



Ruben Miguel Análise técnica e ambiental da produção de AQS.
Conde Fonseca Caso de estudo.



Ruben Miguel Análise técnica e ambiental da produção de AQS.
Conde Fonseca Caso de estudo

dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Manuel Arlindo Amador de Matos, Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Professor Doutor António Gil D'orey de Andrade Campos

Professor Auxiliar do Departamento de Mecânica da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Manuel Arlindo Amador de Matos

Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro
(Orientador)

Professor Doutor Nelson Amadeu Dias Martins

Professor auxiliar do Departamento de Mecânica da Universidade de Aveiro
(Arguente)

agradecimentos

Aos meus pais por todo o apoio, motivação e ajuda prestada durante todo o meu percurso académico.

Aos meus colegas e amigos pela amizade e força prestada durante o percurso feito até aqui.

Ao professor Alfredo Rocha e ao Tiago Luna pelo envio dos dados da radiação necessários à realização deste trabalho.

Um especial agradecimento ao meu orientador, o Doutor Manuel Matos, por toda a ajuda prestada ao longo do trabalho e pela sua constante disponibilidade, sem ele a realização do trabalho não teria sido possível.

palavras-chave

Painéis solares térmicos, água quente sanitária, análise técnica, análise económica, análise ambiental.

resumo

O aproveitamento de energia solar apresenta desafios técnicos, custos económicos e ambientais que importa racionalizar.

Os objetivos deste trabalho são a realização uma avaliação técnica, ambiental e económica de produção de água quente sanitária (AQS) a partir de um caso de estudo. O método de trabalho utilizado obedeceu a uma metodologia top-down, ou seja, a partir da observação da realidade de uma instalação de produção doméstica de água quente sanitária que inclui um conjunto de dispositivos de aquecimento baseado em painéis solares térmicos e caldeira de apoio a gás.

Para o efeito, numa habitação foi monitorizada ao longo do ano quer a utilização água quente quer de utilização de gás combustível, quer as condições de irradiação solar, temperaturas da instalação.

Para a avaliação económica e ambiental do sistema, foi realizado o inventário do material e equipamento instalado bem como dos respetivos custos de aquisição e incidências ambientais. Para efeitos de análise, os investimentos realizados foram considerados sob quatro conjuntos de equipamentos: A - Painéis solares e acessórios, B - Dispositivo de distribuição de água quente solar, C – Dispositivos adicionais (filtração de AFS, bomba recirculadora, válvulas para utilização de água quente em MLR e MLL) e D - Dispositivo de aquecimento de água de reforço/alternativo.

De modo avaliar o interesse económico e ambiental do sistema de AQS, criaram-se cinco projetos (R1, R2, R3, R4 e R5) cada um dos quais tendo em conta diferentes perspetivas de análise. A análise económica dos diferentes projetos foi realizada numa base anual e para um horizonte temporal de 15 anos, recorrendo a um modelo de análise económica de projetos baseado na ótica do utilizador/consumidor, (excluindo amortizações e impostos que não o IVA), tendo sido escolhido como critério o Valor Atualizado Líquido (VAL), tendo em conta os custos de investimento, os custos operatórios e, quando aplicável, as poupanças previstas.

A análise técnica mostrou a necessidade de cobrir os painéis durante os períodos de maior radiação solar e ausência de utilização (férias de verão), a afinação de set-point de temperatura, a melhoria do posicionamento do depósito de acumulação de água quente.

Os resultados da análise económica permitiram concluir que o investimento em painéis solares só é vantajoso desde que a duração do projeto seja cerca de 20 anos, que pode ser vantajoso a recuperação de água de desperdício de AQS e a utilização de água quente para alimentação às máquinas de lavar loiça e roupa.

Os resultados da análise ambiental permitiram concluir que o projeto com maior pegada de carbono é o que resulta da utilização exclusiva de gás butano, sendo que os projectos envolvendo a energia solar térmica apresentam benefícios ambientais significativos em resultado das poupanças de electricidade, gás e água.

Keywords

Solar thermal panels, domestic hot water, technical evaluation, economic evaluation and environmental evaluation.

abstract

The use of solar energy presents technical challenges, economic and environmental costs that need to be rationalized.

The objectives of this work are to carry out a technical, environmental and economic evaluation of the use of domestic hot water (DHW) from a case study. The work method used was based on a top-down analysis, that is, from the observation of the reality of a domestic hot water installation that includes a set of heating devices based on thermal solar panels and butane gas boiler.

For this purpose, a dwelling was monitored throughout the year using both hot water and the use of combustible gas, as well as solar irradiation conditions and installation temperatures.

For the economic and environmental evaluation of the system, an inventory of the equipment was carried out, as well as their acquisition costs and environmental impacts. For analysis purposes, the investments made were considered under four sets of equipment: A - Solar panels and accessories, B - Solar hot water distribution device, C - Additional devices (AFS filtration, recirculating pump, valves for hot water use in washing machines) and D - alternate water heating device.

In order to evaluate the economic and environmental interest of the DHW system, five projects (R1, R2, R3, R4 and R5) were created, each taking into account different analysis perspectives. The economic analysis of the different projects was carried out on an annual basis for a 15-year time horizon, using a model of economic analysis of projects based on the user / consumer perspective (excluding depreciation and taxes other than VAT). Taking into account the investment costs, the operating costs and, when applicable, the expected savings.

The technical analysis showed the need to cover the panels during periods of higher solar radiation and absence of user (summer vacation), set-point temperature tuning, improved positioning of the hot water storage tank.

The results of the economic analysis have led to the conclusion that investment in solar panels is only advantageous if the duration of the project is about 20 years, which may be advantageous for the recovery of waste water and the use of hot water for feeding to the washing machines.

The results of the environmental analysis allowed to conclude that the project with the highest carbon footprint results of the exclusive use of butane gas, and the projects involving solar thermal heat have significant benefits as a result of the savings of gas and water

Índice

Índice	i
Índice de Figuras	iv
Índice de Tabelas	v
Índice de Gráficos.....	vi
Lista de abreviaturas	vii
Nomenclatura	viii
1 Introdução.....	1
1.1 A energia solar.....	1
1.2 Regulamentação da EU e nacional para a utilização de energia em edifícios	3
1.3 Motivação para este estudo.....	4
1.4 Objetivos do presente trabalho	5
1.5 Estrutura da tese.....	6
2 Sistema solar térmico	7
2.1 Sistemas de aquecimento solar térmico.....	7
2.1.1 Sistema de termossifão	7
2.1.2 Sistema de circulação forçada	8
2.2 Coletores solares térmicos	9
2.2.1 Coletores sem cobertura	9
2.2.2 Coletores planos com cobertura.....	10
2.2.3 Coletores parabólicos compostos (CPC'S).....	10
2.2.4 Coletor solar de vácuo.....	11
2.3 Tanque de armazenamento de calor.....	12
2.3.1 Tanque de armazenamento de AQS.....	13
2.3.2 Tanque de armazenamento de termofluido	14
2.3.3 Tanque de armazenamento combinado.....	14
2.3.4 Tanque de armazenamento estratificado.....	15
2.4 Circuito hidráulico	15
2.4.1 Termofluido.....	15
2.4.2 Grupo de circulação	16
2.4.3 Dispositivos de segurança.....	17
2.4.3.1 Válvulas de segurança	17
2.4.3.2 Válvulas de purga.....	17
2.4.3.3 Vaso de expansão.....	17
2.4.4 Controlo e parametrização	18
3 Caso de estudo.....	19
3.1 Caracterização do caso de estudo	19
3.1.1 Localização e orientação.....	19

3.1.2	Características técnicas do sistema	20
3.1.3	Circuito hidráulico	20
3.1.4	Modelo operatório do Sistema Solar térmico (SST)	20
3.2	Caracterização económica	22
3.2.1	Custos de investimento	22
3.2.1.1	Equipamento A	23
3.2.1.2	Equipamento B	23
3.2.1.3	Equipamento C	24
3.2.1.4	Equipamento D	25
3.2.2	Custo de operação e manutenção	25
3.3	Instrumentação e monitorização do sistema	26
3.4	Modelação do caso de estudo	27
3.4.1	Consumo de água	27
3.4.1.1	Consumo de água 4º esquerdo	27
3.4.1.2	Consumo de água 5º Esquerdo	27
3.4.2	Consumo de gás butano	28
3.4.3	Sistema de apoio	29
4	Resultados e discussão	31
4.1	Monitorização do sistema solar térmico (SST)	31
4.1.1	Caso A – Set point do depósito de acumulação	31
4.1.2	Caso B – Efeito da ausência de radiação direta	35
4.1.3	Caso C – Sombreamento dos painéis e ausência de consumo de AQS	35
4.1.4	Caso D – Limitação de radiação para preparação de AQS	36
4.1.5	Caso E – Limitações de acumulação de AQS	36
4.2	Modelo de análise do projeto	41
4.2.1	Projeto R1	41
4.2.1.1	Modelo de consumo e custo de gás	42
4.2.1.2	Custos de água	42
4.2.2	Projetos R2 e R5	42
4.2.2.1	Modelo de consumo e custo de gás	42
4.2.2.2	Custo de água	43
4.2.2.3	Custo de eletricidade	43
4.2.3	Projeto R3	43
4.2.3.1	Modelo de consumo e custo de gás	44
4.2.3.2	Consumo e custo de água	44
4.2.3.3	Consumo e custo de eletricidade	44
4.2.4	Projeto R4	45
4.3	Análise Económica	45
4.3.1	Projeto R1	46

4.3.2	Projeto R2.....	47
4.3.3	Projeto R3.....	47
4.3.4	Projeto R5.....	49
4.3.5	Projeto R4.....	49
4.4	Análise Ambiental	50
4.4.1	Projeto R1	53
4.4.2	Projetos R2 e R5	54
4.4.3	Projeto R3.....	55
4.4.4	Projeto R4.....	56
5	Conclusão.....	57
5.1	Análise técnica.....	57
5.2	Análise económica.....	57
5.3	Análise ambiental.....	58
5.4	Limitações do trabalho.....	59
5.5	Sugestões para trabalho futuro	59
	Referências bibliográficas	60
	Anexo A – Casos tipo	61
	Anexo B – Casos de anomalia	63

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Decomposição da energia total emitida pelo sol (ver URL1).	2
Figura 1.2 – Decomposição da energia total emitida pelo sol (Roriz et al. 2010).....	3
Figura 2.1 – Coletor solar sem cobertura (ver URL5).	9
Figura 2.2 – Coletor solar plano com cobertura (ver URL6).	10
Figura 2.3 – Coletor solar parabólico composto (ver URL7).....	11
Figura 2.4 – Coletor solar de vácuo (ver URL8).	12
Figura 2.5 – Tanque de armazenamento de água quente sanitária (AQS) (Green Pro 2004).....	13
Figura 2.6 - Variação do ponto de ebulição do termofluído em função de percentagem de propilenoglicol misturado na água (ATSDR 2011).....	16
Figura 3.1 Esquema simplificado do SST na produção de AQS (Vulcano 2013).....	22

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Custos de aquisição.....	23
Tabela 3.2 – Custos e recursos do Equipamento A.....	23
Tabela 3.3 - Custos e recursos do Equipamento B.	24
Tabela 3.4 - Custos e recursos do Equipamento C.	25
Tabela 3.5 - Custo e recursos do Equipamento D.	25
Tabela 3.6 - Consumos médios estimados de gás butano combustível ao longo do ano (antes da instalação do SST).	29
Tabela 4.1 - Considerações tomadas para cada um dos projetos	41
Tabela 4.2 - Consumos médios estimados de combustível ao longo do ano depois da instalação do SST.....	43
Tabela 4.3 – Extrato da tabela LCIA da base de dados Ecoinvent, indicador IPCC 2007, para os diferentes recursos.....	52

Índice de Gráficos

Gráfico 4.1 – Perfil temporais de temperatura em vários locais do SST e da radiação solar recebida para o período de 28 de junho a 4 de julho.....	33
Gráfico 4.2 - Perfil temporal de temperatura em vários locais do SST e da radiação recebida para o período de 21 a 28 de julho.....	34
Gráfico 4.3 – Perfis temporais de temperatura e radiação do SST no período de 29 de julho a 5 de agosto evidenciando o efeito da nebulosidade (dia 30 de julho e 4 de agosto) em termos da captação de energia térmica (ver perfil de temperatura no depósito).	37
Gráfico 4.4 - Perfis temporais de temperatura e radiação no SST no período de 6 a 20 de agosto e do efeito da colocação de cobertura “rede-sombra”.	38
Gráfico 4.5 – Perfil temporal de temperaturas e radiação do SST, que inclui a remoção de cobertura do painel entre 21 de agosto 2 de setembro.	39
Gráfico 4.6 – Perfil temporal das temperaturas e da radiação para o período de 25 de outubro até 3 de novembro, em que são evidentes as dificuldades de preparar AQS pelo SST por insuficiência de intensidade e duração de radiação.	40
Gráfico 4.7 VLA acumulado relativo ao projeto R1.	46
Gráfico 4.8 - VLA acumulado relativo aos projetos R1 e R2.....	47
Gráfico 4.9 - VLA acumulado relativo aos projetos R1 e R3.....	48
Gráfico 4.10 - VLA acumulado relativo aos projetos R1 e R5.....	49
Gráfico 4.11 - VLA acumulado relativo ao projeto R4.	50
Gráfico 4.12 - Impacto ambiental acumulado para o projeto R1.	54
Gráfico 4.13 - Impacto ambiental acumulado para os projetos R1, R2 e R5.....	55
Gráfico 4.14 - Impacto ambiental acumulado para os projetos R1 e R3.	55
Gráfico 4.15 - Impacto ambiental acumulado para o projeto R4.	56

Lista de abreviaturas

- ACV - Análise do ciclo de vida
ADENE - Agência para Energia
AFS - Águas Frias Sanitárias
AIE - Agência Internacional de Energia
AQS - Águas Quentes Sanitárias
CFE - Cash-Flow Exploração
CFI - Cash-Flow Investimento
CFL - Cash-Flow Liquido
CPC'S - Coletores Parabólicos Compostos
EU - União Europeia
EUA - Estados Unidos da América
MLL - Máquina de Lavar a Loiça
MLR - Máquina de Lavar a Roupa
NZEB - Nearly Zero Energy Buildings
PE - Parlamento Europeu
RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
SST - Sistema Solar Térmico
TIR - Taxa Interna de Rentabilidade
VLA - Valor Liquido Atualizado
VLA acumulado - Valor Liquido Atualizado acumulado

Nomenclatura

i	– Taxa de atualização	[%]
QAb	– Energia Absorvida	[J]
QC	- Energia Útil	[J]
QCC	- Energia trocada por condução-convecção entre o coletor e o ar que o rodeia	[J]
QE	– Energia transmitida por radiação	[J]
QI	- Energia Incidente (radiação direta)	[J]
QR	- Energia refletida	[J]
ε	– Emissividade	[-]

1 INTRODUÇÃO

A sociedade contemporânea confronta-se com uma situação de limite, na qual o crescimento da população, o consumismo, a alteração das condições climáticas, a degradação ambiental e as novas desigualdades sociais são fatores de risco para a manutenção de condições de sustentabilidade da Humanidade e da Natureza pelo facto de vivermos num planeta limitado em termos de recursos e de espaço.

1.1 A ENERGIA SOLAR

Desde a revolução industrial, século XVIII, o desenvolvimento da sociedade tem passado pelo consumo intensivo de energia, levando a uma dependência crescente desta.

Atualmente a maioria da energia consumida é de origem fóssil, o que levanta uma grande diversidade de problemas a nível económico, social, ambiental e político. É com base nesta problemática e no desenvolvimento sustentável, que conceitos como energias alternativas e eficiência energética apresentam cada vez maior relevância no nosso quotidiano.

A maior fonte de energia disponível na Terra é aquela que é proveniente do Sol, pois é o principal responsável pelos processos químicos e biológicos nela existentes, sendo assim indispensável para a existência de vida na Terra. Por outro lado, a energia solar pode ser utilizada para diversas funcionalidades no âmbito dos processos tecnológicos de hoje, sendo uma fonte limpa do ponto de vista ambiental embora exigindo recursos económicos e ambientais significativos.

A energia solar pode-se considerar ilimitada à escala humana, uma vez que a duração de vida do sol é de cinco biliões de anos. Contudo a energia solar disponível na Terra é muito variável no espaço e no tempo, pois depende da latitude geográfica, do dia do ano e da hora do dia. Por exemplo, as altitudes solares que o sol atinge no Verão são maiores do que aquelas que atinge no Inverno, este fenómeno deve-se à inclinação do eixo da Terra.

A irradiação solar total é definida como a quantidade de energia radiante emitida pelo sol em todos os comprimentos de onda (que não apenas a luz visível) em cada

segundo, num plano perpendicular de um metro quadrado fora da atmosfera terrestre a uma determinada distância do sol. Na superfície exterior da atmosfera da Terra, a irradiação é conhecida como a constante solar e é igual a cerca de 1367 W. m^{-2} .

No entanto, nem toda a energia que é recebida na superfície exterior da Terra atinge a superfície terrestre. De facto, a radiação solar incidente ou insolação, definida como a quantidade de energia que passa através da atmosfera terrestre e atinge uma determinada área da superfície terrestre, é de, no máximo, cerca de 1000 W. m^{-2} quando os raios solares chegam ao solo numa superfície perpendicular a estes. Esta situação resulta do facto de a atmosfera da Terra dissipar cerca de 25 a 30% da energia radiante incidente, devido a absorção e reflexão, como se pode observar na Figura 1.1.



Figura 1.1 - Decomposição da energia total emitida pelo sol (ver URL1).

Por outro lado, e em matéria de aproveitamento de energia solar em dispositivos tecnológicos (por exemplo: painel solar térmico), a energia incidente (Q_i) proveniente da radiação direta não é toda transformada em energia absorvida pelo dispositivo (Q_{Ab}), uma vez que parte dessa energia é refletida (Q_R), outra é trocada por condução-convecção (Q_{CC}) com o ar que o rodeia e outra parte é transmitida por radiação (Q_E), depois deste balanço a energia captada pelo painel, ou seja a energia útil (Q_C), é a única que irá ser aproveitada para aquecimento do fluxo de termofluido (m), como é ilustrado na Figura 1.2.

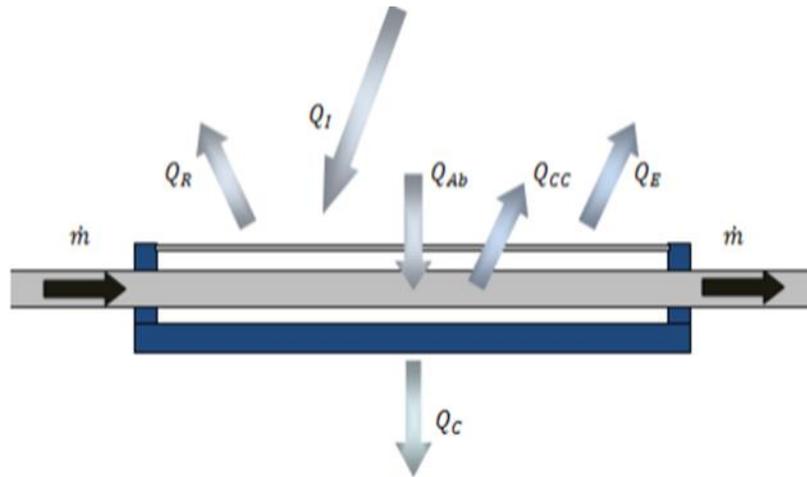


Figura 1.2 – Decomposição da energia total emitida pelo sol (Roriz et al. 2010).

De facto, a quantidade de energia solar é colossal, mas a possibilidade prática de a recuperar é limitada¹.

1.2 REGULAMENTAÇÃO DA EU E NACIONAL PARA A UTILIZAÇÃO DE ENERGIA EN EDIFÍCIOS

A União Europeia tem uma estratégia de desenvolvimento sustentável, no âmbito da qual a redução da dependência dos combustíveis fósseis e a redução emissão de gases com efeito de estufa são um dos principais componentes. Neste âmbito, têm vindo a ser estabelecidas metas cada vez mais restritivas, destacando-se atualmente a meta 20-20-20 (ver URL3), que consiste em

¹ A Terra recebe mais energia do Sol em apenas uma hora do que a população do mundo usa em um ano inteiro. O fluxo total de energia solar intercetada pela terra em qualquer dia é de $1,5 \cdot 10^{22}$ Joules. Sendo equivalente à queima de 360 bilhões de toneladas de petróleo por dia ou 15 mil milhões de tep por hora. Em 2000 o consumo total de energia no mundo foi de apenas $4,24 \cdot 10^{20}$ Joules e em 2005 foi de 10.537 Mtep.

Contudo nem toda a energia fornecida pelo sol está disponível para aproveitamento, estima-se, no entanto, que a energia recebida pela Terra proveniente do Sol é de cerca de 222.504.000 TWh. Ano⁻¹. Colocando isto em perspectiva, a energia total elétrica (não a energia total) em 2011 foi de cerca de 22.126 TWh, AIE (Agência Internacional de Energia) em todo o mundo, deste modo a energia solar disponível é cerca de 10.056 vezes superior ao consumo de energia elétrica do mundo. Mesmo considerando uma eficiência de conversão baixa, de cerca de 10%, da energia solar disponível em energia elétrica, a energia disponível ainda seria de 22.250.400 TWh mais de mil vezes o seu consumo. Deste modo as necessidades de energia elétrica de todo o mundo poderiam ser satisfeitas por um painel de 127.000 km². Teoricamente isso poderia ser assegurado por seis centrais de energia solar de 21.100 km², uma planta em cada um dos desertos continentais quentes na Austrália, China, médio Oriente, África do Norte, América do Sul e EUA ou uma grande central solar cobrindo 1% do deserto do Saara.

No entanto, a nível prático, esta proposta é impraticável uma vez que a generosidade do Sol só pode ser colhida durante o dia e as exigências para distribuir essa energia para longas distâncias torna essa proposta impraticável! Tal exemplo serve apenas para ilustrar a abundância da energia do Sol (ver URL2).

- Reduzir, pelo menos, 20% nas emissões de gases com efeito de estufa em comparação com os níveis de 1990;
- Aumentar para 20% a quota-parte das energias renováveis no consumo de energia;
- Melhorar 20% a eficiência energética.

No âmbito a utilização de energia no sector doméstico, isto é, em edifícios, refira-se os edifícios com balanço energético nulo (NZEB), isto é, são edifícios cujo balanço entre a energia consumida e a energia produzida é nulo, conseqüentemente as emissões diretas de dióxido de carbono serão nulas também. Este conceito é também um objetivo previsto pela União Europeia, segundo a Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010, artigo 9.º, ponto 1, alínea a) e alínea b), passa-se a citar " Os estados membros asseguram que: o mais tardar até 31 de Dezembro de 2020, todos os edifícios novos sejam edifícios com necessidades quase nulas de energia;" e " Após 31 de Dezembro de 2018, os edifícios novos ocupados e detidos por autoridades públicas sejam edifícios com necessidades quase nulas de energia".

Em Portugal, no sector dos edifícios, tem vindo a ser produzida regulamentação que visa o aproveitamento de energia solar. De acordo com o Regulamento (RCCTE), dado pelo Decreto-Lei nº80/2006 de 4 de Abril, capítulo III, artigo 7.º, ponto 2:" O recurso a sistemas de coletores solares térmicos para aquecimento de água sanitárias nos edifícios abrangidos pelo RCCTE é obrigatório sempre que haja uma exposição solar adequada, na base de 1 m² de coletor por ocupante convencional previsto, conforme o definido na metodologia de cálculo das necessidades nominais de energia para aquecimento de água sanitária referida no artigo 11.º, podendo este valor ser reduzido por forma a não ultrapassar 50% da área de cobertura total disponível, ... ".

1.3 MOTIVAÇÃO PARA ESTE ESTUDO

A escolha do tema relativo à produção de água quente sanitária (AQS) em painéis solares térmicos deveu-se, em grande parte, à oportunidade de poder estar em contato direto com a realidade prática, uma vez que ao longo da formação académica estes temas foram abordados através de modelos de simulação disponíveis em aplicações de *software* (Retscreen, por exemplo). Assim, a possibilidade de poder obter informação a partir de um caso de estudo, isto é, tendo em conta recursos instalados, bem como a possibilidade de monitorizar algumas variáveis operatórias, em ordem a calcular o

desempenho técnico, económico e ambiental - afigurou-se muito relevante para o autor deste trabalho. De facto, embora sejam relevantes os aspetos técnico-económicos da produção de água quente sanitária (AQS) para uma habitação, o especial interesse deste projeto resulta da análise ambiental que o tema inclui.

O interesse pelo tema de trabalho resulta do diferentes aspetos de análise o caso de estudo apresenta, dado que o projeto alvo deste estudo procura obter uma perspetiva integrada que possa maximizar o aproveitamento AQS a partir da utilização de painéis solares térmicos, para além dos usos correntes (higiene e cozinha), nomeadamente: redução da utilização de combustíveis fósseis, alargando a utilização de AQS aos eletrodomésticos (máquina de lavar louça e roupa), reduzindo o consumo de água através do uso de recirculação.

Por fim e não menos importante, a elaboração deste trabalho aprofunda/consolida o conhecimento adquirido ao longo da formação académica sobre este tipo de sistemas.

1.4 OBJETIVOS DO PRESENTE TRABALHO

A utilização de AQS no setor doméstico consome recursos energéticos e económicos importantes ocasionando impactos ambientais significativos. Com este trabalho pretende-se elaborar uma avaliação técnica, ambiental e económica a partir de um caso de estudo, comparando duas alternativas de produção de AQS. Neste caso de estudo, será desenvolvida uma pesquisa com base em trabalho de campo (inventário de construção e monitorização da operação) que forneça informações sobre o equipamento instalado (material e custos), o modelo de utilização de AQS, a disponibilidade e utilização horária da energia, incluindo os seus custos associados.

A avaliação técnica deverá permitir determinar a disponibilidade de AQS e as perdas de energia associadas.

A avaliação ambiental das duas alternativas deverá fazer uso da metodologia da análise de ciclo de vida (ACV).

A avaliação económica das duas alternativas deverá recorrer às metodologias de avaliação de projetos baseada no valor atualizado líquido (VAL).

1.5 ESTRUTURA DA TESE

A tese é constituída por cinco capítulos. No primeiro capítulo faz-se uma introdução à energia solar térmica, passando pela sua decomposição desde a sua origem (sol) até chegar à Terra, mais concretamente até ao contato com o coletor solar. Ainda neste capítulo faz-se um enquadramento legal do tema com a realidade em que habitamos, mais concretamente em termos Europeus e em Portugal. Também é descrita a motivação que levou à realização deste tema, bem como os objetivos do trabalho em questão.

O segundo capítulo para além de descrever os tipos de sistemas solares térmicos que há, descreve quais os tipos de coletores disponíveis no mercado, bem como a descrição dos diferentes tanques de armazenamento disponíveis. É ainda feita uma abordagem relativamente ao circuito hidráulico e ao funcionamento do sistema solar térmico.

O terceiro capítulo refere-se ao caso de estudo proposto, em que é feita a respetiva localização, caracterização técnica e económica tendo em conta o inventário dos materiais e equipamento de que o caso de estudo é construído. Neste capítulo faz-se referência à instrumentação usada na monitorização da instalação e qual foi a instrumentação utilizada. Por último, é descrito o modelo económico de análise do caso de estudo.

No quarto capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos para as variáveis em estudo e é feita a análise económica e ambiental para cada projeto.

Por último, o quinto capítulo, vem concluir todo o trabalho, bem como a identificação das limitações do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 SISTEMA SOLAR TÉRMICO

A recuperação de energia térmica a partir do Sol tem vindo a ser aproveitada recorrendo a processos diversificados, desde os sistemas mais simples aos sistemas concentradores.

Sabendo-se que os painéis comuns operam com temperaturas baixas, os rendimentos dos processos são sempre relativamente limitados.

Os coletores solares instalados nos edifícios fazem a conversão da luz solar (radiação de onda-curta) em calor. O calor é produzido através de uma placa metálica revestida que tende a comportar-se como um corpo negro. Esta placa encontra-se ligada a um sistema de tubos por onde circula um fluido de transferência térmica. Esse fluido circula para um tanque de armazenamento isolado onde se dá a transferência de energia do fluido para água potável dando origem à água quente sanitária (AQS), por intermédio de um permutador de calor.

Depois de arrefecido, o fluido escoo novamente até ao coletor através de uma segunda conduta, enquanto que a água potável aquecida sobe no tanque devido a ser menos densa. A água fria que se encontra no tanque permanece no fundo onde posteriormente será aquecida.

O fluido térmico é normalmente formado por uma mistura de água com glicol (anticongelante) de forma a proteger os coletores de congelamento. Este fluido circula em circuito fechado sendo utilizado por sistemas de transferência de calor através de um permutador (Green Pro 2004).

2.1 SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR TÉRMICO

Atualmente existem dois tipos de sistemas de aquecimento térmico, onde a sua principal diferença consiste no modo como o fluido e água aquecidos circulam no sistema.

2.1.1 SISTEMA DE TERMOSSIFÃO

Este sistema é constituído por um coletor solar e um depósito de água que se encontra na parte superior do coletor.

O sistema de termossifão é o sistema mais simples, funcionando segundo o princípio da gravidade, ou seja, a água quente torna-se mais leve fazendo com que suba naturalmente para o acumulador sem recorrer a qualquer grupo hidráulico de bombagem.

Este sistema tem como principais vantagens o fato de ser mais económico, simples, necessitando de menores cuidados de manutenção, devido à inexistência de órgãos mecânicos e dispositivos de controlo eletrónico. Contudo estes sistemas também apresentam desvantagens, o acumulador tem de ficar a uma cota superior ao coletor, a circulação da água é lenta e apresenta muitas perdas térmicas, principalmente nas noites frias de Inverno. A presença do depósito junto do painel ocasiona impacto estético e exige amarração apropriada por causa do vento. Estes sistemas são utilizados principalmente em moradias e sistemas de pequenas dimensões (ver URL4).

2.1.2 SISTEMA DE CIRCULAÇÃO FORÇADA

O sistema de circulação forçada é composto por um conjunto de equipamentos, dos quais os principais são: coletores solares, acumulador, grupo de circulação e central de controlo.

Nestes sistemas, o acumulador é instalado separadamente dos painéis solares. Inversamente ao que acontece nos sistemas de termossifão, o acumulador é instalado na posição vertical, assegurando uma melhor estratificação dos diferentes níveis de temperatura e, conseqüentemente, possibilitando um maior aproveitamento da energia solar. Por outro lado, as perdas térmicas do depósito podem diminuir significativamente devido ao coletor poder ser colocado num local protegido.

Os sistemas de circulação forçada permitem, ainda, a possibilidade de regulação do caudal, a maior rapidez de obtenção de água quente, maior eficiência, e a integração com sistemas de aquecimento central e/ou aquecimento de piscinas.

Contudo existem algumas desvantagens neste sistema de circulação, tais como: são sistemas mais dispendiosos, têm um custo elétrico adicional relativamente ao funcionamento da bomba circuladora embora seja muito pequeno e por fim a instalação também é mais complexa.

Estes sistemas são ideais para aplicações individuais e coletivas, tais como: habitação (unifamiliar e edifícios coletivos), serviços (lares, restaurantes, hotéis, etc.) e indústria (ver URL4).

2.2 COLETORES SOLARES TÉRMICOS

O objetivo dos coletores térmicos é converter a maior quantidade de radiação possível em calor e posteriormente transportá-lo com o mínimo de perdas possível para o resto do sistema. Existem diversos tipos de coletores térmicos, dependendo da aplicação, custos e desempenhos específicos.

2.2.1 COLETORES SEM COBERTURA

Os coletores sem cobertura são constituídos apenas por uma placa absorvedora. Têm uma menor eficiência relativamente aos coletores planos, devido à sua simplicidade, não têm cobertura, isolamento térmico nem revestimento conduzindo desta forma a perdas elevadas. Por outro lado, é uma solução barata, tendo várias aplicações: como o aquecimento de piscinas através de placas absorvedoras de plástico; ou para o pré-aquecimento de águas quentes sanitárias (AQS) através de placas absorvedoras seletivas de aço inoxidável.

Estes coletores estão disponíveis para diversos tipos de telhados: telhados planos, telhados inclinados, o que permite que a instalação seja adaptada ao tipo de revestimento que se possui. A escolha deste tipo de coletores também permite que se poupe dinheiro no revestimento do telhado, para a área dimensionada, uma vez que a placa absorvedora substitui a cobertura do telhado. No entanto por causa do seu menor rendimento é necessário instalar uma maior área de coletores do que para outros tipos de coletores e deveram ser utilizados para necessidades de temperatura de utilização inferiores a 30 ° C (Green Pro 2004). A Figura 2.1 representa um coletor sem cobertura.



Figura 2.1 – Coletor solar sem cobertura (ver URL5).

2.2.2 COLETORES PLANOS COM COBERTURA

Os coletores solares planos são constituídos por uma caixa plana onde se encontra a placa absorvedora de metal, por isolamento térmico na parte inferior e de lado. Na parte superior existe uma cobertura transparente, enquanto que os tubos de alimentação e retorno do fluido térmico se encontram na posição lateral do coletor.

A cobertura transparente deve possuir uma elevada transmissão de luz e conseqüentemente uma baixa reflexão durante o tempo de vida útil do coletor, provocando desta forma o efeito de estufa dentro da caixa, deste modo o lado de dentro da caixa é mais quente do que o lado de fora. Posteriormente o fluido térmico é aquecido com a ajuda da placa absorvedora, sendo depois conduzido em circuito fechado por todo o sistema, regressando ao painel depois de aquecer a água potável existente no tanque de armazenamento.

Os coletores planos pesam entre cerca de 15 a 20 kg.m², possuem tamanhos variáveis, que vão desde 1,5 m² até 12,5 m² e em casos especiais até podem mesmo ultrapassar este valor. No entanto os tamanhos mais comuns são de 2 m² com um peso médio de 40 kg por módulo. Na Figura 2.2 está ilustrado o coletor solar plano.



Figura 2.2 – Coletor solar plano com cobertura (ver URL6).

2.2.3 COLETORES PARABÓLICOS COMPOSTOS (CPC'S)

O funcionamento destes coletores passa pela concentração da radiação solar, na placa absorvedora, por intermédio dum sistema duplo de absorção da radiação. Estes

coletores são constituídos por um sistema de absorvedores, que permitem captar a radiação solar de forma semelhante ao que acontece nos coletores planos, por um sistema de reflexão da radiação que permite concentrar a radiação na parte inferior do absorvedor em forma de parábola.

Com o intuito de minimizar as perdas térmicas dos coletores planos desenvolveu-se uma tecnologia baseada na redução da área de absorção, em comparação com a área de captação da radiação solar, reduzindo assim as perdas térmicas devido a estas serem proporcionais à área do absorvedor. Este fenómeno é conseguido devido à superfície refletora, mais propriamente à sua configuração, pois permite concentrar a radiação recorrendo à utilização de materiais espelhados com elevado nível de reflexão. O ângulo de abertura destas superfícies permite captar radiação direta e difusa.

Os CPC'S consistem em sistemas de concentração de energia que foram fabricados de forma a se obterem temperaturas mais elevadas, com maiores rendimentos, devido às suas menores perdas térmicas, no entanto com características de simplicidade que os tornam semelhantes aos coletores planos, pelo fato de poderem se colocar da mesma forma em telhados ou outras estruturas fixas.

Devido às suas altas temperaturas, estes sistemas não são concebidos para o aquecimento edifícios ou águas sanitárias. São desta forma utilizados em centrais térmicas e podem ser cilíndricos ou de revolução (Green Pro 2004). Observa-se na Figura 2.3 um coletor parabólico composto.



Figura 2.3 – Coletor solar parabólico composto (ver URL7).

2.2.4 COLETOR SOLAR DE VÁCUO

Nos coletores de vácuo as placas absorvedoras podem ser instaladas como placas absorvedoras planas, convexas ou cilíndricas. A forma em tubo destes coletores permite controlar as forças que aumentam com o vácuo devido à sua alta compressão.

Um coletor de tubo de vácuo é constituído por um número de tubos, que estão conectados entre eles através de um distribuidor ou caixa coletora, onde se localizam o isolamento e as linhas de alimentação e retorno.

De forma a minimizarem-se as perdas térmicas neste coletor, são utilizados tubos de vidro (com absorvedores internos) sujeitos a vácuo. As perdas de calor por convecção podem ser eliminadas para pressões dentro do tubo de pelo menos 10^{-2} bar. Por conseguinte as perdas para atmosfera são significativamente menores, sendo de enfatizar que mesmo para temperaturas de absorção de 120 °C ou mais, os tubos de vidro permanecem frios no exterior. Normalmente os tubos são evacuados para pressões abaixo dos 10^{-5} bar. No caso de perdas por radiação, não podem ser reduzidas pela criação de vácuo, devido a estas não dependerem do meio em que se encontram. Estas perdas por radiação encontram-se assim reduzidas, como no caso de coletores planos, devido à escolha de bons revestimentos (baixos valores de ϵ) (Green Pro 2004). A Figura 2.4 ilustra um coletor de vácuo.



Figura 2.4 – Coletor solar de vácuo (ver URL8).

2.3 TANQUE DE ARMAZENAMENTO DE CALOR

A energia proveniente do sol não pode ser controlada e raramente coincide com o horário das necessidades energéticas, por conseguinte, é necessário armazenar a energia solar de forma a ser utilizada quando necessário.

Os tanques de armazenamento estão divididos em dois tipos: tanques de pressão e tanques de superfície livre. Os tanques de pressão estão disponíveis em aço inoxidável, plástico ou esmaltados. Em comparação com outros tanques de aço, os tanques de aço inoxidável são mais leves e com menores necessidades de manutenção, no entanto são mais caros em relação ao aço esmaltado e são mais sensíveis a água com muito cloro. Para evitar a corrosão, os tanques esmaltados têm que ser equipados com magnésio ou com um ânodo externo. Também estão disponíveis tanques de aço revestidos com plástico, que, embora sendo mais baratos, são sensíveis a temperaturas superiores a 80 °C; os testes realizados à maioria destes revestimentos têm demonstrado problemas de fiabilidade. Os tanques de plástico de superfície livre apresentam sensibilidades a temperaturas muito elevadas (Green Pro 2004).

2.3.1 TANQUE DE ARMAZENAMENTO DE AQS

A Figura 2.5 representa o esquema de um tanque de armazenamento normalizado, que apresenta dois permutadores de calor para duas fontes de calor (bivalente) ou um permutador (inferior) para uma fonte de calor e um permutador de calor para uma utilização de termofluído para aquecimento do ar ambiente. A pressão de operação do tanque é variável entre 4 e 6 bar. O tanque deve estar dotado dos dispositivos de segurança apropriados (vaso de expansão, válvulas de segurança e de purga).

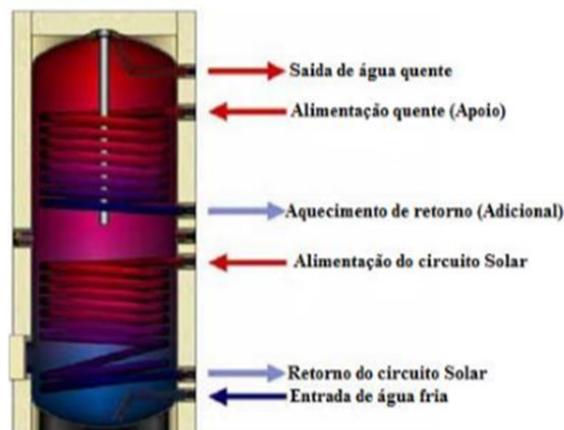


Figura 2.5 – Tanque de armazenamento de água quente sanitária (AQS) (Green Pro 2004).

O tanque de armazenamento deve ser dimensionado tendo em conta a cobertura de 1,5 a 2 vezes a quantidade de água quente utilizada diariamente. Assim o volume

deverá ser de 50 a 70 litros por pessoa (consumo médio), correspondendo a, tipicamente, um tanque de 300 litros para uma família de 5 pessoas. Por um lado, tanques de armazenamento de grandes dimensões podem acumular maiores quantidades de energia, no entanto também aumentam a utilização dos sistemas de apoio, uma vez que o nível de temperatura no tanque de armazenamento é menor do que para um tanque de menores dimensões.

No caso dos tanques de armazenamento servirem de depósito a água potável a temperatura deverá ser limitada a 60 °C, devido ao calcário precipitar a altas temperaturas, podendo mesmo bloquear a superfície do permutador de calor. Além disso, o calcário é depositado gradualmente na base do tanque de armazenamento (Green Pro 2004).

2.3.2 *TANQUE DE ARMAZENAMENTO DE TERMOFLUÍDO*

O tanque de armazenamento de termofluído é um tanque de aço (tanque de pressão) ou um tanque de plástico não pressurizado com água para aquecimento. O calor armazenado neste tanque pode ser introduzido diretamente no sistema de aquecimento (suporte de aquecimento) ou pode ser transferido para a água potável através de um permutador de calor (Green Pro 2004).

2.3.3 *TANQUE DE ARMAZENAMENTO COMBINADO*

O tanque de armazenamento combinado resulta da combinação de um tanque regulador e de armazenamento de água potável. Uma pequena seção com um tanque de armazenamento de água potável é instalada na parte de cima da área quente do tanque de armazenamento de regulação, onde essa mesma parte superior funciona como permutador de calor. Estes tanques podem ser utilizados em sistemas solares para aquecimento de água, com e sem suporte de aquecimento. Devido ao sistema de alimentação o funcionamento da tubagem é simples, bem como o controlo do sistema. Todos os geradores de calor (coletores solares, sistemas de apoio), tais como todos os consumidores de calor (água quentes, aquecedores) operam no mesmo regulador. O sistema de aquecimento está conectado à área superior do tanque de armazenamento de regulação, local onde a água potável é aquecida. A zona intermédia serve para aumentar, em caso de necessidade, a temperatura da água de retorno. Na zona inferior existe um permutador cuja função é alimentar o sistema solar. O tanque de armazenamento de água potável interno é aquecido através da parede (Green Pro 2004).

2.3.4 *TANQUE DE ARMAZENAMENTO ESTRATIFICADO*

Estes tanques foram projetados de forma a ser possível utilizar água quente imediatamente, não sendo necessário aquecer antes o tanque de armazenamento. Estes tanques de enchimento especial têm capacidade para mais de 300 litros, possuem também um dispositivo de controlo-próprio que engloba a variação da introdução de água aquecida. Processo este que tem lugar a uma altura em que a temperatura de alimentação da água é semelhante à temperatura do tanque de armazenamento nesta camada. Por conseguinte é criado um efeito de estratificação térmica no tanque e a temperatura utilizável na área superior do armazenamento é rapidamente atingida.

A grande vantagem destes tanques relativamente aos tanques de armazenamento comuns de água quente, é que não existem perdas de calor na passagem das camadas frias, devido ao aquecimento da camada inicial. Desta forma diminui-se a frequência de utilização do aquecimento adicional (Green Pro 2004).

2.4 **CIRCUITO HIDRÁULICO**

O calor produzido nos coletores é transportado até aos tanques de armazenamento solar, através do circuito hidráulico usando um termofluido. O circuito inclui: (a) as tubagens que fazem a ligação dos coletores aos tanques de armazenamento, (b) o termofluido de transferência térmica ou seja o fluido responsável pelo transporte de calor desde o coletor até ao tanque de armazenamento, (c) a bomba circulação, tem como função fazer escoar o fluido térmico no circuito hidráulico, (d) o permutador de calor que transfere o calor do fluido térmico para a água potável existente no tanque, (e) a bomba de recirculação (f) os dispositivos e acessórios para enchimento, esvaziamento e drenagem de termofluido, (g) o equipamento de segurança, nomeadamente o vaso de expansão, a válvula de purga e a válvula de segurança que protegem o sistema de danos (perdas) devido à expansão do fluido (Green Pro 2004).

2.4.1 *TERMOFLUIDO*

O termofluido tem a função de conduzir o calor produzido no coletor solar até ao tanque de armazenamento. O líquido mais utilizado é a água devido ao facto de apresentar uma capacidade térmica, condutividade térmica elevadas e uma baixa viscosidade. Para além disso não entra em combustão, não é tóxica e é barata.

Contudo, como a água congela aos 0 ° C e evapora aos 100 °C, isto pode ser um problema no caso dos painéis térmicos, dado que necessitam de se manter operacionais

fora do intervalo máximo e mínimo acima mencionado. Para resolver a situação, em geral é adicionado glicol (propilenoglicol ou etilenoglicol conhecido como anticongelante) à água, o que baixa o ponto de fusão da mistura e aumenta o ponto de ebulição desta. Assim sendo, a percentagem de glicol no termofluido depende de local para local, sendo feita com base nas temperaturas mínimas e máximas de cada região.

A adição de glicol, contudo aumenta o poder corrosivo da água, desta forma é necessário a adição de inibidores de acordo com as características dos materiais específicos de cada instalação. Além do termofluido se tornar mais corrosivo, a adição de glicol provoca também a diminuição das capacidades térmicas, redução da condutividade térmica, aumento da viscosidade e aumento da fricção (Green Pro 2004).

O glicol mais utilizado na preparação de termofluidos é o propilenoglicol, tal como sucede no caso de estudo, com uma percentagem de 25% na composição do termofluido. A Figura 2.6 representa a variação do ponto de ebulição do termofluido em função da percentagem de propilenglicol na água.

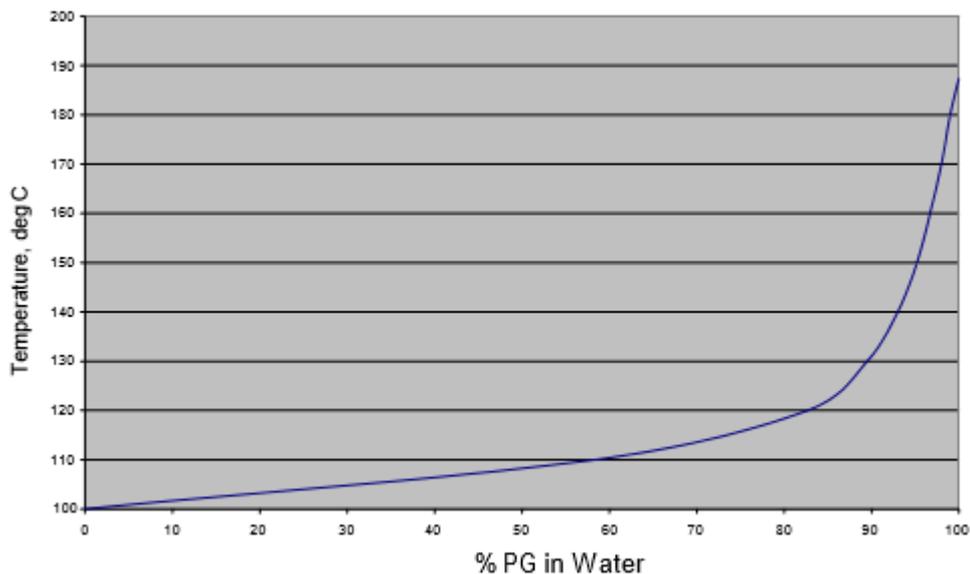


Figura 2.6 - Variação do ponto de ebulição do termofluido em função de percentagem de propilenglicol misturado na água (ATSDR 2011).

2.4.2 GRUPO DE CIRCULAÇÃO

O grupo de circulação é formado por um conjunto de elementos básicos que são necessários ao funcionamento do sistema solar térmico. Este grupo, normalmente é constituído por um sensor de temperatura, válvulas, bomba hidráulica (sistema de

circulação forçada), caudalímetro e regulador de caudal. A principal função do grupo de circulação é movimentar o termofluido do sistema (sistema de circulação forçada), permitindo de certa maneira monitorizar algumas condições do seu funcionamento. Em geral, o grupo de circulação pode ser adquirido pré-montado em configuração que suporta um conjunto de funcionalidades, tais como, sensores de temperatura, purgador, válvula de segurança, dispositivo de acesso para carga de termofluido, desgasificador e medidor de caudal. A bomba de circulação deverá ser dimensionada de forma a contornar todas as perdas de carga do sistema, evitando que fique sobredimensionada, o que levaria a um aumento do custo de funcionamento do sistema (Monteiro 2014).

2.4.3 DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA

Em concordância com a norma Europeia EN 12975 os sistemas de energia solar devem possuir um sistema de segurança de forma a assegurar que a acumulação contínua de calor, sem o respetivo consumo de energia, não leva o sistema à rutura. Esta situação pode ocorrer caso o fluido de transferência térmica escape pela válvula de segurança (Ex: no caso da estagnação do sistema e conseqüente aumento de pressão, o circuito solar deve ser reabastecido antes de ser reiniciado) (Green Pro 2004).

2.4.3.1 VÁLVULAS DE SEGURANÇA

Conforme a norma EN 12975 os sistemas de energia solar devem estar equipados com uma válvula de segurança com uma largura nominal mínima de DN 15 (secção de entrada), ajustada para uma determinada pressão máxima. Quando é excedida essa pressão máxima de regulação, a válvula de segurança abre, permitindo o escoamento do fluido de transferência térmica para um tanque coletor (Green Pro 2004).

2.4.3.2 VÁLVULAS DE PURGA

Trata-se de um dispositivo que permite a descarga de ar (ou vapor), essencial à manutenção do escoamento líquido a plena secção. Deve ser instalada nos pontos mais elevados da canalização.

2.4.3.3 VASO DE EXPANSÃO

O reservatório de expansão é um recipiente de metal fechado, dotado de uma membrana flexível (balão) com válvula externa de ar (ou azoto), sendo adquirido com uma pressão pré-estabelecida. Este vaso encontra-se ligado à linha do fluido de transferência térmica que, quando aquecido, sofre expansão do volume e força a entrada

no vaso de expansão quando a sua pressão excede a pressão preestabelecida da membrana.

O vaso de expansão deve estar instalado no sistema de tubagem no circuito de alimentação do coletor, de modo a absorver a dilatação do fluido, provocada pelo aumento de temperatura. O tamanho do recipiente de expansão deve ter a dimensão suficiente para quantidade de fluido no circuito solar.

Se o vaso de expansão é projetado para a dilatação adicional do fluido de transferência térmica, a pressão máxima de operação não é alcançada, não sendo necessária a ação da válvula de segurança. Existem diversos tamanhos standard de recipientes de expansão, de 10, 12, 18, 25, 35 e 50 litros.

Na seleção do vaso de expansão para o circuito de termofluido do sistema solar, deve-se ter em atenção que a membrana deve ser resistente ao glicol (Green Pro 2004).

2.4.4 *CONTROLO E PARAMETRIZAÇÃO*

O controlo do funcionamento do sistema solar térmico é feito através da designada centralina, que faz uma monitorização constante da diferença de temperatura do entre os painéis solares e o depósito, dos tempos de operação (On/Off), bem como o estado da bomba de circulação. Quando a diferença de temperatura entre coletor solar e o depósito é superior a um determinado valor (*set-point* à operação), a centralina aciona a bomba de circulação; quando a referida diferença é inferior a um determinado valor (*set-point* à desoperação) a centralina comanda o desligar da bomba de recirculação.

A seleção adequada dos *set-points* é um importante aspeto da parametrização do sistema.

3 CASO DE ESTUDO

Neste capítulo apresenta-se o caso que foi considerado para efeito de análise. Para além da localização, apresenta-se uma descrição da instalação, os órgãos e as características técnicas, o modelo de funcionamento, a caracterização económica, a instrumentação utilizada para medir as variáveis necessárias e a modelação económica e ambiental utilizada no caso de estudo.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

O dispositivo que serviu de suporte a este estudo é um conjunto de dois painéis solares (coletores planos com cobertura) de orientação vertical de marca Vulcano (mod FKT-2S) de orientação fixa e de circulação forçada para um tanque de armazenamento de água quente, isolado termicamente com 300 litros de capacidade, alimentado com água fria sanitária (AFS) proveniente diretamente da rede de abastecimento de água ao prédio onde se encontra instalado, cuja função é a produção de AQS, tanto para banhos, como para outras tarefas domésticas, nomeadamente lavar roupa e loiça em máquina, lavar a loiça manual.

Este projeto de aquecimento de água sanitária para uma habitação duplex unifamiliar com dois quartos de banho, um dos quais servido por um esquentador. O início do serviço e registo ocorreu em 16 de junho de 2016, tendo sido completamente desligados os esquentadores.

3.1.1 LOCALIZAÇÃO E ORIENTAÇÃO

O sistema solar térmico (SST) encontra-se instalado num prédio na zona de Esgueira, distrito de Aveiro, e alimenta dois apartamentos desse prédio, correspondentes aos dois últimos pisos do prédio, servindo de residência habitual a cinco habitantes (casal e três filhos). Os painéis encontram-se em posição fixa dada pela orientação do prédio e inclinação do telhado, orientados para OesSudoeste, captando energia essencialmente desde o meio da manhã até ao pôr do sol. Os painéis estão pousados sobre uma estrutura de cantoneira sobre apoios com ligação à estrutura do prédio.

3.1.2 *CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO SISTEMA*

O SST instalado funciona segundo o sistema de circulação forçada e os seus principais dispositivos são: dois coletores solares de 2,55 m² cada (Painel solar premiumSun FKT-2s), um depósito de acumulação de 300litros em posição horizontal, um grupo de circulação (Grupo de circulação Caleffi AGS 5) e uma centralina (central de controlo Vulcano mod B-Sol 100). Dado que o sistema é composto por dois circuitos hidráulicos independentes (um para a água sanitária e outro para o termofluido), cada circuito dispõe dos seguintes dispositivos de segurança: vaso de expansão, purgador e válvula de segurança, sensor de pressão e de temperatura.

O circuito de AQS dispõe de um esquentador para funcionar como reforço ou em substituição do SST.

3.1.3 *CIRCUITO HIDRÁULICO*

O circuito da água quente sanitária (AQS) inclui as tubagens de alimentação de água fria e as tubagens isoladas de retorno com AQS. A movimentação através destas tubagens faz-se sob a ação da pressão de alimentação existente na rede pública de abastecimento ao prédio.

O circuito hidráulico do caso em estudo apresenta ainda uma bomba de recirculação destinada a reduzir a quantidade de água desperdiçada em cada banho, efetuando a sua recirculação ao depósito de acumulação até se obter a água à temperatura desejada, através de um comando temporizado, acionado antes de proceder à utilização de AQS.

Também foram integradas outras funcionalidades neste circuito, como a disponibilização de AQS a outras utilidades existentes na cozinha, tais como as máquinas de lavar a loiça (MLL) e da máquina de lavar roupa (MLR), que consomem uma fração de energia elétrica no aquecimento de água que se estima ser de cerca de 75% da energia elétrica gasta por cada ciclo de funcionamento.

3.1.4 *MODELO OPERATÓRIO DO SISTEMA SOLAR TÉRMICO (SST)*

A água fria sanitária alimenta o depósito de acumulação de 300 litros de capacidade através de uma ligação à rede. O depósito de acumulação horizontal dispõe de um permutador de calor fixado num dos topos, que se encontra ligado ao grupo de circulação (bomba recirculadora), através do qual circula termofluido, sob controlo de um sistema automático programável, conhecido como centralina. A programação da

centralina (*settings*) é definida com base na diferença de temperatura entre os coletores solares e a temperatura da água observada no depósito a meia altura. Quando a diferença de temperatura é igual ou superior a 7 °C, a bomba de circulação entra em funcionamento e o termofluido quente proveniente do painel é impelido através do grupo de circulação para o permutador de calor do depósito de acumulação de AQS. Ao chegar ao permutador de calor, a energia térmica do termofluido é utilizada para aquecer a água, regressando pelo sistema de tubagem, e impelido pela bomba do grupo de circulação até aos painéis solares. O sistema mantém-se em circulação até que a diferença de temperatura entre o coletor e o depósito seja de 4 °C.

Quanto aos dispositivos de segurança, como o próprio nome indica só entram em funcionamento em casos de emergência. Caso o termofluido atinja temperaturas muito elevadas que coloquem em causa a segurança do sistema entra em funcionamento os dispositivos de segurança (válvulas de segurança, válvulas de purga e vasos de expansão).

Em série ou em paralelo (comutável manualmente), a instalação dispõe de um sistema de apoio à produção de AQS baseado num esquentador a gás butano, que é acionado apenas no caso das necessidades de aquecimento não possam ser satisfeitas pelo SST. Estas situações ocorrem quando a radiação solar direta é insuficiente (quando o céu está encoberto ou nebulado), pois mesmo quando os dias são pequenos e a inclinação solar é grande (como sucede no período de novembro a fevereiro), desde que haja radiação solar direta a incidir sobre o painel durante tempo suficiente (estima-se que sejam necessárias pelo menos cerca de 6 horas por dia) para que possam ser satisfeitas as necessidades de água quente. Num dia de céu limpo o depósito não deve apresentar valores de temperatura inferiores a 50 °C, principalmente se o consumo for reduzido. A Figura 3.1 ilustra o funcionamento da produção de AQS através do SST.

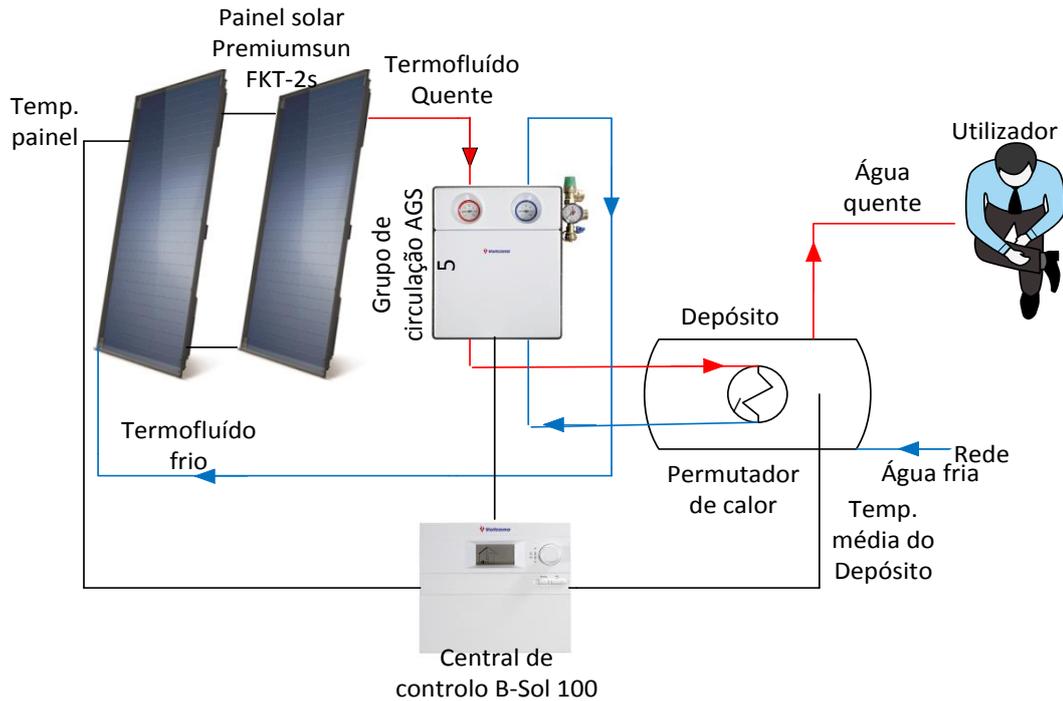


Figura 3.1 Esquema simplificado do SST na produção de AQS (Vulcano 2013).

3.2 CARACTERIZAÇÃO ECONÓMICA

A caracterização económica do caso de estudo foi efetuada tendo em conta a documentação relativa às aquisições de materiais e componentes para a construção da instalação. As aquisições de equipamento foram efetuadas em 2014, mas as obras de instalação prolongaram-se até junho de 2016.

3.2.1 CUSTOS DE INVESTIMENTO

De modo a calcular os custos de investimento no SST, realizou-se um inventário dos materiais e componentes considerando os quatro conjuntos de equipamentos seguintes de acordo com a aplicação: Equipamento A, Equipamento B, Equipamento C e Equipamento D.

A Tabela 3.1 resume os custos de aquisição em loja (não incluindo descontos comerciais, nem IVA, nem custos de transporte e instalação), determinados a partir dos registos de faturação e classificados de acordo com os conjuntos de equipamentos atrás referidos.

Tabela 3.1 - Custos de aquisição

Aquisição	Custo
Equipamento A	3 628,93 €
Equipamento B	455,18 €
Equipamento C	836,07 €
Equipamento D	100,00 €
Total	5 020,18 €

3.2.1.1 EQUIPAMENTO A

A designação Equipamento A respeita ao conjunto de equipamentos estritamente necessários à preparação DE AQS através da utilização de um SST. O Equipamento A é constituído por: dois coletores solares térmicos, um grupo de circulação, dois vasos de expansão, dois purgadores, uma centralina e um depósito de acumulação; as condutas por onde circula o termofluído e a água, o isolamento, os vedantes, os acessórios de ligação entre o sistema de tubagem (tês, joelhos, bichas, uniões, tampões, porcas) e pelos dispositivos de medida (manómetro e termómetro) e por fim pelas válvulas de segurança. Na Tabela 3.2 pode observar-se os custos, bem como as quantidades equivalentes de materiais aplicadas sob diferentes utilidades consideradas no âmbito do Equipamento A.

Tabela 3.2 – Custos e recursos do Equipamento A.

	Custo (€)	Aço Inox (kg)	Cobre/ Latão (kg)	Polímero (kg)	Vidro (kg)
"Equipamento"	3242,83	44,62	16,45	51,25	80,00
Acessórios	152,16	4,23	5,70	2,28	0,00
Válvulas	28,06	0,00	0,40	0,00	0,00
Material	205,88	13,36	0,00	23,50	0,00
Total	3628,93	62,21	22,55	77,03	80,00

Os valores apresentados foram obtidos por pesagem dos diferentes componentes unitários e do número de componentes utilizados na instalação.

3.2.1.2 EQUIPAMENTO B

O Equipamento B refere-se ao conjunto de componentes necessários à pré-instalação do SST, respeitando assim aos componentes (tubos e acessórios) de ligação entre o SST e o dispositivo de distribuição de AFS e AQS à habitação. No presente caso de estudo, a habitação não estava preparada de raiz para receber a instalação de aquecimento solar, pelo que foi necessário proceder às obras necessárias de instalação

de condutas e adaptação dos dispositivos para poder beneficiar da utilização de água quente solar ao nível dos dois pisos da habitação (curete do prédio ao nível das cozinhas). O Equipamento B é, portanto, constituído pelos materiais: tubos, vedantes e isolamentos; por acessórios: objetos de ligação entre o sistema de tubagem (tês, joelhos, tampões, casquilhos, uniões, junções e válvulas). Na Tabela 3.3 pode-se observar o custo, bem como a quantificação dos recursos utilizados no âmbito do Equipamento B.

Tabela 3.3 - Custos e recursos do Equipamento B.

	Custo (€)	Aço Inox (kg)	Cobre/ Latão (kg)	Polímero (kg)
Acessórios	107,84	4,25	0,14	0,00
Válvulas	11,16	0,42	0,00	0,00
Material	336,18	40,09	0,00	8,75
Total	455,18	44,75	0,14	8,75

3.2.1.3 EQUIPAMENTO C

O equipamento C respeita a uma bomba de recirculação e dispositivos de ligação à infraestrutura. A introdução do SST ocasiona uma distância acrescida à fonte de calor (depósito) o que se traduz numa perda de água acrescida. A introdução da bomba de recirculação com funcionamento automático temporizado permite reduzir as perdas de água que haviam sido determinadas em cerca de 10 litros por cada utilização.

Neste âmbito foram ainda consideradas, as utilizações de água quente para limpeza manual da loiça na cozinha, limpeza da loiça na máquina de lavar loiça (MLL) e limpeza da roupa na máquina de lavar roupa (MLR). Neste último caso foi introduzida uma válvula com controlo termostático para limitar a temperatura de admissão de água a 40 ° C.

O Equipamento C é assim constituído por: uma bomba de recirculação e respetivo controlador; pelos materiais: sistema de tubagem da água, vedantes e isolamento; pelos acessórios: objetos de ligação do sistema de tubagem (tês, joelhos, tampões, casquilhos, uniões, junções, cruzeta, porcas e bichas), por um filtro e duas redes laváveis e por fim pelas válvulas. Na Tabela 3.4 pode-se observar o custo, bem como a quantificação dos recursos do Equipamento C.

Tabela 3.4 - Custos e recursos do Equipamento C.

	Custo (€)	Aço Inox (kg)	Cobre/ Latão (kg)	Polímero (kg)
"Equipamento"	279,00	0,50	4,00	0,10
Acessórios	205,74	5,43	1,44	1,77
Válvulas	265,44	0,83	5,52	0,00
Material	85,89	8,91	0,00	2,70
Total	836,07	15,67	10,96	4,57

3.2.1.4 EQUIPAMENTO D

Por outro lado, e nos períodos de inverno quando a temperatura do depósito de água quente não atinge o valor adequado, é necessário operar o sistema de aquecimento de apoio a gás, que ainda assim admite a água a partir do depósito, admitindo que esta possa estar a uma temperatura superior à AFS. No extremo oposto, e por indicação do fabricante, é necessário evitar que a água possa ser recebida na caldeira a temperaturas superiores a 60 ° C, pelo que foi instalada uma válvula com controlo termostático.

O Equipamento D é constituído apenas pela caldeira a gás com capacidade para modular as necessidades de energia térmica de forma a assegurar uma temperatura final de rca de 60°C. Na Tabela 3.5 pode-se observar o custo do sistema de apoio (esquentador), bem como os recursos pela qual este é composto.

Tabela 3.5 - Custo e recursos do Equipamento D.

	Custo (€)	Aço Inox (kg)	Cobre/ Latão (kg)
"Equipamento"	100,00	1,00	20,00
Total	100,00	1,00	20,00

3.2.2 CUSTO DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

Os custos de operação do SST estão relacionados com a energia elétrica que se despende em resultado do funcionamento da bomba. Além disso, nos meses em que a energia solar é insuficiente para cobrir as necessidades energéticas, o funcionamento do sistema de apoio, neste caso, o esquentador a gás butano, impõe custos de exploração acrescidos devidos ao consumo de gás.

Os custos de manutenção corretiva (substituição de componentes) em sistemas solares térmicos devem ter periodicidade quinquenal.

3.3 INSTRUMENTAÇÃO E MONITORIZAÇÃO DO SISTEMA

A avaliação técnica do desempenho do sistema solar térmico decorre da parametrização e das condições específicas de exploração, tais como a configuração (*set points*, temperatura máxima admissível da água no depósito de acumulação), a temperatura da AQS à saída do depósito de acumulação, a quantidade de AQS disponível, a quantidade de energia elétrica utilizada, o número de horas de funcionamento da bomba de recirculação do termofluido, o índice de radiação solar, as perdas de energia do depósito de acumulação ao longo do tempo, as perdas de energia em linha em resultado do transporte da AQS nas tubagens entre o depósito e os pontos de utilização. Numa perspetiva mais pragmática e menos específica, importa também determinar a fração temporal em que o sistema solar térmico assegura integralmente as necessidades de AQS nos diferentes dias de cada mês e ao longo do ano.

Tendo em conta os objetivos do trabalho, o tempo e o equipamento foram monitorizados os seguintes parâmetros: a temperatura do depósito de acumulação de água e a temperatura do ar circundante usando um *datalogger* programado para leitura de termopares tipo K e registo a intervalos de 5 (marca TESTOTHERM, mod.ccc), as temperaturas do termofluido à saída do painel e a temperatura do termofluido no retorno (ou seja à entrada do painel) usando um *datalogger* programado para leitura de termopares tipo K e registo a intervalos de 5 minutos (marca TESTOTHERM, mod.ccc). Foi solicitado ao grupo de Climatologia do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e prontamente recebidos os registos da radiação incidente a intervalos de 10 minutos.

Em relação ao caso de estudo, quer a quantidade e custo de água utilizada quer o consumo e custo de gás butano foram obtidos a partir dos documentos de despesa efetuada ao longo do ano de 2015 e 2016.

Tendo em vista distinguir a utilização de gás butano para produção de AQS em esquentador da utilização de gás butano no fogão da cozinha, procedeu-se à pesagem das garrafas de gás ao longo do tempo. Estas observações tinham por objetivo propor um modelo de utilização mensal de combustível e de água para a produção de AQS (ver sec. 3.4.2), bem como o número de banhos e quantidade de água por cada banho.

3.4 MODELAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

Dado que o caso em estudo se refere a dois apartamentos contíguos, e antecedendo a entrada em funcionamento do SST, o sistema de aquecimento de água para cozinha e para banhos fazia uso de dois esquentadores a gás butano, cada um dos quais dotado de garrafa de gás butano independente, sendo um deles era destinado apenas à produção de AQS. Nestas circunstâncias, foi possível fazer o registo temporal dos consumos de água e de combustível necessários para satisfazer as necessidades de produção de AQS.

3.4.1 CONSUMO DE ÁGUA

3.4.1.1 CONSUMO DE ÁGUA 4º ESQUERDO

Para obter o consumo médio diário de água monitorizou-se o seu consumo durante um determinado período de tempo (desde 2 de dezembro de 2014 até 2 de junho de 2016), a partir dos registos de faturação de água consumida efetuados de dois em dois meses. O consumo médio diário de água para esse período foi de 195 L. dia⁻¹. No entanto, sabendo que os ocupantes da casa (1 homem e duas mulheres) estiveram fora cerca de um mês e meio, considerou-se o consumo médio diário estimado deveria ser cerca de 223 L. dia⁻¹ e assim totalizando 81,14 m³.ano⁻¹.

De modo a obter o consumo médio diário de água quente para banhos do apartamento 4º esquerdo, considerou-se que, em média, um homem gasta 60 L de água quente em cada banho, enquanto que uma mulher gasta o dobro ou seja de 43,80 m³.ano⁻¹.

Antecedendo cada banho com AQS, ocorre a inutilização de 10 L, correspondente ao volume morto de tubagem entre o esquentador e o quarto de banho, ou seja, o equivalente a 4,17 m³ ano⁻¹.

O consumo médio diário de água fria sanitária na casa de banho foi estimado em 107 L.dia⁻¹, ou seja, de 38,90 m³ ano⁻¹.

3.4.1.2 CONSUMO DE ÁGUA 5º ESQUERDO

O consumo médio diário da água canalizada no apartamento 5º esquerdo foi estimado, tal como na situação anterior, a partir da faturação referente ao período de 2 de dezembro de 2014 até 2 de junho de 2016. Este consumo incluía a utilização em quarto

de banho e na cozinha, tendo sido concluído que o consumo médio diário foi de 254 L.dia⁻¹.

No entanto, considerando que os ocupantes (dois homens) estiveram fora cerca de um mês e meio, o consumo médio diário foi corrigido para 290 L.dia⁻¹ ou seja de 107,43 m³.ano⁻¹.

De modo a estimar o consumo médio diário de AQS do apartamento e considerando que em média cada homem gasta 60 L de água quente para tomar banho, obteve-se um consumo médio diário de AQS de 43 L.dia⁻¹ ou seja de 15,64 m³.ano⁻¹. Considerou-se também que o consumo médio de água fria inutilizada antecedendo cada banho foi de 7 L, o que corresponde a 1,825 m³.ano⁻¹.

Por outro lado, o consumo médio de água fria foi estimado considerando que três pessoas consomem 107 L.dia⁻¹ de água fria na casa de banho, então duas pessoas consomem em média 71 L.dia⁻¹, o que corresponde a 25,93 m³.ano⁻¹. Por diferença, A quantidade de água utilizada na cozinha foi de 164 L.dia⁻¹, o que corresponde a 59,98 m³.ano⁻¹.

3.4.2 CONSUMO DE GÁS BUTANO

Para obter o consumo médio diário de gás para preparar AQS na ausência do projeto de aquecimento solar, quer para banhos quer para a cozinha monitorizou-se o seu consumo durante um determinado período de tempo (desde 13 janeiro de 2015 a 4 de julho de 2016). O consumo médio diário estimado de combustível foi de 0,483 kg.dia⁻¹. No entanto, considerando que os ocupantes estiveram fora cerca de um mês e meio no referido período, então o consumo médio diário de gás butano foi estimado em 0,552 kg.dia⁻¹.

Por outro lado, monitorizou-se apenas o consumo de gás para a produção de água quente para banhos do apartamento 4^o esquerdo (duas mulheres e um homem), para tal fez-se observações periódicas da quantidade de gás que era gasta desde o início da utilização de uma garrafa de 13 kg de gás butano. Durante o período de observação que decorreu desde 11 de março até 16 de junho de 2016, foram gastas duas garrafas tendo sido observado um consumo médio diário gás butano de 0,343 kg.dia⁻¹

De modo a encontrar-se o consumo médio diário de gás para banhos dos apartamentos 4^o e 5^o esquerdo, considerou-se que uma mulher consumia o dobro da água de cada homem e como tal, consumia também o dobro do gás. Deste modo o consumo médio diário equivalente-homem foi de 0,069 kg.dia⁻¹. eq-homem⁻¹ o que

corresponde a $0,481 \text{ kg.dia}^{-1}$ e a $175,4 \text{ kg.ano}^{-1}$ de gás butano utilizado na produção de AQS, para a família deste caso de estudo.

Nas referidas circunstâncias, por diferença, foi possível concluir que a quantidade de gás butano necessário para uso na cozinha foi de $0,077 \text{ kg.dia}^{-1}$.

Com base na análise da informação disponível referente ao período de observação e admitindo um valor médio fixo para o consumo de gás na cozinha, foi possível concluir que ocorre maior consumo de combustível nos meses mais frios para a produção de AQS. A Tabela 3.6 mostra os consumos médios diários e mensais estimados ao longo do ano:

Tabela 3.6 - Consumos médios estimados de gás butano combustível ao longo do ano (antes da instalação do SST).

	jan	fev	mar	abril	maio	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	total
	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
Consumo diário de gás (kg/dia)	0,70	0,70	0,60	0,55	0,50	0,50	0,40	0,40	0,50	0,55	0,60	0,70	
Consumo diário de gás para cozinha fixo (kg/dia)	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	
Consumo mensal de gás para banho(kg/mês)	19,3	17,5	16,2	14,2	13,1	12,7	10,0	10,0	12,7	14,7	15,7	19,3	175,4

3.4.3 SISTEMA DE APOIO

Após a instalação do SST, para os meses em que foi possível monitorizar, registou-se o fator de utilização do sistema de apoio. O fator de utilização do sistema de apoio corresponde ao quociente entre o número de dias do mês em que foi necessário acionar o sistema de apoio em relação ao número de dias desse mês

Os únicos meses em que se conseguiu monitorizar o SST foram: julho, agosto, setembro e outubro. Apenas em outubro houve necessidade de acionar o sistema de apoio durante uma semana.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo apresentam-se os resultados relativos à monitorização de algumas das variáveis descritas anteriormente (temperatura e radiação incidente), bem como a aplicação do modelo de consumo de combustível, explicado no capítulo anterior e respetivos custos associados a este, incluindo os custos relativos à água e à eletricidade utilizada pelo funcionamento das bombas. Também se procedeu à análise económica e ambiental do caso de estudo.

4.1 MONITORIZAÇÃO DO SISTEMA SOLAR TÉRMICO (SST)

A monitorização da temperatura foi realizada ao longo do tempo, entre os dias 28 junho até 2 novembro, tendo ocorrido em quatro locais diferentes do sistema. No primeiro local foi medida a temperatura do termofluído à saída do painel (linha a vermelho); o segundo local refere-se à temperatura do termofluído à saída da bomba de recirculação (linha azul), isto é, já depois do termofluído ter passado pelo permutador de calor; o terceiro local refere-se à temperatura do depósito (linha amarela) e o quarto local refere-se à temperatura ambiente (linha preta). O registo da radiação (linha verde) pode ser observado ao longo do tempo.

Tendo em vista a análise técnica, foram identificadas várias situações ou casos a partir dos perfis temporais de temperatura e radiação, atrás mencionados.

4.1.1 CASO A – SET POINT DO DEPÓSITO DE ACUMULAÇÃO

O *set point* do depósito de acumulação é a temperatura máxima admissível no depósito de acumulação. Quando a situação anterior é atingida, a bomba de recirculação de termofluído é desligada, a circulação é interrompida e deixa de haver transporte de calor a partir do PST. Esta situação ocasiona o sobreaquecimento do termofluído no painel, podendo ocorrer a sua vaporização e descarga através da válvula de purga. Caso a situação se prolongue ou repita irá ocorrer perda de fluido e degradação dos materiais devido a aquecimento excessivo. A resolução deste problema pode passar por elevar a temperatura de set-point ou, no limite, cobrir o painel reduzindo a radiação absorvida.

O *set point* estabelecido pelo fabricante para o SST era de 70°C.

Conforme pode observar-se nos Gráficos 4.1. e 4.2, a radiação foi sempre abundante atingindo cerca de 1000 W.m^{-2} no primeiro caso e cerca de 900 W.m^{-2} no segundo caso (quase um mês mais tarde). No primeiro caso pode observar-se ainda o efeito da nebulosidade entre 30 de junho e 2 de julho.

Por outro lado, para os dias em que é exemplo o dia 28 de junho ou 4 e 5 de julho, constata-se que após atingir o *set point* do depósito, ocorre o corte da circulação de termofluído dando origem a temperaturas elevadas do termofluído à saída do painel (acima de $100 \text{ }^\circ\text{C}$), mas sem que o calor possa ser recuperado.

Para ultrapassar o constrangimento anterior, a partir do dia 19 de julho, o *set point* da temperatura do depósito foi alterado de $70 \text{ }^\circ\text{C}$ para $80 \text{ }^\circ\text{C}$, tendo ainda sido repostos termofluídos. A análise do Gráfico 4.2 mostra que a partir da referida data, as situações de paragem de circulação de termofluído e respetivo sobreaquecimento deixaram de ocorrer. Outros exemplos desta situação podem ser visualizados no Anexo A.

Pode concluir-se que para o período desde junho até ao fim de julho, houve sempre energia disponível para as necessidades de produção de AQS, não tendo sido necessário o sistema de apoio, pois as temperaturas mínimas do depósito nunca atingiram valores inferiores a 40°C (temperatura definida como mínimo de conforto AQS).

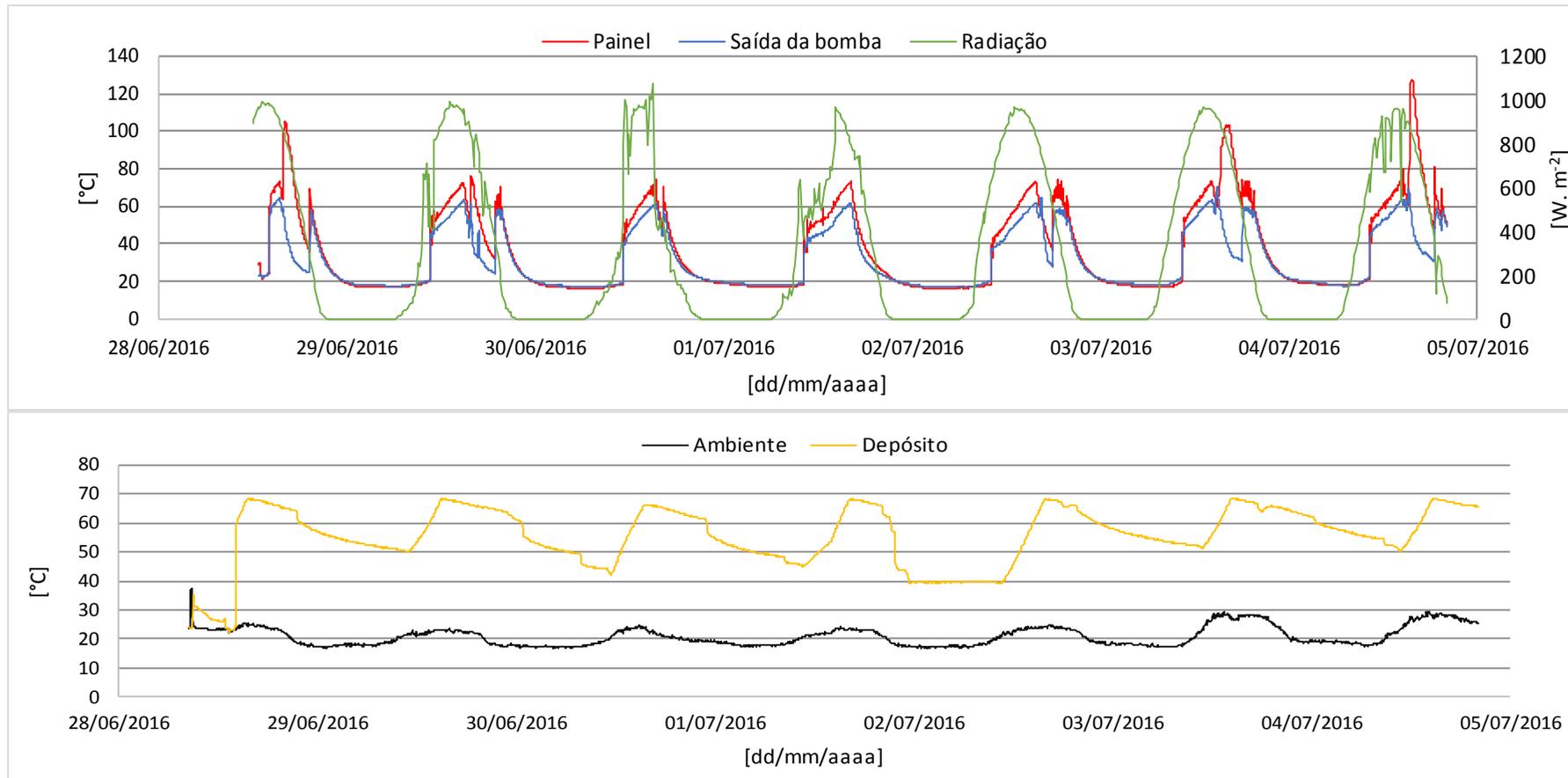


Gráfico 4.1 – Perfil temporais de temperatura em vários locais do SST e da radiação solar recebida para o período de 28 de junho a 4 de julho

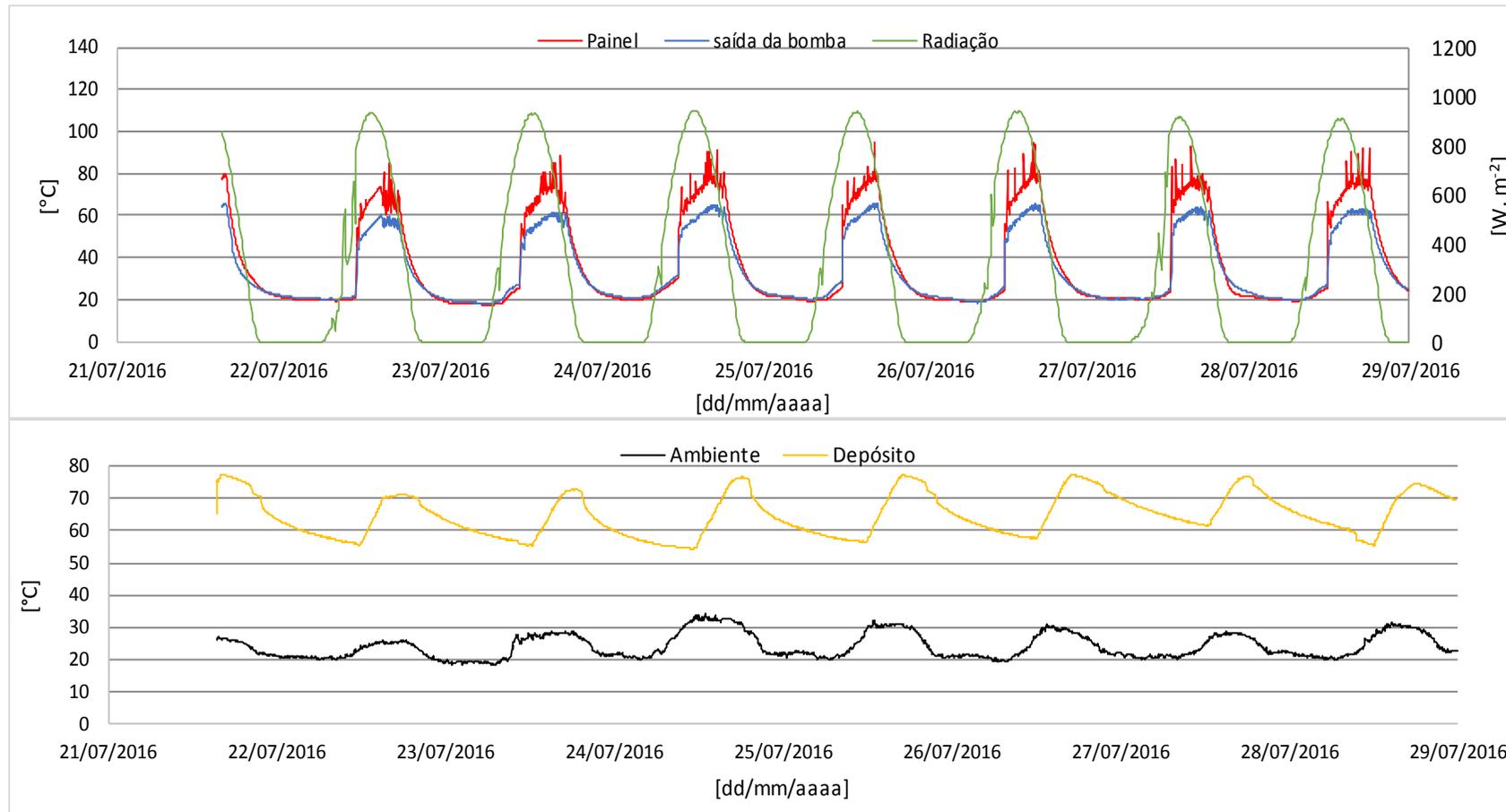


Gráfico 4.2 - Perfil temporal de temperatura em vários locais do SST e da radiação recebida para o período de 21 a 28 de julho.

4.1.2 CASO B – EFEITO DA AUSÊNCIA DE RADIAÇÃO DIRETA

A ausência de radiação solar direta, por efeito da presença de nebulosidade, afeta de forma determinante a captação de energia solar. A análise do Gráfico 4.3 evidencia este efeito nos dias 30 de julho e 4 de agosto que terão coincidido com dias de chuva. É também notável a recuperação de calor que ocorre quer no dia 31 de julho quer em 5 de agosto em virtude da radiação solar ter atingido os níveis de normalidade de um dia ensolarado. Os níveis de radiação máximos são de cerca de 900 W.m^{-2} , mas a largura dos picos é já menor do que o que sucede no Gráfico 4.1.

4.1.3 CASO C – SOMBREAMENTO DOS PAINÉIS E AUSÊNCIA DE CONSUMO DE AQS

Devido a ausência da casa dos utilizadores de AQS de 6 a 20 de agosto, foi ensaiada a colocação de uma cobertura (rede-sombra) sobre os painéis com o objetivo de reduzir a radiação incidente. De acordo com o Gráfico 4.4, é notório que a temperatura do depósito de acumulação não ultrapassou $50 \text{ }^\circ\text{C}$, tendo mesmo diminuído para $40 \text{ }^\circ\text{C}$ no final do período.

Constata-se que foi um período com grande disponibilidade de radiação e que devido à ausência de consumo, a energia acumulada no depósito apenas diminuiu devido às perdas de energia para o ambiente, as temperaturas do depósito variaram sempre entre os $50 \text{ }^\circ\text{C}$ e os $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Contudo para os dias 17 e 19 de agosto, que devido à fraca radiação, a bomba de circulação não entrou em funcionamento, baixando dessa forma a temperatura do depósito para valores abaixo dos $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Essa diminuição de temperatura fez com que, apesar dos dias 21 e 22 terem sido dias com radiação abundante, as temperaturas do depósito tivessem passado a rondar entre os $30 \text{ }^\circ\text{C}$ e os $40 \text{ }^\circ\text{C}$. O mesmo registo evidencia as perdas de calor que o sistema apresenta, particularmente visíveis durante a noite. Atendendo à forma abrupta de decaimento da temperatura, é provável que este efeito esteja a ser potenciado pela estratificação da água e pelo posicionamento da sonda de controlo de temperatura a meia altura do depósito de acumulação que se encontra na posição horizontal.

O Gráfico 4.5 referente ao período de 21 de agosto a 2 de setembro permite perceber o efeito da retirada da cobertura do painel em 24 de setembro, com a recuperação da temperatura do depósito para cerca de 80°C , para uma intensidade de radiação máxima inferior a 800 W.m^{-2} . É ainda visível o decaimento natural (sem utilização de AQS) entre 10 a 15°C desde o fim da tarde até à manhã do dia seguinte.

4.1.4 CASO D – LIMITAÇÃO DE RADIAÇÃO PARA PREPARAÇÃO DE AQS

As limitações na energia solar disponível são observáveis no Gráfico 4.6 referente ao período de 25 de outubro até 3 de novembro, quando comparado com os perfis das semanas anteriores. De facto, é possível observar uma menor quantidade de radiação incidente quer na intensidade (máximo inferior a $600\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) quer na duração de cada período de radiação. De facto, verifica-se os dias cada vez mais nublados, mais chuvosos e sobretudo como é possível verificar pela temperatura ambiente monitorizada, cada vez mais frios, verificando-se que a temperatura máxima atingida pela água no depósito de acumulação fica cada vez mais afastada do *set point*, havendo mesmo alguns dias em que as temperaturas máximas do depósito não atingem os valores de conforto ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$), não repondo a utilização e as perdas.

4.1.5 CASO E – LIMITAÇÕES DE ACUMULAÇÃO DE AQS

A acumulação de calor é um aspeto fundamental do SST na preparação de AQS pois assegura o “delay” necessário entre a produção e a utilização. Para o referido efeito é necessário que o desempenho do depósito seja apropriado. Este desempenho depende de várias características do depósito: capacidade, forma, orientação, isolamento térmico exterior, localização e área do dispositivo permutador, localização do sensor de temperatura para controlo, da admissão de AFS e AQS, entre outros aspetos.

Neste caso de estudo, a capacidade do depósito em aço inox, cilíndrico, com 300 litros de capacidade, mas orientado na horizontal por falta de espaço vertical, isolado termicamente com material isolante de espessura e condutividade térmica desconhecidos; o permutador de calor é uma serpentina de área desconhecida, instalado numa das paredes do topo, com entrada por cima e saída em posição inferior; o porto de acesso para a sonda de temperatura encontra-se localizado a meia altura na parede de topo que suporta a serpentina de permuta.

A avaliação da acumulação mostra perdas de calor acentuadas durante a noite, que podem até ser úteis no verão, mas que são um obstáculo no inverno em relação ao atingir condições de utilização direta, isto é, sem sistema de apoio.

Adicionalmente deve referir-se que a temperatura que serve de referência ao funcionamento da recirculação de termofluido é amostrada a meio do depósito de acumulação, o que pode significar um subaproveitamento do volume de acumulação caso seja observada estratificação.

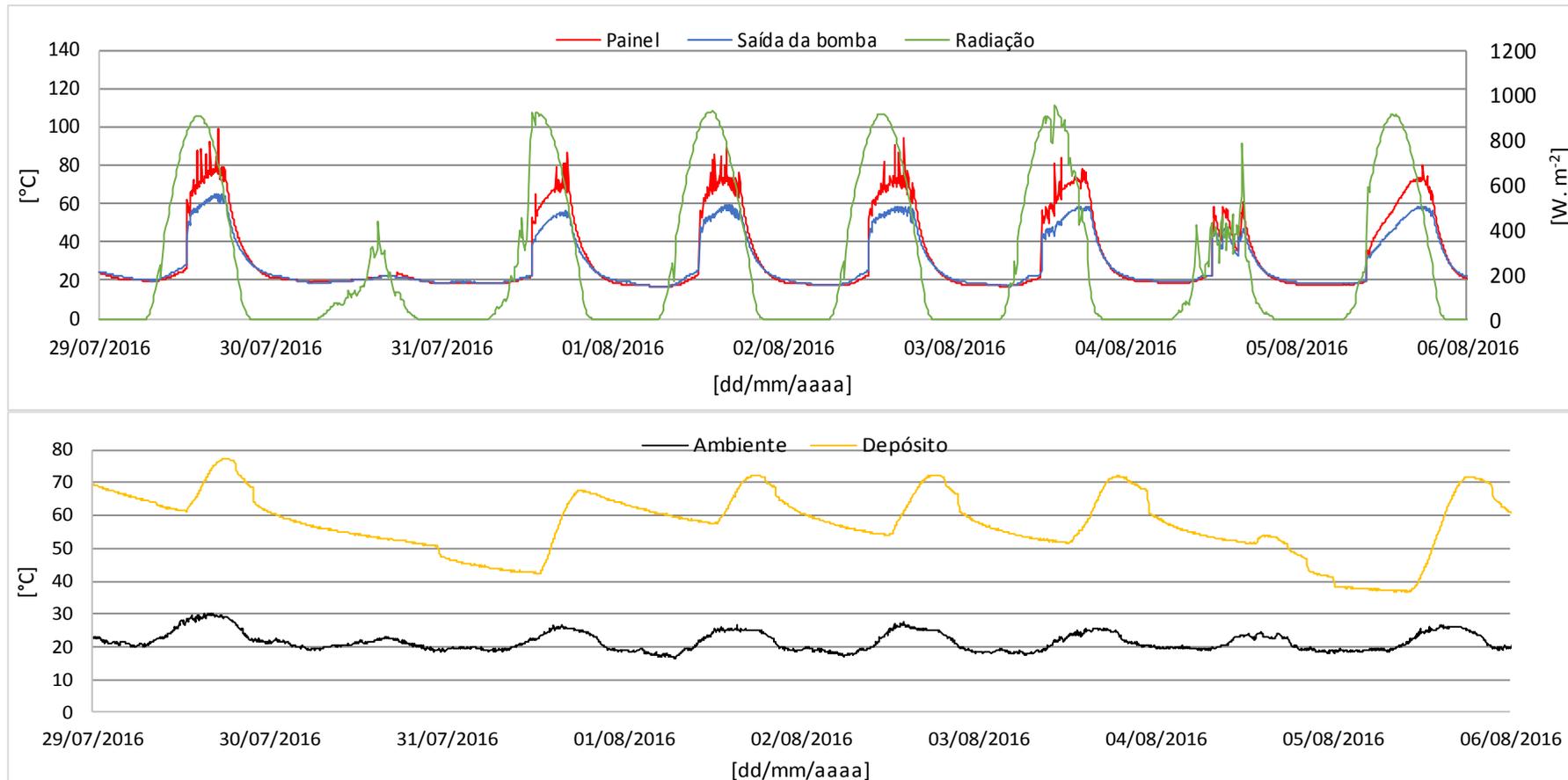


Gráfico 4.3 – Perfis temporais de temperatura e radiação do SST no período de 29 de julho a 5 de agosto evidenciando o efeito da nebulosidade (dia 30 de julho e 4 de agosto) em termos da captação de energia térmica (ver perfil de temperatura no depósito).

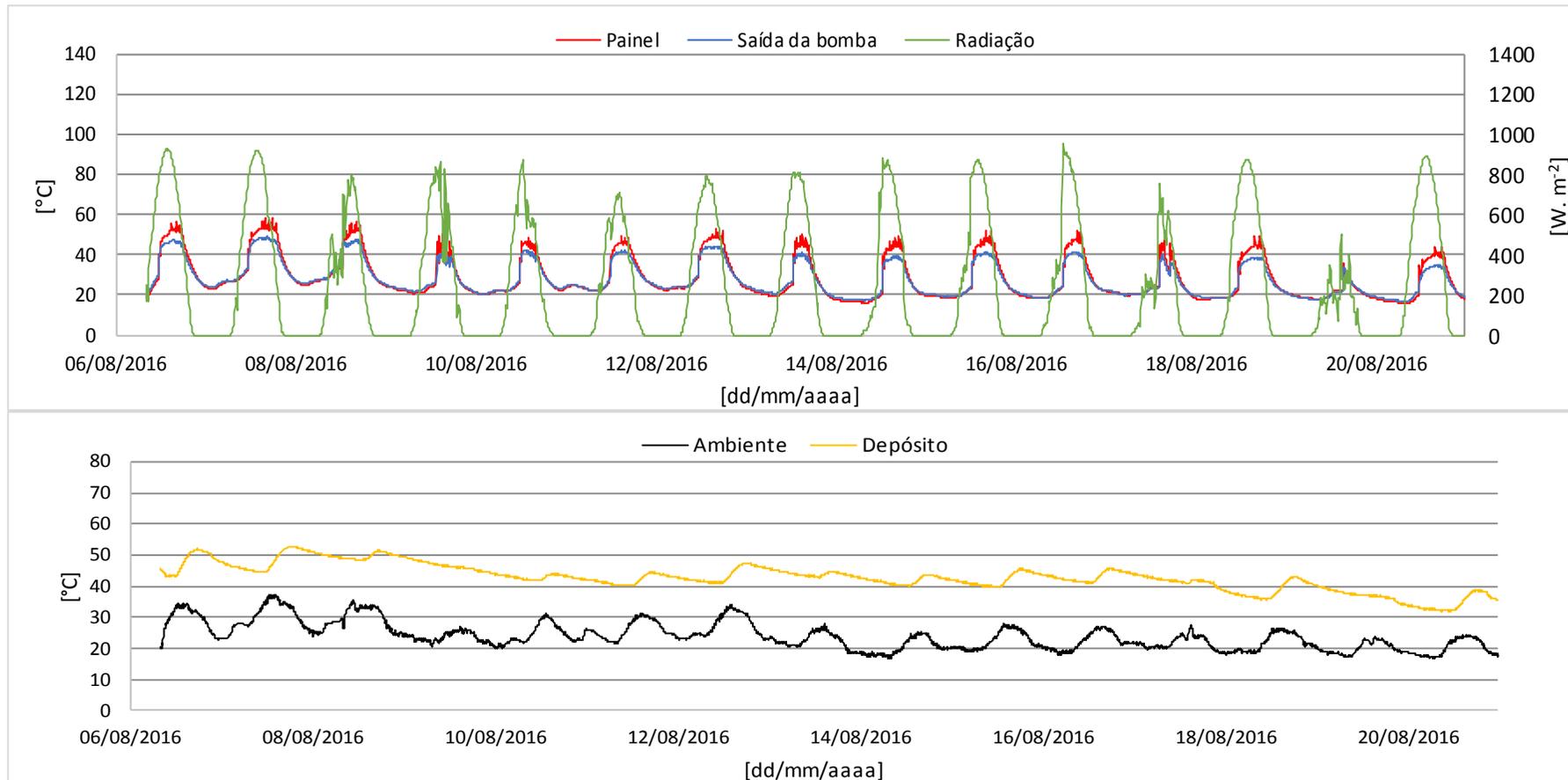


Gráfico 4.4 - Perfis temporais de temperatura e radiação no SST no período de 6 a 20 de agosto e do efeito da colocação de cobertura “rede-sombra”.

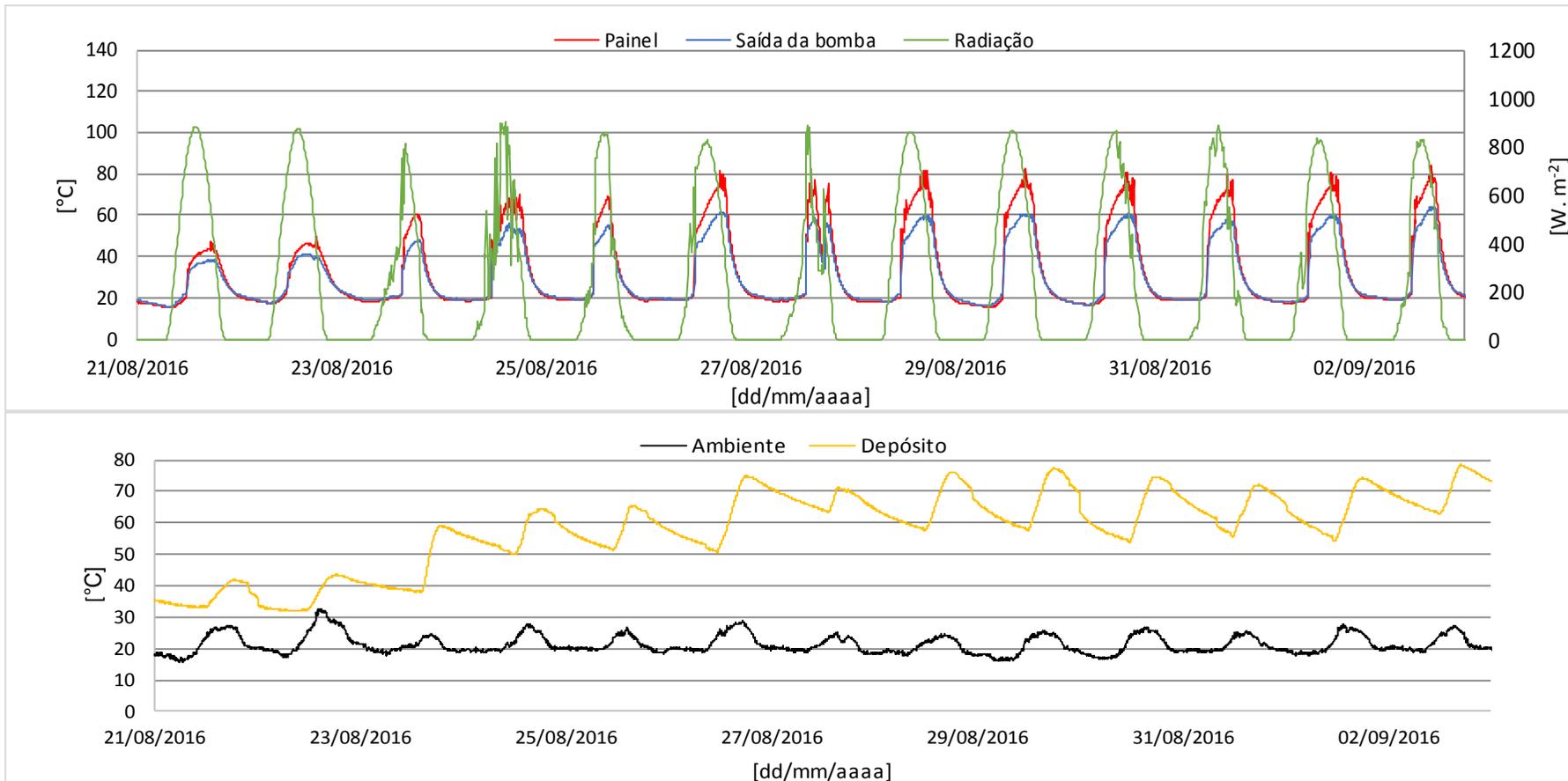


Gráfico 4.5 – Perfil temporal de temperaturas e radiação do SST, que inclui a remoção de cobertura do painel entre 21 de agosto 2 de setembro.

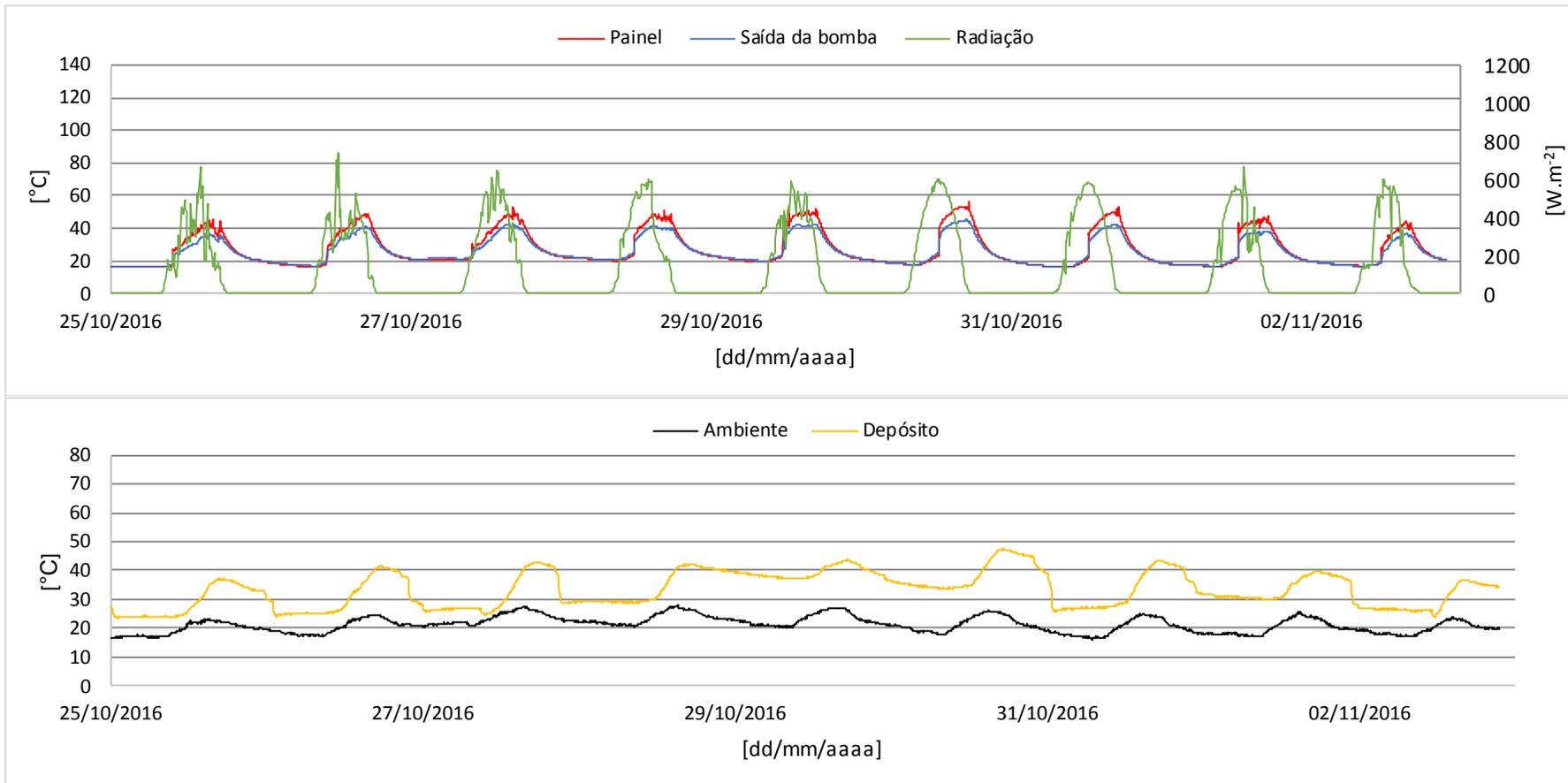


Gráfico 4.6 – Perfil temporal das temperaturas e da radiação para o período de 25 de outubro até 3 de novembro, em que são evidentes as dificuldades de preparar AQS pelo SST por insuficiência de intensidade e duração de radiação.

4.2 MODELO DE ANÁLISE DO PROJETO

A implementação da produção de AQS baseado em painéis solares térmicos numa habitação exigiu um conjunto significativo de recursos materiais e de serviços, mensuráveis em termos económicos e ambientais. Em ordem à avaliação económica e ambiental do caso de estudo, implementou-se um modelo em Excel sob a forma de cinco projetos (R1, R2, R3, R4 e R5), diferindo entre si em termos dos recursos considerados.

A Tabela 4.1 ilustra as considerações que foram feitas para cada um dos projetos acima referidos.

Tabela 4.1 - Considerações tomadas para cada um dos projetos

Considerações	R1	R2	R3	R4	R5
Esquentador a gás	✓	✓	✓	✗	✓
Manutenção	✓	✓	✓	✗	✓
Sistema Solar Térmico	✗	✓	✓	✗	✓
Pré-instalação	✗	✗	✓	✗	✗
Bomba de recirculação	✗	✗	✓	✓	✗
Mão-de-obra	✗	✗	✗	✗	✓

O modelo de análise considerou como base de trabalho para comparação, uma duração arbitrária de projeto de 15 anos.

4.2.1 PROJETO R1

No projeto R1 a obtenção de AQS é feita apenas recorrendo a um esquentador (Marca Vulcano, mod. WRS 400K) alimentado a partir de uma garrafa em aço com gás butano como combustível. Este esquentador tem a característica de poder utilizar água pré-aquecida (se existir), tem a capacidade de modelar o consumo de gás de modo a assegurar uma temperatura de saída de 60°C. No projeto R1, a produção de AQS exige apenas o esquentador e o consumo de gás. Considerou-se também um período de manutenção de cinco em cinco anos no valor de cem euros até ao fim de vida do projeto 15 anos. O projeto R1 pode ser considerado como o projeto de referência, para efeitos de comparação.

Os recursos necessários ao projeto estão indicados como Equipamento D (ver sec 3.2.1).

4.2.1.1 MODELO DE CONSUMO E CUSTO DE GÁS

O sistema de produção de AQS para banhos para este projeto é realizado apenas pelo esquentador a gás, vindo o consumo anual de gás e dado pela Tabela 3.6, conforme descrito no capítulo anterior, totalizando 175,4 kg. ano⁻¹ para a produção de AQS para banhos, a um preço médio de 1,80 €. kg⁻¹, valor obtido com base nas faturas relativas à compra das garrafas de gás butano ao longo do tempo de observação e totalizando um dispêndio de 315,77 €. ano⁻¹.

4.2.1.2 CUSTOS DE ÁGUA

Tendo sido apresentado no capítulo anterior, os consumos de água quente para banhos foram de 43,80 m³.ano⁻¹ e de 15,64 m³.ano⁻¹ para os apartamentos 4^o e 5^o esquerdo respetivamente. Com base no registo dos consumos mensais de água, bem como as suas tarifas e taxas associadas, chegou-se ao custo médio de 3,56 €. m⁻³, o que corresponde a um custo de 211,57 €. ano⁻¹ de produção de AQS.

4.2.2 PROJETOS R2 E R5

Nestes projetos, o sistema de AQS recorre ao sistema solar térmico baseado em painéis solares necessitando ainda de um esquentador a gás funciona como sistema de apoio durante os meses mais frios. Considerou-se que o sistema de apoio contribui em cerca de 17% da AQS anual para banhos.

Apenas se considera a água quente utilizada um a banhos e um custo de manutenção de 200 € de cinco em cinco anos até ao final do tempo de vida do projeto (Equipamento A e Equipamento D).

A diferença entre os projetos R2 e R5 reside no custo de mão-de-obra (considerada equivalente aos custos com material e equipamento), que não foi considerado no caso do projeto R2.

4.2.2.1 MODELO DE CONSUMO E CUSTO DE GÁS

Deste modo, para os meses em que não se monitorizou a disponibilidade energética armazenada no depósito ao longo dos dias, pressupôs-se o fator de disponibilidade para esses meses. Por conseguinte, para os meses mais frios (dezembro e janeiro) considerou-se uma menor disponibilidade (50 % da energia fornecida para

banhos era proveniente do sistema de apoio) enquanto que para fevereiro o sistema de apoio apenas apoiava em 30 %. Ainda nos meses de novembro e março o sistema de apoio contribuiu em 40 % e 25 % respetivamente. Para os meses monitorizados a contribuição do sistema de apoio foi nula exceto para o mês de outubro que contribui com 10 % enquanto que para os meses de abril, maio e junho também se considerou contribuição nula. O que resultou numa indisponibilidade energética anual de 17% do SST. Desta forma o consumo de gás ao longo do ano é dado pela Tabela 4.2 :

Tabela 4.2 - Consumos médios estimados de combustível ao longo do ano depois da instalação do SST.

	jan	fev	mar	abril	maio	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	
Factor de utilização do esquentador a gás	0,5	0,4	0,25	0	0	0	0	0	0	0,1	0,3	0,5	0,171
Consumo mensal de gás para banhos (kg/mês)	9,66	6,98	4,05	0	0	0	0	0	0	1,47	4,71	9,66	36,5

Considerando que se consumiram 36,5 kg. ano⁻¹ para a produção de AQS para banhos, a um preço médio de 1,80 €. kg⁻¹, gastou-se no total, em termos monetários 65,80 €. ano⁻¹.

4.2.2.2 CUSTO DE ÁGUA

Os consumos médios estimados de água quente anual para banhos para os apartamentos em estudo são iguais às do projeto R1, como tal os custos são iguais, cerca de 211, 57 €. ano⁻¹.

4.2.2.3 CUSTO DE ELETRICIDADE

A bomba de circulação do termofluido tem uma potência permanente equivalente a 1 W, se se considerar o funcionamento da bomba de 24 h por dia durante 365 dias, verifica-se que a energia elétrica total consumida ao longo do ano é de 8760 W.h.ano⁻¹. O preço da energia elétrica é de 0, 25 €. kW⁻¹.h⁻¹ ou 0, 25*10⁻³€. W⁻¹. h⁻¹, o que corresponde a um custo de 2,17 €. ano⁻¹.

4.2.3 PROJETO R3

O projeto R3 é semelhante ao projeto R2, no entanto para além de se considerarem os custos do sistema solar térmico, do sistema de apoio e os custos de manutenção (200 €) de 5 em 5 anos, consideram-se também os custos relativos à pré-instalação do sistema e da aquisição do sistema de recirculação de água. A bomba de recirculação diminui os consumos de água desperdiçada nos banhos. Tendo sido introduzidas outras funcionalidades, como o aproveitamento de água quente armazenada

no depósito para máquina de lavar a loiça e para a máquina de lavar a roupa (Equipamento A, Equipamento B, Equipamento C e Equipamento D).

4.2.3.1 MODELO DE CONSUMO E CUSTO DE GÁS

O consumo médio anual de gás para aquecimento de água do projeto R3 é igual ao consumo do projeto R2. Embora haja uma poupança de água com a recirculação, essa poupança é de água fria que se encontra na tubagem, logo essa poupança não se traduz monetariamente em redução de combustível. Como tal o consumo médio estimado foi de 36,5 kg. ano⁻¹ com o respetivo custo de 65,80 €. ano⁻¹.

4.2.3.2 CONSUMO E CUSTO DE ÁGUA

O consumo médio anual de água para este projeto é semelhante aos anteriores, no entanto com a introdução da bomba de recirculação há um menor consumo de água inutilizada por banho e conseqüentemente um menor custo associado. Desta forma, como foi descrito no capítulo anterior, o consumo médio estimado de água inutilizada para banhos foi de 6 m³.ano⁻¹ equivalente a uma poupança monetária de 21,34 €. ano⁻¹.

4.2.3.3 CONSUMO E CUSTO DE ELETRICIDADE

O consumo de eletricidade da bomba de circulação do termofluido como já foi explicado para o projeto R2 é desprezável, o mesmo acontece para a bomba de recirculação de água. Se se considerar a bomba (8 W) funciona durante 15 segundos para cada banho tomado e que o número de banhos médio anual é de 678 banhos para os dois apartamentos, então o valor do consumo total de eletricidade da bomba recirculadora por ano é inferior a 1 cêntimo!

No entanto para este projeto encontram-se poupanças a nível do consumo de eletricidade utilizado para o aquecimento de água para a máquina de lavar a roupa e para a máquina de lavar a loiça.

A máquina de lavar a roupa tem um consumo específico de energia elétrica de 1 kWh.ciclo⁻¹, funciona cerca de 4 ciclos. semana⁻¹, considerando a percentagem média estimada de energia proveniente do depósito de acumulação de 0,75 kWh.kWh⁻¹, considerando 52 semanas de utilização (1 ano) e um fator de indisponibilidade do sistema de 17,3% então o consumo anual médio estimado de energia armazenada no depósito para aquecimento de água para a máquina de lavar a roupa é cerca de 130,7 kWh.ano⁻¹, o que corresponde a uma redução de cerca de 32,30 €. ano⁻¹.

A máquina de lavar a loiça tem um consumo específico de energia elétrica de 1,4 kWh ciclo⁻¹, funciona cerca de 5 ciclos.semana⁻¹, considerando a percentagem média estimada de energia proveniente do depósito de acumulação de 0,75 kWh.kWh⁻¹, considerando 52 semanas de utilização e um fator de indisponibilidade do sistema de 17,3% então o consumo médio anual estimado de energia armazenada no depósito para aquecimento de água para a máquina de lavar a loiça é de 228,6 kWh.ano⁻¹, correspondendo a uma poupança monetária de cerca de 56,59 €.ano⁻¹.

4.2.4 PROJETO R4

No projeto R4 apenas se considera a aquisição da bomba de recirculação e o dispositivo de controlo respetivo tendo como objetivo a diminuição dos consumos de AQS associada aos banhos (Equipamento C) no entanto não inclui as funcionalidades para MLL e MLR).

Como foi referido no projeto R3, a quantidade de água que se consegue poupar em média é de cerca de 6 m³.ano⁻¹, o que corresponde a uma poupança de água de 21, 34 euros por ano. Em termos de consumo de energia elétrica é desprezável.

4.3 ANÁLISE ECONÓMICA

A análise económica deste tipo de projetos ligados à satisfação de uma necessidade de consumo, traduz-se apenas em consumo de recursos, ou seja, em custos. Sendo que o ponto de interesse desta análise é verificar qual a solução que efetivamente é mais vantajosa em termos de custos para a obtenção de determinado serviço, neste caso a produção de água quente para banhos (AQS) durante o tempo de vida do projeto. O indicador económico utilizado neste trabalho para comparar projetos é o valor líquido actualizado (VLA), considerando n como o período de duração do projeto, vindo dado por (Abecassis 1982):

$$VLA = \frac{FCL}{(1 + i)^n} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

em que i é a taxa de atualização e n o número de anos que decorre desde o início do projeto. O valor líquido atualizado acumulado (VLA acumulado) é dado por (Abecassis 1982):

$$VLA \text{ acumulado} = \sum_{n=0}^n \frac{FCL}{(1 + i)^n} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

O VLA acumulado é a soma do VLA ao longo dos anos durante o período de vida do projeto.

O fluxo de caixa líquido (FCL) (liquid cash-flow) resulta da diferença entre os proveitos de exploração e os custos dessa exploração. Os custos de exploração contemplam por um lado os custos de investimento (aquisição de equipamento) e os custos de exploração (custos salariais, aquisição de consumíveis).

Com a exceção do projeto R4, os projetos apresentados destinam-se a satisfazer uma necessidade de conforto (AQS), em que apenas são envolvidos custos, o que ocasiona um VLA negativo. Contudo este critério de avaliação económica permite a comparação entre um projeto de referência (por exemplo, o projeto R1) e qualquer dos restantes projetos R2, R3 e R5, para um período de 15 anos.

4.3.1 PROJETO R1

O cash-flow líquido é obtido no primeiro ano pelo o custo de investimento do Equipamento D e é igual ao cash-flow de investimento para este ano. Nos anos seguintes, o cash-flow líquido é igual ao cash-flow de exploração para os anos em que não há manutenção, ou seja, pelos custos anuais de água quente consumida para banhos e pelo custo da utilização de combustível para esse efeito. Por outro lado, para os anos em que há manutenção o cash-flow líquido é igual à subtração do cash-flow de investimento (manutenção) ao cash-flow de exploração (custos) durante o ciclo de vida do projeto (15 anos). O VLA acumulado para este projeto encontra-se no Gráfico 4.7.

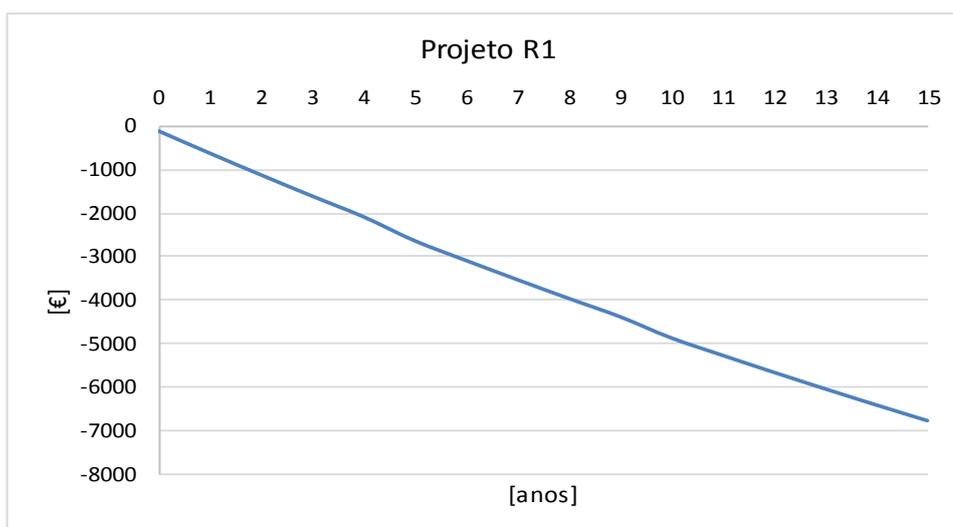


Gráfico 4.7 VLA acumulado relativo ao projeto R1.

De modo a satisfazer as necessidades de produção de AQS para banhos para os dois apartamentos (4º e 5º esquerdo) gastou-se durante o ciclo de vida do projeto 6 795€.

4.3.2 PROJETO R2

O CFL é dado no ano zero do projecto pelo custo de investimento no Equipamento A (referente apenas ao SST) e Equipamento D (sistema de aquecimento de apoio). No primeiro ano e seguintes, o CFL inclui os custos anuais da utilização de combustível para aquecimento nos meses em que há necessidade do sistema de apoio (o consumo de eletricidade é desprezável) e ainda os custos de manutenção.

Considerando uma taxa de atualização de 2,5%, desta forma o VLA acumulado para um período de 15 anos, referido aos projetos R1 e R2 encontra-se no Gráfico 4.8.

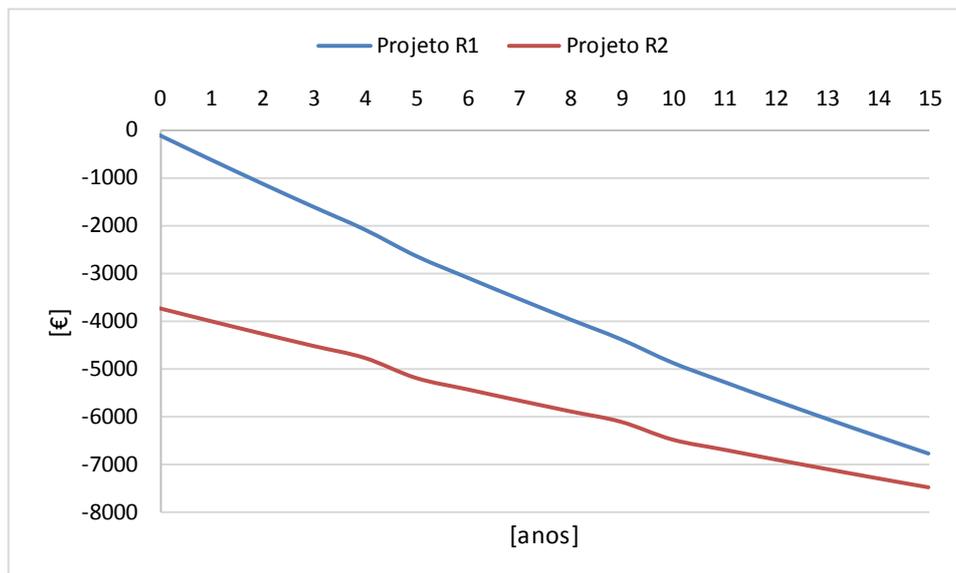


Gráfico 4.8 - VLA acumulado relativo aos projetos R1 e R2.

A análise do gráfico anterior permite concluir que a instalação do SST dada pelo projecto R2, apresenta um défice de cerca de 700 euros ao fim do período considerado para o projeto (15 anos) em relação ao projecto R1. Contudo para um período de 20 anos o custo de R1 já seria superior ao custo de R2, ou seja, o investimento teria sido recuperado (para 2,5% de taxa de atualização).

4.3.3 PROJETO R3

O CFL no primeiro ano obtém-se tendo em conta o custo de investimento com as aquisições de: Equipamento A, Equipamento B, Equipamento C e Equipamento D.

Durante o período de vida do projeto (15 anos), o CFL é calculado tendo em conta os custos de exploração (utilização de combustível no sistema de apoio à produção de AQS, negligenciando a utilização de energia elétrica para o funcionamento das bombas) e manutenção (CFE) e os proveitos de exploração. Considerou-se como proveitos de exploração o valor das poupanças de água para banhos provenientes da bomba recirculadora e as poupanças de energia elétrica resultantes da utilização de AQS nas máquinas de lavar a loiça e roupa.

Considerando uma taxa de atualização de 2,5%, o VLA acumulado ao longo do período de duração dos projetos R1 e R3 encontra-se no Gráfico 4.9.

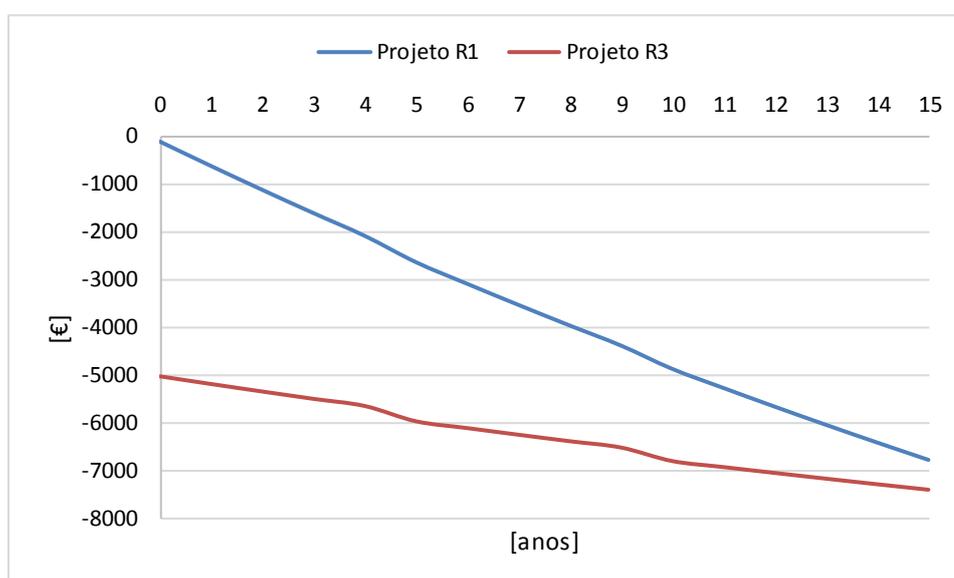


Gráfico 4.9 - VLA acumulado relativo aos projetos R1 e R3.

De modo a satisfazer as necessidades energéticas na produção de AQS para banhos para os apartamentos 4º e 5º esquerdo, para o período considerado para o projeto (15 anos), a substituição do projeto R1 pelo projeto R3 resulta num défice de 637 euros. Contudo para um período de 20 anos o custo de R1 seria superior ao custo de R3, ou seja, o investimento teria sido recuperado (para 2,5% de taxa de atualização).

De modo a compreender-se melhor este valor, deve-se ter presente que este projeto considera mais utilidades para a AQS do que o projeto R2, ou seja para além da produção de AQS para banhos, este projeto produz AQS para as máquinas de lavar roupa e loiça, que desta forma deixam de utilizar tanta electricidade (cerca de 75%), a despeito do investimento inicial adicional que o projecto R3 requer em relação ao projeto

R2. Para efeitos de comparação com os projectos R1 e R2, ocorre um benefício dado pelo valor da energia elétrica poupada.

4.3.4 PROJETO R5

O projecto R5 é idêntico ao projecto R2 em termos de investimentos em equipamento e custos de operação mas inclui custos de instalação do SST, tendo sido considerado que estes são idênticos aos custos com equipamento SST.

Para uma taxa de atualização de 2,5%, desta forma o VLA acumulado ao longo do ciclo de vida dos projetos R5 e R1, tal como representado no Gráfico 4.10.

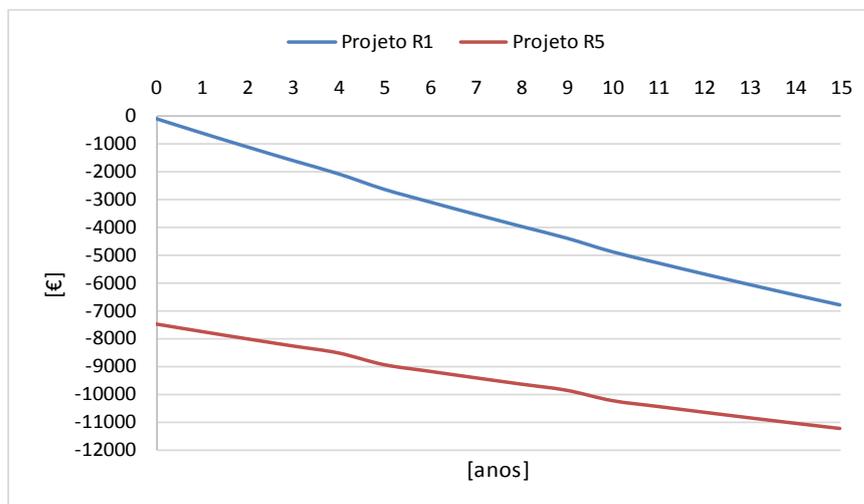


Gráfico 4.10 - VLA acumulado relativo aos projetos R1 e R5.

A análise do gráfico anterior permite concluir que seria necessário um período muito mais alargado (superior a 25 anos) para a recuperação de capital investido. Ao fim de 15 anos o projeto R5 apresenta um défice de 4429 euros.

4.3.5 PROJETO R4

O Projeto R4 refere-se à instalação de uma bomba de recirculação e respectivo controlador destinada a reduzir desperdícios de água potável que ocorrem sempre que é solicitada AQS, admitindo que os custos anuais de eletricidade consumida pela bomba são negligenciáveis e que resulta proveitos dados pela poupança anual de água.

Considerando um período para a duração do projeto (15 anos), e uma taxa de atualização de 2,5%, o VLA acumulado ao longo do projeto encontra-se representado no Gráfico 4.11.

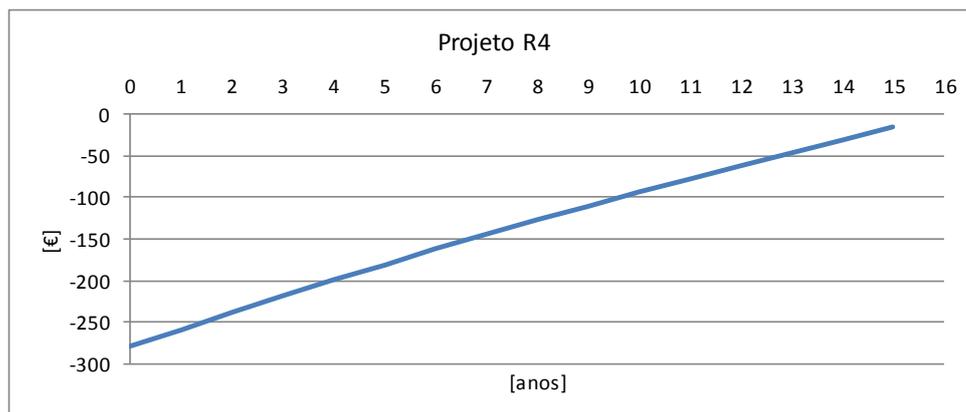


Gráfico 4.11 - VLA acumulado relativo ao projeto R4.

A análise do projecto R4 mostra que o investimento económico na bomba recirculadora não é vantajoso, considerando um período de 15 anos. Uma vez que a poupança no custo de água ao longo do seu ciclo de vida não paga o investimento inicial que foi feito nela, pois resulta num VLA negativo de 16 euros.

No contexto deste trabalho, este projecto é o único que pode considerar como um verdadeiro projecto de investimento. A TIR para este projeto é de 1,72% e o período de retorno só ocorre depois do período considerado para o projeto (15 anos).

4.4 ANÁLISE AMBIENTAL

A análise ambiental dos diferentes projetos foi realizada através da metodologia da análise de ciclo de vida em base anual, tendo sido selecionado o indicador de avaliação impacto de ciclo de vida (AICV) segundo o modelo do painel intergovernamental para as alterações climáticas IPCC de acordo com a versão designada de IPCC 2007, na opção GWP 100a traduzido em termos kg CO₂ equivalente por unidade funcional. Este indicador equivale à pegada de carbono como indicador de impacto ambiental.

A unidade funcional de base escolhida para a ACV é o serviço de água quente sanitária (AQS) disponível anualmente para um período de 15 anos, a partir da análise de inventário de utilização de recursos estabelecida anualmente. Este estudo pode correr em paralelo com o estudo económico, em que se faz uso do inventário de utilização de recursos.

Assim este estudo tem o seu início na realização do inventário dos recursos necessários a cada um dos projetos (R1 a R5), em termos do consumo anual de bens

(gás, água, etc.) e/ou o consumo de recursos usados na construção ponderados pelo número de anos de duração do projeto. Uma vez estabelecido o inventário é possível determinar diretamente a grandeza do impacto do uso dos referidos recursos a partir da informação disponível na base de dados Ecoinvent versão 2.2 de 2010.

A Tabela 4.3 ilustra o indicador IPCC 2007 para os diferentes tipos de recursos utilizados.

Comparando os indicadores IPCC 2007 com os fatores de emissão para a utilização de combustíveis (Despacho n.º 17313/2008 de 26 de junho) conclui-se que os primeiros são superiores, derivando isto do facto de os primeiros incluírem toda a cadeia de atividades/processos desde a extração da natureza até à utilização e não apenas a emissão em resultado da conversão em sentido estrito.

Tabela 4.3 – Extrato da tabela LCIA da base de dados Ecoinvent, indicador IPCC 2007, para os diferentes recursos.

Number	category	subCategory	Name	unidade	IPCC 2007 meanValue (kg CO ₂ _eq)
1072	metals	extraction	chromium steel 18/8, at plant	kg	GWP 100a 4,53
1066	metals	extraction	brass, at plant	kg	GWP 100a 2,46
8311	metals	general manufacturing	chromium steel product manufacturing, average metal working	kg	GWP 100a 2,43
8339	metals	general manufacturing	copper product manufacturing, average metal working	kg	GWP 100a 1,84
705	electricity	supply mix	electricity mix	kWh	GWP 100a 0,60
660	electricity	production mix	electricity, medium voltage, production PT, at grid	kWh	GWP 100a 0,63
631	electricity	production mix	electricity, low voltage, production PT, at grid	kWh	GWP 100a 0,71
1576	oil	fuels	propane/ butane, at refinery	kg	GWP 100a 0,61
1599	oil	Heating systems	light fuel oil, burned in boiler 10kW, non-modulating	kg	GWP 100a 4,02
7305	transport systems	road	transport, lorry 16-32t, EURO5	tkm	GWP 100a 0,17
1844	plastics	polymers	polyvinylidenchloride, granulate, at plant	kg	GWP 100a 4,92
2288	water supply	production	tap water, at user	kg	GWP 100a 0,00032
806	glass	construction	flat glass, uncoated, at plant	kg	GWP 100a 0,98
1880	solar collector systems	systems	solar system, flat plate collector, one-family house, hot water	-	GWP 100a 1338,70

O valor do modelo IPCC 2007 (GWP 100a) utilizado para a eletricidade foi o de $0,71 \text{ kg CO}_2\text{-eq.kWh}^{-1}$, (processo 631 do Ecoinvent, v2.2) que inclui o *mix* de produção de energia elétrica, bem como as perdas durante a conversão e o transporte (distribuição), admitindo-se que acumula todos os efeitos desde a produção.

É de salientar também, que o indicador GWP(100a) do modelo IPCC 2007, para o gás butano apenas contabiliza o valor de produção em sede de refinaria, não incluindo a emissão que resulta da combustão, não se encontrou disponível na base de dados acima mencionada e da distribuição de gás.

No entanto, apesar de não existir valor de combustão para o gás butano no Ecoinvent, encontrou-se o valor de combustão para o diesel (light fuel oil), para uma caldeira com uma potência de 10 kW, o valor apenas servirá de comparação ao valor calculado para o gás butano.

De modo a encontrar-se o valor da emissão de CO_2 para a combustão do gás butano, recorreu-se à análise elementar desse composto, com recurso a uma folha de cálculo programada para esse efeito. Segundo o Decreto-Lei nº89/2008 de 30 de maio, capítulo VI, artigo 20.º, anexo I, para as especificações técnicas dos combustíveis, a composição volumétrica do gás butano comercial é dada aproximadamente por 12% propano, 86% butano e 2% de pentano, para esta composição obteve-se o valor de $3,03 \text{ kg CO}_2. \text{ kg gás}^{-1}$.

Quanto à distribuição, como se pode observar pela Tabela 4.3, o valor do modelo IPCC 2007 (GWP 100a) encontra-se em kg CO_2 equivalente. tkm^{-1} . Considerando que a distância máxima (ida e volta) de distribuição de gás é de 120 km, então o valor da distribuição de gás é de $0,02 \text{ kg CO}_2$ equivalente kg gás^{-1} , conclui-se que se trata de um valor desprezável, quando comparado com os valores de combustão e de produção.

A exemplo do estudo económico, não é considerada a água que dá origem a AQS, para efeitos de cálculo de incidências/impactos ambientais, a menos que corresponda a uma poupança.

4.4.1 PROJETO R1

Como já foi dito anteriormente, este projeto é apenas constituído pelo Equipamento D. Os recursos utilizados neste projecto podem reduzir-se a: gás butano, aço inox e metais (cobre/latão). Tendo em conta as quantidades anuais destes recursos (ver sec. 4.2.1) e os impactos da utilização destes recursos, é possível determinar o impacto de ciclo de vida acumulado ao longo do período de duração do projecto.

O Gráfico 4.12 ilustra o impacto ambiental acumulado para o tempo considerado para o projeto (15 anos).

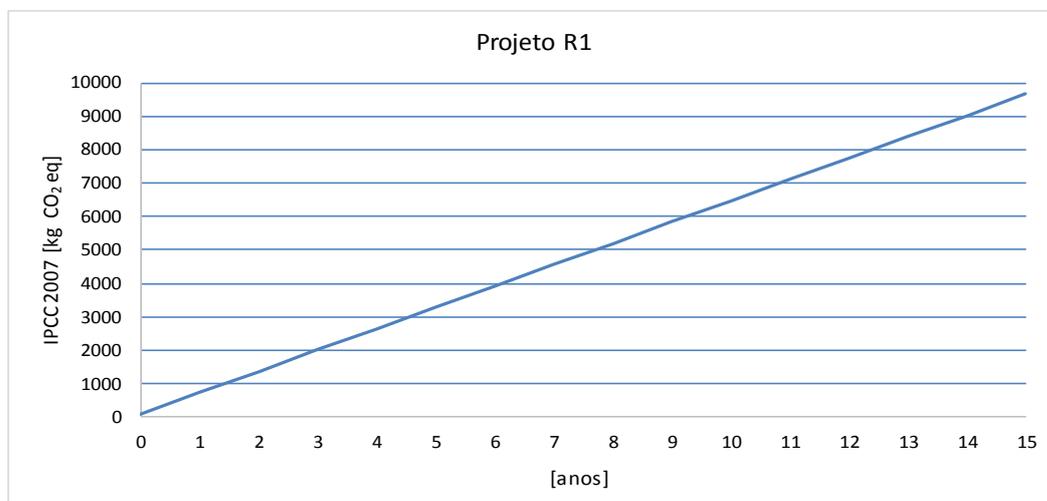


Gráfico 4.12 - Impacto ambiental acumulado para o projeto R1.

A produção de AQS para o caso de estudo através do projeto R1 causa uma pegada de carbono de 9658 kg CO₂ eq para o período considerado para o projeto (15 anos), como é possível observar pelo Gráfico 4.12.

4.4.2 PROJETOS R2 E R5

Os projetos R2 e R5 incluem os Equipamentos A e D, sendo que os recursos utilizados foram: eletricidade, gás butano, aço, metais, plástico (polímeros) e vidro. O impacto ambiental da eletricidade, respeitante ao funcionamento da bomba, não foi considerado devido ao consumo anual desta ser muito baixo.

O valor do impacto IPCC 2007 (GWP 100a) dado pelo Ecoinvent para a produção de um coletor solar plano é de 1338,70 kg CO₂ por unidade instalada. Este valor compara favoravelmente com o valor calculado neste trabalho de 1079,9 kg CO₂ equivalente por unidade construída tendo em conta apenas os materiais que compõem o painel.

O Gráfico 4.13 ilustra o impacto ambiental acumulado para os projetos R1, R2 e R5 para o tempo considerado para os projetos.

A produção de AQS para banhos através do SST, com o esquentador a gás como sistema de apoio produz uma pegada de carbono de 3071,78 kg CO₂ equivalente para o tempo considerado para o projeto (ver Gráfico 4.13). No final do segundo ano verifica-se

que R1 já apresenta um impacto ambiental maior do que os projectos R2 e R5; ao fim de 15 anos o projecto R1 apresenta um impacto ambiental (IPPC 2007) cerca de três vezes superior aos projetos R2 e R5.

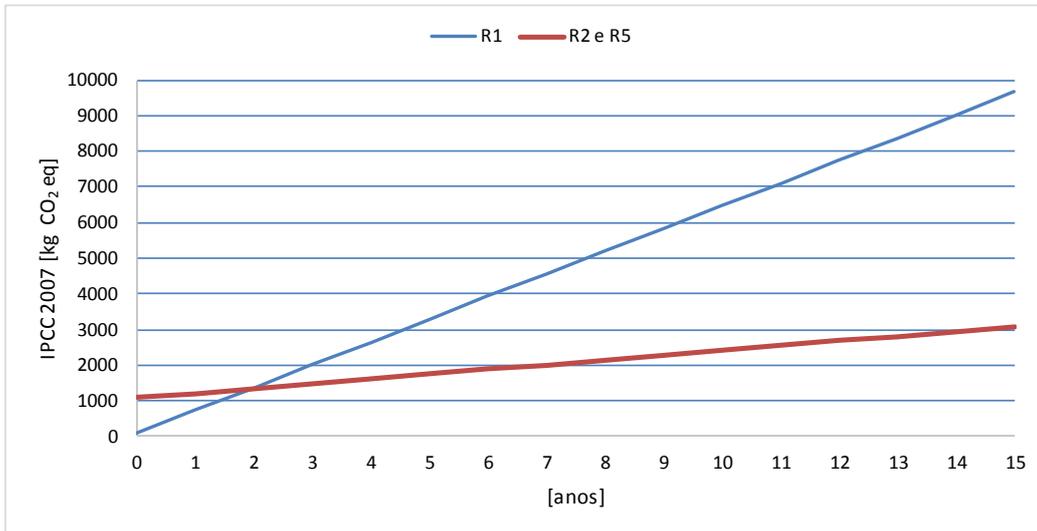


Gráfico 4.13 - Impacto ambiental acumulado para os projetos R1, R2 e R5.

4.4.3 PROJETO R3

Este projeto é constituído pelos Equipamentos A, B, C e D, os recursos utilizados neste projeto foram: água, eletricidade, gás butano, aço inox, metais, plástico e vidro.

O Gráfico 4.14 ilustra o impacto ambiental acumulado para R1 e para R3 para o tempo considerado para os projetos (15 anos).

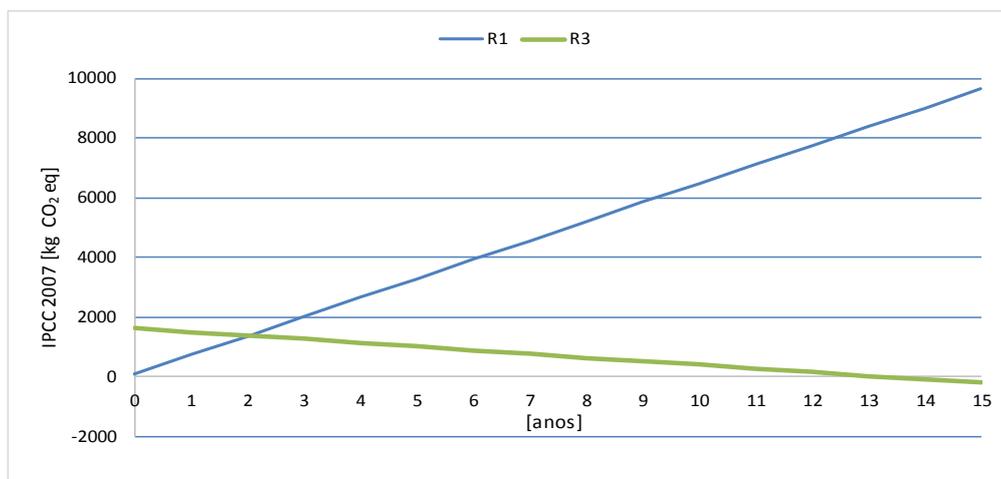


Gráfico 4.14 - Impacto ambiental acumulado para os projetos R1 e R3.

Observa-se que no final do segundo ano R1 começa a apresentar um impacto ambiental superior ao de R3.

Verifica-se também que a produção de AQS para banhos, através do SST, incluindo o esquentador a gás como sistema de apoio e com a bomba de recirculação de água, permite a poupança de água e energia elétrica, totalizando uma redução da pegada de carbono de 220,49 kg CO₂ equivalente para o período de 15 anos considerado para os projetos como se pode verificar no Gráfico 4.14, o que significa que o projeto R3 apresenta um impacto ambiental favorável.

4.4.4 PROJETO R4

Este projeto é constituído pela bomba de recirculação e pelo controlo da bomba de recirculação. Os recursos utilizados, utilizados foram: água, eletricidade, aço, metais e plástico.

O Gráfico 4.15 representa o impacto ambiental acumulado para o tempo considerado para o projeto.

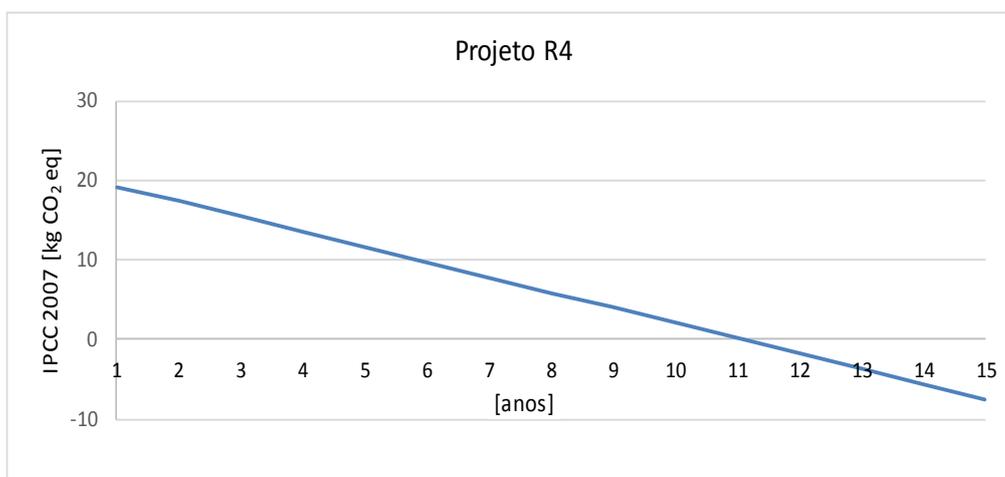


Gráfico 4.15 - Impacto ambiental acumulado para o projeto R4.

Como se pode observar pelo Gráfico 4.15 ao final de 11 anos o projeto R4 apresenta um impacto ambiental favorável.

5 CONCLUSÃO

A aplicação de sistemas de aquecimento de água para utilização doméstica na produção de água quente sanitária (AQS) baseados em painéis solares térmicos apresenta interesse a vários níveis, nomeadamente de diversificação de fontes de energia, redução de impactos ambientais e custos de operação, mas apresenta alguns problemas, nomeadamente a complexidade e a morosidade da recuperação do investimento.

O presente estudo faz uma análise de um projeto de instalação solar focada nas diferentes componentes: técnica, económica e ambiental, apresentando ainda algumas sugestões de melhoria de desempenho.

5.1 ANÁLISE TÉCNICA

O sistema de AQS que serviu de objeto a este estudo, possui aspetos de complexidade ao nível da utilização para múltiplas funcionalidades, apresenta alguns componentes construtivos de robustez excecional, mas apresenta também fragilidades ao nível do sistema de acumulação de AQS que derivam quer da tecnologia de acumulação de AQS escolhida em função do espaço disponível para instalação e da exposição solar.

A monitorização feita para os meses de julho a outubro, permitiram concluir que a disponibilidade energética foi suficiente para cobrir as necessidades energéticas dos utilizadores, exceto para o mês de outubro, em que, devido às mudanças de tempo, em que ocorreram dias chuvosos mais encobertos, que ocasionaram a entrada em funcionamento do sistema de apoio à produção de AQS.

5.2 ANÁLISE ECONÓMICA

Em termos económicos, só para períodos pouco superiores a 15 anos é que o SST com apoio de esquentador a gás (R2 e R3) é competitivo com a produção de AQS utilizando apenas o esquentador a gás (R1). Contudo se forem considerados os custos de mão de obra (R5) para instalação esse período quase duplica.

Relativamente aos projetos R2 e R3, a produção de AQS pelo esquentador a gás, verificou-se ser menos dispendiosa em cerca de 700 euros face à produção de AQS utilizando SST com sistema de apoio, sem custos de mão-de-obra associados (R2) e menos dispendioso em cerca de 637 euros face ao projeto R3, para horizonte temporal de 15 anos.

O projeto R4 é um projeto especial, uma vez que só se considera a bomba de recirculação adquirida, no entanto verificou-se que no final do ciclo de vida do projeto (15 anos), ter-se-ia poupado 16 euros caso a bomba não tivesse sido adquirida.

Se se estendesse a duração do projeto para 20 anos a conclusão era que o projeto R2 e R3, baseado num sistema solar térmico (SST) seriam mais favoráveis em relação a R1, baseado no consumo de gás butano. No entanto o mais rentável de todos seria mesmo R3, devido à poupança conseguida com a eletricidade.

Por outro lado, seguramente que o SST melhorou o valor patrimonial do imóvel bem como a eficiência energética da habitação.

5.3 ANÁLISE AMBIENTAL

Atendendo aos resultados da análise ambiental para um período de 15 anos, verificou-se que o projeto R1 possui uma pegada de carbono três vezes superior à do projeto R2 / R5. Recordar-se que a pegada de carbono dos projetos R2 e R5 é idêntica devido à única diferença entre eles (mão-de-obra) não possuir impacto ambiental a considerar.

Quanto ao projeto R3 verifica-se que no final do tempo considerado, o projeto apresenta um impacto ambiental favorável, devido sobretudo, à energia elétrica poupada no âmbito do projeto R3.

O projeto R4 é um projeto especial, uma vez que só se considera a bomba de recirculação adquirida, no entanto verificou-se que ao final de onze anos esse projeto apresenta um impacto ambiental favorável.

Finalmente, conclui-se que melhor projeto, em termos ambientais, para a produção de AQS é o projeto R3, enquanto que R1 é o projeto com o maior impacto ambiental de acordo com o indicador IPP 2007 (GWP, 100a).

5.4 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

As limitações do trabalho prendem-se sobretudo com a incerteza de algumas das estimativas de utilização de recursos (gás, água e eletricidade) bem como de algumas das parametrizações, nomeadamente tempo de duração do projeto (15 anos) e a fração mensal de utilização do sistema de apoio para produção de AQS (17%).

Tendo em conta a tecnologia instalada, não foram contabilizados recursos reais utilizados na instalação (energia, transportes), tendo sido admitido uma relação típica usada na instalação de sistemas de AQS (custos iguais de materiais e mão de obra).

5.5 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO

Para efeitos de melhoria, sugere-se a continuação da monitorização das temperaturas do sistema, uma vez que se pode conhecer com mais precisão, a real contribuição mensal do sistema de apoio na produção de AQS para banhos, em particular nos meses mais frios.

Caso seja possível, sugere-se alterar o depósito horizontal utilizado no caso de estudo para um depósito vertical, o que permitiria obter uma melhor estratificação da água acumulada no depósito. Em caso de impossibilidade, poder-se-ia melhorar a quantidade de calor armazenado mudando a posição do sensor no depósito. O sensor mede a temperatura da água a meio do depósito, uma mudança para o fundo do depósito permitiria armazenar maior quantidade de energia, por aproveitamento integral da capacidade do depósito, já que se suspeita que com o atual posicionamento do sensor, essa capacidade não esteja a ser aproveitada na totalidade devido a estratificação da água.

Referências bibliográficas

- ADENE, 2016. "Sistemas Solares Térmicos".
- ATSDR, U.S.C. for D.C.A. for T.S. and D.R., 2011. Propylene Glycol. , p.5500. Available at: <http://www.atsdr.cdc.gov/substances/toxsubstance.asp?toxid=240>.
- Abecassis, F. e Cabral, N. (1982). Análise Económica e Financeira de Projectos, Fundação Calouste Gulbenkian.
- Diretiva 2010/31/EU de 19 de maio, "Parlamento Europeu e do Concelho".
- Green Pro, 2004. Solar Térmico - Manual Sobre Tecnologias, Projecto E Instalação. , p.262. Available at: <http://www.greenpro.de/po/solartermico.pdf>.
- Monteiro, L.C.P. 2014. Modelação Matemática de Sistemas Solares Fotovoltaicos. Tese de Mestrado. Universidade de Trás-os- Montes e Alto Douro, p.128.
- Decreto-Lei nº80/2006 de 4 de abril , "Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)".
- Decreto-Lei nº 89/2008 de 30 de maio, "Ministério da Economia e da Inovação".
- Roriz, L., Rosendo, J., Lourenço, F., Calhau, K., & Morais, F., (2010). *Energia Solar em Edifícios* . Lisboa:Edições Orion.
- Vulcano, 2013. " Solar Térmico - Soluções de água quente".

Sites visitados: (URL)

- URL1: http://www.cresesb.cepel.br/images/tutorial_solar/Image74.gif. [Accessed: 15-May-2016].
- URL2: http://www.mpoweruk.com/solar_power.htm#voltaic. [Accessed: 20-May-2016].
- URL3: http://www.europarl.europa.eu/atyourservice/pt/displayFtu.html?ftuld=FTU_5.7.1.html [Accessed : 25-May-2016].
- URL4: <http://www.solarwaters.pt/sistemas-solares-termicos/sistema-solar-termico> [Accessed : 4-Jun-2016].
- URL5: http://portal.pucminas.br//documentos/green/coletor_aberto.jpg [Accessed : 7-Jun-2016].
- URL6: <http://cdn2.ecycle.com.br/images/Nathali/coletoresplanos-750.jpg> [Accessed : 9-Jun-2016].
- URL7: http://www.wayse.pt/gallery1/thumb/folio_2_00.jpg [Accessed : 13-Jun-2016].
- URL8: http://www.unisolaquecedores.com.br/Imagens/coletor_solar_vacuo.jpg [Accessed:17-Jun-2016].
- URL9: <http://esu-services.ch/data/ecoinvent/>. [Accessed: 15 -Oct-2016].

Anexo A – Casos tipo

A1 – Monitorização da temperatura de 5 a 11 de julho

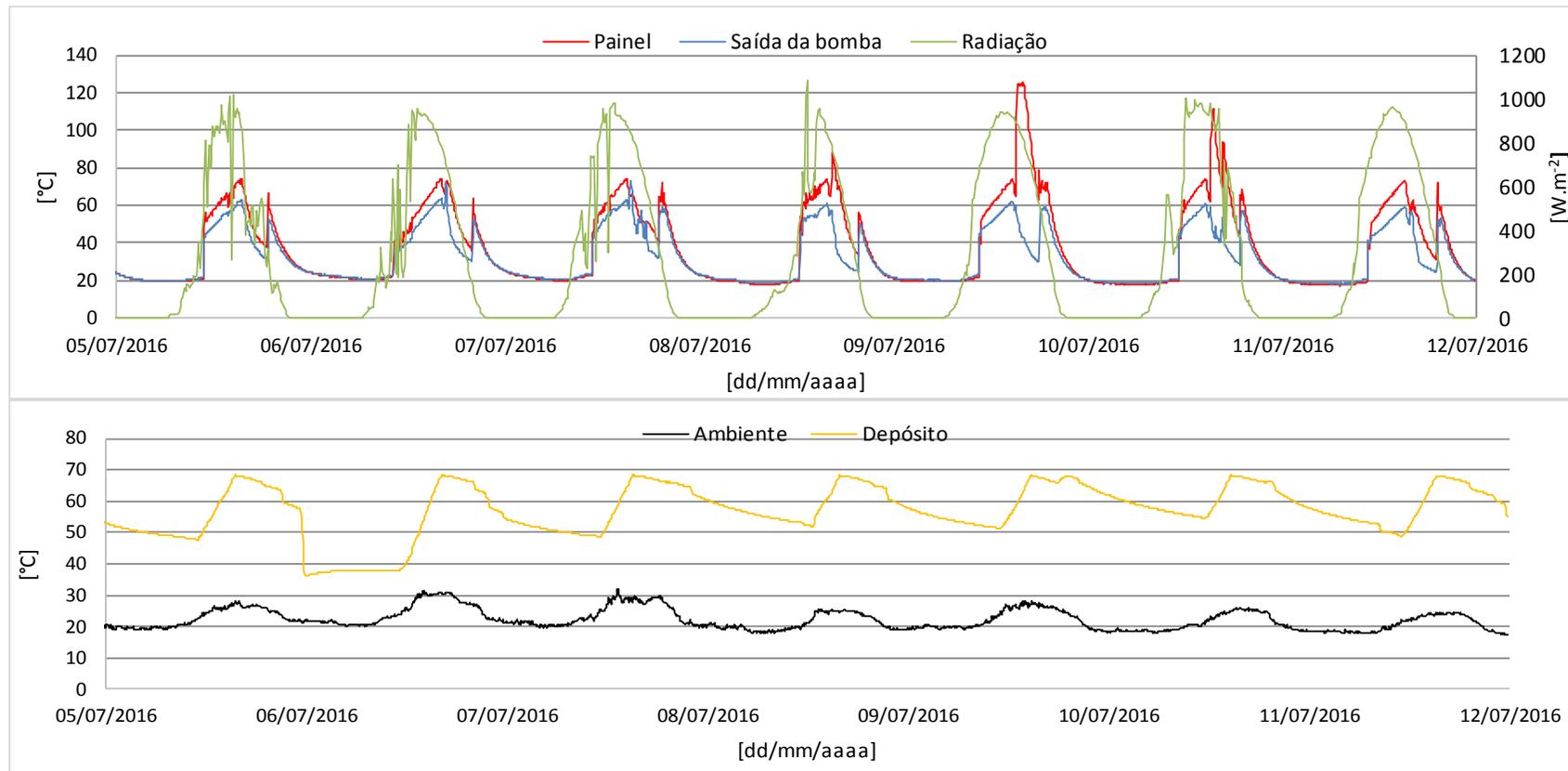


Gráfico A1 - a) Variação da temperatura do "painel", da temperatura à "saída da bomba" e da radiação (b) variação das temperaturas "ambiente" e do "depósito" ao longo do tempo, respectivamente, para o período de 5 a 12 de julho

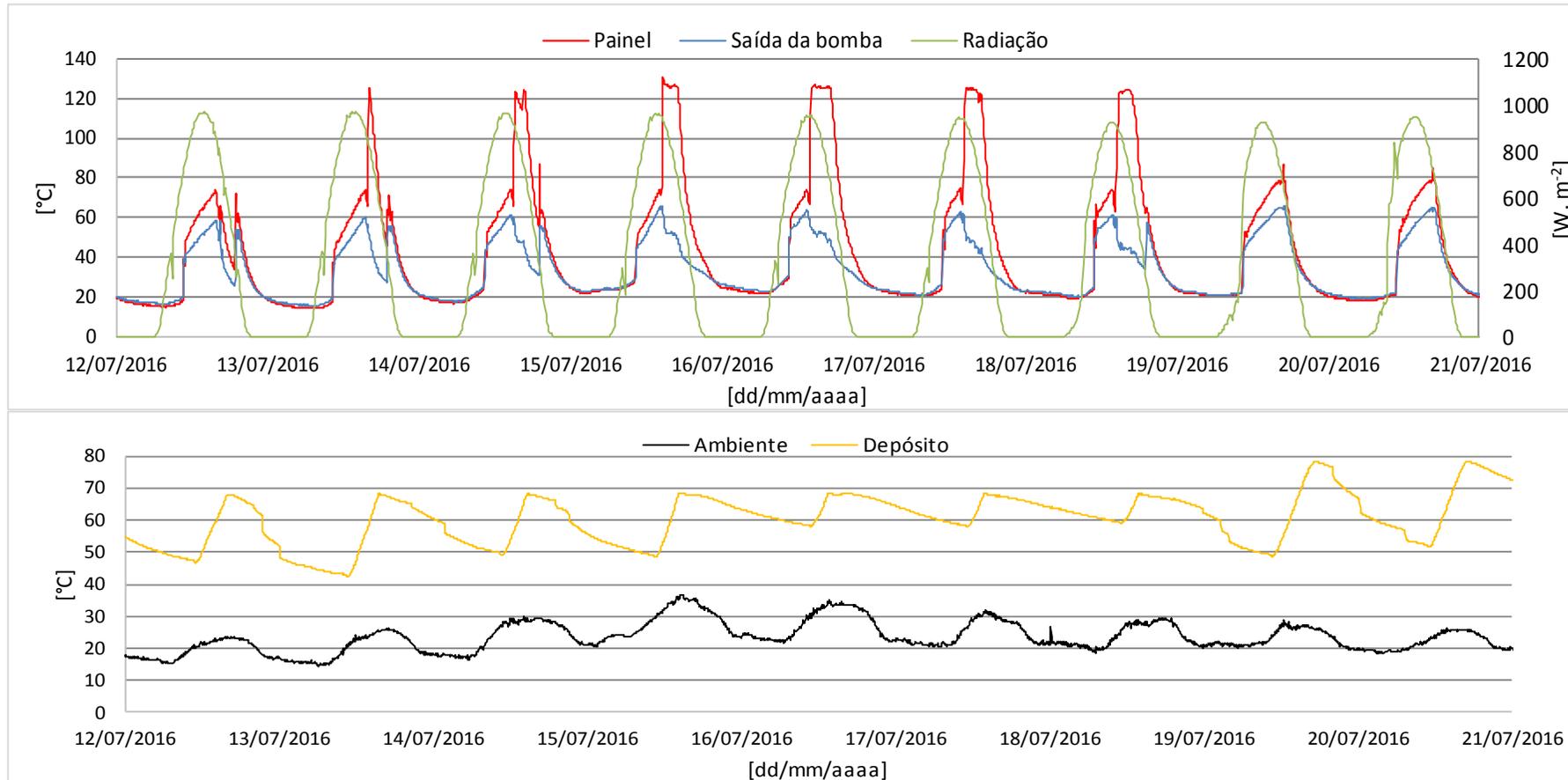
A2 – Monitorização da temperatura de 12 a 20 de julho

Gráfico A2 - a) Variação da temperatura do "painel", da temperatura à "saída da bomba" e da radiação (b) variação das temperaturas "ambiente" e do "depósito" ao longo do tempo, respectivamente, para o período de 12 a 21 de julho.

Anexo B – Casos de anomalia

B1 – Monitorização da temperatura de 7 a 17 de setembro

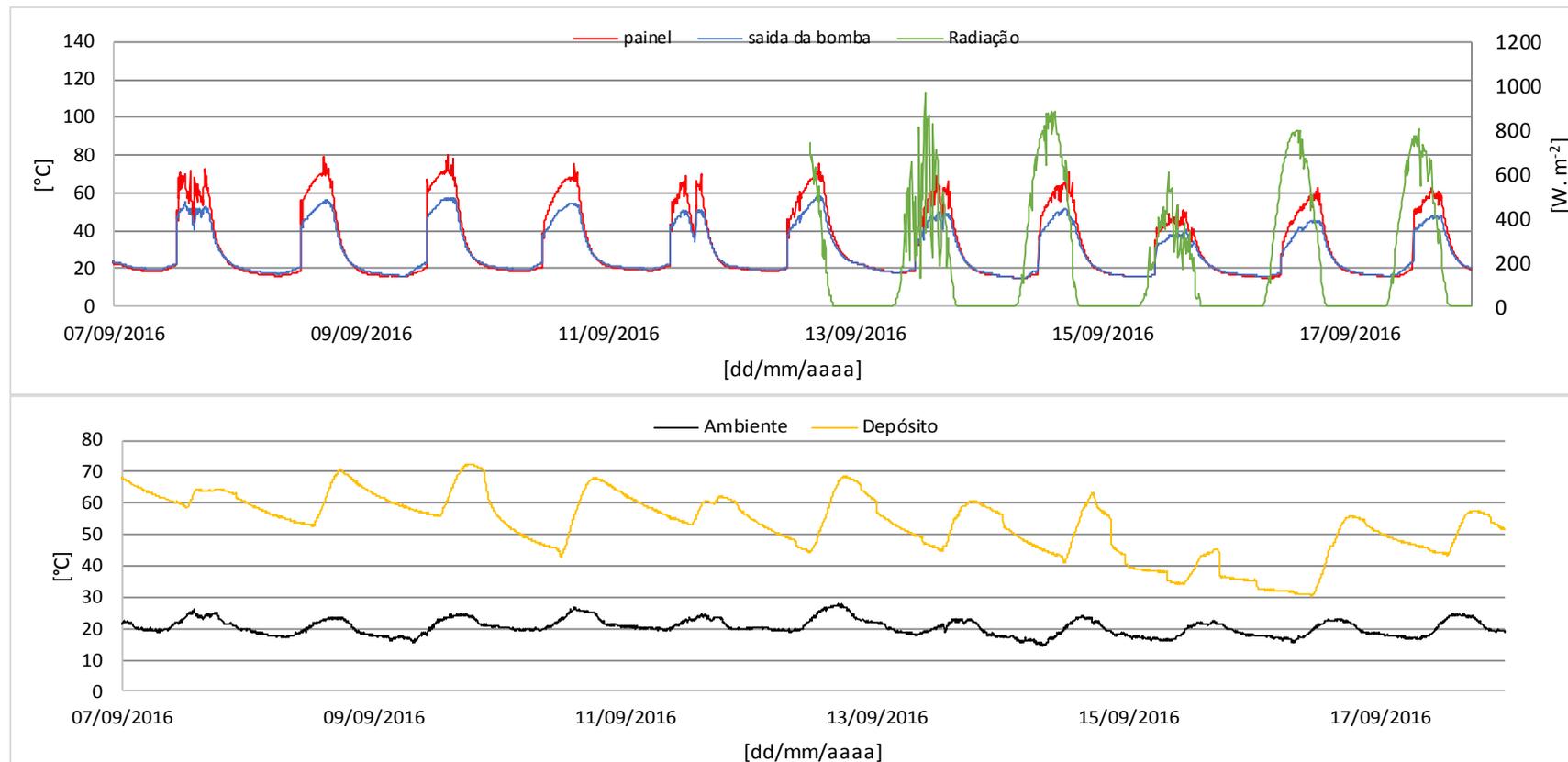


Gráfico B1 - a) Variação da temperatura do “painel”, da temperatura à “saída da bomba” e da radiação (b) variação das temperaturas “ambiente” e do “depósito” ao longo do tempo, respetivamente.

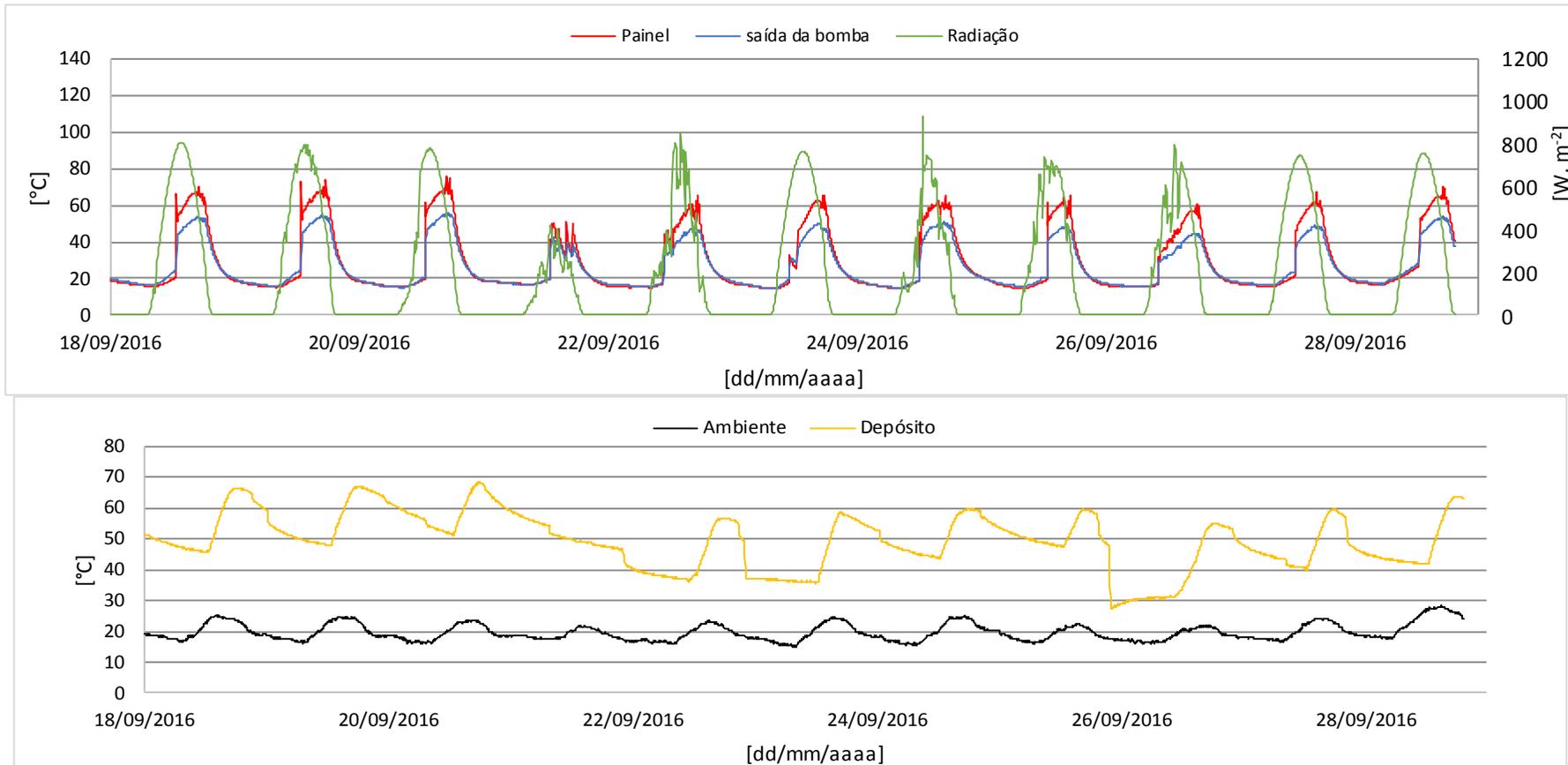
B2 – Monitorização da temperatura de 18 a 28 de setembro

Gráfico B2 - a) Variação da temperatura do "painel", da temperatura à "saída da bomba" e da radiação (b) variação das temperaturas "ambiente" e do "depósito" ao longo do tempo, respetivamente.

B3 – Monitorização da temperatura de 29 de setembro a 7 de outubro.

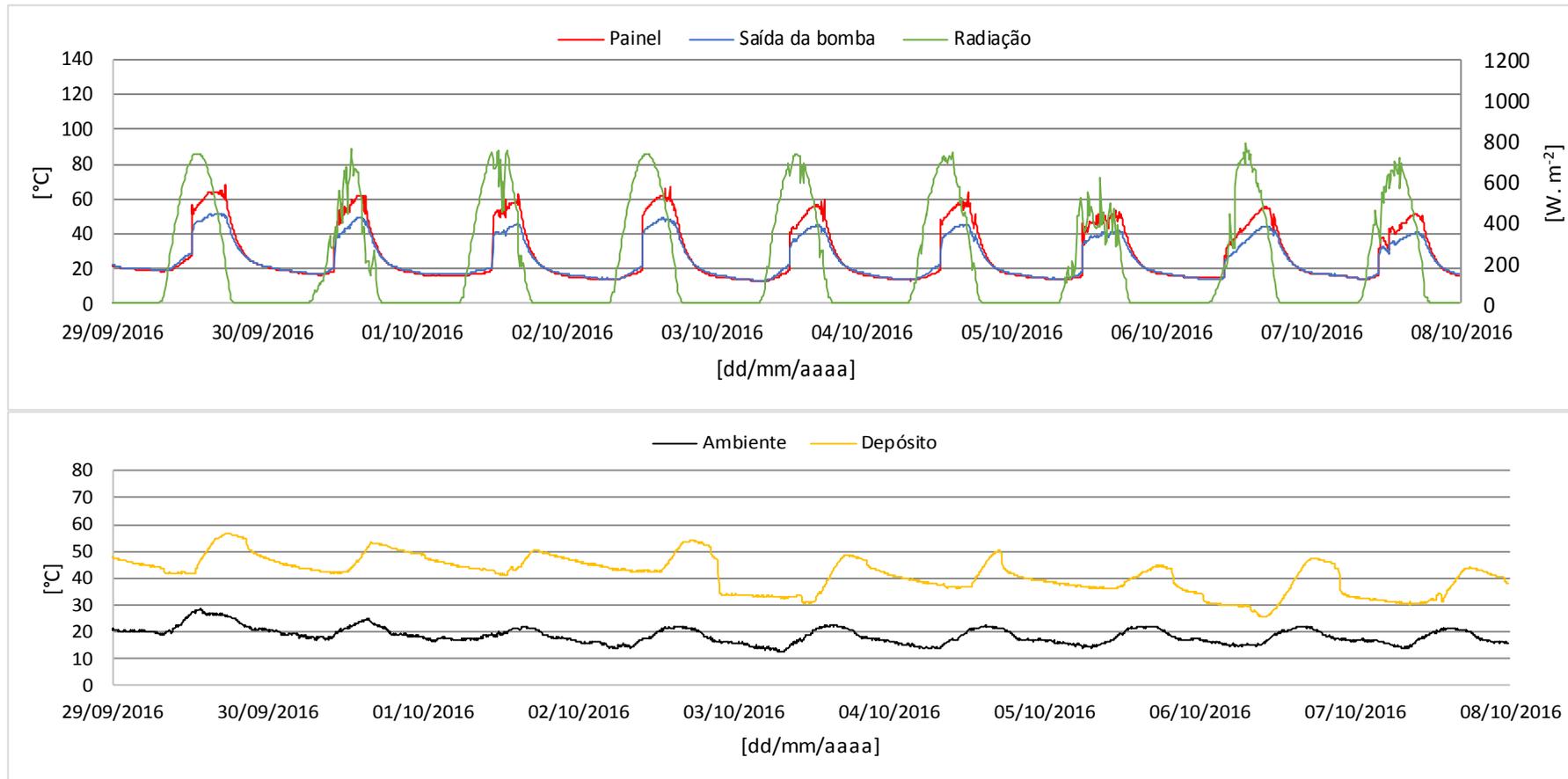


Gráfico B3 - a) Variação da temperatura do “painel”, da temperatura à “saída da bomba” e da radiação (b) variação das temperaturas “ambiente” e do “depósito” ao longo do tempo, respetivamente.

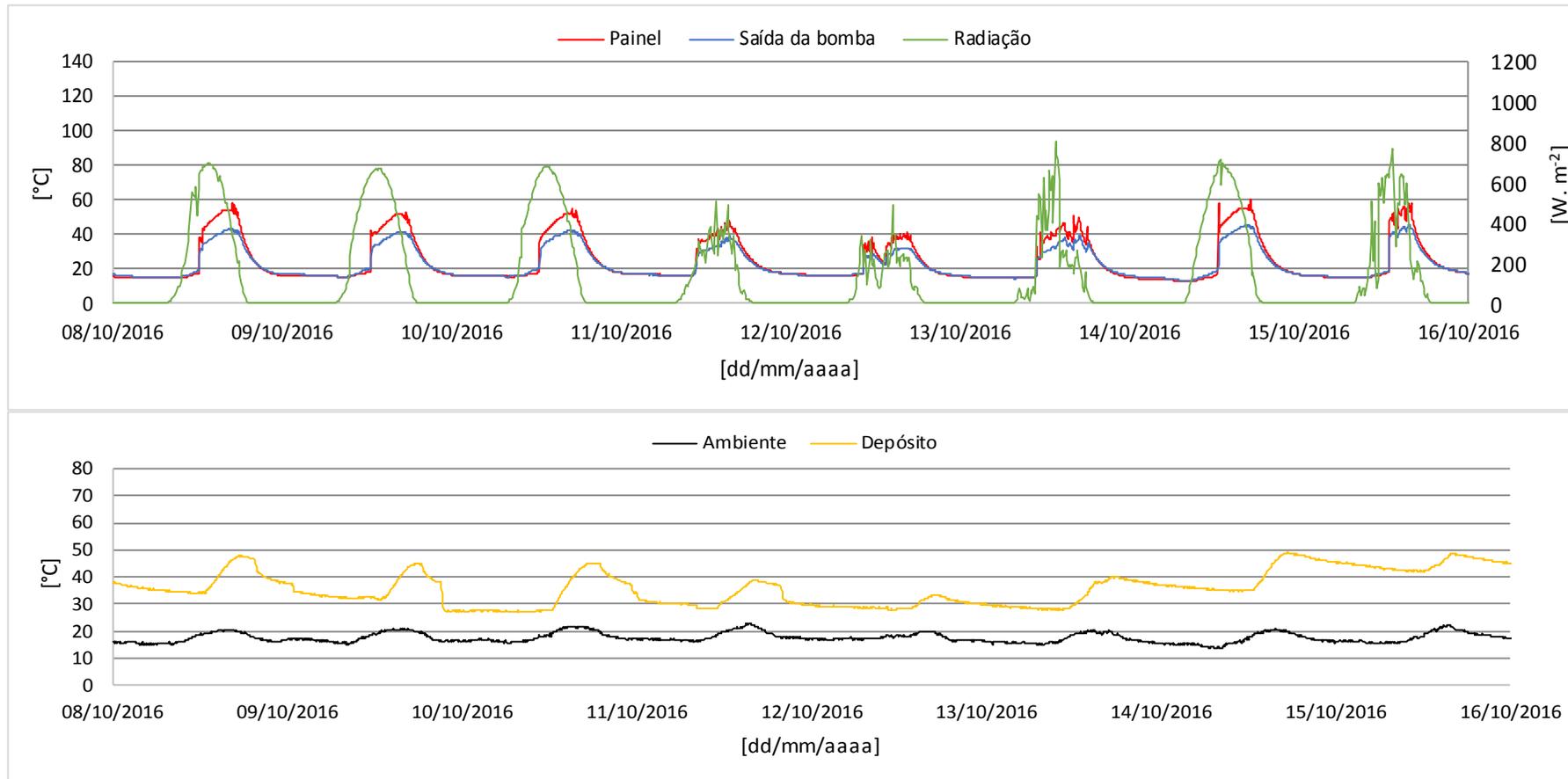
B4 – Monitorização da temperatura de 8 a 15 de outubro

Gráfico B4 - a) Variação da temperatura do "painel", da temperatura à "saída da bomba" e da radiação (b) variação das temperaturas "ambiente" e do "depósito" ao longo do tempo, respetivamente.

B5 – Monitorização da temperatura de 16 a 24 de outubro

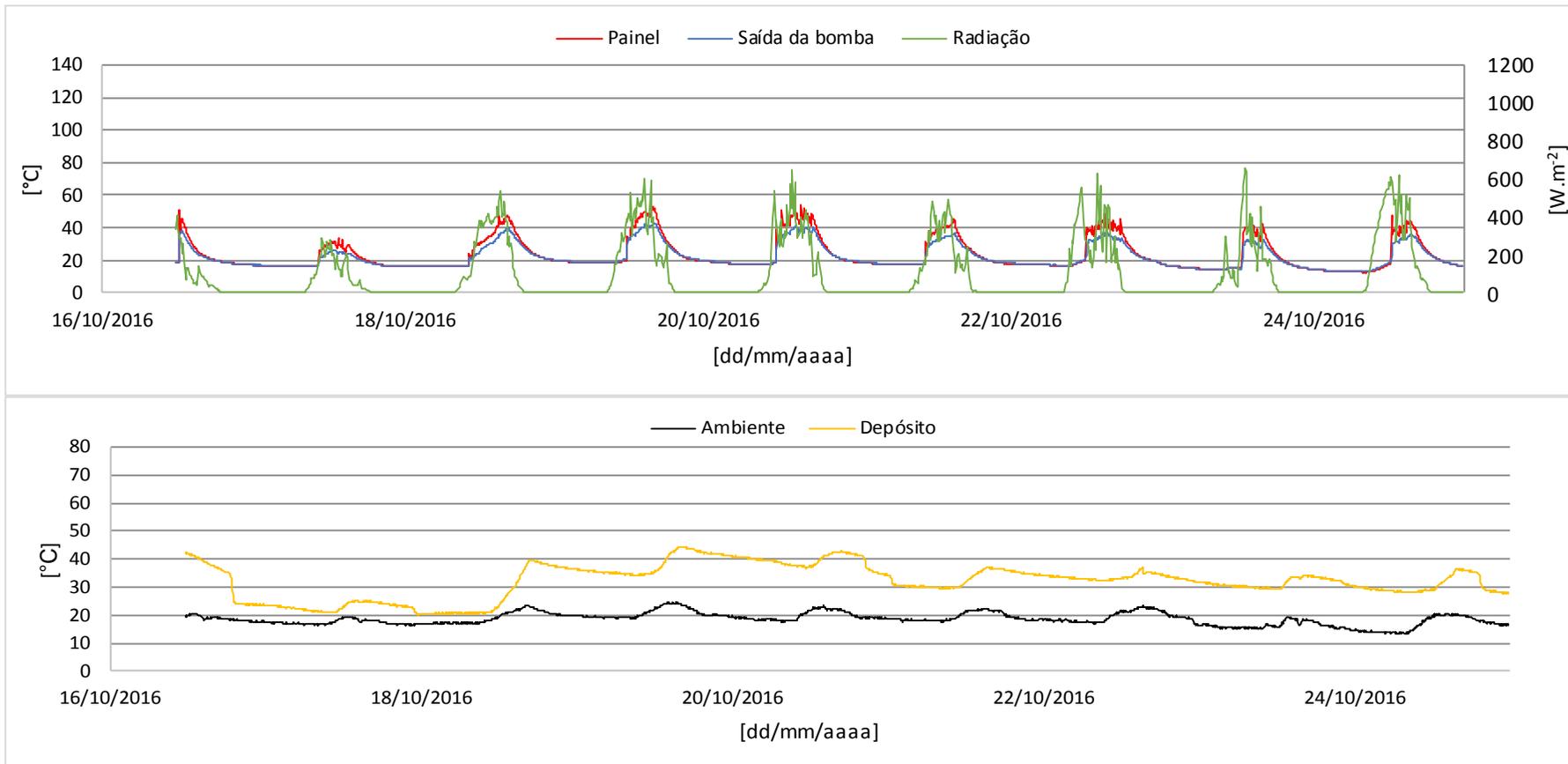


Gráfico B5 - a) Variação da temperatura do “painel”, da temperatura à “saída da bomba” e da radiação (b) variação das temperaturas “ambiente” e do “depósito” ao longo do tempo, respetivamente.