

"Só é vencido quem desiste de lutar."

Mário Soares

Aos meus Pais e à Margarida

Agradecimentos

Ao Professor Miguel Oliveira Panão, por me ter aceite enquanto mes-trando quando eu não tinha tema de tese e por me ter proposto um tema que, em circunstâncias normais, não teria sido a minha escolha prioritária. Pude aprender e aprofundar os meus conhecimentos numa área de especialização que não é a minha. Por fim, muito do trabalho aqui feito não teria sido possível ser devidamente aplicado e escrito se não fosse a intervenção do Professor Panão. Por isto tudo, obrigado.

A todos os meus amigos que me acompanharam, apoiaram e ajudaram na realização desta dissertação: a minha profunda gratidão.

Resumo

Pretende-se, com esta dissertação, explorar uma solução para um sistema AQS com base num banho termostatizado (AQS-BT). Assim, tem-se como objetivo o desenvolvimento de um estudo sobre um equipamento que tenha como base um sistema de termoacumulação mas com um funcionamento similar a um chuveiro elétrico. Este sistema não está implementado no mercado português e, com este estudo, pretende-se analisar a sua possível viabilidade quer enquanto sistema independente, quer enquanto sistema de apoio a algum equipamento AQS atualmente em vigor no mercado.

Assumem-se, assim, para o desenvolvimento deste sistema, duas fases de funcionamento:

Fase de pré-arranque: fase na qual o sistema está cheio de água à temperatura de abastecimento da rede fornecedora, não havendo qualquer entrada ou saída de água do sistema, e sofrendo esta um aquecimento por via da resistência elétrica até chegar a uma temperatura pré-definida.

Fase de utilização: fase na qual há entrada e saída de um caudal de água, sendo que o volume de água que entra está à temperatura de abastecimento da rede fornecedora, o volume de água que sai tem como temperatura a temperatura de saída que é considerada como sendo a temperatura média da água no interior do sistema, e o volume de água no interior do sistema é aquecido por uma resistência de potência.

O sistema AQS-BT compõe-se de dois elementos fundamentais: o banho termostatizado de água que serve de acumulador de energia proveniente de uma resistência elétrica e um tubo de cobre disposto em hélice por onde circula a água a aquecer e utilizar.

Ao estudar-se a sensibilidade do sistema quando utilizado em relação ao volume de água do banho com a pressão de 1 bar, concluiu-se que o sistema é mais eficaz com a utilização de volumes de banho termostatizado de menor volume.

Verifica-se, igualmente, o efeito que a variação do caudal ou do comprimento do tubo teriam no sistema. Explorou-se a variação do caudal, entre um valor mínimo e máximo previamente definidos, no sistema AQS-BT com caudal fixo. Chegou-se à conclusão a existência de um maior aproveitamento em sistemas de caudal fixo com um valor reduzido.

Variando a percentagem de ocupação que o diâmetro da hélice ocupa em relação ao diâmetro ocupado pelo volume de água, varia-se o comprimento máximo de tubo. Demonstrou-se que a variação do comprimento não produz alterações no tempo de utilização do sistema.

Estes resultados apontam para o favorecimento de sistemas mais compactos, de menor volume e menor comprimento de tubo, com a utilização de um caudal mais reduzido.

Avaliando a alteração da pressão a que a água do banho termostático está sujeita, e qual o seu impacto no tempo de utilização do sistema, identifica-se uma vantagem na utilização de sistemas pressurizados. No entanto, o elevado tempo de arranque dos sistemas pressurizados pode inviabilizar a sua utilização.

Após a análise com caudal fixo, estudou-se o comportamento do sistema usando um caudal variável.

Explorou-se, assim, a sensibilidade do sistema à variação do tempo de utilização disponível em relação à variação do volume do banho. Constatou-se que, quanto menor o comprimento de tubo, mais sensível é o sistema a uma variação do tempo de utilização para um tanque de maior volume.

Para haver um bom fator de comparação do sistema considerou-se o Índice de Desempenho de Utilização, que compara o tempo de utilização ao tempo necessário de reaquecimento após utilização. Verificou-se que o sistema é muito mais eficiente com temperaturas de banho termostático inferiores. No entanto, quanto mais baixa a temperatura do banho termostático, mais sensível é o sistema à variação do comprimento do tubo. Ao comparar-se o comportamento do sistema na abordagem de caudal fixo e variável, verificou-se uma clara vantagem para a abordagem de caudal variável.

Em conclusão, pode-se afirmar que tal sistema será útil, ainda que requerendo parametrizações particulares, como seja a temperatura de pré-aquecimento, para qualquer uso de curta duração (lavatório de casa de banho e/ou cozinha). Para usos prolongados, e enquanto sistema independente, tal depende da exigência do utilizador em termos de caudal e temperatura de utilização. Este tipo de equipamento é indiscutivelmente viável enquanto equipamento auxiliar. Se nos referirmos a uma instalação com esquentador, como as presentes na maioria dos lares portugueses, este sistema pode substituir largamente o uso do gás por electricidade, dado que o esquentador pode servir apenas para fazer um pré-aquecimento da água de origem da rede a uma temperatura de entrada do sistema um pouco mais elevada; e também com vista a nulificar o desperdício de água fria característico do início de utilização de um sistema munido apenas de esquentador. Enquanto equipamento de apoio a um termoacumulador, podê-lo-á fazer com vista a fazer face aos picos de utilização. A solução mais interessante poderá passar, no entanto, pelo apoio a um sistema solar térmico.

Palavras Chave: AQS, Termoacumulador, Chuveiro Elétrico, Eficiência Energética

Abstract

It is intended, with this dissertation, to explore a solution for an DHW system based on a thermostated bath (DHW-TB). Thus, the goal is the development of a study on an equipment that is based on a thermoaccumulation system but with a similar operation as an electric shower. This system is not implemented in the Portuguese market and, with this study, it is intended to analyse its possible viability either as an independent system or as a support system for some DHW equipment currently in force in the market.

Thus, for the development of this system, two phases of operation are assumed:

Pre-start phase: phase in which the system is full of water at the supply network supply temperature, there being no water inlet or outlet of the system, and this is undergoing heating through the electric resistance until it reaches a predefined temperature.

Usage phase: phase in which there are an inlet and outlet of a water flow, the volume of water entering is at the supply temperature of the supply network, the volume of water leaving the outlet temperature as temperature is considered as the average temperature of the water inside the system, and a power resistance heats the volume of water inside the system.

The DHW-TB system is made up of two fundamental elements: the thermostated water bath that serves as an energy accumulator from an electric resistance and a copper tube arranged in a propeller through which circulates the water to be heated and used.

When studying the sensitivity of the system when used to the volume of water of the bath with a pressure of 1 bar, it was concluded that the system is more efficient with the use of volumes of the thermostated bath of smaller volume.

The effect of changing the flow rate or length of the tube in the system is also verified. The flow variation, between a minimum and maximum value previously defined, was explored in the DHW-TB system with a fixed flow. It has been concluded that there is a greater use in fixed flow systems with reduced value.

By varying the percentage of occupancy that the diameter of the propeller occupies to the diameter occupied by the volume of water, the maximum length of the tube varies. It has been shown that the variation of the length does not produce changes in the time of use of the system.

These results point to the favouring of more compact systems, of smaller volume and smaller tube length, with the use of a smaller flow rate.

By evaluating the change in the pressure at which the thermostated bath water is subjected, and its impact on the time of use of the system, an

advantage is identified in the use of pressurised systems. However, the high start-up time of the pressurised systems may make their use unfeasible.

After the analysis with a fixed flow, the behaviour of the system was studied using a variable flow.

The sensitivity of the system to the variation in the time of use available to the change in bath volume was thus investigated. It has been found that the smaller the pipe length, the more sensitive the system is to a change in the time of use for a larger volume tank.

In order to have a good comparison factor of the system, it was considered the Utilization Performance Index, which compares the time of use to the necessary reheating time after use. It has been found that the system is much more efficient with lower thermostatted bath temperatures. However, the lower the temperature of the thermostatted bath, the more sensitive the system is to the variation of the tube length. When comparing the behaviour of the system in the approach of fixed and variable flow, there was a clear advantage for the variable flow approach.

In conclusion, it can be stated that such a system will be useful, even if it requires particular parameterisations, such as the preheating temperature, for any short-term use (bathroom sink and / or kitchen). For prolonged use, and as an independent system, this depends on the user's requirement in terms of flow rate and temperature of use. This type of equipment is indisputably viable as auxiliary equipment. If we refer to a water heater installation, such as those in most Portuguese homes, this system can largely replace the use of gas by electricity, since the water heater can only be used to preheat the water from the network to a slightly higher system inlet temperature; and also with a view to nullifying the waste of cold water characteristic of the start of use of a system provided only with water heater. As support equipment for a heater, it may do so in order to cope with peaks of use. The most interesting solution may, however, be the support for a solar thermal system.

Keywords: DHW, Water Heater, Electric Shower, Energy Efficiency

Conteúdo

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
Nomenclatura	ix
1 Introdução	1
1.1 Consumo Energético em Portugal	2
1.2 Consumo Energético por Sector	2
1.3 Consumo Energético relativamente a AQS	3
1.4 Consumo Doméstico de Água em Portugal	6
2 Projecto de Sistema AQS com banho termostatizado	9
2.1 Termoacumulador de Energia com base em Banho Termostatizado	9
2.2 Dimensionamento da instalação	10
2.3 Modelo matemático do Sistema AQS-BT	11
2.3.1 Fase de Arranque	12
2.3.2 Fase de Utilização	13
3 Resultados e Discussão	17
3.1 Tempo de aquecimento	17
3.2 Caudal volumétrico fixo	18
3.3 Caudal volumétrico variável	20
4 Conclusões e Trabalho Futuro	23
Bibliografia	25

Lista de Figuras

Figura 1.1	Repartição do consumo de energia final por sector, Portugal - 2009 - (INE, 2011)	3
Figura 1.2	Distribuição do consumo de energia no alojamento por tipo de energia e tipo de utilização - Portugal 2010 - (INE, 2011)	3
Figura 1.3	Distribuição do consumo de energia para aquecimento de águas por tipo de fonte - Portugal 2010 - (INE, 2011)	4
Figura 1.4	Mercado Português relativamente a equipamentos de AQS - (INE - DGEG, 2011)	6
Figura 1.5	Caracterização do Consumo Doméstico em Portugal (Vieira et al., 2007)	7
Figura 2.1	Sistema AQS em estudo	11
Figura 3.1	Tempo de arranque em função do volume do banho termostaticado para os diferentes cenários de temperatura	17
Figura 3.2	Tempo de utilização em função do volume do banho termostaticado para um caudal de 1.5 l/min e para os diferentes cenários de temperatura	18
Figura 3.3	Tempo de utilização em função do volume do banho termostaticado com $T_{a,f} = 80^{\circ}\text{C}$ e caudal de 1.5 lpm	19
Figura 3.4	Efeito da variação do caudal de água a aquecer no tempo de utilização	19

Figura 3.5	Variação do comprimento de tubo em função da percentagem de ocupação do diâmetro da serpentina em relação ao diâmetro do volume de água (esquerda); Tempo de utilização em função do volume do banho termostaticado com $T_{a,f} = 80^{\circ}\text{C}$ e caudal de 1.5 l/min para diferentes comprimentos de tubo (direita).	20
Figura 3.6	Índice de desempenho na utilização (IDU) médio	21

Lista de Tabelas

Tabela 1.1	Energia final e útil dos principais equipamentos utilizados na produção de AQS (consumos anuais)	5
Tabela 1.2	Energia final e útil dos principais equipamentos solares na produção de AQS (Fonseca, 2015) (valores anuais)	5

Nomenclatura

A	Área	$[m^2]$
C_d	Coeficiente de descarga	
c_p	Calor específico	$[J\ kg^{-1}K^{-1}]$
D	Diâmetro	m
d	Distância entre pontos de saída consecutivos	m
e_T	Erro associado	
f	Fator de fricção	
g	Aceleração gravítica	$m\ s^{-2}$
H	Largura	m
h	Coeficiente de convecção	$W\ m^{-2}K^{-1}$
h_b	Altura manométrica da bomba	m
hr	Coeficiente de radiação	$W\ m^{-2}K^{-1}$
k	Condutibilidade térmica	$W\ m^{-1}K^{-1}$
L	Comprimento	m
\dot{m}	Caudal mássico	$kg\ s^{-1}$
N	Número de tubos de um sistema de tubos paralelos	

n	Número de ramificações	
n_0	Número de tubos com origem no centro	
N_m	Número de medidas	
n_t	Número de tubos	
P	Perímetro molhado	m
p	Nível de emparelhamento	
P_b	Potência da bomba	W
Q	Ganho de energia	W
q''_S, S	Constante solar	$W m^{-2}$
R	Raio da estrutura radial	m
r	Raio do tubo	m
R_t	Resistência de condução da parede do tubo	
S_t	Desvio padrão	
Sv	Esbelteza	
T	Temperatura	$^{\circ}C$
U	Coeficiente de perdas de calor	$W m^{-2} K^{-1}$
\dot{V}	Caudal volúmico	$m^3 s^{-1}$
V	Volume	m^3
v	Velocidade	$m s^{-1}$
\dot{W}	Potência de bombeamento	W
W	Espaçamento entre tubos	m
x	Largura do sistema linha-até-linha	m

y Altura do sistema linha-até-linha m

Números Adimensionais

Nu Número de Nusselt

Ra Número de Rayleigh

Re Número de Reynolds

Símbolos Gregos

β Inclinação do coletor $^{\circ}$

ΔP Perda de carga Pa

ΔT Diferença de temperatura $^{\circ}C$

δ Espessura dos tubos mm

ϵ Emissividade

ν Viscosidade cinemática $m^2 s^{-1}$

ϕ Diâmetro dos tubos m

ρ Massa específica ou Densidade $kg m^{-3}$

σ Constante de Stefan-Boltzmann $5.670 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$

Subscritos

1 raio interno do tubo

2 raio externo do tubo

a ambiente

c	cantos
circ	circuito
cond	condução
distr	distribuída
e	entrada
f	fluido
G	global
g	vidro
isol	isolamento
opt	ótima
p	painel, absorsor
pg	entre absorsor e vidro
pg	entre vidro e ambiente
ref	referência
s	saída
t	topo
u	útil
w	vento

Siglas

AQS Águas Quentes Sanitárias

1 Introdução

O consumo doméstico de água das famílias nas suas habitações para fazerem face a um variado conjunto de necessidades intrínsecas à sua sobrevivência e à sua comodidade, está essencialmente associado à alimentação, higiene pessoal, lavagem de roupa e louça, limpeza de interiores e as descargas de autoclismos. Este consumo é diretamente proporcional ao aumento da população humana, e à melhoria das condições de higiene e de saneamento básico. Associado a este consumo de água está também associado o consumo de energia, pelo que qualquer variação no primeiro possui repercussões no segundo.

As relações existentes entre o ambiente e o setor energético são, portanto, particularmente relevantes. A produção e o consumo de energia são responsáveis, direta e indiretamente, por alguns dos principais impactos negativos da atividade humana sobre o ambiente. Entre estes sobressaem os problemas associados às emissões para a atmosfera de gases com efeito de estufa, bem como de outros poluentes, como o dióxido de carbono, o dióxido de enxofre e o óxido de azoto.

Torna-se, assim, relevante o aumento da eficiência e racionalização do consumo doméstico da energia e de água, não apenas no sentido da diminuição do uso dos recursos naturais, mas, também, na redução dos impactos negativos em relação ao meio ambiente.

Pretende-se, assim, com esta dissertação, fazer um estudo de viabilidade técnica e económica de um aparelho elétrico de aquecimento de água instantâneo, baseado num sistema de acumulação de energia. Esta pesquisa permitirá conferir se este conceito inovador no mercado português de AQS poderá concorrer ou ser uma solução igualmente prática de possível implementação em comparação com os restantes equipamentos para AQS já existentes no mercado.

1.1. Consumo Energético em Portugal

O sector da energia em Portugal tem vindo a deparar-se com diversos desafios, decorrentes não só da alteração do seu enquadramento interno, e da diversificação das origens de energia, mas igualmente derivados da globalização dos mercados, do aumento de preços ao nível internacional e dos compromissos assumidos ao nível ambiental, entre outros aspectos que alteraram o mercado da energia em Portugal. Com efeito, a energia é uma entrada básica em praticamente todos os processos produtivos e uma rubrica importante no consumo final das famílias (Energia em Portugal, 2013). Com essa premissa, pretende-se, neste capítulo, fazer um estudo sobre o consumo de energia em Portugal, caracterizando mais detalhadamente a parte correspondente aos sistemas de águas quentes sanitárias (AQS).

1.2. Consumo Energético por Sector

Sendo Portugal um país industrializado e desenvolvido, o grande consumo energético é absorvido pelos Transportes e pelas diversas Indústrias. Na sua maioria, esse consumo incide sobre recursos não renováveis e/ou fósseis. Além dos nefastos efeitos associados ao uso de combustíveis fósseis, Portugal carece deste tipo de recursos, o que estimula a uma elevada dependência da importação de energia primária. O consumo doméstico ocupa uma parcela de 17,7 %, aproximadamente $\frac{1}{5}$ do consumo energético total (Figura 1.1). O consumo energético doméstico pode ser dividido em consumo de equipamentos eléctricos, para iluminação, para aquecimento/arrefecimento do ambiente, para aquecimento de águas e nas cozinhas.

A parcela que consome mais energia numa habitação residencial é a cozinha, como se poderia antever. Esta alberga um conjunto alargado de equipamentos em funcionamento como, por exemplo, frigoríficos, congeladores, microondas, máquinas de lavar louça, as máquinas de secar e lavar roupa e máquinas de café, sendo que, naturalmente, a própria tarefa de cozinhar consome energia. O aquecimento de águas é a parcela seguinte, acompanhada de perto pelo aquecimento do ambiente (Figura 1.2), ambas com a função de conforto e bem-estar.

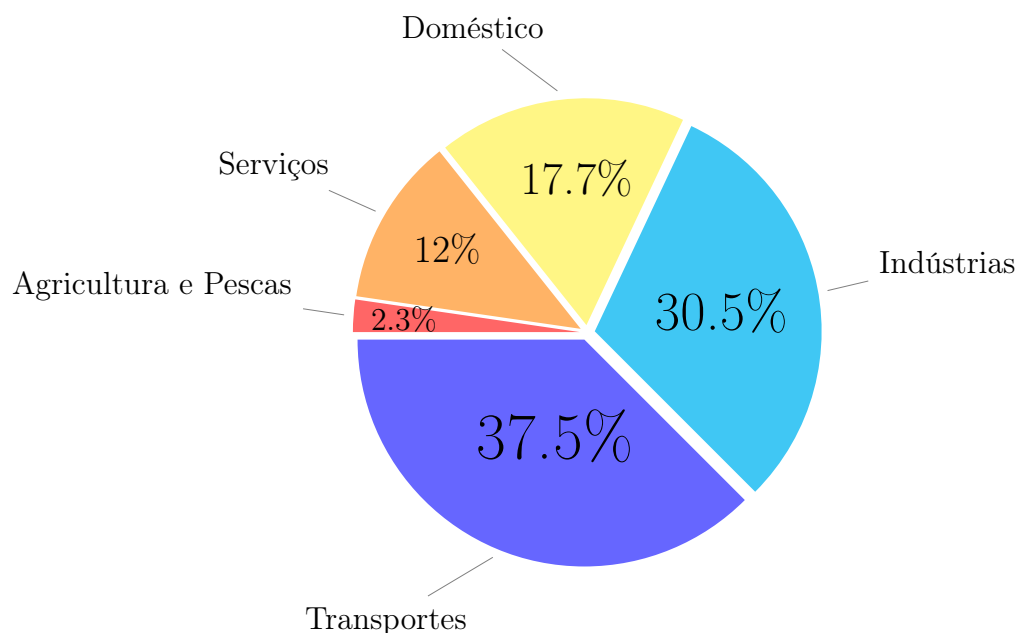


Figura 1.1: Repartição do consumo de energia final por sector, Portugal - 2009 - (INE, 2011)

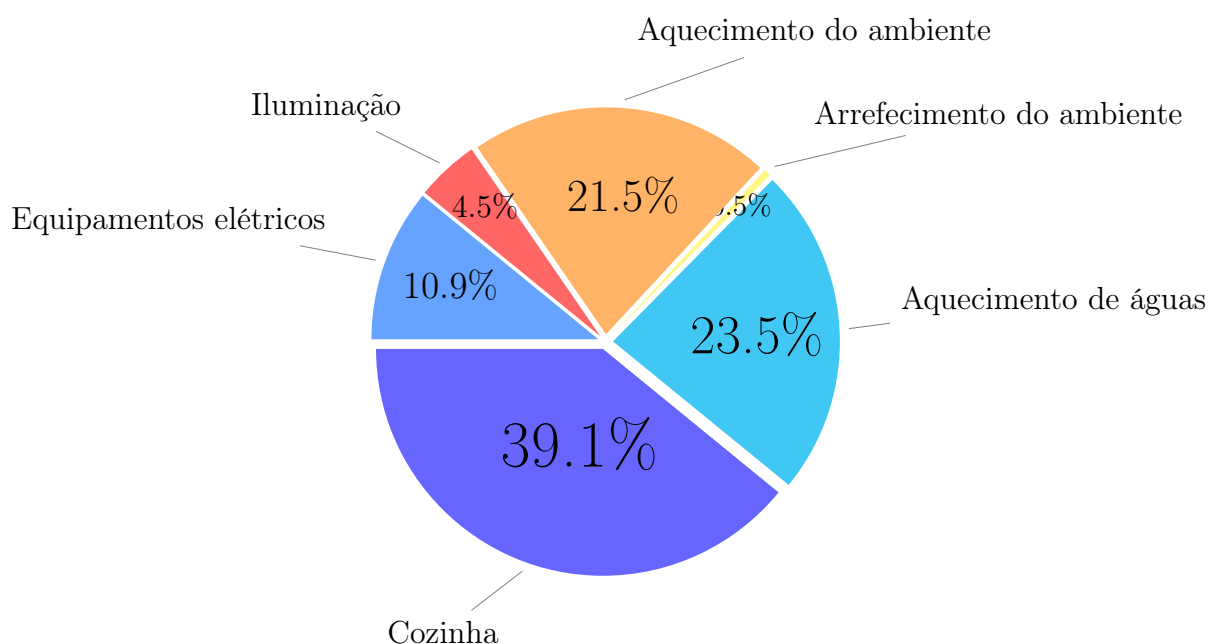


Figura 1.2: Distribuição do consumo de energia no alojamento por tipo de energia e tipo de utilização - Portugal 2010 - (INE, 2011)

1.3. Consumo Energético relativamente a AQS

Apresenta-se na Figura 1.3 a distribuição do consumo de energia para aquecimento de águas por tipo de fonte. Existe uma grande preponderância para o gás, com mais

de $\frac{2}{3}$ de quota de mercado. A eletricidade tem apenas um peso de 3,4 %.

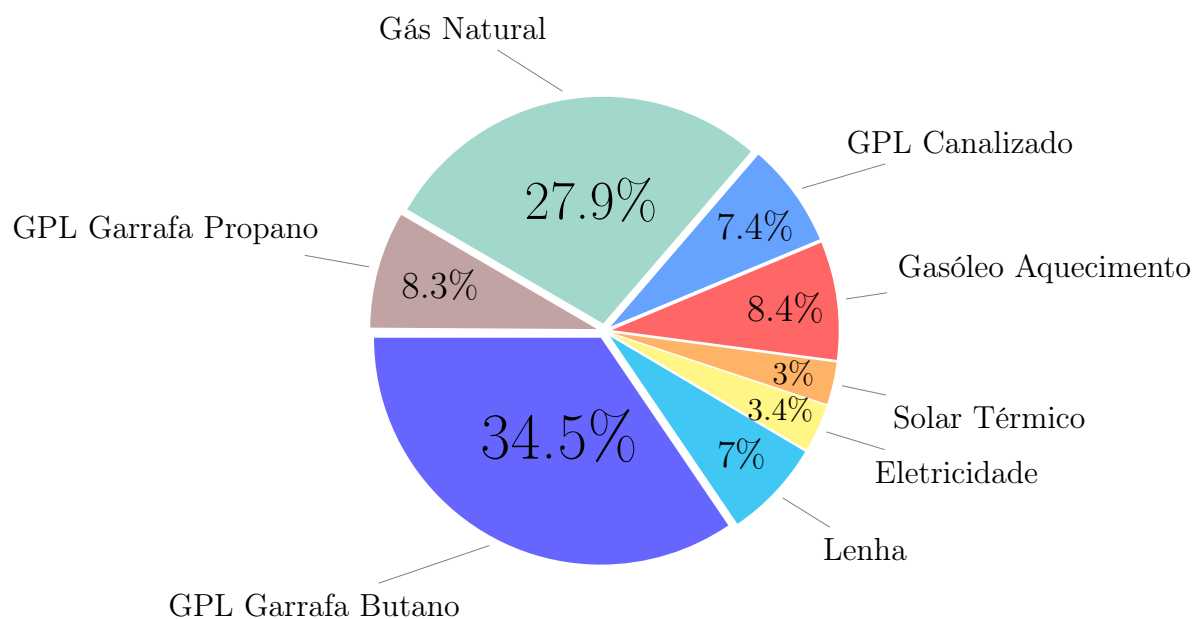


Figura 1.3: Distribuição do consumo de energia para aquecimento de águas por tipo de fonte - Portugal 2010 - (INE, 2011)

A aposta nas energias renováveis e numa menor dependência de combustíveis fósseis, e, conseqüentemente, numa menor influência sobre o meio ambiente, são motivos que justificam o razão de usar a eletricidade no futuro (Azevedo, 2016). O custo unitário da eletricidade terá tendência a baixar, sendo que os equipamentos serão desenvolvidos para aproveitar o menor custo da eletricidade em vazio (Fonseca, 2015).

Os resultados obtidos para a energia final e energia útil dos principais equipamentos utilizados na produção de AQS encontram-se na tabela 1.1, onde se constata diferenças na ordem de 70%, entre os valores máximos e mínimos.

Pela análise dos resultados obtidos, verificam-se os seguintes rendimentos típicos: de 75% nos esquentadores e nas caldeiras, com reduzida variação para diferentes fontes de energia, de 90% nos termoacumuladores e de 250% nas bombas de calor (com um COP, *Coefficient of Performance*, de 2.5). Verifica-se que os equipamentos que utilizam a eletricidade enquanto fonte de energia, nomeadamente as bombas de calor, têm um desempenho superior aos restantes que utilizam outras fontes de energia.

A tabela 1.2 mostra os valores estimados para aquecimento de águas para fins domésticos com sistema solar térmico.

Com base nos resultados incluídos na Tabela 1.2, verifica-se um rendimento de 67%

Equipamento	Fonte de Energia	Energia final (kWh/alój)	Energia útil (kWh/alój)	Rendimento (%)
Esquentador	Gás Natural	1500 - 2653	1125 - 1990	75
	GPL canalizado	1500 - 1533	1125 - 1150	75
	Propano Garrafa	1500 - 1562	1125 - 1172	75
	Butano Garrafa	1395 - 1400	1046 - 1050	75
Caldeira	Gás Natural	1500 - 2667	1125 - 2000	75
	GPL Canalizado	1500 - 1733	1125 - 1300	75
	Biomassa	4723	3542	75
	Gasóleo	4015	3012	75
Termoacumulador	Eletricidade	1333	1200	90
Bomba de Calor	Eletricidade	800	2000	250

Tabela 1.1: Energia final e útil dos principais equipamentos utilizados na produção de AQS (consumos anuais)

	Energia fornecida (kWh/alój)	Energia útil (kWh/alój)	Rendimento (%)
Painel Solar	2105	842	40
Sistema de Apoio		561	26,7
Total		1403	66,7

Tabela 1.2: Energia final e útil dos principais equipamentos solares na produção de AQS (Fonseca, 2015) (valores anuais)

para os equipamentos de energia solar térmica.

Os equipamentos de AQS com o objectivo de se tornarem mais eficientes terão uma tendência para funcionarem com electricidade tomando em consideração que, em termos ambientais, a energia eléctrica é cada vez mais produzida por fontes renováveis, o que diminui a dependência face aos combustíveis fósseis (Suspiro, 2018).

Os termoacumuladores e as bombas de calor são, portanto, boas soluções. No entanto, por uma questão de investimento, os termoacumuladores são uma escolha mais atractiva, no imediato, para o cliente final (Martins, 2017). Além do mais, as bombas de calor não têm expressão no mercado nacional, ao passo que os termoacumuladores têm uma quota de mercado de 12% (equipamentos comercializados em 2011). Constata-se que o mercado português é dominado pelos esquentadores com uma quota de mercado de 66%.

Como referido anteriormente, o objetivo deste trabalho é o estudo de viabilidade térmica e económica de um conceito diferente para a preparação de AQS. No entanto,

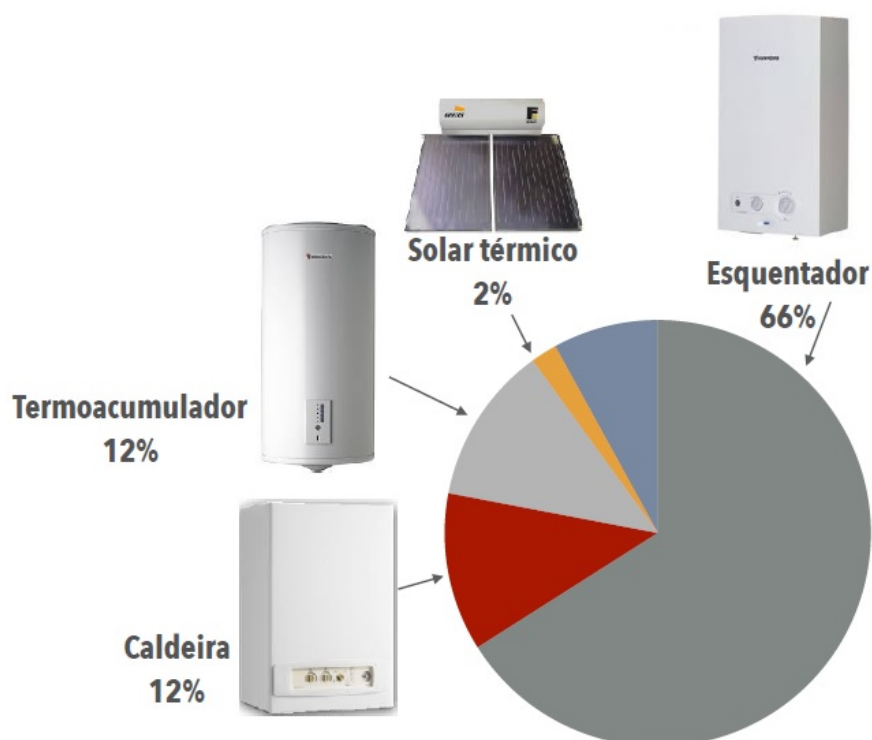


Figura 1.4: Mercado Português relativamente a equipamentos de AQS - (INE - DGEG, 2011)

por inerência e conseqüentemente, este trabalho poderá provocar uma redução na parcela que os esquentadores ocupam atualmente no mercado português e aumentar a dos equipamentos de acumulação.

Qualquer desenvolvimento de um equipamento de AQS depende do conhecimento dos hábitos de utilização do consumidor. Assim sendo, a secção seguinte aborda as características do consumo de água doméstico dos portugueses nas diversas actividades quotidianas.

1.4. Consumo Doméstico de Água em Portugal

O consumo de água doméstico pode variar significativamente dependendo de diversos fatores, como hábitos pessoais, estrutura cultural e socioeconómica, bem como das condições climáticas. Estes padrões de consumo foram reportados num estudo de 2007 realizado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Vieira *et al.*, 2007).

As características de utilização consideradas estão sintetizadas no infográfico da figura 1.5.

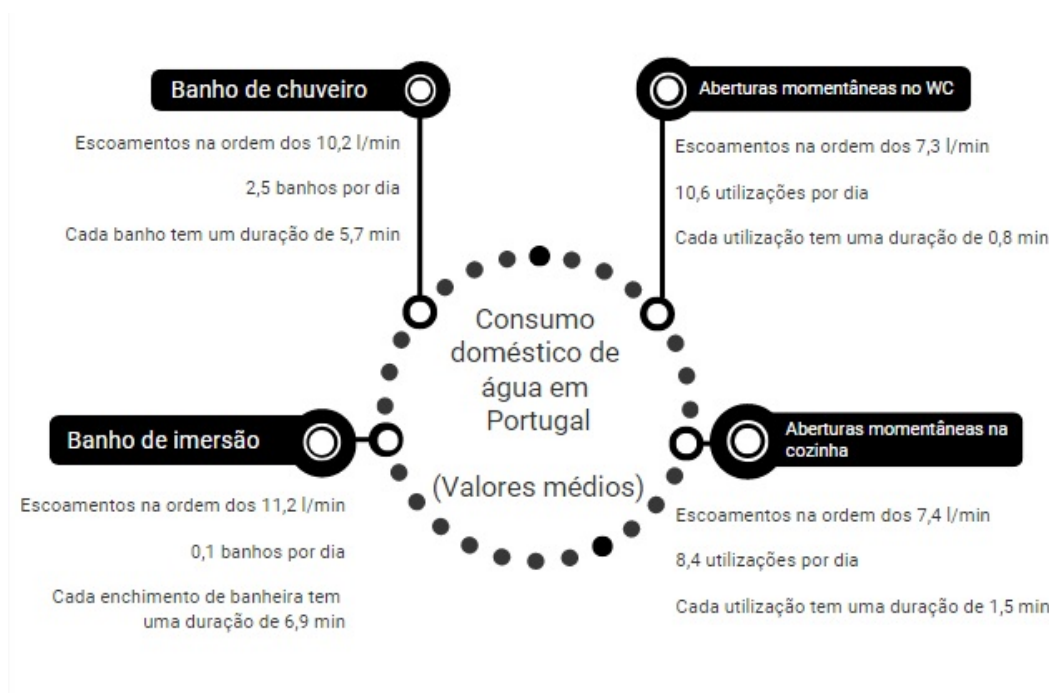


Figura 1.5: Caracterização do Consumo Doméstico em Portugal (Vieira et al., 2007)

Relativamente às aberturas momentâneas, o caudal de água, quer no chuvaeiro, quer no banho de imersão, tem um valor médio de, aproximadamente, 10 litros/min. Na cozinha, por sua vez, o caudal de água tem um valor médio de 7,4 litros/min.

Cada agregado familiar toma em média 2,5 banhos por dia com uma duração de 5,7 minutos. Constatam-se, também, uma elevada frequência de aberturas momentâneas de torneira na casa de banho e na cozinha, com 10,6 e 8,4 utilizações por dia, respetivamente. Verifica-se, igualmente, a quase inexistência de banhos de imersão, o que já de si mostra uma preocupação consciente de eficiência ecológica e económica por parte das pessoas. Conclui-se que tomar banho é o que consome mais água numa casa/estrutura familiar, $36 \pm 13\%$. Aberturas momentâneas de água usadas na preparação de alimentos, lavagem de roupa à mão, lavagem de louça à mão e higiene pessoal é o que consome, a seguir, mais água ($29 \pm 10\%$ do consumo total).

2 Projecto de Sistema AQS com banho termostaticado

O mercado português de AQS, como demonstrado anteriormente, está dominado pelos esquentadores, sendo que os termoacumuladores ainda têm alguma quota de mercado. A eletricidade, actualmente, enquanto fonte de energia no aquecimento de águas, não tem expressão. No entanto, verifica-se que equipamentos que utilizem energia eléctrica como fonte de energia irão ser vantajosos num futuro próximo, assim como se constata que equipamentos de termo-acumulação de energia para AQS terão superioridade sobre o controlo e gestão de energia desde o momento em que é produzida até ao utilizador final. É nesse sentido que se pretende explorar uma solução para um sistema AQS com base num banho termostaticado (AQS-BT). Assim sendo, esta dissertação terá como objetivo o desenvolvimento de um estudo sobre um equipamento que tenha como base um sistema de termoacumulação mas com um funcionamento similar a um chuveiro eléctrico. Este sistema não está implementado no mercado português e, com este estudo, pretende-se analisar a sua possível viabilidade quer enquanto sistema independente, quer enquanto sistema de apoio a algum equipamento AQS actualmente em vigor no mercado.

2.1. Termoacumulador de Energia com base em Banho Termostaticado

O termoacumulador é um equipamento constituído por um depósito de armazenamento de água, aquecido por uma resistência eléctrica, cuja capacidade volumétrica de armazenamento de água varia, usualmente, entre 30 a 200 litros. O aquecimento da água faz-se de forma lenta (portanto, carecendo de uma baixa potência), o que justifica o grande volume, que deverá ter capacidade suficiente para responder aos diversos picos de utilização de água quente (com tarifa bi-horária deve aquecer a água só nos períodos de vazio). O depósito está revestido por uma camada isolante exterior,

tipicamente poliuterano, que reduz as perdas de calor. Possui uma tubagem de saída de água quente e outra de entrada de água fria, onde deve estar instalado o sistema de segurança. A válvula de segurança regula o possível excesso de pressão provocado pelo aumento da temperatura da água através de um tubo de descarga. Deste grupo fazem também parte uma torneira, que controla a entrada de água fria, e uma válvula anti-retorno, que impede a água quente de voltar a misturar-se com a fria.

No interior do depósito encontram-se a resistência e o termostato que regula o funcionamento desta consoante a temperatura desejada. É importante que o termostato esteja regulado para uma temperatura em torno dos 60°C, tomando em consideração que, a temperaturas inferiores, pode-se potenciar o crescimento de bactérias, tomando como exemplo a *Legionella* (Armstrong *et al.* , 2014a). No entanto, temperaturas excessivamente elevadas aumentam os depósitos de calcário, a corrosão e as perdas de calor (Armstrong *et al.* , 2014b).

2.2. Dimensionamento da instalação

A solução aqui estudada consiste num sistema híbrido entre o funcionamento de um termoacumulador e de um chuveiro elétrico.

O chuveiro elétrico é, também, um sistema AQS que aquece a água corrente localmente, e num curto intervalo de tempo, ao fazê-la passar por uma tubagem envolta numa resistência elétrica. Em contraste com o termoacumulador, os chuveiros elétricos não têm qualquer reservatório de água e necessitam de uma elevada potência para funcionarem.

Por um lado, a solução concebida nesta dissertação, tal como o termoacumulador, dispõe de um reservatório (de menores dimensões), com água pré-aquecida relativamente ao período de funcionamento. Mas por outro lado, tal como o chuveiro elétrico, o objetivo será aquecer a água corrente num curto intervalo de tempo.

Assumem-se, assim, para o desenvolvimento deste sistema, duas fases de funcionamento:

Fase de pré-arranque: fase na qual o sistema está cheio de água à temperatura de abastecimento da rede fornecedora, não havendo qualquer entrada ou saída de água do sistema, e sofrendo esta um aquecimento por via da resistência elétrica até chegar a

uma temperatura pré-definida.

Fase de utilização: fase na qual há entrada e saída de um caudal de água, sendo que o volume de água que entra está à temperatura de abastecimento da rede, o volume de água que sai tem como temperatura a temperatura de saída que é considerada como sendo a temperatura média da água no interior do sistema, e o volume de água no interior do sistema é aquecido por uma resistência elétrica.

O esquema do sistema de aquecimento de águas sanitárias com base num banho termostaticado (AQS-BT) encontra-se ilustrado na Figura 2.1.

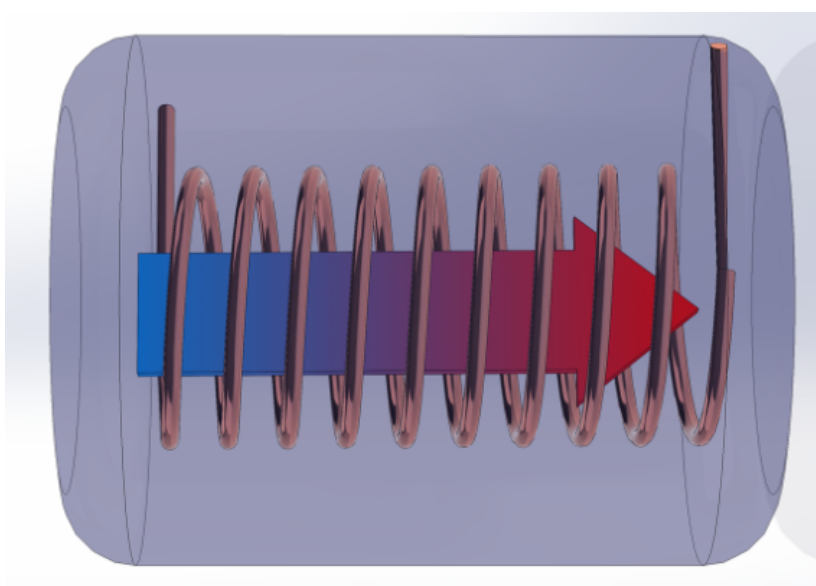


Figura 2.1: Sistema AQS em estudo

A secção seguinte dedica-se ao desenvolvimento do modelo matemático que descreve estas duas fases de funcionamento e que permitirá estabelecer as gamas de operação e dimensões do sistema AQS-BT.

2.3. Modelo matemático do Sistema AQS-BT

O sistema AQS-BT compõe-se de dois elementos fundamentais: 1) o banho termostaticado de água que serve de acumulador de energia proveniente de uma resistência elétrica; 2) e um tubo de cobre disposto numa serpentina por onde circula a água a aquecer e utilizar.

No capítulo anterior, descreveu-se, sucintamente, que a solução a estudar contém

duas fases de funcionamento: a de arranque e a de utilização. As secções seguintes descrevem, fisicamente, a análise termodinâmica e em termos de transmissão de calor associada a estas duas fases. O modelo matemático é desenvolvido no sentido de obter os vários tempos úteis à descrição deste sistema em funcionamento. Nomeadamente, o tempo de aquecimento do banho termostaticado (Δt_{aq}), o tempo de utilização até que a temperatura do banho atinja o limite a partir do qual requer novo período de carga de energia (Δt_u) e, por fim, o tempo de reaquecimento após o final da utilização (Δt_{r-aq}). À razão entre o tempo de utilização e o de re-aquecimento designaremos por Índice de Desempenho na Utilização ($IDU = \Delta t_u / \Delta t_{r-aq}$).

2.3.1. Fase de Arranque

A análise da fase de arranque segue o pressuposto de que o depósito que acomoda o banho termostaticado de água isolado, e que a eficiência de transmissão da potência eléctrica dissipada pela resistência para aquecimento do banho é total. Assim, para estimar o tempo associado a esta fase de arranque, basta a análise de um balanço de energia em sistema fechado. Neste caso, a variação da energia interna do volume de água deve-se à potência eléctrica dissipada pela resistência,

$$\Delta U_a = q_{el} \cdot \Delta t_{aq}$$

Usando a relação entre a energia interna e a variação de temperatura da água, assumindo que em líquido $c_{v,a} \approx c_{p,a}$, o intervalo de tempo nesta fase de arranque obtém-se como

$$\Delta t_{aq} = \frac{\rho_a c_{p,a} V_a (T_{a,f} - T_{a,i})}{q_{el}} \quad (2.1)$$

em que $\rho_a, c_{p,a}$ correspondem à massa volúmica e calor específico da água, respectivamente, obtidos à temperatura média entre o valor inicial ($T_{a,i}$) e final ($T_{a,f}$) da temperatura da água, e V_a é o volume de água do banho termostaticado. Um comentário evidente em relação à Eq. (2.1) seria o de que esse intervalo de tempo diminui com o aumento da potência da resistência eléctrica, diminuição do volume de água do banho e diminuição da temperatura final da água.

2.3.2. Fase de Utilização

Serão consideradas duas abordagens para a fase de utilização. A primeira consiste em manter fixo o caudal de água a aquecer pelo banho termostaticado. Neste caso, pretende-se que a água saia a uma temperatura elevada usando um caudal mínimo para depois ser misturada com água fria de modo a obter a temperatura desejada. O comprimento dos tubos terá de ser adequado ao cumprimento desta condição de projeto. A segunda abordagem consiste em manter fixo o comprimento de tubo com valores relativamente pequenos (1 - 2,5m) e variar o caudal de água com o objetivo dela sair do sistema AQS-BT à temperatura desejada. Ao longo do tempo de utilização, esse caudal é ajustado pelo facto da temperatura do banho termostaticado diminuir ao longo do processo. O modelo físico deverá ser desenvolvido distintamente para cada abordagem.

Existem alguns pressupostos e relações básicas que servem na modelação física do processo de aquecimento da água através do banho termostaticado e da energia acumulada durante o processo de arranque. O primeiro pressuposto é o que de que a condição fronteira no tubo de cobre é a de temperatura uniforme, pelo que a relação entre as temperaturas envolvidas e a correspondente transmissão de calor se expressa como

$$\frac{T_s - T_{m,s}}{T_s - T_{m,e}} = \exp\left(-\frac{\pi D_t L_t \bar{h}_D}{\rho \dot{V} c_p}\right) \quad (2.2)$$

em que T_s corresponde à temperatura na superfície do tubo, igual à do banho termostaticado em cada instante, $T_{m,e}$, $T_{m,s}$ correspondem às temperaturas médias à entrada e saída do caudal de água em aquecimento, D_t e L_t são o diâmetro e comprimento do tubo de cobre por onde circula a água, ρ e c_p correspondem à massa volumica e calor específico da água à temperatura média entre a entrada e saída do tubo ($\bar{T}_m = (T_{m,e} + T_{m,s})/2$), \dot{V} é o caudal volumétrico de água e, por fim, \bar{h}_D corresponde ao coeficiente de convecção médio associado às trocas de calor entre o caudal de água e o banho termostaticado.

A determinação do coeficiente de convecção médio segue a metodologia usual de análise da convecção forçada em escoamento interiores que parte de uma análise ao número de Reynolds para saber o regime de escoamento no interior do tubo. Pelo facto

da secção do tubo ser circular, o número de Reynolds pode ser obtido como

$$\text{Re}_D = \frac{4\rho\dot{V}}{\pi D_t \mu} \quad (2.3)$$

Para ter uma ideia do regime esperado no âmbito deste conceito de sistema AQS, assume-se que o caudal volumétrico mínimo a usar seja $\dot{V} = 1.5 \text{ l/min}$, uma temperatura média à entrada e saída de 15°C e 60°C , respectivamente, e um diâmetro de tubo de $D_t = 8 \text{ mm}$. Neste caso, o número de Reynolds é superior a 2300, pelo que o regime esperado para este sistema será sempre o regime turbulento. Nesse sentido, a correlação com maior gama de validação a usar será a de Gnielinski para o número de Nusselt médio ($\overline{\text{Nu}}_D$),

$$\overline{\text{Nu}}_D = \frac{(f/8)(\text{Re}_D - 1000)\text{Pr}}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(\text{Pr}^{2/3} - 1)} \quad (2.4)$$

em que f corresponde ao factor de fricção no tubo, assumido como liso pelo que se usa a correlação de Pethukov,

$$f = (0,79 \ln(\text{Re}_D) - 1,64)^{-2}$$

e Pr corresponde ao número de Prandtl. O coeficiente de convecção médio obtém-se a partir do número de Nusselt médio como,

$$\bar{h}_D = \overline{\text{Nu}}_D \frac{k}{D_t} \quad (2.5)$$

Para além do coeficiente de convecção, existe também o dimensionamento do comprimento do tubo disposto de forma helicoidal dentro do depósito que contém a água do banho termostatzado. Existem duas abordagens a esse dimensionamento. Ou se procura colocar o maior comprimento de tubo possível, ou define-se uma gama de comprimentos para efeitos de análise paramétrica. O ponto de referência deste cálculo está no volume escolhido para a água do banho termostatzado, V_a que no algoritmo varia entre 5 e 50 litros. Como o depósito possui uma forma cilíndrica, há que escolher uma dimensão de partida e optou-se pela altura do mesmo, $H_d = 0.4 \text{ m}$. Assim, o diâmetro do depósito com base no volume de água total obtém-se como

$$D_d = \sqrt{\frac{4V_a}{\pi H_d}}$$

Assumindo que o espaçamento entre duas voltas consecutivas é o mesmo que o diâmetro do tubo ($S = D_t$), a altura da hélice obtém-se como $H = (D_t + S)$, pelo que o número de voltas resulta em $N = H_d/H$ que será arredondado ao menor número. Para o comprimento de tubo máximo que esta abordagem permite considera-se que o diâmetro da hélice ocupa apenas 90% do diâmetro ocupado pelo volume de água (D_d). Logo,

$$L = \sqrt{H^2 + (\pi \cdot 0,9D_d)^2} \cdot N$$

Após o período de utilização, o tempo de re-aquecimento necessário até que a água do banho termostaticado assuma o valor inicial obtém-se por balanço de energia com uma formulação semelhante à Eq. (2.1) para o tempo de arranque, porém, com uma temperatura inicial mais elevada e igual à temperatura média da água à saída estabelecida pelo utilizador.

Em seguida descreve-se o algoritmo implementado em Matlab para os cálculos dos tempos de utilização, re-aquecimento e IDU em cada abordagem ao sistema AQS-BT.

Sistema AQS-BT com caudal fixo

Com um caudal volumétrico fixo, o algoritmo começa por determinar a temperatura média da água à saída recorrendo à relação dada pela Eq. (2.2) trabalhada para obter $T_{m,s}$ em função dos restantes parâmetros. Depois, importa estimar a energia removida pelo caudal no intervalo de tempo de $\delta t = 1$ s de utilização do sistema,

$$Q_u = \rho \dot{V} c_p (T_{m,s} - T_{m,e}) \cdot \delta t \quad (2.6)$$

Sabendo o valor de Q_u , actualiza-se a temperatura do banho termostaticado, T_s . Para cada condição explorada, o algoritmo termina quando a temperatura média de saída for inferior à definida pelo utilizador, $T_{m,s}(\Delta t_u) < T_{m,s}^u$.

Sistema AQS-BT com caudal variável

Neste caso, os comprimentos de tubo são menores e variam numa gama entre $L = 1$ m e 2,5 m de comprimento. Ao contrário da abordagem anterior, pretende-se ajustar o caudal de modo a que a temperatura média da água à saída seja a que foi definida pelo utilizador. Com a redução da temperatura do banho termostaticado (T_s), a razão de diferenças de temperatura, $\frac{T_s - T_{m,s}}{T_s - T_{m,e}}$, tende a aumentar, implicando que o caudal volumétrico de água (\dot{V}) diminua ao longo do tempo.

Esta abordagem fica limitada pelo constrangimento conceptual definido anteriormente de um caudal mínimo de 1.5 l/min, pelo que atingindo esse valor, espera-se que a temperatura média da água à saída ($T_{m,s}$) diminua em relação à inicialmente definida pelo utilizador. Assim, há que estabelecer um critério para definir o tempo de utilização máximo para cada condição. Neste caso, optou-se por considerar um limite mínimo para a temperatura do banho termostaticado em 10% da temperatura média da água à saída definida pelo utilizador.

O procedimento de cálculo é semelhante ao caso anterior em que o caudal volumétrico é fixo. Porém, existe uma nuance no algoritmo que obriga a um cálculo iterativo. Para saber o caudal a controlar num determinado instante, necessita-se do valor do coeficiente de convecção que, por sua vez, depende do caudal. Nesse sentido, estabeleceu-se um processo iterativo que termina quando a média da diferença absoluta entre os caudais em iterações consecutivas é menor em uma ordem de grandeza, ou quando o número de iterações excede as 100. Por outro lado, sempre que o caudal final for menor do que o mínimo, ou maior do que o máximo que o sistema de circulação de água permite (na presente dissertação considerou-se o valor de 12 l/min), é forçado a que o caudal possua os valores limite.

No capítulo seguinte são explorados e analisados os resultados obtidos pelo modelo físico para as duas abordagens em relação ao caudal volumétrico.

3 Resultados e Discussão

O algoritmo descrito no capítulo anterior, para além das duas abordagens enunciadas, foi também aplicado em três cenários diferentes, para três temperaturas finais do banho termostaticado distintas, $T_{a,f} = 80^\circ\text{C}$, $T_{a,f} = 120^\circ\text{C}$ e $T_{a,f} = 140^\circ\text{C}$, obtidas pela variação da pressão da água no interior do depósito, para 1 bar, 3 bar e 5 bar, respectivamente. O objectivo seria avaliar se a alteração da pressão a que a água do banho termostaticado está sujeita leva a uma alteração significativa do tempo de utilização do sistema.

3.1. Tempo de aquecimento

O tempo inicial de aquecimento ocorre na fase de arranque do sistema ($\Delta t_{aq.}$), dada pela Eq. (2.1) e que varia, essencialmente, com o volume de água no banho termostaticado (V_a) e a pressão a que está a água nesse banho. Como se pode ver na figura 3.1, esse tempo, $\Delta t_{aq.}$ varia linearmente com V_a , para uma determinada temperatura inicial (T_0) e potência da resistência eléctrica (q_{el}).

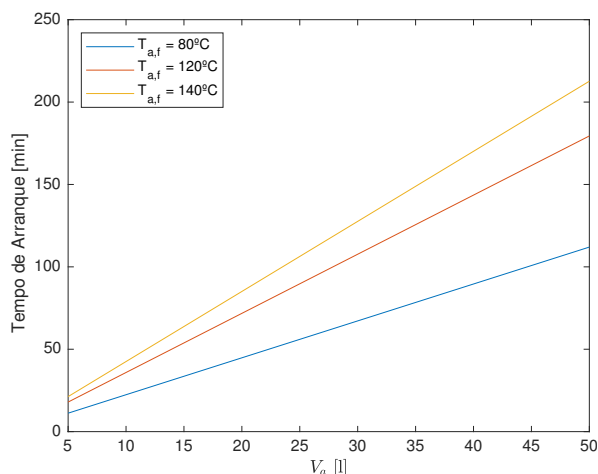


Figura 3.1: Tempo de arranque em função do volume do banho termostaticado para os diferentes cenários de temperatura

A Figura 3.1 mostra os resultados obtidos para a gama considerada para o volume

do banho termostaticado de 5-50 litros. Conforme demonstra a Figura 3.1, o elevado tempo de arranque dos sistemas pressurizados pode limitar a sua utilização.

Porém, avaliando a alteração da pressão a que a água do banho termostaticado está sujeita, e qual o seu impacto no tempo de utilização do sistema (Figura 3.2), identifica-se uma vantagem na utilização de sistemas pressurizados.

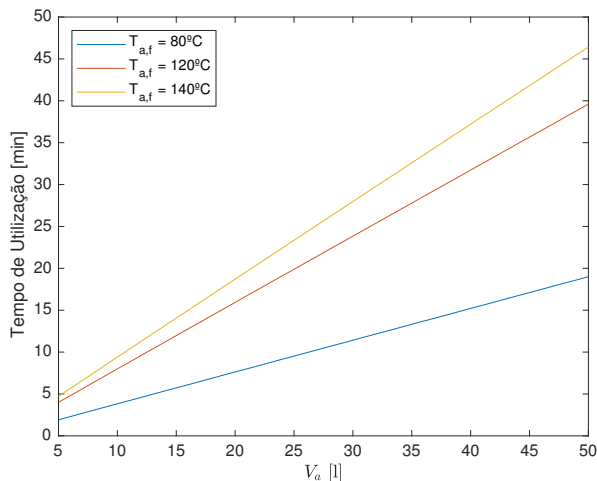


Figura 3.2: Tempo de utilização em função do volume do banho termostaticado para um caudal de 1.5 l/min e para os diferentes cenários de temperatura

3.2. Caudal volumétrico fixo

Os resultados do tempo de arranque indicam que as diferenças induzidas pela alteração da pressão da água serão, essencialmente, de escala, pelo que, a análise subsequente centra-se nos resultados obtidos pelo modelo com a pressão de 1 bar.

Na Figura 3.3, encontra-se o tempo de utilização do sistema em função do volume de água do banho termostaticado para um regime de funcionamento que fornece água a 60°C. Sendo a variação linear, considera-se o declive dessa recta como a sensibilidade do sistema quando utilizado em relação ao volume de água do banho.

Considerando uma gama de caudais fixos entre um mínimo de 1.5 l/min e um máximo de 12 l/min, na Figura 3.4 explora-se o efeito do aumento do caudal sobre a sensibilidade do tempo de utilização e a escala do mesmo. Nomeadamente, um aumento do caudal induz um efeito exponencial sobre a sensibilidade e diminui a gama do tempo de utilização, pelo que se pode indicar um maior aproveitamento em sistemas de caudal fixo com um valor reduzido.

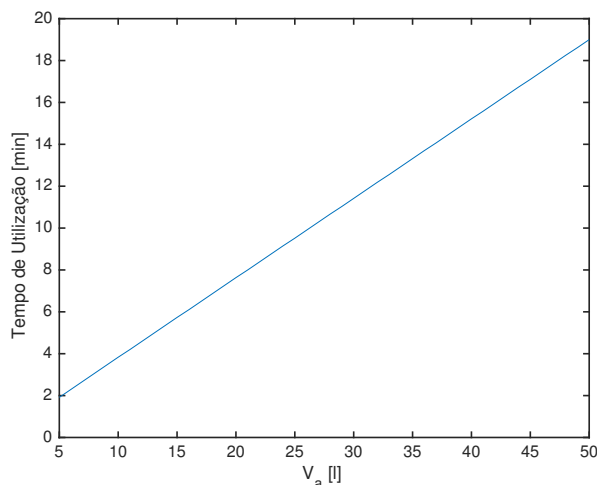


Figura 3.3: Tempo de utilização em função do volume do banho termostaticado com $T_{a,f} = 80^{\circ}\text{C}$ e caudal de 1.5 lpm

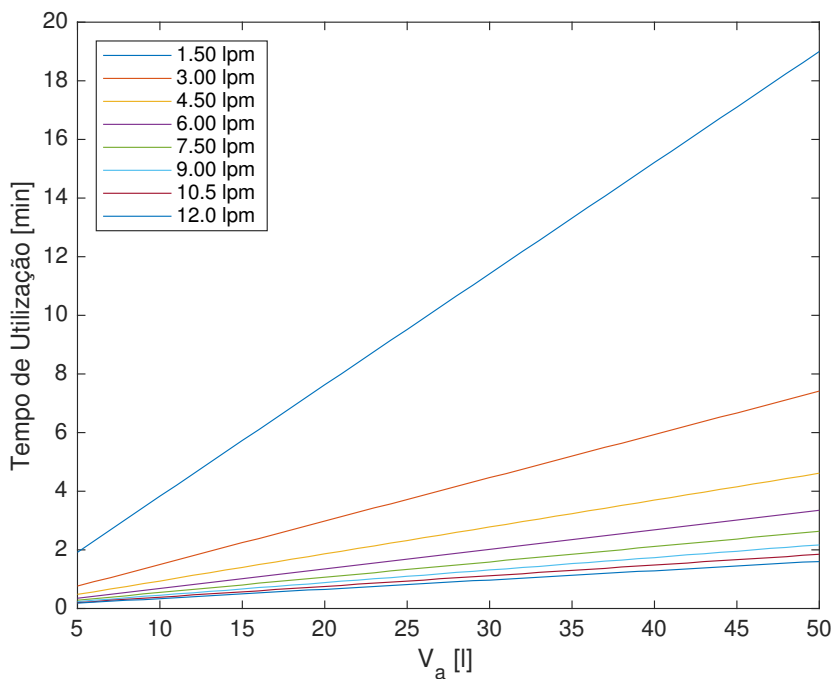


Figura 3.4: Efeito da variação do caudal de água a aquecer no tempo de utilização

Na abordagem com o caudal fixo, o comprimento do tubo no interior do banho termostaticado varia com o volume de água. Assim, variando a percentagem de ocupação que o diâmetro da serpentina ocupa em relação ao diâmetro ocupado pelo volume de água, varia-se o comprimento máximo de tubo. Na Figura 3.5 estão representados os comprimentos resultantes, à esquerda, e o seu efeito no tempo de utilização, à direita. A sobreposição dos declives indica que a variação do comprimento não produz alterações no tempo de utilização do sistema.

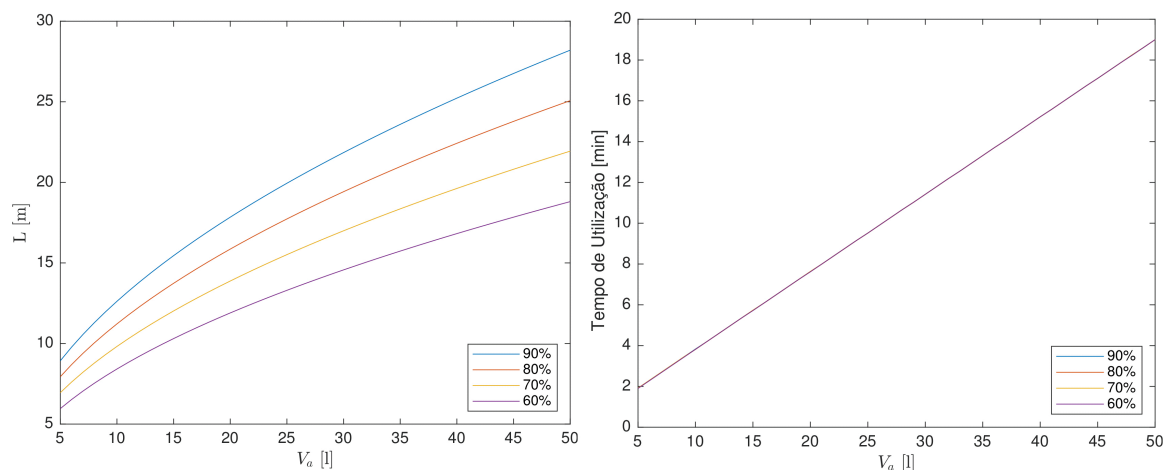


Figura 3.5: Variação do comprimento de tubo em função da percentagem de ocupação do diâmetro da serpentina em relação ao diâmetro do volume de água (esquerda); Tempo de utilização em função do volume do banho termostaticado com $T_{a,f} = 80^\circ\text{C}$ e caudal de 1.5 l/min para diferentes comprimentos de tubo (direita).

Estes resultados apontam para o favorecimento de sistemas mais compactos, de menor volume e menor comprimento de tubo, com a utilização de um caudal mais reduzido.

3.3. Caudal volumétrico variável

Após a análise com caudal fixo, é necessário o estudo do comportamento do sistema usando um caudal variável.

Um importante fator de comparação do comportamento do sistema é o IDU. Na Figura 3.6 está representada a evolução do IDU para a abordagem de caudal variável. Verifica-se que o sistema é muito mais eficiente com temperaturas do banho termostaticado inferiores. No entanto, quanto mais baixa a temperatura do banho termostaticado, mais sensível é o sistema à variação do comprimento do tubo.

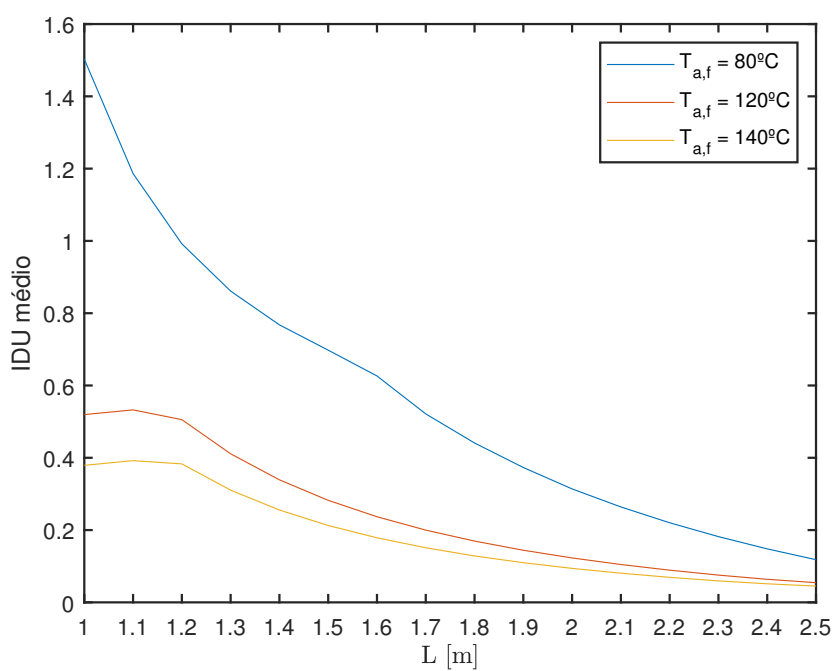


Figura 3.6: Índice de desempenho na utilização (IDU) médio

4 Conclusões e Trabalho Futuro

Fez-se o estudo de um equipamento de preparação de AQS, o qual é um misto entre um termoacumulador e um chuveiro eléctrico.

Pode-se afirmar que tal sistema será útil, ainda que requerendo parametrizações particulares, como seja a temperatura de pré-aquecimento, para qualquer uso de curta duração (lavatório de casa de banho e/ou cozinha). Para usos prolongados, e enquanto sistema independente, tal depende da exigência do utilizador em termos de caudal e temperatura de utilização. Este tipo de equipamento é indiscutivelmente viável enquanto equipamento auxiliar. Se nos referirmos a uma instalação com esquentador, como as presentes na maioria dos lares portugueses, este sistema pode substituir largamente o uso do gás por electricidade, dado que o esquentador pode servir apenas para fazer um pré-aquecimento da água da rede até uma temperatura de entrada do sistema um pouco mais elevada; e também com vista a nulificar o desperdício de água fria característico do início de utilização de um sistema munido apenas de esquentador. Enquanto equipamento de apoio a um termoacumulador, podê-lo-á fazer com vista a fazer face aos picos de utilização. A solução mais interessante poderá passar, no entanto, pelo apoio a um sistema solar térmico.

No entanto, este equipamento apresenta uma principal desvantagem. O chuveiro eléctrico e o termoacumulador garantem uma temperatura de saída da água constante durante toda a utilização. Isso não acontece com este sistema

Apesar de não ter sido possível nesta dissertação fazer uma análise económica, é absolutamente necessário a sua realização, não só como validação prática do estudo mas, também, como alicerce para uma possível implementação do conceito e equipamento no mercado. Consequentemente, é igualmente importante passar o estudo da teoria à prática, pelo que é compreensível que um dos passos a dar seja a realização de um protótipo para a validação do conceito em ambiente laboratorial, e posteriormente em contexto de utilização real. Ainda antes dessa etapa, poderá ser interessante a realização de um estudo computacional da dinâmica de fluidos e comportamento térmico

do sistema, assim como um estudo elaborado de como controlar e gerir a energia disponível desde o momento em que é produzida até ao utilizador final através de smart grids.

Bibliografia

- Armstrong, P., Ager, D., Thompson, I., & McCulloch, M. 2014a. Domestic hot water storage: Balancing thermal and sanitary performance. *Energy Policy*, **68**(may), 334–339.
- Armstrong, Peter M., Uapipatanakul, Meg, Thompson, Ian, Ager, Duane, & McCulloch, Malcolm. 2014b. Thermal and sanitary performance of domestic hot water cylinders: Conflicting requirements. *Applied Energy*, **131**(oct), 171–179.
- Azevedo, Vírgilio. 2016 (06). *Fácil na eletricidade, difícil nos transportes*. <https://expresso.pt/iniciativaseprodutos/mes-da-energia/2016-06-14-Facil-na-eletricidade-dificil-nos-transportes>. (Acedido a 15/09/2018).
- Energia em Portugal. 2013. *A Energia em Portugal*. <http://www.energiaportugal.pt/pt/energia-em-portugal>. (Acedido a 15/09/2018).
- Fonseca, Sara Mendonça Barbosa Jesus. 2015. *Caracterização do Consumo de Energia no Sector Residencial em Portugal*. M.Phil. thesis, Instituto Superior Técnico.
- INE, I.P., DGEG. 2011. *Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010*. INE, I.P./DGEG.
- Martins, Carlos. 2017 (07). *EDP com bombas de calor e termoacumuladores a preço reduzido*. <https://abertoatedemadrugada.com/2017/07/edp-com-bombas-de-calor-e.html>. (Acedido a 15/09/2018).
- Suspiro, Ana. 2018 (04). *Produção renovável foi superior ao consumo de eletricidade em março. É inédito em 40 anos*. <https://observador.pt/2018/04/03/>

producao-renovavel-foi-superior-ao-consumo-de-eletricidade-em-marco-e-inedito-em-4
(Acedido a 15/09/2018).

Vieira, P., do C. Almeida, M., Baptista, J.M., & Ribeiro, R. 2007. Household water use: a Portuguese field study. *Water Science and Technology: Water Supply*, **7**(5-6), 193–202.