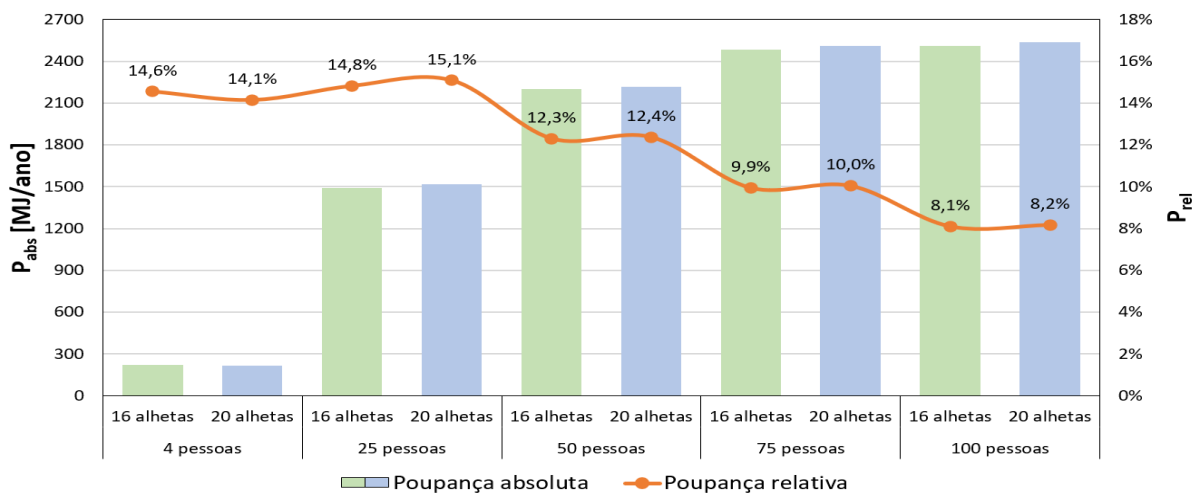


Figura 4.6: Variação da poupança anual com o número de alhetas do evaporador.

## 4. Resultados e Discussão

No estudo do adsorisor foram analisados quatro diâmetros nominais (10,16 cm; 14,13 cm; 16,828 cm e 21,908 cm), para os quais o número de alhetas interiores não foi alterado (10 para todos os casos). A Tabela 4.5 mostra como o comprimento do adsorisor e a massa de adsorvente variam consoante o diâmetro, uma vez que o volume ocupado pelo adsorisor é invariável (considera-se que ocupa 90% do nodo superior do reservatório).

O gráfico da Figura 4.7 apresenta a poupança de energia obtida utilizando quatro diâmetros de adsorisor diferentes. Um adsorisor fino é o mais recomendado, pois permite melhorar as poupanças em cerca de 1% nos casos estudados.

Tabela 4.5: Parâmetros do adsorisor analisados.

	4 pessoas	25 pessoas	50 pessoas	75 pessoas	100 pessoas
<b>Diâmetro do adsorisor (<math>D_{o,ads}</math>) = 10,16 cm</b>					
$L_{ads}$ [m]	7,65	45,87	91,74	137,62	183,49
$m_a$ [kg]	36,90	221,38	442,75	664,13	885,50
<b>Diâmetro do adsorisor (<math>D_{o,ads}</math>) = 14,13 cm</b>					
$L_{ads}$ [m]	3,95	23,72	47,43	71,15	94,87
$m_a$ [kg]	37,65	225,91	451,82	677,73	903,64
<b>Diâmetro do adsorisor (<math>D_{o,ads}</math>) = 16,828 cm</b>					
$L_{ads}$ [m]	2,79	16,72	33,44	50,16	66,89
$m_a$ [kg]	38,39	230,35	460,71	691,06	921,41
<b>Diâmetro do adsorisor (<math>D_{o,ads}</math>) = 21,908 cm</b>					
$L_{ads}$ [m]	1,64	9,87	19,73	29,60	39,46
$m_a$ [kg]	39,30	235,80	471,60	707,41	943,21

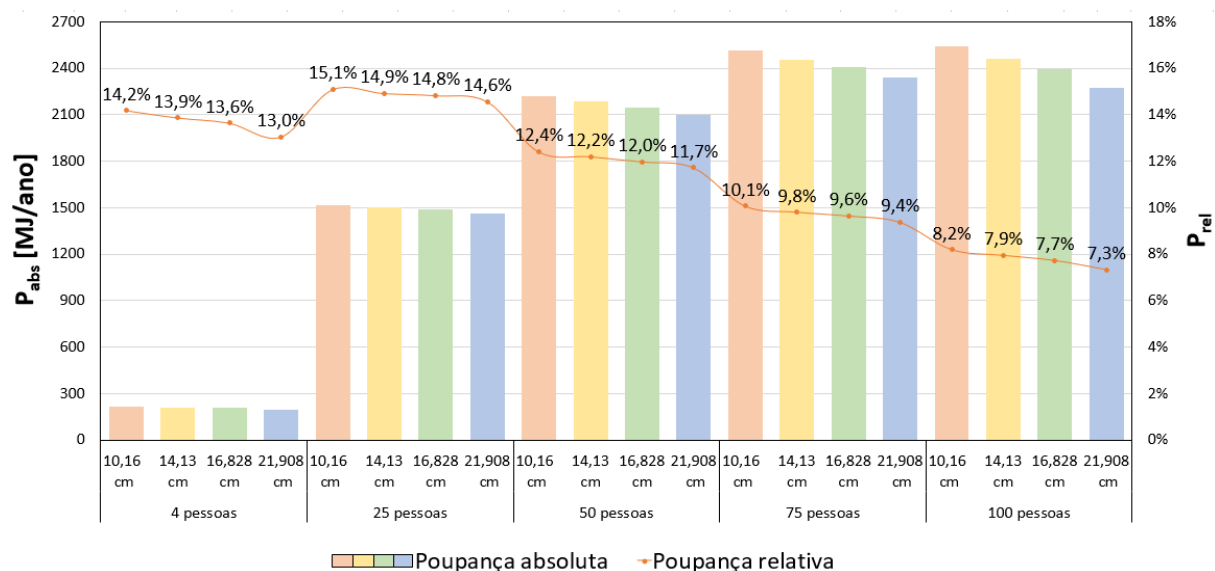


Figura 4.7: Influência do diâmetro do adsorisor na poupança anual.

As alhetas exteriores do adsorisor têm o intuito de aumentar a área de transferência de calor com a água dentro do reservatório e, com isso, melhorar a eficiência do sistema. No entanto, o espaço ocupado pelas alhetas pode ser aproveitado para aumentar o volume do adsorisor ( $V_{t,ads}$ ) e, por conseguinte, a massa do adsorvente ( $m_a$ ), como indica a



Tabela 4.6, sendo possível armazenar maior quantidade de adsorvato para ser utilizado posteriormente.

Tabela 4.6: Variáveis alteradas com a remoção das alhetas exteriores do adsorisor.

	4 pessoas	25 pessoas	50 pessoas	75 pessoas	100 pessoas
<b>Com alhetas exteriores (<math>N_{f_{ext,ads}} = 695</math>)</b>					
$V_{t,ads}$ [L]	61,98	371,90	743,80	1115,70	1487,60
$m_a$ [kg]	36,90	221,38	442,75	664,13	885,50
$L_{ads}$ [m]	7,65	45,87	91,74	137,62	183,49
<b>Sem alhetas exteriores</b>					
$V_{t,ads}$ [L]	75,00	450,00	900,00	1350,00	1800,00
$m_a$ [kg]	44,64	267,86	535,73	803,59	1071,46
$L_{ads}$ [m]	9,25	55,51	111,01	166,52	222,02

O espaço libertado com a remoção das alhetas exteriores do adsorisor permite aumentar o volume do mesmo em aproximadamente 21%. Como mostram os resultados apresentados na Figura 4.8, as poupanças de energia são superiores quando o sistema não tem alhetas. Importa realçar que não foi efetuado um estudo de otimização, pois poderá existir um determinado número de alhetas para o qual os sistemas possam beneficiar da sua introdução.

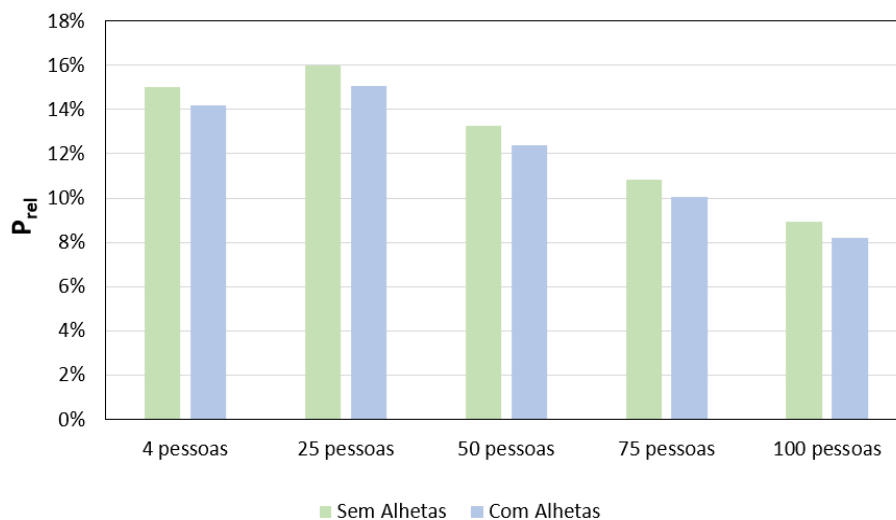


Figura 4.8: Influência das alhetas exteriores do adsorisor na poupança relativa anual de energia.

## 4.2. Análise da dimensão global do sistema

A configuração final do sistema é apresentada na Tabela 4.7. Através desses valores fez-se uma comparação das poupanças absoluta e relativa para os perfis em estudo. A Figura 4.9 mostra que o módulo de adsorção tem influência positiva no que diz respeito à poupança relativa de energia em todos os casos.

Embora o desejado fosse verificar um aumento, ou, pelo menos, manter o valor da poupança de energia relativa com o aumento da dimensão do sistema, tal não se verificou.

#### 4. Resultados e Discussão

As poupanças de energia obtidas com o uso do sistema com módulo de adsorção foram de 15,0%; 16,0%; 13,3%; 10,8% e 8,9% em relação ao sistema convencional para os casos estudados de 4, 25, 50, 75 e 100 pessoas, respectivamente. No panorama geral, as poupanças relativas vão diminuindo quando o sistema é dimensionado para um edifício com maior número de pessoas, à exceção da passagem de 4 pessoas para 25 pessoas, no qual há um aumento de 1% na poupança anual obtida. Contudo, é necessário realçar que as análises paramétricas efetuadas carecem de estudos de otimização para cada perfil.

Tabela 4.7: Configuração final do sistema.

	4 pessoas	25 pessoas	50 pessoas	75 pessoas	100 pessoas
$V_1$ [L]	250	1500	3000	4500	6000
$V_2$ [L]	62,5	375	750	1125	1500
$h_2$ [m]	0,200	0,428	0,581	0,628	0,813
$A_{col}$ [m <sup>2</sup> ]	4,56	29,16	58,32	87,48	116,64
$D_{o,cond}$ [mm]	33,40	60,33	73,03	88,90	88,90
$L_{cond}$ [m]	7,00	16,29	23,29	24,30	33,40
$e_{cond}$ [mm]	3,378	3,912	5,156	5,486	5,486
$p_{cond}$ [mm]	40,14	67,07	79,77	95,64	95,64
$\alpha_{cond}$ [°]	1,25	1,24	1,22	1,24	1,22
$D_{o,evap}$ [mm]	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05
$e_{evap}$ [mm]	2,311	2,311	2,311	2,311	2,311
$N_{t,evap}$	95	278	415	581	597
$N_{fext,evap}$	20	20	20	20	20
$D_{o,ads}$ [cm]	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16
$L_{ads}$ [m]	9,25	55,51	111,01	166,52	222,02
$N_{f,ads}$	10	10	10	10	10
$N_{fext,ads}$	0	0	0	0	0
$m_a$ [kg]	44,64	267,86	535,73	803,59	1071,46

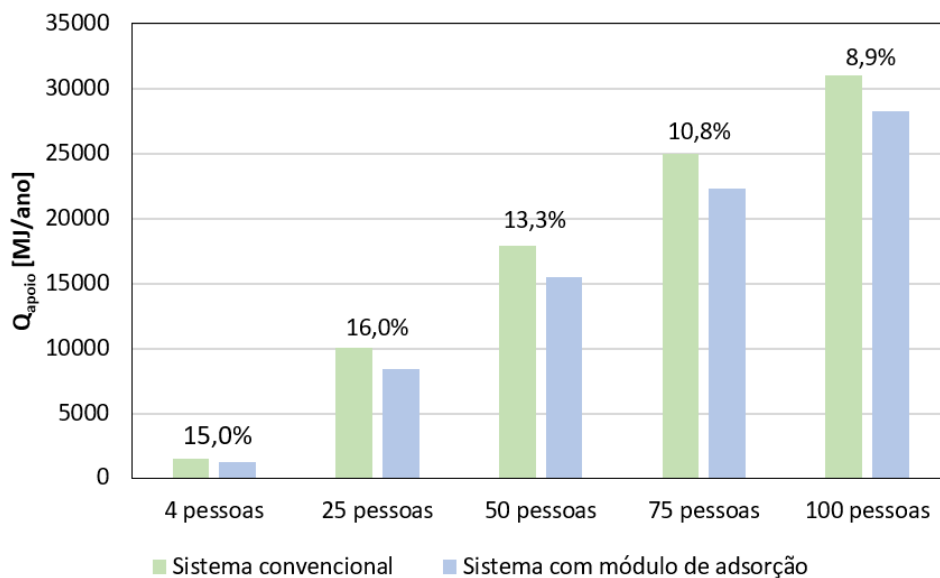


Figura 4.9: Energia consumida num ano pelo aquecedor de apoio nos sistemas convencional e com módulo de adsorção para a configuração final (poupança relativa de energia no topo das barras).

A fração renovável, tal como indica a Equação 4.3, é a relação entre a energia consumida de cariz renovável (solar e pelo evaporador, quando este está presente, descontando as perdas térmicas) e a energia total consumida, que engloba a energia do apoio.

$$f_{ren} = \frac{(Q_{hx} - P_1 - P_2) + Q_{evap,ads}}{(Q_{hx} - P_1 - P_2) + Q_{evap,ads} + Q_{apoio}} \quad (4.3)$$

Tal como a Figura 4.10 mostra, a fração renovável tende a aumentar ligeiramente para sistemas com maiores dimensões: 79,8%; 78,7%; 80,0%; 80,8% e 81,5% para os sistemas de 4, 25, 50, 75 e 100 pessoas, respetivamente. Quando comparada entre os sistemas com e sem módulo de adsorção, nota-se um aumento entre 2 a 4% da fração renovável para os sistemas com módulo de adsorção em todos os casos estudados.

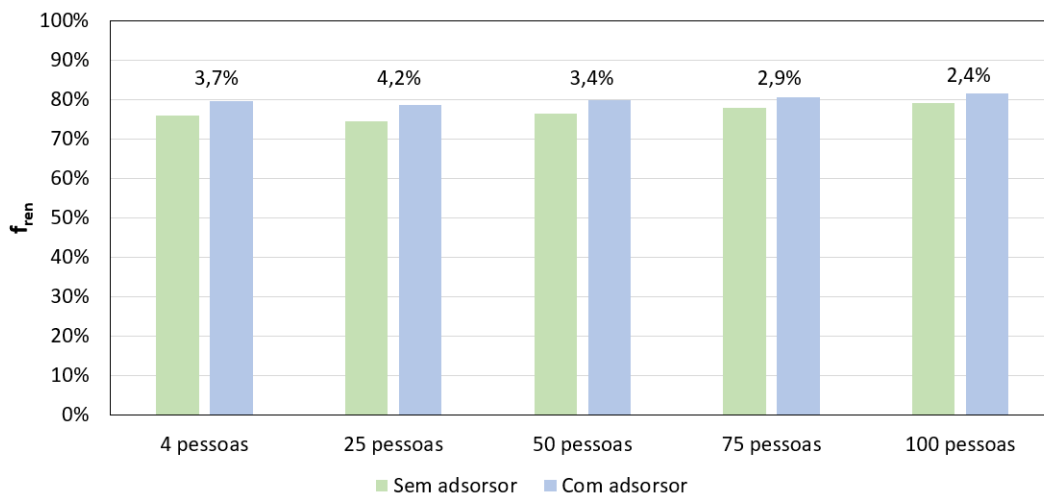


Figura 4.10: Fração renovável dos sistemas com e sem módulo de adsorção.

As Tabelas 4.8 e 4.9 apresentam a evolução ao longo do ano do consumo médio mensal do aquecedor de apoio nos dois sistemas (convencional e com módulo de adsorção), das poupanças de energia obtidas, da diferença da temperatura média mensal da água no nodo superior do reservatório de armazenamento nos sistemas convencional e com módulo de adsorção ( $\bar{T}_{w,ads} - \bar{T}_{w,conv}$ ) e da diferença da temperatura média mensal entre a água proveniente da rede e a água do reservatório de pré-aquecimento ( $\bar{T}_{w,2} - \bar{T}_{rede}$ ). Os resultados em questão referem-se ao caso de um edifício multifamiliar com 50 pessoas, sendo tomado como caso representativo, uma vez que os outros casos estudados apresentam resultados similares no que diz respeito à variação das temperaturas e às poupanças obtidas ao longo do ano.

A temperatura média anual no nodo superior do sistema com módulo de adsorção é maior 0,8 °C do que a do sistema convencional. Esta temperatura atinge um valor máximo de 95,7 °C no sistema com adsorção, como se pode observar na Figura 4.11. Verifica-se que a introdução do condensador dentro do reservatório secundário permite um aumento médio anual de 2,6 °C da temperatura do reservatório de pré-aquecimento ( $T_{w,2}$ ) em relação à temperatura da água da rede ( $T_{rede}$ ). Isto significa que a energia necessária para aquecer a água no reservatório de AQS será menor, logo, a eficiência do sistema irá aumentar. Ainda se pode observar que a poupança absoluta é maior para o mês de maio (339,2 MJ), com um valor interessante no mês de julho (193,6 MJ), pois seria de esperar poupanças maiores nos meses mais frios, em que a temperatura da água

#### 4. Resultados e Discussão

decrece com maior facilidade do *setpoint* de consumo, levando a uma maior utilização do módulo de adsorção. A poupança relativa é superior para os meses com temperatura de água mais quente: o mês de agosto apresenta uma poupança de 91%; em contrapartida, no mês de dezembro verifica-se uma poupança de 3,9%.

Tabela 4.8: Consumo médio mensal do aquecedor de apoio para os sistemas convencional e com módulo de adsorção para o caso de 50 pessoas.

	$\bar{Q}_{apoio,conv}$ [MJ]	$\bar{Q}_{apoio,ads}$ [MJ]	$\bar{P}_{abs}$ [MJ]	$\bar{P}_{rel}$
<b>Janeiro</b>	2559,0	2351,4	207,7	8,1%
<b>Fevereiro</b>	2216,4	1996,3	220,1	9,9%
<b>Março</b>	1158,0	924,5	233,5	20,2%
<b>Abril</b>	2282,2	2082,6	199,7	8,7%
<b>Mai</b>	1554,9	1215,7	339,2	21,8%
<b>Junho</b>	1063,7	905,7	158,0	14,9%
<b>Julho</b>	330,3	136,7	193,6	58,6%
<b>Agosto</b>	67,0	6,0	61,0	91,0%
<b>Setembro</b>	351,4	210,0	141,4	40,2%
<b>Outubro</b>	941,7	672,2	269,5	28,6%
<b>Novembro</b>	2336,9	2102,9	234,0	10,0%
<b>Dezembro</b>	3047,5	2928,0	119,5	3,9%
<b>Soma</b>	<b>17909,1</b>	<b>15532,0</b>	<b>2377,1</b>	<b>13,3%</b>

Tabela 4.9: Temperaturas médias mensais da água: do reservatório principal (nodo superior) para os sistemas convencional e com módulo de adsorção, do reservatório secundário e da rede, para o caso de 50 pessoas.

	$\bar{T}_{w,ads}$ [°C]	$\bar{T}_{w,conv}$ [°C]	$\bar{T}_{w,ads} - \bar{T}_{w,conv}$ [°C]	$\bar{T}_{w,2}$ [°C]	$\bar{T}_{rede}$ [°C]	$\bar{T}_{w,2} - \bar{T}_{rede}$ [°C]
<b>Janeiro</b>	35,4	34,0	1,3	18,3	16,0	2,3
<b>Fevereiro</b>	35,8	34,0	1,8	18,6	15,9	2,7
<b>Março</b>	46,0	45,6	0,4	20,3	16,6	3,7
<b>Abril</b>	36,5	35,4	1,1	20,2	18,0	2,1
<b>Mai</b>	45,8	44,7	1,1	22,8	19,6	3,2
<b>Junho</b>	45,7	45,6	0,2	23,9	21,1	2,8
<b>Julho</b>	52,9	51,9	1,0	25,0	22,1	3,0
<b>Agosto</b>	62,2	62,0	0,2	24,8	22,2	2,6
<b>Setembro</b>	62,8	62,8	-0,1	23,9	21,5	2,4
<b>Outubro</b>	48,1	47,1	1,0	23,0	20,1	2,9
<b>Novembro</b>	36,8	35,5	1,3	20,0	18,4	1,6
<b>Dezembro</b>	32,2	31,3	0,9	18,7	16,9	1,7
<b>Anual</b>	<b>45,0</b>	<b>44,2</b>	<b>0,9</b>	<b>21,6</b>	<b>19,0</b>	<b>2,6</b>

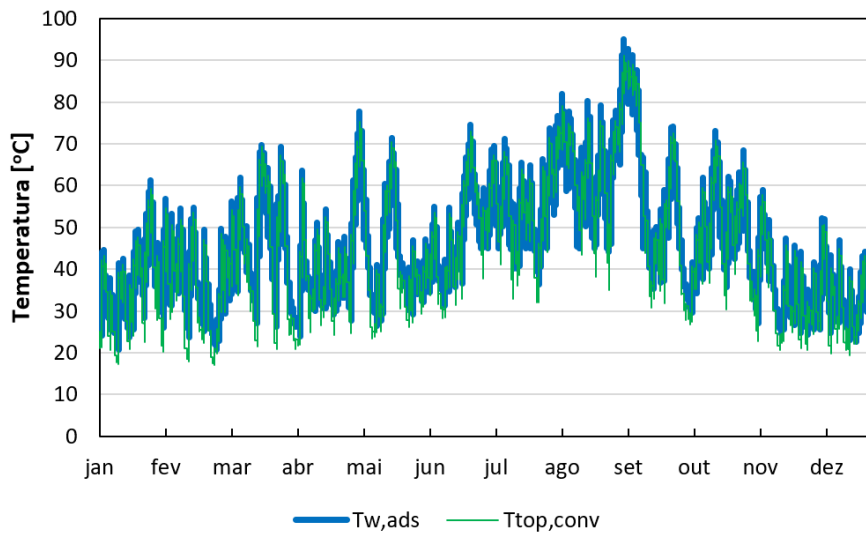


Figura 4.11: Evolução anual da temperatura da água no nodo superior do reservatório para os sistemas convencional e com módulo de adsorção para o caso de estudo de 50 pessoas.

A densidade de armazenamento de energia foi outro dos fatores avaliados. Os sistemas convencionais apenas armazenam energia sensível que é calculada segundo a Equação 2.1. A densidade de energia nestes sistemas é obtida dividindo esta energia pelo volume de armazenamento, conforme a Equação 4.4.

$$E_{d,conv} = \rho \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (4.4)$$

onde  $E_{d,conv}$  é a densidade de armazenamento de energia no sistema convencional e  $\rho$  é a massa volúmica da água.

O sistema com módulo de adsorção acomoda dois materiais de armazenamento diferentes, o que dificulta o seu cálculo. Considerando apenas o meio adsorvente, a densidade de energia pode ser calculada através da razão entre a energia média ponderada libertada pelo adsorção para a água durante os períodos de descarga e o volume do adsorção, como indica a Equação 4.5.

$$\bar{E}_{d,ads} = \frac{\bar{Q}_{ads}}{V_{ads}} \quad (4.5)$$

onde  $\bar{Q}_{ads}$  é a energia média ponderada libertada pelo adsorção durante o período analisado e  $V_{ads}$  é o volume ocupado pelo adsorção.

Na Tabela 4.10 são apresentados alguns valores relacionados com a densidade de armazenamento de energia, onde  $Q_{ads,t}$  representa a energia total libertada pelo adsorção ao longo do ano, e  $\%Q_{ads}$  a percentagem de energia libertada proveniente apenas do efeito de adsorção (não contabiliza a libertação de energia sensível). A densidade de armazenamento de energia média ponderada ( $\bar{E}_{d,ads}$ ) durante os períodos de descarga varia entre os 38,8 e os 41,5 kWh/m<sup>3</sup> para os sistemas estudados, tratando-se de valores superiores à densidade obtida por Fernandes (2017), 29 kWh/m<sup>3</sup>, cujo trabalho deu origem ao presente estudo. O valor máximo de densidade armazenamento ( $\bar{E}_{d,ads,max} = 118,3 \text{ kWh/m}^3$ ) verifica-se no sistema de 100 pessoas, para um período de descarga onde  $\Delta X_{ads} = 0,24 \text{ kg/kg}_{\text{sílica gel}}$ .

Tabela 4.10: Densidade de armazenamento de energia no adsorisor.

	4 pessoas	25 pessoas	50 pessoas	75 pessoas	100 pessoas
$V_{ads}$ [m <sup>3</sup> ]	0,075	0,45	0,9	1,35	1,80
$Q_{ads,t}$ [MJ]	745,6	3902,4	7537,9	11105,4	14684,9
$\%Q_{ads}$	93,4%	94,1%	93,7%	94,0%	93,8%
$\bar{D}_{e,ads}$ [kWh/ m <sup>3</sup> ]	38,8	40,1	38,9	40,2	41,5
$D_{e,ads,max}$ [kWh/ m <sup>3</sup> ]	117,1	115,2	113,6	113,8	118,3

A Figura 4.12 apresenta a evolução da energia libertada pelo adsorisor para a água durante os períodos de descarga para o sistema de 50 pessoas (as análises dos outros sistemas podem ser observadas no Apêndice B). Através da observação do gráfico e dos valores mencionados na Tabela 4.10, confirma-se que a energia térmica libertada nas fases de adsorção é muito superior à libertada nas fases de arrefecimento (calor sensível). Ao longo do ano vão existindo picos de libertação de energia, sendo que os mais notórios ocorrem no início de maio e no final de setembro. Importa salientar ainda que agosto é o mês com menos libertação de energia por parte do adsorisor (tem menos necessidades de aquecimento).

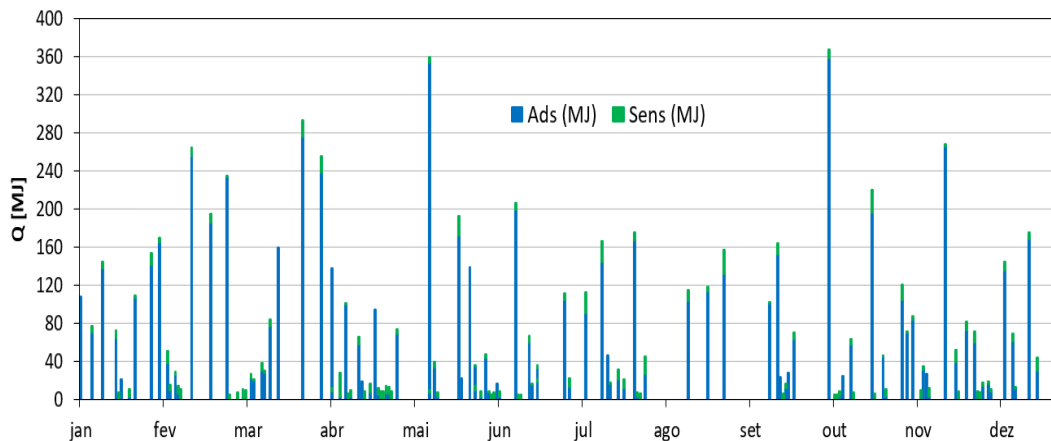


Figura 4.12: Evolução anual da energia libertada pelo adsorisor para a água no final de cada período de descarga para caso de estudo de 50 pessoas.

## 5. Conclusão

O impacto dos combustíveis fósseis no ambiente é cada vez mais evidente, cabendo a NÓS, cidadãos, tomar medidas e intervir de modo a melhorar esta situação. A redução ou mesmo a remoção destes poluentes passa por encontrar alternativas para a produção de energia através de fontes renováveis.

Este trabalho visou explorar a implementação dum sistema de armazenamento de energia térmica com módulo de adsorção para edifícios multifamiliares. A diferença deste sistema para os convencionais é a introdução do módulo de adsorção constituído por um adsorisor, um condensador e um evaporador, o que permite o armazenamento de energia durante longos períodos de tempo quase sem perdas, desde que os materiais do par de trabalho, neste caso sílica gel/água, estejam separados. Outra vantagem é que têm uma densidade de armazenamento maior.

A configuração inicial da análise paramétrica do sistema teve por base os menores diâmetros dos componentes do módulo de adsorção analisados. O objetivo foi perceber a influência desses componentes, assim como a influência do volume do reservatório secundário no desempenho global do sistema.

O primeiro componente a ser analisado foi o reservatório secundário, tendo-se concluído que quanto maior o volume do mesmo, maiores serão as poupanças do sistema. No entanto optou-se por um volume correspondente a 25% do reservatório principal para garantir que o sistema seja algo compacto. Relativamente ao diâmetro do condensador, verificou-se que um diâmetro inferior permite obter uma melhor eficiência do sistema. Todavia, o diâmetro foi escolhido consoante o ângulo de inclinação da serpentina do condensador ( $\alpha_{cond} \geq 1,2^\circ$ ), de modo a permitir o escoamento da água sem problemas. A utilização de um evaporador longo, ou seja, com um diâmetro menor, melhora o desempenho do sistema, pelo que a análise prosseguiu com o diâmetro mais pequeno. Contudo em aplicações práticas é preciso ter em atenção a altura dos tubos do evaporador, a qual aumenta com a diminuição do diâmetro dos mesmos. O aumento do número de alhetas exteriores e o aumento da espessura dos tubos do evaporador também proporcionam um melhor desempenho do sistema. O último componente a ser parametrizado foi o adsorisor, tendo-se verificado que quanto mais esguio este for, maiores serão as poupanças, na ordem de 1% de diferença para os diâmetros estudados. Através das simulações realizadas concluiu-se que, na melhor configuração do sistema, as alhetas exteriores do adsorisor não devem estar presentes. Foram obtidas maiores poupanças para os sistemas sem as mesmas, uma vez que sem as alhetas consegue-se aumentar a massa do adsorvente como consequência do aumento do volume do adsorisor. Todavia, é preciso referir que não se fez uma otimização e poderá existir um número de alhetas para o qual valha a pena a sua adição.

Através das configurações finais dos sistemas conclui-se que, no panorama geral, à medida que as dimensões do sistema aumentam menor será a poupança relativa. As poupanças de 15,0%; 16,0%; 13,3%; 10,8% e 8,9% foram alcançadas para os sistemas com 4, 25, 50, 75 e 100 pessoas, respetivamente.

## 5. Conclusão

---

A fração renovável refere-se à percentagem de cariz renovável utilizada, sendo que o sistema com módulo de adsorção permite um aumento entre 2,4 a 4,2% deste parâmetro em relação ao sistema convencional. As frações renováveis obtidas para o sistema com módulo de adsorção foram de 79,8%; 78,7%; 80,0%; 80,8% e 81,5% para os sistemas com 4, 25, 50, 75 e 100 pessoas, respetivamente.

Os valores da densidade de armazenamento de energia média ponderada durante os períodos de descarga ao longo do ano, considerando apenas o meio adsorvente, para a configuração final foram de 38,8 kWh/m<sup>3</sup>; 40,1 kWh/m<sup>3</sup>; 38,9 kWh/m<sup>3</sup>; 40,2 kWh/m<sup>3</sup> e 41,5 kWh/m<sup>3</sup> para os sistemas com 4, 25, 50, 75 e 100 pessoas, respetivamente. Estes valores são superiores à densidade obtida na investigação sobre a qual o presente trabalho se baseou, o que é um indicador positivo. Além disso, o pico das densidades para os sistemas estudados varia entre 113,6 kWh/m<sup>3</sup> e 118,3 kWh/m<sup>3</sup>, os quais se mostram muito favoráveis em relação aos obtidos em sistemas semelhantes da literatura, pelo que se perspetivam como resultados bastante interessantes e demonstrativos de quão promissor é este tipo de armazenamento.

Apesar da poupança relativa diminuir com o aumento da dimensão do sistema com módulo de adsorção, este tipo de sistemas revela-se promissor, dado que permite sempre obter poupanças quanto ao uso do aquecedor de apoio. Por último, referem-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- otimizar os parâmetros do sistema de armazenamento (como o número de coletores, a capacidade do reservatório, o *setpoint* da temperatura de consumo), com o intuito de aumentar a fração renovável de energia, assim como as poupanças de energia;
- otimizar os parâmetros dos componentes do módulo de adsorção, consoante a capacidade do reservatório de AQS;
- analisar o custo da manutenção, assim como da produção/aquisição do sistema com módulo de adsorção e comparar com o custo de um sistema convencional;
- adaptar o sistema desenvolvido, de modo a também permitir o aquecimento dos espaços interiores, que, em conjunto com o aquecimento de água, corresponde a cerca de 45% da energia consumida no setor residencial em Portugal e 80% na UE.



## Bibliografia

1. AdsorTech. [https://www.ctcv.pt/pdf/Ficha\\_Projeto\\_Adsortech.pdf](https://www.ctcv.pt/pdf/Ficha_Projeto_Adsortech.pdf).
2. Allouhi, A. *et al.* Optimal working pairs for solar adsorption cooling applications. *Energy* **79**, 235–247. ISSN: 0360-5442. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.11.010> (2015).
3. Alva, G., Lin, Y. & Fang, G. An overview of thermal energy storage systems. *Energy* **144**, 341–378. ISSN: 0360-5442. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.037> (2018).
4. Bales, C. *Thermal Properties of Materials for Thermo-chemical Storage of Solar Heat* rel. téc. (International Energy Agency, mai. de 2005). [http://members.ieashc.org/publications/downloads/task32-Thermal\\_Properties\\_of\\_Materials.pdf](http://members.ieashc.org/publications/downloads/task32-Thermal_Properties_of_Materials.pdf).
5. Brites, G. J. V. N. *Desenvolvimento e otimização de um sistema de refrigeração solar por adsorção* (Tese de Doutoramento). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (2013). <http://hdl.handle.net/10316/21792>.
6. Cárdenas, B. & León, N. High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **27**, 724–737. ISSN: 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.028> (2013).
7. Çengel. *Heat and Mass Transfer: A Practical Approach* (McGraw-Hill, 2006).
8. Chaudhari, V. H. & Desai, A. D. Experimental study of single bed prototype adsorption refrigeration unit using waste heat energy. *Materials Today: Proceedings*. ISSN: 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.022> (2021).
9. Dahash, A., Ochs, F., Janetti, M. B. & Streicher, W. Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications: A critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems. *Applied Energy* **239**, 296–315. ISSN: 0306-2619. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.189> (2019).
10. De Paris, A. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:22016A1019(01)).
11. DIRETIVA. 2018/2001. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC).
12. Dusane, B. & Ghuge, N. "A Review On Solar Adsorption Refrigeration System". **6**, 8–13 (nov. de 2016).
13. Eurostat. (3/11/2021). [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_consumption\\_in\\_households#Energy\\_consumption\\_in\\_households\\_by\\_type\\_of\\_end-use](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households#Energy_consumption_in_households_by_type_of_end-use).

14. Fernandes, M. *Sistema de armazenamento de energia térmica com módulo de adsorção* (Tese de Doutorado). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (2017).
15. Fernandes, M., Brites, G., Costa, J., Gaspar, A. & Costa, V. Review and future trends of solar adsorption refrigeration systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **39**, 102–123. ISSN: 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.081> (2014).
16. *Global Energy Review - International Energy Agency* (2021), 2021. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021?mode=overview>.
17. Goyal, P., Baredar, P., Mittal, A. & Siddiqui, A. R. Adsorption refrigeration technology – An overview of theory and its solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **53**, 1389–1410. ISSN: 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.027> (2016).
18. Hasnain, S. Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques. *Energy Conversion and Management* **39**, 1127–1138. ISSN: 0196-8904. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00025-9) (1998).
19. Jaehnig, D., Hausner, R., Wagner, W. & Isaksson, C. Thermo-chemical storage for solar space heating in a single-family house (jan. de 2006).
20. Kantima Iammak, W. W. & Kiatsiriroj, T. Investigation of Modular Chemical Energy Storage Performance (dez. de 2004).
21. Köll, R. *et al.* An experimental investigation of a realistic-scale seasonal solar adsorption storage system for buildings. *Solar Energy* **155**, 388–397. ISSN: 0038-092X. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17305509> (2017).
22. Lefebvre, D. & Tezel, F. H. A review of energy storage technologies with a focus on adsorption thermal energy storage processes for heating applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **67**, 116–125. ISSN: 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.019> (2017).
23. Li, G. Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **53**, 897–923. ISSN: 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.006> (2016).
24. Lombardo, W. *et al.* A CCHP system based on ORC cogenerator and adsorption chiller experimental prototypes: Energy and economic analysis for NZEB applications. *Applied Thermal Engineering* **183**, 116119. ISSN: 1359-4311. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116119> (2021).
25. Mangold, D. Seasonal storage- a German success story. *Sun Wind Energy* **1**, 48–58 (2007).
26. Meister, C. & Beausoleil-Morrison, I. Experimental and modelled performance of a building-scale solar thermal system with seasonal storage water tank. *Solar Energy* **222**, 145–159. ISSN: 0038-092X. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X21003893> (2021).
27. Núñez, T., Henning, H. & Mittelbach, W. "High Energy Density Heat Storage System – Achievements and Future", 8–13 (set. de 2003).

28. Palomba, V. & Frazzica, A. Recent advancements in sorption technology for solar thermal energy storage applications. *Solar Energy* **192**. Thermal Energy Storage for Solar Applications, 69–105. ISSN: 0038-092X. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.102> (2019).
29. Pavlov, G. K. & Olesen, B. W. Thermal energy storage—A review of concepts and systems for heating and cooling applications in buildings: Part 1—Seasonal storage in the ground. *HVAC&R Research* **18**, 515–538. eprint: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/10789669.2012.667039>. 10.1080/10789669.2012.667039 (2012).
30. Pordata. (3/11/2021). <https://www.pordata.pt/en/Europe/Final+energy+consumption+total+and+by+type+of+consumer+sector-1397>.
31. RCCTE. Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013. <https://files.dre.pt/2s/2013/12/234000003/0005800087.pdf> (2013).
32. Scapino, L., Zondag, H. A., Van Bael, J., Diriken, J. & Rindt, C. C. Sorption heat storage for long-term low-temperature applications: A review on the advancements at material and prototype scale. *Applied Energy* **190**, 920–948. ISSN: 0306-2619. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.148> (2017).
33. Schmidt, T., Mangold, D. & Müller-Steinhagen, H. Central solar heating plants with seasonal storage in Germany. *Solar Energy* **76**. Solar World Congress 2001, 165–174. ISSN: 0038-092X. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.025> (2004).
34. Shmroukh, A. N., Ali, A. H. H. & Ookawara, S. Adsorption working pairs for adsorption cooling chillers: A review based on adsorption capacity and environmental impact. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **50**, 445–456. ISSN: 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.035> (2015).
35. TRNSYS. <http://www.trnsys.com/>.
36. Tubes, V. F. 2013. <https://vulcanfinnedtubes.com/products-services/welded-longitudinal-finned-tubes/>.
37. WEO. 2021. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021/executive-summary>.
38. Xu, J., Wang, R. & Li, Y. A review of available technologies for seasonal thermal energy storage. *Solar Energy* **103**, 610–638. ISSN: 0038-092X. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.06.006> (2014).
39. Yang, T., Liu, W., Kramer, G. J. & Sun, Q. Seasonal thermal energy storage: A techno-economic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **139**, 110732. ISSN: 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110732> (2021).
40. Yu, N., Wang, R. & Wang, L. Sorption thermal storage for solar energy. *Progress in Energy and Combustion Science* **39**, 489–514. ISSN: 0360-1285. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.05.004> (2013).



## Apêndice A. Perfis de consumo

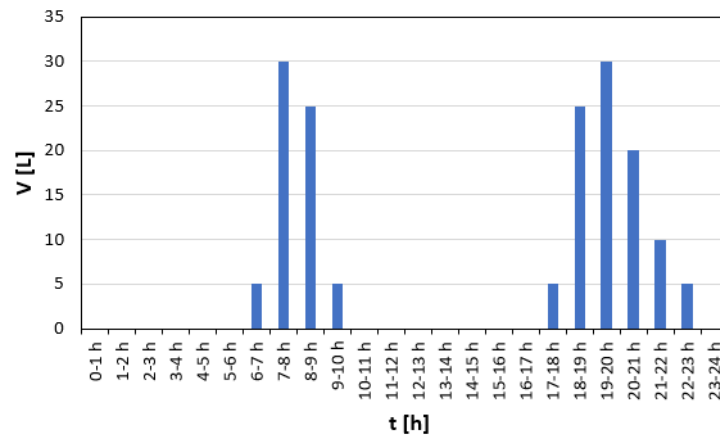


Figura Ap.1: Perfil de consumo considerado para 4 pessoas.

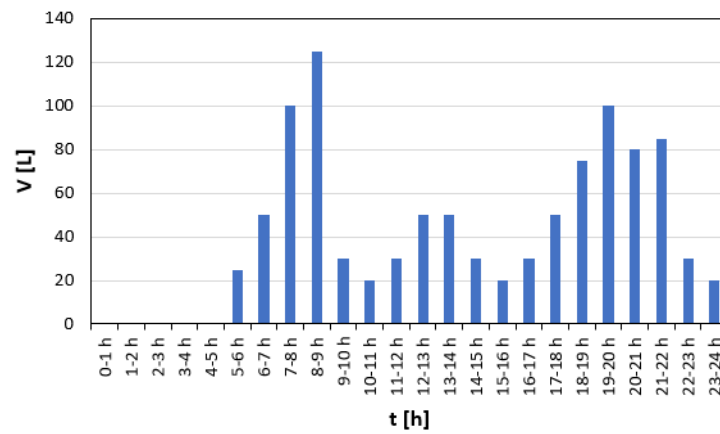


Figura Ap.2: Perfil de consumo considerado para 25 pessoas.

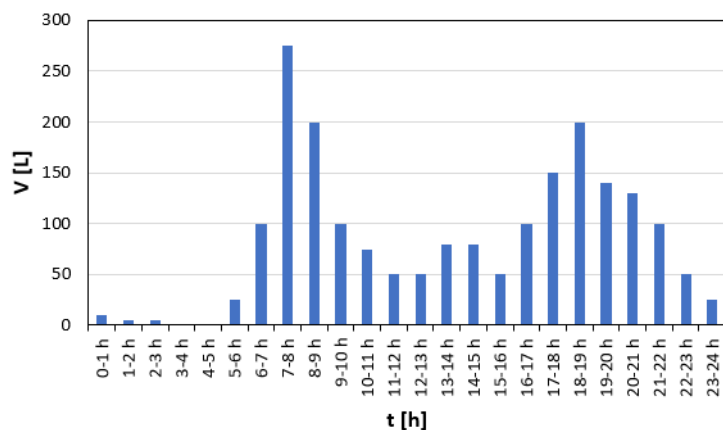


Figura Ap.3: Perfil de consumo considerado para 50 pessoas.

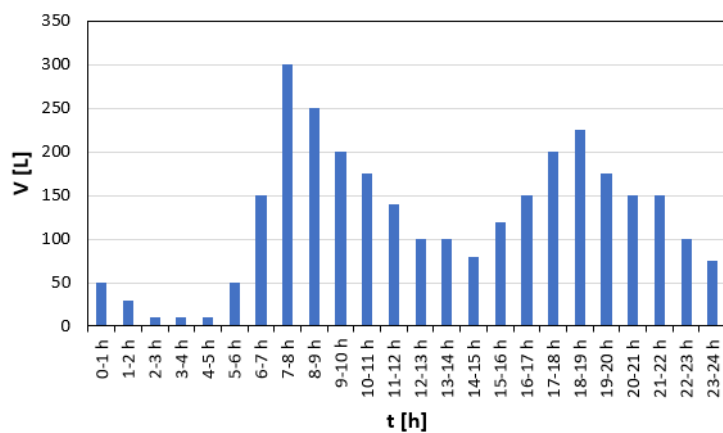


Figura Ap.4: Perfil de consumo considerado para 75 pessoas.

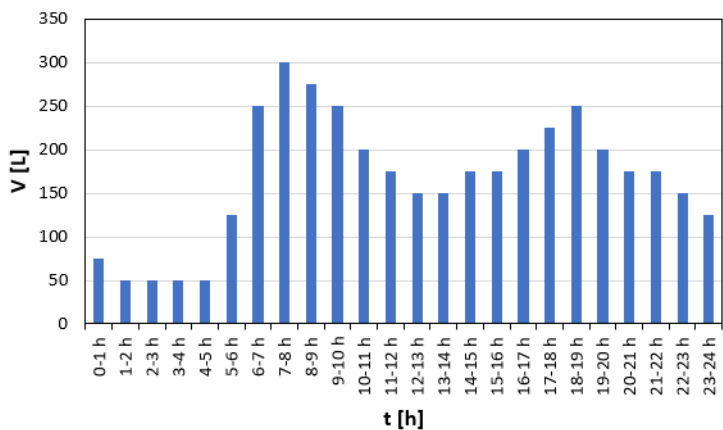


Figura Ap.5: Perfil de consumo considerado para 100 pessoas.

## Apêndice B. Evolução anual da energia libertada pelo adsorção para a água no final de cada período de descarga

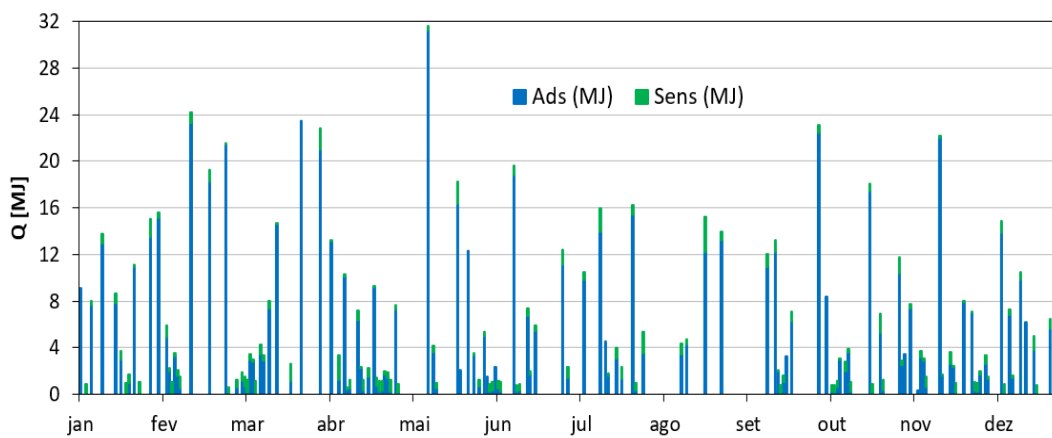


Figura Ap.6: Evolução anual da energia libertada pelo adsorção para a água no final de cada período de descarga no caso de estudo para 4 pessoas.

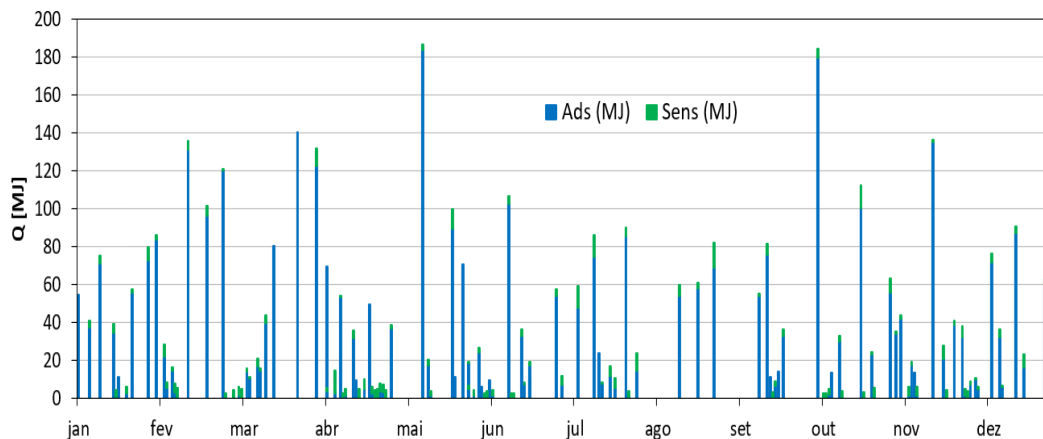


Figura Ap.7: Evolução anual da energia libertada pelo adsorção para a água no final de cada período de descarga no caso de estudo para 25 pessoas.

Apêndice B. Evolução anual da energia libertada pelo adsorisor para a água no final de cada período de descarga

---

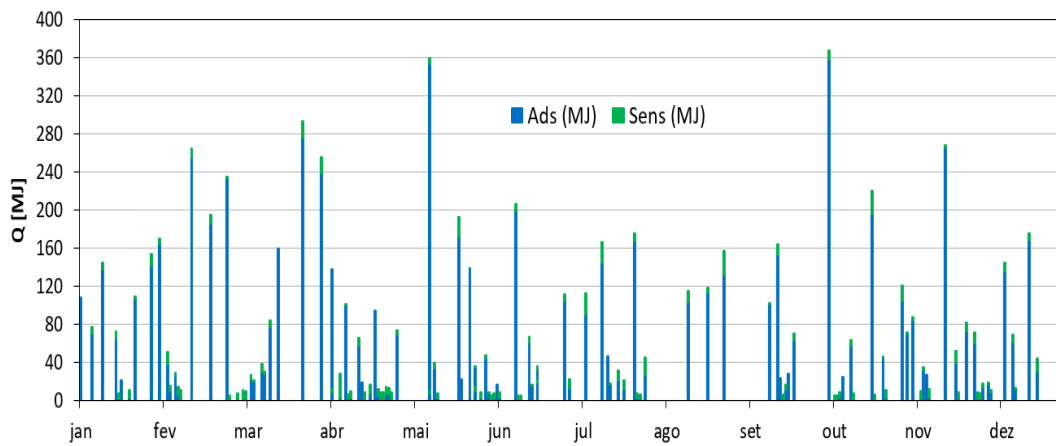


Figura Ap.8: Evolução anual da energia libertada pelo adsorisor para a água no final de cada período de descarga no caso de estudo para 50 pessoas.

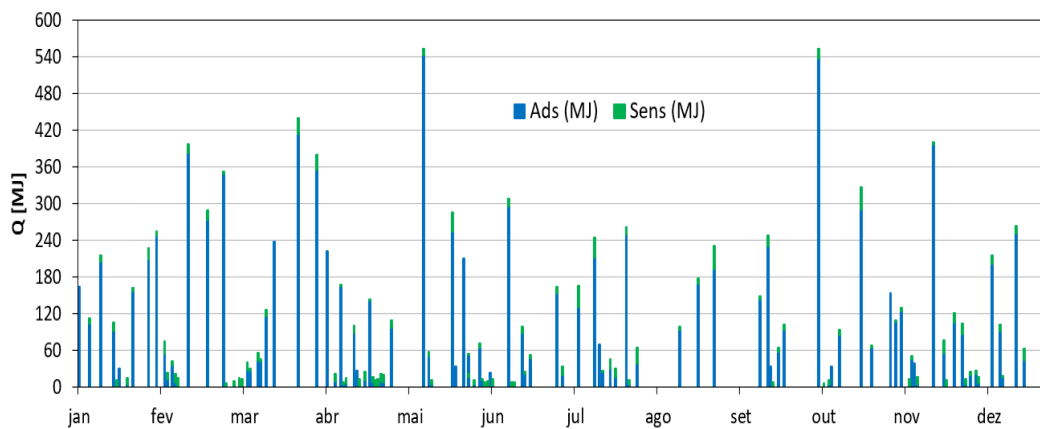


Figura Ap.9: Evolução anual da energia libertada pelo adsorisor para a água no final de cada período de descarga no caso de estudo 75 pessoas.

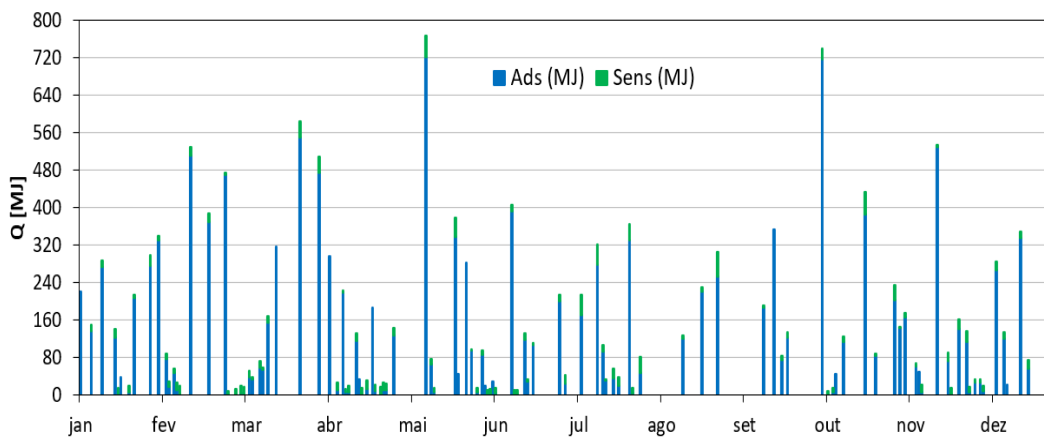


Figura Ap.10: Evolução anual da energia libertada pelo adsorisor para a água no final de cada período de descarga no caso de estudo para 100 pessoas.



## Anexo A. Parâmetros geométricos dos componentes do sistema de adsorção

### Reservatório principal

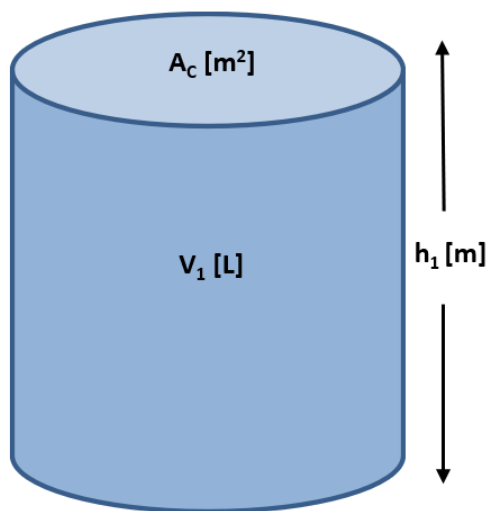


Figura An.1: Reservatório principal.

Tabela An.1: Parâmetros geométricos do reservatório principal.

Parâmetros	Fórmulas
Área da secção transversal [m <sup>2</sup> ]	$A_c = \frac{V_1}{h_1}$
Diâmetro do reservatório principal [m]	$D_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot A_c}{\pi}}$
Volume de um nodo no reservatório [m <sup>3</sup> ]	$V_{nodo} = \frac{V_1}{n}$
Volume de água no interior do reservatório [m <sup>3</sup> ]	$V_{w,1} = V_1 - V_{ads}$

## Reservatório secundário

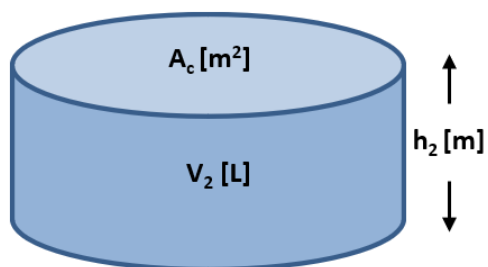


Figura An.2: Reservatório secundário.

Tabela An.2: Parâmetros geométricos do reservatório secundário.

Parâmetros	Fórmulas
Altura [m]	$h_2 = \frac{V_2}{A_c}$
Volume de água no interior do reservatório secundário [m <sup>3</sup> ]	$V_{w,2} = V_2 - \left( \frac{\pi \cdot D_{o,cond}^2}{4} \right) \cdot L_{cond}$

## Adsorisor

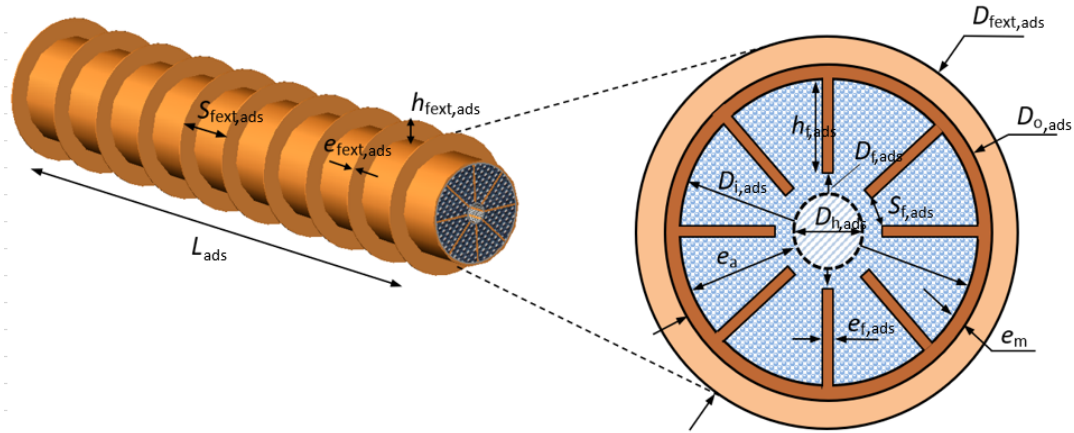


Figura An.3: Adsorisor.

Tabela An.3: Parâmetros geométricos do adsorisor.

Parâmetros	Fórmulas
Comprimento do cilindro [m]	$L_{ads} = \frac{f_{ads-n} \cdot 4 \cdot V_{nodo}}{\pi \cdot D_{fext,ads}^2}$
Diâmetro interno do cilindro [m]	$D_{i,ads} = D_{o,ads} - 2 \cdot e_m$
Diâmetro do furo [m]	$D_{h,ads} = D_{i,ads} \cdot f_c$
Volume ocupado pelo tubo do adsorisor [m <sup>3</sup> ]	$V_{t,ads} = \frac{D_{o,ads}^2 \cdot \pi \cdot L_{ads}}{4}$
Volume ocupado pelo adsorisor [m <sup>3</sup> ]	$V_{ads} = \frac{D_{o,ads}^2 \cdot \pi \cdot L_{ads}}{4} + V_{fext,ads}$
Volume de água no nodo do adsorisor [m <sup>3</sup> ]	$V_{w,nodo,ads} = V_{nodo} - V_{ads}$

## Propriedades do adsorvente

Tabela An.4: Propriedades do adsorvente.

Parâmetros	Fórmulas
Espessura do adsorvente [m]	$e_a = \frac{(1 - f_c) \cdot D_{i,ads}}{2}$
Volume do adsorvente [m <sup>3</sup> ]	$V_a = \frac{(D_{i,ads}^2 - D_{h,ads}^2) \cdot \pi \cdot L_{ads}}{4} - V_{f,ads}$
Massa do adsorvente [kg]	$m_a = \rho_a \cdot (1 - E) \cdot V_a$

## Alhetas interiores com secção longitudinal

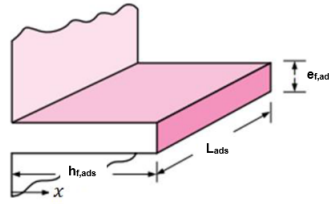


Figura An.4: Representação de uma alheta longitudinal [Adaptado de Çengel 2006].

Tabela An.5: Parâmetros geométricos das alhetas interiores com secção longitudinal do adsorisor.

Parâmetros	Fórmulas
Diâmetro limitado pelas alhetas [m]	$D_{f,ads} = D_{h,ads}$
Altura da alheta [m]	$h_{f,ads} = \frac{D_{i,ads} - D_{f,ads}}{2}$
Espaçamento entre alhetas [m]	$S_{f,ads} = \frac{\pi \cdot D_{i,ads} - N_{f,ads} \cdot e_{f,ads}}{N_{f,ads}}$
Área de uma alheta [m <sup>2</sup> ]	$A_{f,ads} = L_{ads} \cdot (D_{i,ads} - D_{f,ads})$
Volume das alhetas [m <sup>3</sup> ]	$V_{f,ads} = \frac{N_{f,ads} \cdot e_{f,ads} \cdot L_{ads} \cdot (D_{i,ads} - D_{f,ads})}{2}$

## Alhetas exteriores com secção anelar

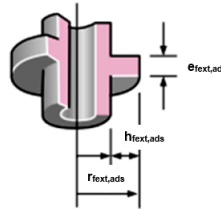


Figura An.5: Representação de uma alheta anelar [Adaptado de Çengel 2006].

Tabela An.6: Parâmetros geométricos das alhetas exteriores com secção anelar do adsorisor.

Parâmetros	Fórmulas
Diâmetro das alhetas [m]	$D_{fext,ads} = D_{o,ads} + f_{fext,ads} \cdot D_{o,ads}$
Altura da alheta corrigida [m]	$h_{fext,cor,ads} = \frac{(D_{fext,ads} - D_{o,ads}) + e_{fext,ads}}{2}$
Espaçamento entre as alhetas [m]	$S_{fext,ads} = \frac{L_{ads} - N_{fext,ads} \cdot e_{fext,ads}}{N_{fext,ads}}$
Área de uma alheta [m <sup>2</sup> ]	$A_{fext,ads} = \frac{\pi \cdot (D_{fext,ads}^2 - D_{o,ads}^2)}{2} + D_{fext,ads} \cdot e_{fext,ads} \cdot \pi$
Volume das alhetas [m <sup>3</sup> ]	$V_{fext,ads} = \frac{(D_{fext,ads}^2 - D_{o,ads}^2) \cdot \pi \cdot N_{fext,ads} \cdot e_{fext,ads}}{4}$

## Evaporador

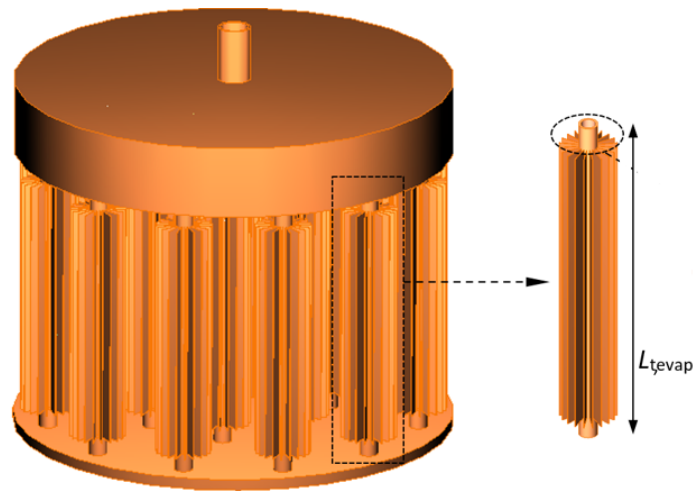


Figura An.6: Evaporador.

Tabela An.7: Parâmetros geométricos do evaporador.

Parâmetros	Fórmulas
Diâmetro interno dos tubos do evaporador [m]	$D_{i,evap} = D_{o,evap} - 2 \cdot e_{evap}$
Somatório da altura de todos os tubos do evaporador [m]	$L_{evap} = \frac{4 \cdot V_{evap}}{\pi \cdot D_{i,evap}^2}$
Altura de cada tubo do evaporador [m]	$L_{t,evap} = \frac{L_{evap}}{N_{t,evap}}$
Área da superfície exterior do evaporador [m <sup>2</sup> ]	$A_{o,evap} = \pi \cdot L_{evap} \cdot D_{o,evap}$
Área da superfície exterior de cada tubo do evaporador [m <sup>2</sup> ]	$A_{o,t,evap} = \pi \cdot D_{o,evap} \cdot L_{t,evap}$
Fração do evaporador que acolhe a água dessorvida [-]	$f_{evap} = 1$
Volume máximo de adsorvato possível de remover [m <sup>3</sup> ]	$V_{w,max} = \frac{m_a \cdot X_{max}}{\rho}$
Volume interno do evaporador [m <sup>3</sup> ]	$V_{evap} = V_{w,max} \cdot f_{evap}$

## Alhetas do evaporador

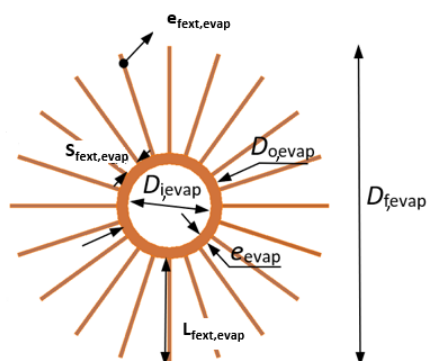


Figura An.7: Representação das alhetas do evaporador.

Tabela An.8: Parâmetros geométricos das alhetas do evaporador.

Parâmetros	Fórmulas
Diâmetro do evaporador com alhetas [m]	$D_{f,evap} = D_{o,evap} + 2 \cdot L_{fext,evap}$
Espessura corrigida da alheta [m]	$e_{fext,cor,evap} = D_{o,evap} \cdot \arcsin\left(\frac{e_{fext,evap}}{D_{o,evap}}\right)$
Altura corrigida da alheta [m]	$L_{fext,cor,evap} = L_{fext,evap} + \frac{e_{fext,evap}}{2}$
Espaçamento entre alhetas [m]	$S_{fext,evap} = \frac{\pi \cdot D_{o,evap} - N_{fext,evap} \cdot e_{fext,cor,evap}}{N_{fext,evap}}$
Área da superfície de cada alheta [m <sup>2</sup> ]	$A_{fext,t,evap} = 2 \cdot (L_{t,evap} + e_{fext,evap}) \cdot L_{fext,evap} + L_{t,evap} \cdot e_{fext,evap}$
Volume de todas as alhetas [m <sup>3</sup> ]	$V_{fext,evap} = \frac{N_{t,evap} \cdot N_{fext,evap} \cdot e_{fext,evap} \cdot L_{t,evap} \cdot (D_{fext,evap} - D_{o,evap})}{2}$

## Condensador

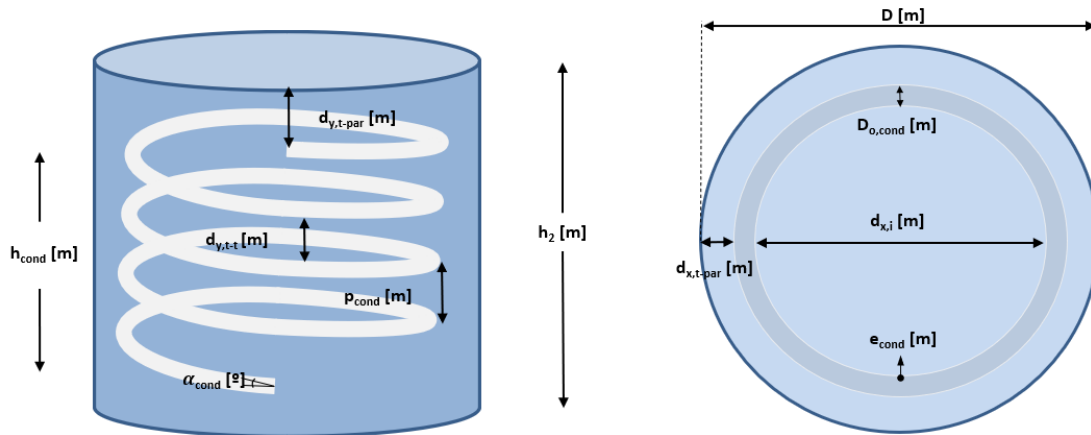


Figura An.8: Condensador imerso no reservatório de pré-aquecimento.

Tabela An.9: Parâmetros geométricos do condensador.

Parâmetros	Fórmulas
Distância vertical condensador - reservatório [m]	$d_{y,t-par} = d_{x,t-par}$
Distância vertical entre fiadas do condensador [m]	$d_{y,t-t} = d_{x,t-par}$
Diâmetro interno do tubo do condensador [m]	$D_{i,cond} = D_{o,cond} - 2 \cdot e_{cond}$
Diâmetro total da serpentina do condensador ao nível do seu eixo [m]	$d_{x,med} = D_2 - D_{o,cond} - 2 \cdot d_{x,t-par}$
Altura do condensador [m]	$h_{cond} = h_2 - D_{o,cond} - 2 \cdot d_{y,t-par}$
Comprimento do tubo do condensador [m]	$L_{cond} = \sqrt{(\pi \cdot d_{x,med} \cdot N_{cond})^2 + h_{cond}^2}$
Passo das voltas do condensador [m]	$p_{cond} = D_{o,cond} + d_{y,t-t}$
Número de voltas do condensador [m]	$N_{cond} = \frac{h_{cond}}{p_{cond}}$
Ângulo das fiadas do condensador [°]	$\alpha_{cond} = \arctan \frac{h_{cond}}{\pi \cdot d_{x,med} \cdot N_{cond}}$
Área da superfície exterior do condensador [m <sup>2</sup> ]	$A_{o,cond} = \pi \cdot D_{o,cond} \cdot L_{cond}$
Volume ocupado pelo condensador [m <sup>3</sup> ]	$V_{cond} = \frac{\pi \cdot D_{o,cond}^2 \cdot L_{cond}}{4}$