

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



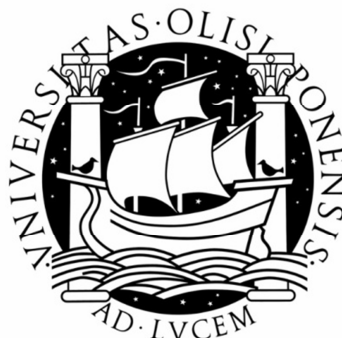
Sistemas Solares Térmicos - Simulação de perfis de consumo e cálculo do comportamento térmico a longo prazo

Nuno Filipe dos Santos Mexa

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

2011

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Sistemas Solares Térmicos - Simulação de perfis de consumo e cálculo do comportamento térmico a longo prazo

Nuno Filipe dos Santos Mexa

Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Trabalho realizado sob a supervisão de

Jorge Facão (LNEG)

Jorge Maia Alves (FCUL)

2011

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos os que me possibilitaram realizar esta dissertação de Mestrado, começando pelo meu orientador, Jorge Facão, que desde o início esteve sempre disponível e me ajudou nos inúmeros problemas práticos que surgiram durante este trabalho.

À Maria João Carvalho, directora do Laboratório de Energia Solar, que ao longo deste trabalho contribuiu com as suas sugestões, apoio e paciência.

Aos meus colegas de trabalho do Laboratório de Energia Solar, Rosário Fialho, Tiago Osório e Ricardo Amorim, cada um com o seu conhecimento e disponibilidade, ajudaram a realizar algumas das tarefas necessárias para terminar este trabalho.

Aos meus outros colegas de trabalho, amigos, familiares e à Ana Cortiçada, um grande agradecimento, porque há vida para além da tese e do trabalho diário. ☺

Por fim, um agradecimento à Fundação para a Ciência e Tecnologia, pelo apoio financeiro ao projecto PTDC/ENR/70844/2006 “Sistemas solares térmicos pré fabricados – nova modelação para ensaio dinâmico e validação por monitorização de comportamento térmico a longo prazo”.

Resumo

Este trabalho constitui a Dissertação de Mestrado com o tema Sistemas solares térmicos – Simulação de perfis de consumo e cálculo do comportamento térmico a longo prazo, realizada no âmbito do Mestrado em Engenharia da Energia e Ambiente.

Nesta dissertação serão apresentados os desenvolvimentos do trabalho realizado entre Outubro de 2009 e Julho de 2011, que foi inserido no âmbito da *Task 4* do projecto “Sistemas solares térmicos pré fabricados – nova modelação para ensaio dinâmico e validação por monitorização de comportamento térmico a longo prazo”, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (PTDC/ENR/70844/2006), cujo principal objectivo é o desenvolvimento de novos modelos matemáticos para a caracterização do comportamento térmico de sistemas solares térmicos e a sua validação experimental por monitorização a longo prazo.

Este trabalho mostra como foi realizado o projecto e a instalação de um circuito hidráulico de ensaio para sistemas solares térmicos que permitisse fazer ensaios de acordo com as normas ISO 9459-5, ISO 9459-2 e que também permitisse realizar ensaios com diferentes perfis de consumo. No trabalho é também referida a instalação de todo o equipamento necessário à aquisição de dados e operação do circuito. O circuito hidráulico foi usado para fazer ensaios a dois sistemas solares térmicos, previamente ensaiados no Laboratório de Energia Solar segundo o método de ensaio DST.

Para o sistema 1, os resultados obtidos do comportamento térmico a longo prazo indicam uma diferença na fracção solar, sempre inferior a 4 %, entre os ensaios realizados no LES e os realizados no âmbito deste trabalho. No sistema 2, a maior diferença entre fracções solares foi de 6 %. Considerando a incerteza de 5 % associada ao método de ensaio, pode-se concluir que os resultados são muito satisfatórios.

Foram iniciadas várias sequências de ensaio de curta duração com resultados variáveis. Para além dos resultados, são também analisados os problemas da instalação experimental, sendo apresentadas sugestões de melhoria da mesma.

Os ensaios e os resultados obtidos são importantes para fazer a validação experimental dos modelos que serão desenvolvidos no âmbito do referido projecto.

Palavras-chave: sistemas solares térmicos, comportamento térmico a longo prazo, circuito de ensaio para sistemas solares, validação experimental.

Abstract

This Master's Dissertation, with the topic “Sistemas Solares Térmicos - Simulação de perfis de consumo e cálculo do comportamento térmico a longo prazo”, is held under the Master of Engenharia da Energia e do Ambiente.

This dissertation will present the work developed between October 2009 and July 2011, which was made part of *TASK 4* in the project "Sistemas solares térmicos pré fabricados – nova modelação para ensaio dinâmico e validação por monitorização de comportamento térmico a longo prazo”, (Pre-fabricated solar thermal systems – new modeling for dynamic system testing and validation by long term thermal performance), with the support of Fundação para a Ciência e Tecnologia (PTDC/ENR/70844/2006), whose main objective is the development of new mathematical models to assess the thermal behavior of solar thermal systems and their experimental validation by long term monitoring.

This work shows how the design and installation of a hydraulic test rig was performed. This test rig was made to test two solar thermal systems (previously tested at the Solar Energy Laboratory, in Lisboa) in accordance with ISO 9459-5, ISO 9459-2 and also to allow the testing of different water load profiles. In this work is also referred the installation of all equipment necessary for data acquisition and operation of the test rig. The obtained results are also reported in this work. The tests and his results are important to the experimental validation of mathematical models to be developed under the mentioned project. In addition to the results, the problems of the experimental test rig were also analyzed, and suggestions were made for its improvement.

Keywords: solar thermal systems, long term thermal performance, solar systems test rig, experimental validation.

Índice

Simbologia	15
1. Objectivos.....	17
2. Introdução.....	19
2.1 Sistemas de Circulação Natural.....	20
2.1.1 Sistemas Termossifão.....	20
2.1.2 Sistemas de colector e depósito integrados (ICS)	21
2.2 Sistemas de Circulação Forçada.....	22
2.2.1 Sistemas de circulação directa.....	22
2.2.2 Sistemas de circulação indirecta.....	23
3. Métodos de ensaio de sistemas solares térmicos.....	25
3.1 Normas de ensaio	25
3.2 Métodos de ensaio para determinação do comportamento térmico.....	28
3.2.1 Método CSTG	28
3.2.2 Método DST	32
4. Projecto e concepção da instalação experimental.....	40
4.1 Projecto da instalação experimental	40
4.2 Sistema de aquisição de dados	47
4.3 Construção do circuito de ensaio.....	50
4.4 Descrição dos sistemas ensaiados	51
5. Resultados	53
5.1 Validação do circuito de ensaio.....	53
5.1.1 Tubagem.....	53
5.1.2 Temperatura da água de entrada nos sistemas.....	53
5.1.3 Sistema de arrefecimento	54
5.1.4 Caudal de extracção.....	55
5.1.5 Problemas observados e melhoria do circuito	57

5.2	Resultados obtidos com o método DST	61
5.2.1	Determinação dos parâmetros característicos.....	61
5.2.2	Determinação do comportamento térmico a longo prazo.....	62
5.3	Simulação de perfis de consumo e previsão a curto prazo	65
5.3.1	Descrição das sequências de ensaio	65
5.3.2	Tratamento de dados e resultados obtidos.....	66
6.	Conclusões e perspectivas de trabalho futuro	71
7.	Referências	75
8.	Anexos.....	77

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Tipos de sistemas solares térmicos para aquecimento de água.	19
Tabela 2 – Classificação de normas aplicáveis no ensaio a sistemas solares térmicos (adaptado de Joshi, et al., 2005).....	25
Tabela 3 – Seleção do método de ensaio para determinação do comportamento térmico (adaptado de EN 12976-2, 2006).....	28
Tabela 4 - Lista de parâmetros característicos de um sistema solar térmico.....	33
Tabela 5 - Tempos de extracção para sequências de ensaio do tipo A (adaptado de ISO 9459-5).	34
Tabela 6 – Volumes de extracção para sequências do tipo A (adaptado de ISO 9459-5).....	35
Tabela 7 – Tempos de extracção para sequências de ensaio do tipo B (adaptado de ISO 9459-5).....	35
Tabela 8 – Volumes de extracção e limiar de temperatura para sequências do tipo B (adaptado de ISO 9459-5).	36
Tabela 9 – Descrição detalhada dos colectores solares térmicos.	51
Tabela 10 – Descrição detalhada dos depósitos acumuladores.	51
Tabela 11 – Comparação entre parâmetros característicos obtidos para o sistema 1, de 275 l.	61
Tabela 12 – Comparação entre parâmetros característicos obtidos para o sistema 2, de 200 l.	62
Tabela 13 - Resultados da previsão do comportamento térmico a longo prazo para o sistema 1, de 275 l, usando o método DST.	63
Tabela 14 – Resultados da previsão do comportamento térmico a longo prazo para o sistema 2, de 200 l, usando o método DST.	64
Tabela 15 – Configuração do perfil de extracção para as sequências de ensaio com 3 extracções diárias.	65
Tabela 16 - Resultados obtidos para o sistema 1, de 275 l, através da ferramenta STP, para as várias sequências de ensaio. O volume diário extraído em cada sequência foi 275 l.	67
Tabela 17 – Diferença entre valores obtidos usando diferentes conjuntos de parâmetros para o sistema 1, de 275 l.	68
Tabela 18 – Resultados obtidos para o sistema 2, de 200 l, através da ferramenta STP, para as várias sequências de ensaio. O volume diário extraído em cada sequência foi 200 l.	69

Índice de Figuras

Figura 1 – Esquema de funcionamento de um sistema solar termossifão (fonte: www.techno-solis.com).	20
Figura 2 - Sistema de colector e depósito integrado.....	21
Figura 3 – Sistema ICS com tubos de vácuo (fonte: www.fujisol.com)	21
Figura 4 – Esquema de funcionamento de um sistema de circulação forçada (fonte: www.artsolar.pt).	22
Figura 5 – Princípio de funcionamento de um sistema <i>drain-down</i> (fonte: Kalogirou, S., 2009).....	23
Figura 6 – Funcionamento de um sistema <i>drain-back</i> (fonte: www.homefreesolar.com)	24
Figura 7 – Energia extraída, Q, em função da irradiação no plano do colector, H. Delta T representa ($T_{CA} - T_{CW}$) (fonte: Carvalho, M.J., 2009).....	29
Figura 8 – Exemplos de perfis de extracção, para três sistemas solares térmicos (fonte: Carvalho, M.J., 2009).....	30
Figura 9 – Representação gráfica dos conjuntos de pontos obtidos para cada tipo de sequência de ensaio, relacionando rendimento do sistema e temperatura reduzida (T_m^*) (fonte: Carvalho, M.J., 2009).....	36
Figura 10 – Variáveis de <i>input</i> e <i>output</i> medidas no sistema solar. O sistema é tratado como uma caixa negra (adaptado de: Spirk, W et al., 1992).....	37
Figura 11 – Esquema final do circuito hidráulico instalado para realização de ensaios a sistemas solares térmicos. A verde é indicada a parte do circuito do sistema solar 1 e a vermelho a parte do circuito destinado ao sistema solar 2.	41
Figura 12 – Sistemas solares térmicos ensaiados no decorrer do projecto. Da direita para a esquerda, sistemas 1 e 2, com depósitos com capacidade para 275 e 200 litros respectivamente.	42
Figura 13 – Localização dos dois depósitos de armazenamento e torre de arrefecimento.....	42
Figura 14 – Equipamentos usados para o arrefecimento da água fornecida aos sistemas solares térmicos.	43
Figura 15 – Válvula electromagnética com activação através de um sinal digital proveniente do sistema de aquisição de dados.	44
Figura 16 – Bomba B1, utilizada para circular a água contida no depósito 2 para os sistemas solares térmicos.	44
Figura 17 – Válvula redutora de pressão, utilizada para assegurar o correcto funcionamento das válvulas <i>autoflow</i>	45
Figura 18 – Circuito hidráulico instalado no interior do edifício.	46

Figura 19 – Quadro de propriedades do ensaio “ <i>Ad-hoc</i> ”. Podem ser definidos ensaios de acordo com as normas de ensaio ou definir ensaios para qualquer hora e dia, bem como qualquer volume de extracção.....	48
Figura 20 – Quadro de operação do <i>software</i> de aquisição de dados. São registadas as temperaturas de entrada e saída da água no depósito, caudal e volume extraído. As extracções são realizadas sempre de acordo com a hora solar. É também indicada a temperatura ambiente e irradiância a cada instante de aquisição.....	48
Figura 21 – Equipamentos para fazer a recolha de dados dos sistemas: a) piranómetro para recolher os valores de irradiância no plano dos colectores, b) sondas de temperatura à entrada e saída dos depósitos, c) medidor de caudal e d) sistema de aquisição de dados e computador de apoio.....	49
Figura 22 – Perfil de extracção realizado ao sistema solar térmico 1, para um volume de extracção de 275 l. A azul está indicada a temperatura de entrada do depósito do sistema solar térmico e a vermelho a temperatura de saída do mesmo depósito.	54
Figura 23 – Extracção realizada ao sistema solar térmico 2, com o caudal registado dentro dos valores exigidos pela norma ISO 9459-5.....	55
Figura 24 – Extracção realizada ao sistema solar térmico 1, onde se observa diminuição do caudal de extracção após o fim da extracção ao sistema solar térmico 2, de menor volume de depósito.....	56
Figura 25 – Caudal estável em 2,3 l/min no início da extracção e entre 9,3 e 9,0 l/min durante uma extracção ao sistema 1.	56
Figura 26 – Depósito de armazenamento 2, isolado com uma capa reflectora, evitando o aquecimento da água devido à exposição à radiação solar.....	58
Figura 27 – Perfil de extracção de um dia de ensaio pelo método DST, ao sistema 1, de 275 l. Sequência de ensaio do tipo DST-A, com 7 extracções diárias realizadas.	59
Figura 28 – Perfil de extracção de um dia de ensaio pelo método DST, ao sistema 1, de 275 l, depois do isolamento do depósito, onde se observa a temperatura de entrada constante ao longo de todo o dia. Sequência de ensaio do tipo B, com 5 extracção realizadas.....	59

Simbologia

a, b	Constantes arbitrárias positivas
a_1, a_2 e a_3	Coefficientes usados na Equação 1, método CSTG, para determinação do comportamento térmico do sistema
A_C	Área de abertura do colector, em m^2
A_C^*	Área efectiva do colector, em m^2
C_p	Calor específico da água, em $J g^{-1} \cdot K^{-1}$
C_s	Capacidade térmica do depósito, em $MJ K^{-1}$
\dot{C}_s	Fluxo de capacidade térmica extraída, em $W K^{-1}$
CSTG	<i>Collector and System Testing Group</i>
D_L	Coefficiente de mistura do depósito
DST	<i>Dynamic System Testing</i>
f_{aux}	Fracção do volume do depósito que é utilizada para aquecimento através do apoio
F_{sol}	Fracção solar
G_t^*	Irradiância incidente no plano do colector, em $W m^{-2}$
H	Irradiação solar incidente na abertura do colector, em $MJ m^{-2}$
h	Posição vertical normalizada no interior do depósito, em metros
\dot{m}_L	Caudal de circulação no depósito durante a extracção, em $l min^{-1}$
P_{aux}	Potência de apoio, em W
P_C	Potência fornecida pelo circuito do colector, em W
P_L	Potência fornecida para o consumo, em W
Q	Energia extraída do sistema solar térmico, em MJ
$Q_{c(n)}$	Energia extraída do sistema solar térmico durante o dia n, em MJ
Q_d	Energia total necessária ao consumo, em MJ
Q_L	Energia fornecida pelo sistema solar térmico, em MJ
S_C	Estratificação do depósito
t	Tempo, em segundos
T	Temperatura, em °C
t_0	Hora de início da primeira extracção do dia
T_{CA}	Temperatura ambiente do ar, em °C
T_{CW}	Temperatura da água da rede à entrada do depósito, em °C
t_f	Temperatura da água no depósito, no final do ensaio, em °C
t_i	Temperatura da água no depósito, no início do ensaio, em °C
t_m	Temperatura média do fluido de transferência de calor, em °C
T_m^*	Temperatura reduzida $= (t_m - T_{CA}) / G_t^*$, em $m^2 KW^{-1}$

T_{SA}	Temperatura ambiente do depósito, em °C
TTL	<i>Transistor–transistor logic</i>
u_C^*	Coeficiente de perdas efectivo do colector, em $W\ ^\circ C^{-1}\ m^{-2}$
U_s	Coeficiente global de perdas do depósito, em $W\ ^\circ C^{-1}$
V_s	Volume do depósito, em litros
Δt	Intervalo de tempo, em segundos
ρ_w	Massa volúmica da água, em $kg\ m^{-3}$

1. Objectivos

Com este trabalho pretendeu-se fazer o projecto e construção de um circuito hidráulico que permitisse realizar ensaios a sistemas solares térmicos, de modo a fazer a validação experimental de um modelo matemático actualmente em desenvolvimento no Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG). Este trabalho está inserido no âmbito do projecto “Sistemas solares térmicos pré fabricados – nova modelação para ensaio dinâmico e validação por monitorização de comportamento térmico a longo prazo” (PTDC/ENR/70844/2006), financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

Uma vez que os ensaios laboratoriais para caracterização do comportamento térmico de sistemas solares térmicos são de curta duração, pretende-se também com este trabalho obter informações sobre diferentes perfis de extracção, que permitam simular de melhor forma os consumos reais e também obter dados através da monitorização de sequências de ensaio contínuas, que possam ser usadas no futuro para validação de modelos.

2. Introdução

No capítulo 2 são descritos genericamente os tipos de sistemas solares térmicos existentes para aquecimento de água, bem como o seu funcionamento.

No capítulo 3 são apresentados os métodos de ensaio de sistemas solares térmicos e descritos os métodos de ensaio para determinação do comportamento térmico usados nos laboratórios de ensaio.

O capítulo 4 apresenta a parte experimental do trabalho, descrevendo-se o projecto e a concepção do circuito hidráulico de ensaio para sistemas solares térmicos.

A apresentação e discussão dos resultados obtidos após os ensaios experimentais realizados segundo o método DST e simulando diferentes perfis de extracção, são feitas no capítulo 5.

Por fim, no capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões do trabalho desenvolvido e perspectivas de trabalho futuro.

Os sistemas solares térmicos para aquecimento de água são talvez a aplicação mais comum e bem disseminada da energia solar. A popularidade dos sistemas solares térmicos reside sobretudo na sua relativa simplicidade e no facto de estes sistemas serem viáveis na generalidade dos casos.

De uma forma genérica, um sistema solar térmico é constituído por um colector ou campo de colectores, um sistema de transferência de energia e um depósito de armazenamento. Destes componentes, o mais importante é o colector solar, que absorve a radiação solar, convertendo-a em calor. Este calor é transferido pelo fluido de transferência de calor (normalmente água ou uma mistura de água com anti-congelante) que passa no colector para o depósito ou aplicação. Este calor pode então ser usado directamente ou armazenado num depósito.

Os sistemas solares térmicos para aquecimento de água a baixas temperaturas (temperatura inferior a 100 °C) podem dividir-se em dois tipos:

- Circulação Natural ou Termossifão
- Circulação Forçada

Os sistemas solares térmicos também podem ser classificados como directos ou indirectos. Nos sistemas directos, a água potável é aquecida directamente no colector e segue para o depósito de armazenamento, sendo esta água consumida pelo utilizador.

Nos sistemas indirectos, a água potável é aquecida indirectamente por um fluido de transferência de calor. Depois de aquecido, este fluido vai transferir o calor para a água potável através de um permutador de calor que pode estar no interior ou exterior do depósito de armazenamento. Neste tipo de instalações, o fluido de transferência de calor e a água de consumo nunca se misturam.

Na Tabela 1 estão indicados os vários tipos de sistemas solares térmicos existentes para aquecimento de água a baixas temperaturas.

Tabela 1 – Tipos de sistemas solares térmicos para aquecimento de água.

Circulação Natural	Circulação Forçada
Sistemas Termossifão	Sistemas de circulação directa
	Sistemas de circulação indirecta
	Sistemas de aquecimento e arrefecimento ambiente
Sistemas de colector e depósito integrados (ICS)	Sistemas de aquecimento para piscinas
	Sistemas produtores de calor para processos industriais
	Sistemas para unidades de dessalinização

2.1 Sistemas de Circulação Natural

Os sistemas de circulação natural podem considerar-se divididos em dois tipos de sistemas, os sistemas termossifão e os sistemas de colector e depósito integrado, descritos nos pontos seguintes. Nos sistemas de circulação natural, a circulação do fluido de transferência de calor ocorre por convecção natural.

2.1.1 Sistemas Termossifão

Nos sistemas termossifão, a água ou fluido de transferência de calor que é aquecido no colector solar, circula do colector para o depósito por convecção natural, ou seja, com o aumento da temperatura, este fluido torna-se menos denso e provoca a circulação do fluido mais quente para o topo do depósito, enquanto o fluido mais frio é empurrado para a parte inferior do depósito, que depois volta a entrar no colector solar. Deste modo existe circulação natural enquanto houver radiação solar.

Para evitar que ocorra o fenómeno inverso, ou seja, de passagem da água quente para o interior do colector durante o período nocturno, deverá ser mantida uma distância de cerca de 30 cm entre o topo do colector e o fundo do depósito de armazenamento ou a instalação de uma válvula anti-retorno que não perturbe o termossifão (INETI, 2007).

O esquema de funcionamento de um sistema termossifão é apresentado na Figura 1.

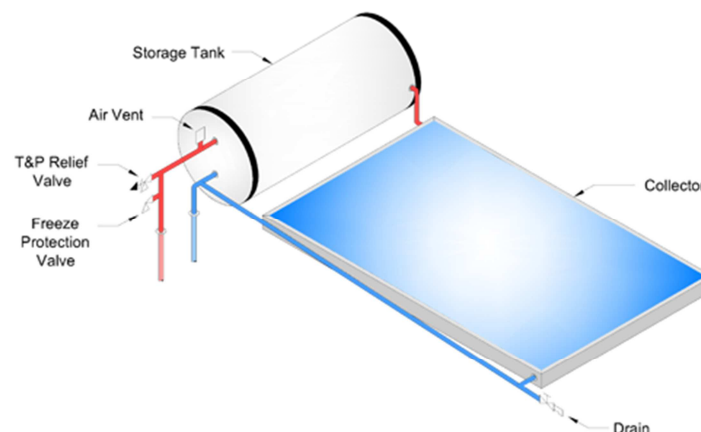


Figura 1 – Esquema de funcionamento de um sistema solar termossifão (fonte: www.techno-solis.com).

Este tipo de sistema tem como grandes vantagens funcionar sem qualquer tipo de bomba circuladora ou controladores, não consumir energia eléctrica, ser mais fiável e ter um tempo de vida superior aos sistemas de circulação forçada.

Como têm o depósito e colector juntos e o depósito tem de estar obrigatoriamente acima dos colectores, são sistemas relativamente altos, o que poderá apresentar alguns problemas em termos estéticos. Outro dos principais problemas dos sistemas termossifão está relacionado com a qualidade de água usada. Águas muito duras ou ácidas provocam incrustações no depósito e podem até provocar corrosão na parte do circuito primário do colector, no caso dos sistemas directos, sem permutador. Isto pode degradar a qualidade da água e reduzir o tempo de vida do sistema.

Este tipo de sistemas não é muito comum em países frios, uma vez que as perdas térmicas do depósito são maiores e pode haver o risco de congelamento da água do circuito secundário durante o Inverno.

2.1.2 Sistemas de colector e depósito integrados (ICS)

Os sistemas de colector e depósito integrado (ICS), tal como os sistemas termossifão, não fazem uso de bombas circuladoras e recorrem ao fenómeno de circulação natural para circulação do fluido de transferência de calor. Existem diversos tipos de sistemas com construções diferentes, mas no geral estes sistemas são caracterizados pelo colector solar e o depósito de armazenamento que formam uma unidade só (Figura 2).

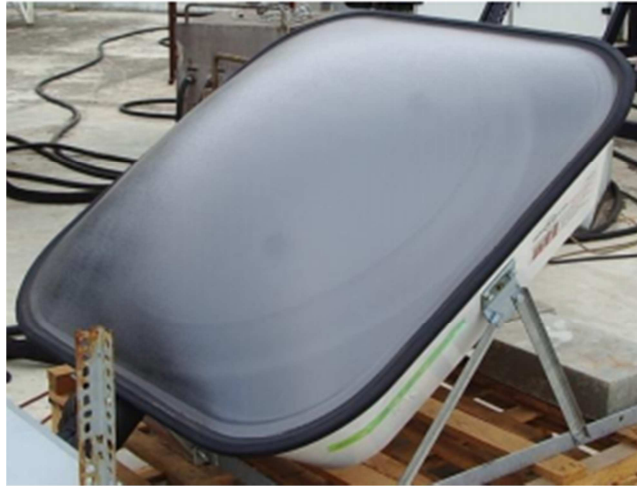


Figura 2 - Sistema de colector e depósito integrado.

O principal problema deste tipo de sistemas são as elevadas perdas térmicas do depósito para o exterior, uma vez que normalmente o depósito não tem isolamento térmico numa das faces para permitir a absorção da radiação solar. Durante a noite, em dias de céu nublado ou com temperatura ambiente baixa, estas perdas são ainda mais elevadas. Estes sistemas são mais adequados a regiões que tenham climas com temperaturas elevadas e com bastante radiação solar.

Actualmente existem outros tipos de sistemas, como o representado na Figura 3, um sistema ICS formado por tubos de vácuo e depósito. Estes sistemas não têm os problemas dos sistemas ICS convencionais, já enumerados anteriormente, uma vez que, apesar do colector e o depósito formarem uma unidade só, o depósito é devidamente isolado de modo a evitar as perdas térmicas e os colectores de tubos de vácuo contribuem para evitar as perdas térmicas da parte do colector.

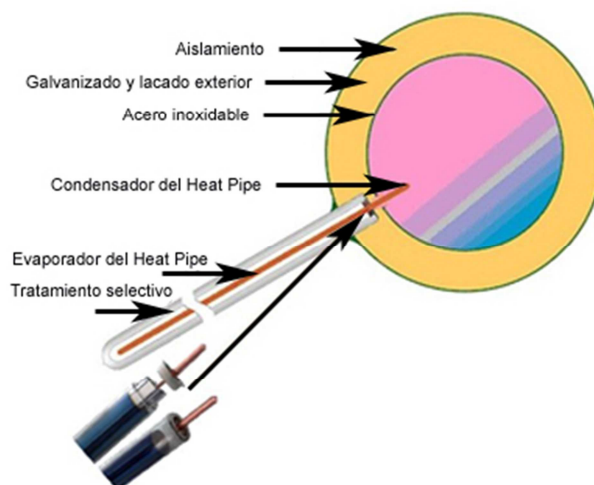


Figura 3 – Sistema ICS com tubos de vácuo (fonte: www.fujisol.com)

2.2 Sistemas de Circulação Forçada

Os sistemas de circulação forçada, também designados por sistemas activos, necessitam de uma bomba circuladora para fazer circular o fluido de transferência de calor no colector. Com o uso desta bomba, deixa de ser necessário ter o depósito junto ao colector, podendo o depósito localizar-se no interior, protegido de condições climáticas adversas. Com isto evitam-se perdas térmicas mais elevadas e o sistema passa a ter mais possibilidades para além do convencional sistema de circulação natural. Associado à bomba circuladora, existe um controlador diferencial, que acciona a bomba quando entre o topo do campo de colectores e o fundo do depósito existe uma diferença de temperatura suficiente (aproximadamente 7 °C), que permita aquecer a água contida no depósito (Figura 4).

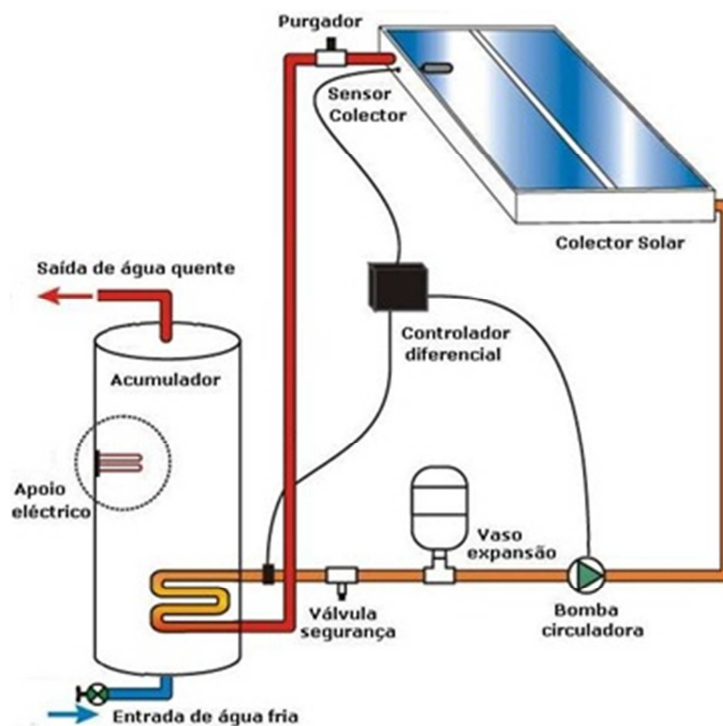


Figura 4 – Esquema de funcionamento de um sistema de circulação forçada (fonte: www.artsolar.pt).

Os sistemas de circulação forçada têm uma maior flexibilidade em relação aos sistemas termossifão, flexibilidade que permite ter um depósito localizado noutro local que não o telhado, ou ter mecanismos mais eficazes para evitar sobre-aquecimento ou congelamento. A implementação de sistemas de grande dimensão é mais fácil em sistemas de circulação forçada, comparativamente aos sistemas solares de termossifão.

Por serem mais complexos, os sistemas de circulação forçada são em geral mais caros e necessitam de ser bem dimensionados para operar de forma eficiente. Têm alguns factores limitantes, tais como o espaço necessário para o depósito de armazenamento e outros equipamentos, que deverão localizar-se no interior, ou mesmo o facto de o sistema estar dependente da electricidade para operar, seja através de um módulo fotovoltaico, seja através da rede eléctrica convencional.

Dentro dos sistemas de circulação forçada podem ser usadas várias configurações, consoante o sistema seja directo ou indirecto e dependendo de diversos factores, como a qualidade da água, o sistema de apoio ou o sistema de protecção contra o congelamento.

2.2.1 Sistemas de circulação directa

Nos sistemas de circulação directa, não se usa um permutador de calor para fazer a transferência de calor entre a água que circula nos colectores e a água de consumo. Sem o permutador de calor, o

fluido de transferência de calor é aquecido directamente, evitando a perda de eficiência associada ao permutador de calor.

No entanto, este tipo de sistemas apresenta várias limitações, já que só devem ser usados em locais onde a água de consumo não possa congelar. Para além disto, estes sistemas apresentam alguns riscos para os equipamentos, especialmente se a qualidade da água é má. Actualmente este tipo de sistemas está fora das regras de boa prática em termos de instalações solares térmicas.

2.2.2 Sistemas de circulação indirecta

Nestes sistemas, o circuito do colector é fechado e existe um permutador de calor que faz a transferência de calor do fluido do circuito primário para a água potável (ver Figura 4). O fluido que circula no circuito primário é normalmente uma mistura de água com propileno glicol, sendo a percentagem de propileno glicol mais alta quanto mais baixa for a temperatura ambiente mínima do local onde for instalado o sistema. Sendo o circuito do colector um circuito fechado, a energia de bombagem é inferior aos sistemas de circulação directa mas há a necessidade de se utilizar um vaso de expansão.

É usada uma bomba circuladora para fazer circular a água potável entre o depósito de armazenamento e o campo de colectores. Para evitar que ocorra o fenómeno de termossifão inverso quando a bomba não está a circular, estes sistemas devem ter válvulas anti-retorno. A bomba circuladora também pode funcionar como sistema de protecção contra o congelamento, fazendo a água circular do depósito para os colectores. No entanto, caso haja falha de energia, a protecção não funciona. Tendo em conta este factor, este sistema sem uma adequada protecção contra o congelamento, não deverá ser usado em climas muito rigorosos, onde existe o risco de congelamento várias vezes no ano.

Um sistema denominado *drain-down* foi criado para protecção contra o congelamento, tendo este algumas variações em relação ao sistema de circulação directa. No caso de falha de energia ou em condições de congelamento, os colectores são esvaziados automaticamente, havendo uma válvula no topo do campo de colectores que faz entrar ar nos colectores e tubagem, à medida que a água é retirada (Kalogirou, S., 2009). O funcionamento normal do sistema é retomado através de um controlador diferencial, que acciona a bomba para levar o fluido novamente para os colectores.

Um esquema de funcionamento deste tipo de sistemas está representado na Figura 5.

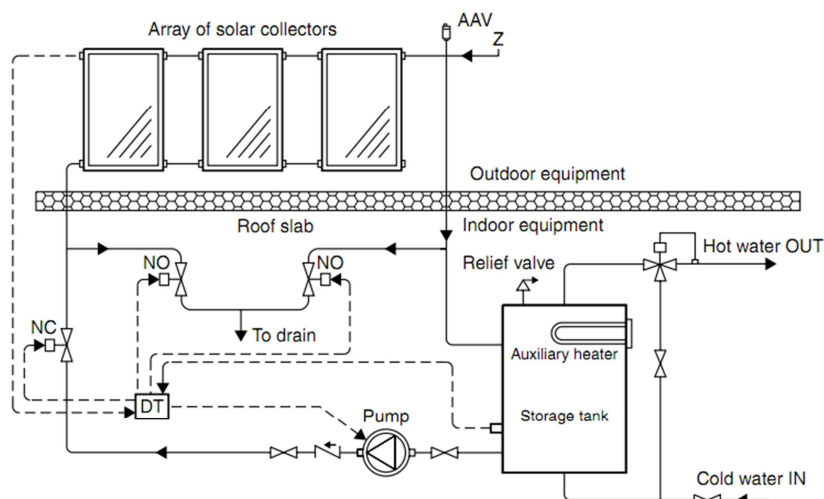


Figura 5 – Princípio de funcionamento de um sistema *drain-down* (fonte: Kalogirou, S., 2009).

Para protecção contra o congelamento, pode também ser usado o sistema *drain-back*. Este sistema tem um princípio de funcionamento muito semelhante a um sistema de circulação indirecta, mas dispõe de um “tanque de drenagem” para onde a água circula quando o sistema não está em funcionamento, ou seja, quando a bomba circuladora pára, o fluido no circuito do colector é drenado por gravidade para

um pequeno depósito bem isolado. Quando existe novamente energia disponível, o sistema é activado e a bomba circuladora volta a encher o circuito do colector.

Um esquema de funcionamento deste sistema é apresentado na Figura 6.

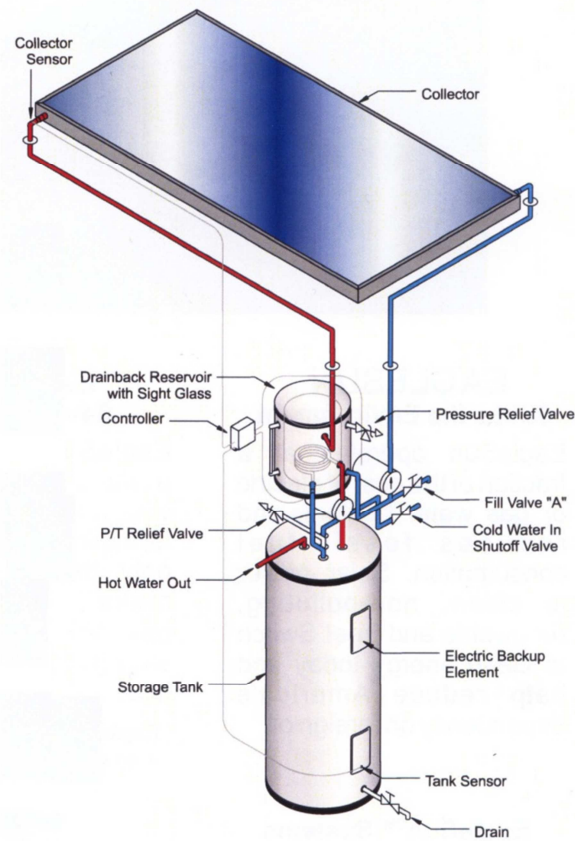


Figura 6 – Funcionamento de um sistema *drain-back* (fonte: www.homefreesolar.com)

Todo este trabalho foi desenvolvido pelo autor, salvo indicado o contrário no texto.

3. Métodos de ensaio de sistemas solares térmicos

3.1 Normas de ensaio

O ensaio de sistemas solares térmicos assume um papel importante na determinação do rendimento térmico e na verificação da fiabilidade dos sistemas solares térmicos, não só como informação essencial para os potenciais utilizadores dos equipamentos, que precisam de informação no momento de adquirir o equipamento, mas também para os próprios fabricantes. Estes necessitam de saber potenciais falhas nos seus produtos e também ter uma caracterização completa do comportamento térmico do equipamento, que lhes permita melhorar o seu sistema solar térmico.

Dependendo do tipo de sistema solar térmico, do tipo de abordagem que se pretende na determinação do comportamento térmico e parâmetros característicos do sistema, ou mesmo se o ensaio é realizado no interior ou exterior, podem ser usadas normas diferentes. As normas AS 2813-1985, 1985; AS 2984-1987, 1987; ASHRAE 95-1987, 1987; BS 5918-1989, 1989; CNS B 7277:No. 12588-1989, 1989; CSA F379.1-M1985, 1985; IS 13129 (part 1 & 2)-1991, 1991; ISO 9459 (part 1-3 & 5); JIS A 4111-1997, foram desenvolvidas para ensaio a sistemas solares térmicos. Embora possam ser usadas normas diferentes para ensaio, algumas são mais exigentes que outras, e existem vantagens e desvantagens na aplicação de cada uma.

Fazendo a classificação das várias normas de ensaio, podem definir-se dois grupos de ensaio, dependendo da abordagem usada no ensaio: método estacionário e método dinâmico.

O método estacionário especifica que o ensaio deve ser realizado durante um determinado número de horas ao longo de um dia, satisfazendo determinadas condições base. O método dinâmico foi desenvolvido de modo a reduzir o tempo necessário para a realização do ensaio, não tendo tantas restrições e permitindo o ensaio com condições climáticas menos favoráveis. Dentro destes dois grupos, estacionário e dinâmico, pode-se definir ainda ensaios realizados no interior e no exterior, aplicáveis tanto a sistemas termossifão, como a sistemas de circulação forçada. Na Tabela 2 podem observar-se as normas aplicáveis nos ensaios a sistemas solares térmicos.

Tabela 2 – Classificação de normas aplicáveis no ensaio a sistemas solares térmicos (adaptado de Joshi, et al., 2005).

Método estacionário				Método dinâmico
Sistemas termossifão		Sistemas circulação forçada		DST Method ISO 9459(part-5) (1997)
Exterior	Interior	Exterior	Interior	
AS 2984-1987	AS 2813-1985	AS 2984-1987	AS 2813-1985	
CNS B 7277:No.12558-1989	ISO 9459(part-1) (1993)	BS 5918:1989	CSA F379.1 M1985	
IS 13129(part-2): 1991	JIS A 4111: 1997	IS 13129(part-2):1991	ASHRAE 95-1987	
ISO 9459(part-2) (1995)		ISO 9459(part-2) (1995)	IS 13129(part-1): 1991	
ISO 9459(part-3) (1997)		ISO 9459(part-3) (1997)	ISO 9459(part-1) (1993)	
JIS A 4111: 1997				

Joshi, et al. (2005) fez uma análise e comparação entre as várias normas aplicáveis a sistemas solares térmicos em termos de avaliação de comportamento térmico. Embora nem todas as normas sejam comparáveis entre si, estudaram-se os procedimentos de ensaio e obtiveram-se resultados comparáveis entre 3 normas diferentes: JIS A 4111: 1997, CNS B 7277:No.12558-1989 e ISO 9459 (part-2) (1995).

Neste estudo foram realizados ensaios a dois sistemas solares térmicos com diferentes tecnologias para fazer a comparação e avaliação das várias normas. Este estudo e outros que o antecedem mostram que existem aspectos que ainda estão por melhorar em cada norma e que para isto é necessário fazer

ensaios experimentais de longo prazo para se obterem dados fiáveis que possam ser trabalhados e comparados.

No âmbito do Comité Europeu de Normalização (CEN) e mais especificamente do Comité Técnico TC 312 “*Thermal solar systems and components*”, criado em 1994, foram preparadas várias normas europeias para abranger terminologia, requisitos gerais e métodos de ensaio a sistemas solares térmicos e componentes. Com a criação destas normas, pretendeu-se facilitar a troca de bens e serviços, através da eliminação de barreiras técnicas aos mercados, na própria União Europeia (UE) e também de dentro da UE para fora e vice-versa.

Apesar de não terem um carácter vinculativo, estas normas europeias são muitas vezes incluídas em Directivas Europeias, estas sim vinculativas, levando à disseminação e aplicação destas normas. No caso do Solar Térmico, a conformidade com estas normas é obrigatória em muitos países da UE para determinados projectos e entidades terem acesso a subsídios e/ou incentivos estatais de apoio a energias renováveis.

Em Portugal, foi aprovado pelo Governo um regulamento denominado Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), aprovado pelo Decreto-Lei 80/2006 de 4 de Abril, que entre outros, impõe a utilização de sistemas solares térmicos para aquecimento de águas sanitárias em novos edifícios. Este regulamento veio desenvolver o mercado do Solar Térmico em Portugal e exigir uma maior atenção por parte dos fabricantes de colectores e sistemas solares térmicos à certificação e ao desenvolvimento dos seus produtos.

Na elaboração destas normas são consideradas para além de outros documentos de carácter nacional, as normas internacionais ISO, as quais podem ser referidas pelas normas europeias. Deste modo, ao se elaborarem normas europeias que têm em conta não só aspectos restritamente técnicos de ensaio, mas também requisitos de qualidade e fiabilidade, obtém-se normas mais completas e abrangentes.

Em 2001, resultado do trabalho do comité técnico CEN/TC 312, surgiram cinco normas europeias relativas a ensaios a colectores e sistemas solares térmicos. Estas normas foram adoptadas pelos estados membros da Comunidade Europeia e vieram criar uma harmonização no que diz respeito a normas de ensaio para o Solar Térmico. As normas em questão são as seguintes:

- EN 12975-1:2006. *Thermal solar systems and components – Solar collectors - Part 1: General requirements.*
- EN 12975-2:2006. *Thermal solar systems and components – Solar collectors - Part 2: Test methods.*
- EN 12976-1:2006. *Thermal solar systems and components – Factory made systems – Part 1: General requirements.*
- EN 12976-2:2006. *Thermal solar systems and components – Factory made systems – Part 2: Test methods.*
- EN 12977-3:2008. *Thermal solar systems and components – Custom built systems – Part 3: Performance characterization of stores for solar heating systems.*

Foram também desenvolvidas as seguintes especificações técnicas para sistemas feitos por medida:

- CEN-TS 12977-1:2010. *Thermal solar systems and components – Custom built systems – Part 1: General requirements.*
- CEN-TS 12977-2:2010. *Thermal solar systems and components – Custom built systems – Part 2: Test methods.*
- CEN/TS 12977-4:2010. *Thermal solar systems and components – Custom built systems – Part 4: Performance test methods for solar combistores.*
- CEN/TS 12977-5:2010. *Thermal solar systems and components – Custom built systems – Part 5: Performance test methods for control equipment.*

Finalmente, uma norma muito importante de votação conjunta entre o CEN e ISO, que define os termos básicos em relação à energia solar:

- EN ISO 9488:1999. *Solar energy – Vocabulary (ISO 9488:1999)*.

Neste trabalho serão abordadas apenas as normas aplicáveis a ensaios realizados no exterior a sistemas solares térmicos pré-fabricados. Os sistemas solares térmicos que se incluem nos sistemas pré-fabricados são os sistemas termossifão, de circulação forçada e sistemas ICS. Deste modo, são aplicáveis as seguintes normas:

- EN 12976-1:2006. *Thermal solar systems and components – Factory made systems – Part 1: General requirements*.
- EN 12976-2:2006. *Thermal solar systems and components – Factory made systems – Part 2: Test methods*.

A norma EN 12976-1 é uma norma de requisitos gerais, especificando requisitos de fiabilidade, durabilidade e segurança para sistemas solares térmicos pré-fabricados.

A norma EN 12976-2 especifica métodos de ensaio para validação dos requisitos indicados na EN 12976-1, e inclui também dois métodos de ensaio para caracterização do comportamento térmico através do ensaio a um sistema.

Deste modo, na EN 12976-2 são indicados os ensaios aplicáveis a sistemas solares térmicos, podendo os ensaios ser divididos em dois grandes grupos:

- Ensaio de fiabilidade e durabilidade¹:
 - Ensaio de resistência à pressão (depósito e circuito primário).
 - Protecção ao sobre-aquecimento.
 - Protecção ao congelamento (apenas se o fabricante indicar que o sistema resiste ao congelamento sem uso de fluido anti-congelante).
 - Verificação de condições de não contaminação da água potável.
 - Verificação dos equipamentos de segurança.
 - Verificação dos componentes utilizados e sua fiabilidade (p. ex. colector).
- Ensaio para determinação do comportamento térmico:
 - Método CSTG (ISO 9459-2).
 - Método DST (ISO 9459-5).

¹ Neste contexto, importa referir que o significado da palavra durabilidade vem não em termos de duração do sistema por um determinado tempo, mas sim para informar que o sistema não vai ser afectado por situações que reduzam apreciavelmente o seu tempo de vida.

3.2 Métodos de ensaio para determinação do comportamento térmico

Tal como referido anteriormente, existem dois métodos de ensaio indicados na norma EN 12976-2, os quais devem ser aplicados consoante o tipo de sistema. Na Tabela 3 está indicado como pode ser feita a selecção dos métodos de ensaio para determinação do rendimento do sistema. Em ambos os casos, o objectivo final é determinar o comportamento térmico anual do sistema solar térmico.

Tabela 3 – Selecção do método de ensaio para determinação do comportamento térmico (adaptado de EN 12976-2, 2006)

Método de ensaio	Sistemas solares com apoio	Sistemas solares sem apoio (apenas solar) e de pré-aquecimento
CSTG (ISO 9459-2)	Não	Sim
DST (ISO/DIS 9459-5)	Sim	Sim

O método de ensaio CSTG (*Collector and System Testing Group*) também designado por *Input-Output*, relaciona a irradiação incidente no colector com a energia armazenada no depósito no final do dia, tratando o sistema como uma caixa preta, ou seja, sem serem feitas medidas intrusivas no sistema.

O método dinâmico ou DST (*Dynamic System Testing*), baseia o ensaio na determinação de parâmetros característicos do sistema solar para serem usados num modelo matemático de simulação do comportamento do sistema. Este modelo pode ser usado com dados de irradiação, temperatura ambiente e temperatura da água da rede para determinar o comportamento térmico anual do sistema solar. Tal como no método CSTG, no método DST o sistema é tratado como uma caixa preta.

Para ambos os métodos é necessário efectuar, durante os respectivos ensaios, várias medidas de grandezas de acordo com cada norma de ensaio:

- Irradiância incidente no colector
- Temperatura ambiente na zona onde está localizado o sistema solar térmico
- Velocidade do vento
- Temperatura da água de consumo na entrada do depósito
- Temperatura da água de consumo na saída do depósito
- Caudal da água de consumo durante a extracção

3.2.1 Método CSTG

O ensaio segundo o método CSTG consiste em dois ensaios, um ensaio diário *Input-Output* e um ensaio de perdas do depósito.

3.2.1.1 Ensaio diário *Input-Output*

O ensaio diário *Input-Output* consiste numa série de ensaios realizados no exterior (pelo menos 6 dias de ensaio) em que se pré-condiciona o sistema no início de cada dia de ensaio, realizando-se apenas uma extracção ao final do dia. São medidos os valores de *input* (irradiação incidente no colector), e de *output*, (a energia contida na água da extracção) e é elaborado um diagrama de *input-output*.

Deste modo pode-se obter a energia diária extraída do sistema para vários valores de irradiação H , e $T_{CA} - T_{CW}$ (diferença entre as médias da temperatura ambiente e temperatura da água fria que entra no depósito). A energia diária extraída do sistema solar Q , é representada pela Equação (1).

$$Q = a_1 H + a_2 (T_{CA} - T_{CW}) + a_3 \quad (1)$$

Os coeficientes de correlação a_1 , a_2 e a_3 são determinados a partir dos resultados do ensaio, fazendo um ajuste através do método dos mínimos quadrados. A energia extraída do sistema solar Q , representa a energia total contida na água que foi retirada do sistema, quando foi extraída ao final do dia, tal como indicado no procedimento de ensaio, descrito no ponto seguinte.

A partir da Equação (1), obtém-se o diagrama de *Input-Output*, para valores de Delta T = $(T_{CA} - T_{CW}) = -10$ K, 0 K, 10 K e 20 K. Nos casos em que estes valores não consigam abranger os resultados dos ensaios de $(T_{CA} - T_{CW})$, devem ser projectadas mais linhas no diagrama *Input-Output*.

A Figura 7 representa um exemplo de um diagrama *Input-Output*.

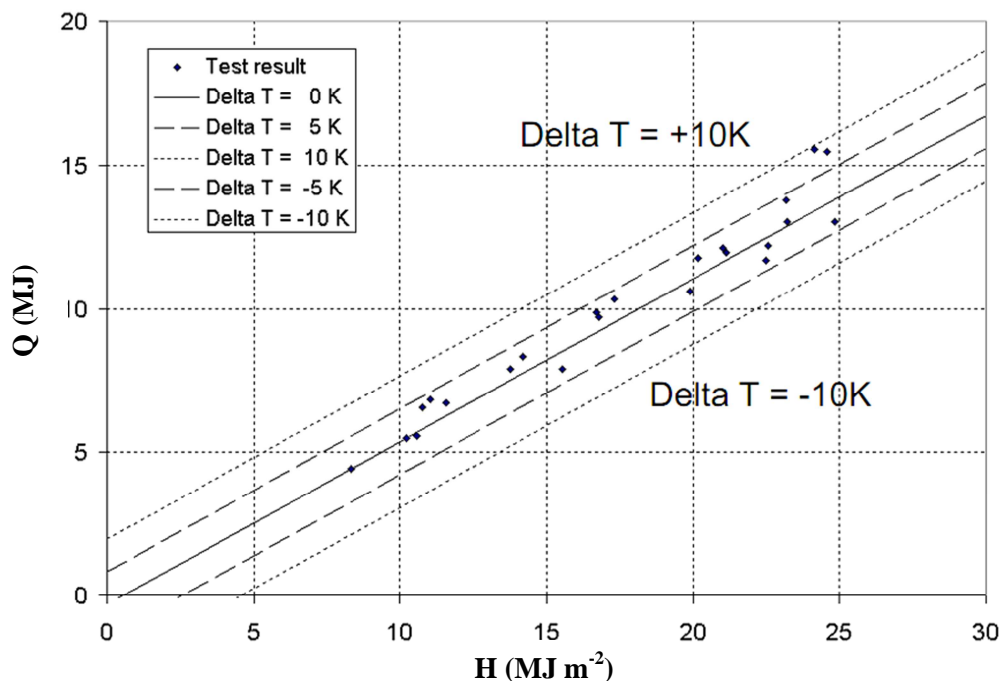


Figura 7 – Energia extraída, Q , em função da irradiação no plano do colector, H . Delta T representa $(T_{CA} - T_{CW})$ (fonte: Carvalho, M.J., 2009).

Condições e procedimento de ensaio

O ensaio deverá ser realizado num período de doze horas centradas no meio-dia solar. No início de cada dia de ensaio, faz-se extracção de água do depósito para três vezes o volume deste, sendo a temperatura da água da rede à entrada do depósito, T_{CW} e o caudal de circulação 600 l h^{-1} , para permitir que todo o sistema fique a uma temperatura uniforme. Desde as seis horas antes do meio-dia solar até seis horas depois do meio-dia solar, o sistema deve operar normalmente sem quaisquer extracções, sendo registadas todas as medições necessárias para o ensaio, já referidos anteriormente (p. ex. irradiação, temperatura ambiente, etc.).

Os ensaios diários deverão ter valores de irradiação entre 8 MJ m^{-2} e 25 MJ m^{-2} e os valores de $(T_{CA} - T_{CW})$ repartidos entre -5 K e 20 K .

No final do dia (seis horas depois do meio-dia solar) é realizada a extracção, retirando um volume de água de três vezes o volume do depósito, ao mesmo tempo que volta a entrar no sistema água à temperatura do início do ensaio, T_{CW} . Caso este volume não seja suficiente para a diferença de temperatura da água extraída e a água que entra no depósito ser inferior a 1 K , continua-se a extracção até esta diferença ser inferior a 1 K .

Determinação do grau de mistura do depósito

Para além do ensaio *Input-Output*, também é realizado um ensaio para determinar a mistura entre a água quente que está no depósito e a água fria que entra no depósito durante a extracção.

Este aspecto é muito importante

O depósito é aquecido até uma temperatura superior a 60 °C. Protege-se o colector da radiação solar e faz-se circular água com um caudal de pelo menos cinco vezes o volume do depósito por hora, parando a circulação quando a água no depósito estiver a uma temperatura uniforme, ou seja, quando a temperatura da água na saída do depósito variar menos de 1 K por um período de quinze minutos. É então feita a extracção de água como para o ensaio *Input-Output*, com um volume de água de três vezes o volume do depósito. É assim determinado o perfil de extracção do depósito, representado graficamente na Figura 8.

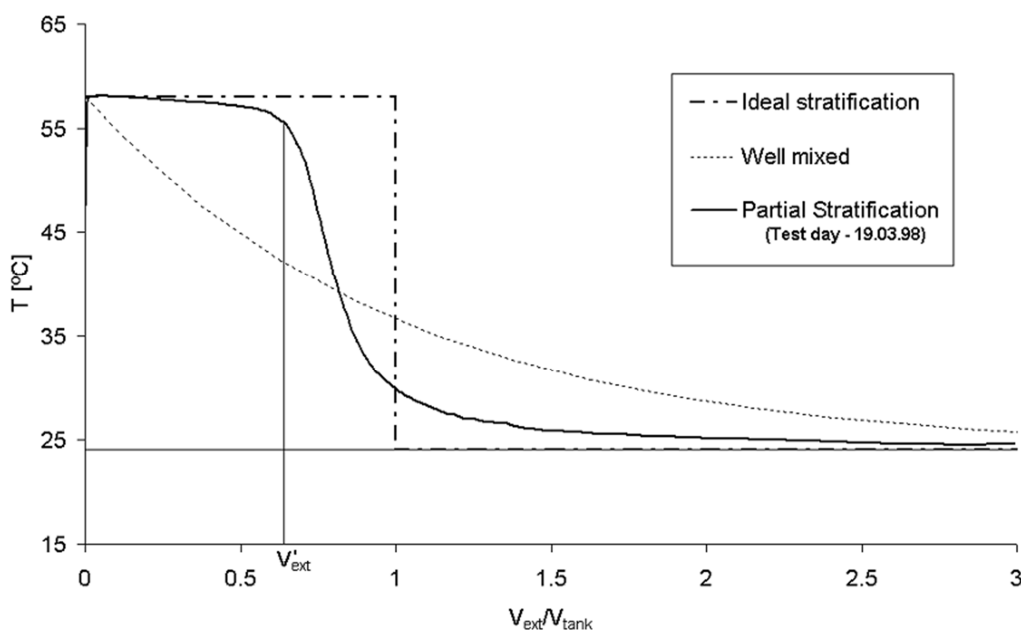


Figura 8 – Exemplos de perfis de extracção, para três sistemas solares térmicos (fonte: Carvalho, M.J., 2009).

O perfil de extracção varia de sistema para sistema, conforme o grau de mistura do depósito. A situação ideal representada na Figura 8, ilustra um sistema em que não existe mistura no depósito, conseguindo-se extrair toda a energia contida no mesmo quando é extraído o volume do depósito.

3.2.1.2 Ensaio de perdas do depósito

O objectivo deste ensaio é calcular o coeficiente global de perdas do depósito, U_s , durante um período nocturno.

Antes do início do ensaio, o depósito é pré-condicionado com água a uma temperatura superior a 60 °C. O ensaio é depois iniciado e o sistema solar térmico funciona normalmente sem que seja realizada qualquer extracção num período de pelo menos doze horas.

São registados os valores de temperatura do depósito no início, T_i , e no final do ensaio, T_f , bem como a temperatura ambiente média durante o ensaio, T_{CA} . Com base nestes valores é determinado o coeficiente de perdas do depósito através da Equação (2), em que V_s representa o volume do depósito e Δt o tempo de arrefecimento.

$$U_s = \frac{4186 \rho_w V_s}{\Delta t} \ln \left[\frac{T_i - T_{CA}}{T_f - T_{CA}} \right] \quad (2)$$

Também é necessário realizar um segundo ensaio para determinar o coeficiente de perdas do depósito com o circuito do colector desligado, assegurando que não ocorre circulação inversa. Este segundo ensaio vai permitir perceber quais são as perdas associadas apenas ao depósito e verificar se existe uma diferença significativa entre perdas apenas do depósito e perdas do sistema completo. Com esta informação pode-se perceber se existe circulação inversa do colector para o depósito durante o período nocturno.

3.2.1.3 Perfis de extracção característicos

Os perfis de extracção característicos são importantes para que se possa ter informação acerca do comportamento do depósito durante o seu funcionamento e para permitir realizar o cálculo do comportamento térmico a longo prazo.

Com base nos ensaios realizados, são calculados perfis de extracção de temperatura e de mistura no depósito, para dias específicos de ensaio, com condições de irradiação e volumes de consumo diferentes. Estes cálculos são realizados de acordo com a norma ISO 9459-2 e estão detalhados neste documento.

3.2.1.4 Cálculo do comportamento térmico a longo prazo

Com base na informação obtida nos ensaios, nomeadamente no diagrama *Input-Output*, no coeficiente global de perdas do depósito, bem como nos perfis de extracção característicos, pode ser calculado o comportamento térmico a longo prazo através do método CSTG. Com base nestes coeficientes, nos dados climáticos locais, e no consumo diário de água quente, pode-se calcular o comportamento térmico do sistema numa base mensal e anual. A previsão a longo prazo tem em conta o somatório da energia fornecida pelo sistema para o período em causa, e para diferentes valores de irradiação, temperatura ambiente, temperatura da água da rede, consumo de água quente e temperatura da água requerida à saída do sistema. O objectivo é fazer uma previsão do comportamento térmico a longo prazo com incerteza inferior a $\pm 5\%$.

O comportamento térmico do sistema é calculado para cada dia do ano, baseando-se nos dados climáticos de cada dia e no consumo de água desse mesmo dia. Para isto tem-se em conta a energia contida no depósito de armazenamento proveniente do dia anterior. Parte desta energia será perdida durante a noite devido às perdas térmicas do depósito, no entanto será suficiente para que no dia seguinte a água contida no depósito esteja a uma temperatura superior à da água da rede.

A determinação da energia extraída do sistema é a soma das energias extraídas nos vários dias de ensaio, representada na Equação (3).

$$Q = Q_{c(1)} + Q_{c(2)} + \dots + Q_{c(n)} \quad (3)$$

Em que $Q_{c(n)}$ representa a energia extraída durante a extracção do dia n .

Para o cálculo da energia total, é efectuado um cálculo da energia extraída no primeiro dia, que tem em conta:

- Energia disponível nas seis horas após o meio-dia solar
- Energia contida no volume de água extraído
- Energia que ficou no depósito e não foi extraída
- Perdas de energia durante a noite

Para o segundo e seguintes dias, é necessário, para além dos pontos referidos anteriormente, ter em conta o facto de o depósito ter sido reenchido com água.

Os cálculos são realizados de acordo com as condições de referência indicadas no anexo B da norma EN 12976-2, estando o cálculo detalhado na norma ISO 9459-2.

3.2.2 Método DST

O método de ensaio dinâmico, designado por DST, foi desenvolvido na Universidade de Munique para fazer a previsão a longo prazo do comportamento térmico de sistemas solares térmicos, e é actualmente o método indicado na norma ISO 9459-5. Tem como principal característica usar um modelo físico e matemático que faz cálculos de comportamento térmico a longo prazo, obtendo os parâmetros característicos do sistema.

A principal vantagem deste método de ensaio reside na possibilidade de obter a caracterização do sistema a longo prazo com menos dias de ensaio.

Para se avaliar o comportamento térmico do sistema, é necessário fazer a determinação dos parâmetros característicos desse sistema. Estes parâmetros são obtidos através de um ajuste não linear, entre os dados experimentais dos ensaios realizados e entre o modelo numérico.

Segundo a norma de ensaio ISO 9459-5, o modelo numérico do ensaio dinâmico, que traduz o balanço térmico do sistema é o indicado na Equação (4).

$$\begin{aligned}
 C_S \frac{\partial T(t, h)}{\partial t} = & \delta_\varepsilon A_C^* \left[G_t^* - u_C^* (T - T_{CA}) \right]^+ \\
 & + \delta_\varepsilon (h + f_{aux} - 1) P_{aux} \\
 & - U_S (T - T_{SA}) \\
 & + \dot{C}_S \left(-\frac{\partial T}{\partial h} + \delta_\varepsilon (h) (T_{CW} - T) \right) \\
 & + \frac{\partial}{\partial h} \left(D_L \dot{C}_S \frac{\partial T}{\partial h} \right) \\
 & + \frac{\partial}{\partial h} \left[b \exp \left(-\frac{a}{\varepsilon} \frac{\partial T}{\partial h} \right) \frac{\partial T}{\partial h} \right]
 \end{aligned} \tag{4}$$

O significado dos membros da equação à direita é, por ordem:

- Ganhos do colector;
- Potência auxiliar;
- Perdas do depósito;
- Modelo *plug-flow*;
- Difusão e convecção;

C_S representa a capacidade térmica do depósito, T é a temperatura de um determinado estrato do depósito, h indica a posição vertical normalizada no interior do depósito e t o tempo. A_C^* representa um parâmetro do sistema - área efectiva do colector, G_t^* representa a irradiância incidente no plano do colector, u_C^* representa um parâmetro característico do sistema, designado por coeficiente de perdas efectivo do colector e T_{CA} representa a temperatura ambiente do colector. P_{aux} é a potência de apoio usada e f_{aux} a fracção do volume do depósito que é utilizada para aquecimento através do apoio. T_{SA} indica a temperatura ambiente do depósito e U_S é o coeficiente de perdas do depósito. \dot{C}_S representa o fluxo de capacidade térmica extraída, podendo ser determinado pela Equação (5):

$$\dot{C}_S = \dot{m}_L C_p \quad (5)$$

T_{CW} indica a temperatura da água da rede à entrada no depósito. D_L representa o coeficiente de mistura do depósito e finalmente, a e b são constantes arbitrárias, sendo o seu valor positivo.

A equação de balanço térmico é resolvida para cada extracto do depósito, considerando-se assim que no primeiro membro da Equação (4) está representada a variação do conteúdo energético do estrato do depósito que se encontra à altura normalizada, h . No segundo membro da Equação (4) estão representados os ganhos e perdas do estrato, que correspondem aos ganhos de energia obtida pelo colector, à perda de energia do depósito para o exterior, à perda de energia devida ao consumo e aos fenómenos de difusão e convecção, respectivamente.

Quando $\varepsilon \rightarrow 0$, a função δ_ε converge para a distribuição de Dirac expressa pela Equação (6):

$$\delta_\varepsilon(x) = \begin{cases} \frac{e^{-x/\varepsilon}}{\varepsilon}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

O fenómeno de convecção é modelado através de um processo de difusão, usando um coeficiente difusivo dependente do gradiente de temperatura e em que a e b são constantes positivas arbitrárias (Spirkl, W et al., 1992).

Os parâmetros característicos do sistema são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Lista de parâmetros característicos de um sistema solar térmico.

Circuito do colector		Depósito	
A_C^*	Área efectiva do colector	D_L	Coeficiente de mistura do depósito
		U_S	Coeficiente de perdas do depósito
u_C^*	Coeficiente de perdas efectivo do colector	\dot{C}_S	Capacidade térmica do depósito
		f_{aux}	Fracção do volume do depósito que é utilizada para aquecimento através do apoio
		S_C	Estratificação do depósito, $Sc=0$ equivale a um permutador de calor imerso no fundo do depósito
		R_L	Resistência térmica do permutador de calor (lado do consumo)

De uma forma simplificada, o método de ensaio consiste em três passos:

1. Ensaios de curta duração, denominadas sequências de ensaio.
2. Identificação dos parâmetros característicos do sistema (ver Equação (4) e Tabela 4) com base nas sequências de ensaio.
3. Previsão, através de *software*, dos ganhos energéticos anuais para uma determinada extracção de água quente do sistema e para condições climáticas de referência, usando para esta previsão os parâmetros determinados anteriormente.

De acordo com o método DST (Spirkl, W et al., 1992), um sistema pode ser descrito por uma equação diferencial, em que cada termo da equação representa um sub-processo do sistema, como se vê na Equação (4). O *software* de código fechado desenvolvido por W. Spirkl, apresenta um algoritmo que permite a identificação dos parâmetros característicos de um sistema solar térmico a partir de ensaios realizados e a previsão a longo prazo com base nesses parâmetros.

3.2.2.1 Procedimento e condições do ensaio DST

Condicionamento do sistema e sequências de ensaio

Antes do início de cada sequência de ensaio, o sistema deve ser condicionado de modo a criar um estado inicial bem definido, ou seja, ter o depósito todo à mesma temperatura. No final das sequências de ensaio também deve ser condicionado o depósito, para avaliar a energia contida no mesmo. Tanto no início como no final das sequências de ensaio, o condicionamento é realizado através da extracção de água com um caudal de aproximadamente 10 l/min, até o depósito ficar a uma temperatura uniforme. Deve ser extraída uma quantidade de água de pelo menos três vezes o volume do depósito, no início e final de cada sequência de ensaio.

O ensaio DST é composto por três sequências de ensaio, designadas por Sequências S-sol, S-store e S-aux. A sequência de ensaio S-sol compreende ensaios durante dias consecutivos, de acordo com condições específicas. A sequência S-store é uma sequência de ensaio para determinação das perdas do depósito e a sequência S-aux consiste num ensaio do sistema com o sistema de apoio integrado ligado, em condições de baixa irradiação.

Sequência S-sol

A sequência S-sol é constituída por duas sequências de ensaio, designadas por sequência do tipo A e sequência do tipo B, em que se realizam medições durante todo o período de funcionamento do sistema, que opera em contínuo. Pretende-se caracterizar o sistema para diferentes estados de funcionamento do colector solar.

As metodologias de ensaio para ambas as sequências são apresentadas seguidamente.

Sequência Tipo A

O objectivo das sequências de ensaio tipo A é caracterizar o sistema, obtendo informação sobre o rendimento do colector em condições de rendimento elevado, ou seja, em condições de entrada da água no colector a temperaturas baixas. Para isto realizam-se extracções, tal como indicado na Tabela 5, com o objectivo de manter sempre baixa a temperatura de entrada no colector. t_0 indica o tempo de início da primeira extracção do dia, que deverá ser entre as 6:30 e as 8:00 (hora solar).

Em situações em que existem em ensaio vários sistemas solares térmicos abastecidos por apenas uma tubagem de água da rede, a norma ISO 9459-5 permite que o início da primeira extracção seja variável de sistema para sistema, mantendo no entanto os intervalos indicados na Tabela 5.

Tabela 5 - Tempos de extracção para sequências de ensaio do tipo A (adaptado de ISO 9459-5).

Nº de extracção	Início da extracção
1	t_0
2	$t_0 + 2 \text{ h } \pm 5 \text{ min}$
3	$t_0 + 4 \text{ h } \pm 5 \text{ min}$
4	$t_0 + 5 \text{ h } \pm 5 \text{ min}$
5	$t_0 + 6 \text{ h } \pm 5 \text{ min}$
6	$t_0 + 8 \text{ h } \pm 5 \text{ min}$
7	$t_0 + 11 \text{ h } \pm 5 \text{ min}$

As extracções devem ter um caudal de cerca de 10 l/min, com a excepção do primeiro minuto de cada extracção, que é recomendável ter um caudal de cerca de 2 l/min, para reduzir erros de medição devido à inércia térmica dos sensores.

O volume de cada extracção depende das dimensões do sistema solar térmico, tal como indicado na Tabela 6. V_S representa o volume do depósito e A_C a área de abertura do(s) colector(es).

Como existe uma ampla gama de sistemas no mercado, tanto com grandes áreas de colectores como grandes volumes de depósitos, não seria realizável fazer apenas uma extracção que servisse a todo o tipo de sistemas. Deste modo, é necessário fazer as extracções em função da razão V_S/A_C , tal como indicado na Tabela 6.

Do mesmo modo que, para permitir uma correcta identificação dos parâmetros é necessário, no caso de sistemas com volumes de depósitos muito elevados, realizar extracções mais curtas de modo a atingir temperaturas mais elevadas, num sistema com uma grande área de colectores será necessário realizar extracções maiores para evitar sobre-aquecimento do sistema.

Tabela 6 – Volumes de extracção para sequências do tipo A (adaptado de ISO 9459-5).

Dimensões do sistema	Volume de extracção
$100 \text{ l m}^{-2} \leq V_S/A_C \leq 200 \text{ l m}^{-2}$	$0,2 V_S \pm 10 \%$
$60 \text{ l m}^{-2} \leq V_S/A_C \leq 100 \text{ l m}^{-2}$	$0,25 V_S \pm 10 \%$
$40 \text{ l m}^{-2} \leq V_S/A_C \leq 60 \text{ l m}^{-2}$	$0,33 V_S \pm 10 \%$
$20 \text{ l m}^{-2} \leq V_S/A_C \leq 40 \text{ l m}^{-2}$	$0,5 V_S \pm 10 \%$

Para a sequência de ensaio do tipo A ser válida, são necessários pelo menos três dias de ensaio nestas condições e com irradiação diária superior a 12 MJ m^{-2} .

Sequência Tipo B

Nas sequências de ensaio do tipo B pretende-se recolher informação sobre o funcionamento do colector a rendimentos mais baixos, e ao mesmo tempo obter informação sobre as perdas de calor no depósito. Para este ensaio, mantém-se o sistema a temperaturas elevadas durante o maior tempo possível, sem deixar o depósito sobreaquecer. Caso esteja presente um sistema de apoio, este pode ser usado para manter o sistema a elevadas temperaturas. Este deve ser ligado no máximo uma hora depois do início da última extracção do dia e desligado no máximo uma hora antes da primeira extracção do dia de ensaio de sequência do tipo B.

Para a realização das sequências do tipo B, é necessário proceder a cinco extracções durante o dia, tal como indicado na Tabela 7. Do mesmo modo que para as sequências do tipo A, t_0 indica a hora de início da primeira extracção, e deve ser realizada entre as 6:30 e 8:00 (hora solar). O caudal das extracções deve ser de aproximadamente 10 l/min , sendo que no primeiro minuto de extracção deverá ser de 2 l/min .

Tabela 7 – Tempos de extracção para sequências de ensaio do tipo B (adaptado de ISO 9459-5).

Nº de extracção	Início da extracção
1	t_0
2	$t_0 + 2 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$
3	$t_0 + 4 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$
4	$t_0 + 6 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$
5	$t_0 + 8 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$

Como na sequência do tipo B é necessário operar o sistema a temperaturas elevadas, é necessário realizar extracções para evitar o seu sobreaquecimento. Os volumes de extracção vão depender, para além das dimensões do sistema, das temperaturas de operação, indicadas na Tabela 8.

Deste modo, a extracção deve terminar quando:

- forem extraídos pelo menos cinco litros, e
- ou 20% de V_S (para o intervalo $20 \text{ l m}^{-2} \leq V_S/A_C \leq 40 \text{ l m}^{-2}$) forem extraídos, ou a temperatura à saída do depósito baixe do valor indicado na Tabela 8.

Tabela 8 – Volumes de extracção e limiar de temperatura para sequências do tipo B (adaptado de ISO 9459-5).

Dimensões do sistema	Temperatura
$100 \text{ l m}^{-2} \leq V_s/A_c \leq 200 \text{ l m}^{-2}$	70 °C
$60 \text{ l m}^{-2} \leq V_s/A_c \leq 100 \text{ l m}^{-2}$	60 °C
$40 \text{ l m}^{-2} \leq V_s/A_c \leq 60 \text{ l m}^{-2}$	50 °C
$20 \text{ l m}^{-2} \leq V_s/A_c \leq 40 \text{ l m}^{-2}$	40 °C

Caso os mecanismos de protecção dos sistemas sejam activados devido a uma temperatura muito elevada de operação, a sequência de ensaio deve ser repetida, reduzindo o limiar de temperatura indicado na Tabela 8. Este facto deve ser devidamente reportado no relatório de ensaio.

Para a sequência de ensaio do tipo B ser válida, são necessários três dias de ensaio (dois dos quais consecutivos) nestas condições e com irradiação diária superior a 12 MJ m^{-2} .

No final das sequências de ensaio A e B, o sistema passou por estados em que o rendimento do colector se situa nas zonas assinaladas no gráfico, representadas na Figura 9, que ajuda a explicar o funcionamento e o rendimento do sistema durante os vários dias de ensaio.

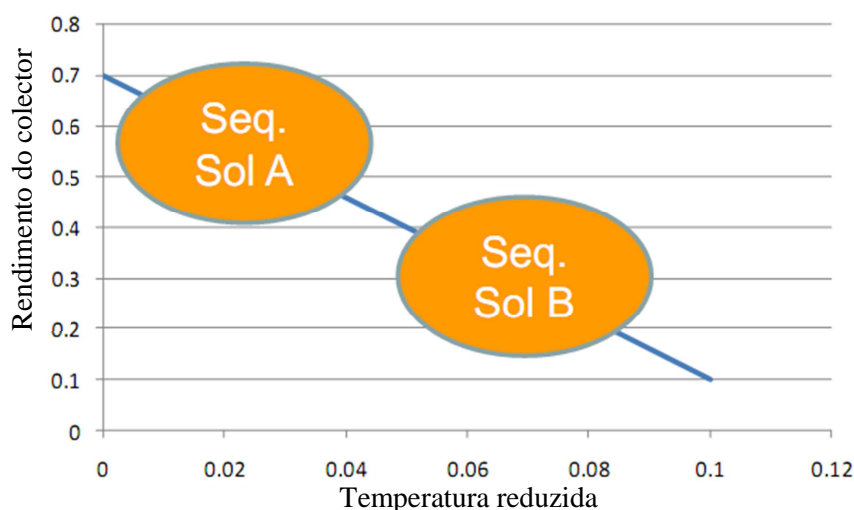


Figura 9 – Representação gráfica dos conjuntos de pontos obtidos para cada tipo de sequência de ensaio, relacionando rendimento do sistema e temperatura reduzida (T_m^*) (fonte: Carvalho, M.J., 2009).

Sequência de ensaio de perdas do depósito S-store

Na sequência S-store, o sistema é colocado numa situação em que as perdas do depósito têm predominância no comportamento do sistema. Esta sequência consiste num condicionamento inicial do sistema do mesmo modo que já foi descrito anteriormente, sendo necessários dois dias consecutivos de sequência de ensaio tipo B, sem uso do sistema de apoio. Seguidamente o depósito é arrefecido entre 36 e 48 horas a partir da última extracção do período de aquecimento. Durante o arrefecimento o colector é tapado e não são realizadas extracções. No final da sequência de ensaio é feito um condicionamento final, realizado do mesmo modo que o condicionamento inicial.

Sequência de ensaio do sistema de apoio S-aux

Com esta sequência de ensaio pretende-se fazer uma caracterização do comportamento do sistema com o apoio ligado e determinar a fracção de volume que é aquecido no depósito pelo sistema de apoio. Durante o ensaio a irradiação deve ser inferior a 200 W m^{-2} e o sistema de apoio deve ser ligado desde $t_0 + 9 \text{ h}$ até $t_0 + 23 \text{ h}$ e mantido desligado fora deste período.

3.2.2.2 Variáveis de *input* e *output*

Para fazer a determinação dos parâmetros característicos do sistema, é necessário fornecer ao modelo determinadas variáveis de entrada, que vão permitir obter os parâmetros do sistema. Na Figura 10 estão representadas as variáveis de *input* (medições realizadas durante os ensaios) e as variáveis de *output* (parâmetros característicos do sistema).

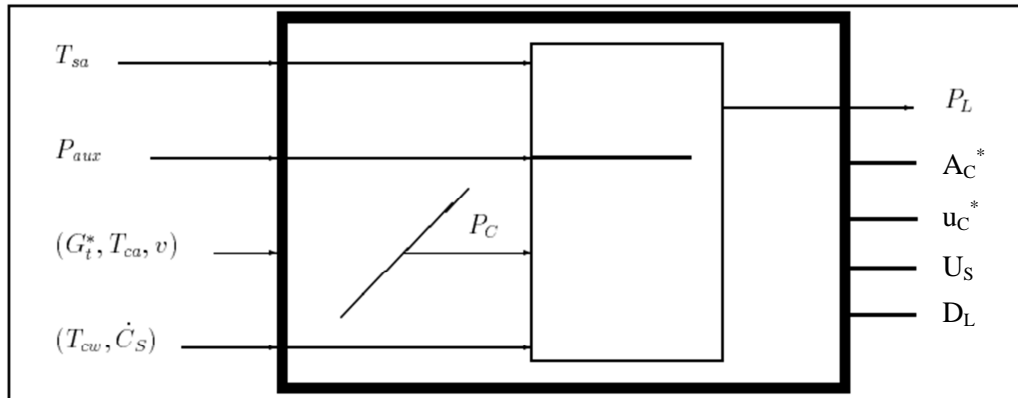


Figura 10 – Variáveis de *input* e *output* medidas no sistema solar. O sistema é tratado como uma caixa negra (adaptado de: SpirkI, W et al., 1992).

Como variáveis de entrada temos:

- Irradiância incidente no plano do colector, G_t^*
- Temperatura ambiente, T_{CA}
- Temperatura ambiente do depósito, T_{SA}
- Temperatura da água da rede na entrada do depósito, T_{CW}
- Caudal da extracção, \dot{m}_L

As variáveis de saída são:

- Potência fornecida pelo sistema, P_L
- Área efectiva do colector, A_C^*
- Coeficiente de perdas efectivo do colector, u_C^*
- Coeficiente de perdas do depósito, U_S
- Coeficiente de mistura, D_L

Na Figura 10, P_L representa a potência fornecida para consumo e P_C representa a potência fornecida pelo circuito do colector para uma temperatura T , dada pela Equação (7).

$$P_C = A_C^* [G_t^* - u_C^*(T - T_{CA})] \quad (7)$$

Os parâmetros característicos são obtidos por ajuste não linear entre o valor P_L experimental e o valor obtido quando considerado o modelo da Equação (4).

O projecto “Sistemas solares térmicos pré fabricados – nova modelação para ensaio dinâmico e validação por monitorização de comportamento térmico a longo prazo” (PTDC/ENR/70844/2006),

tem por objectivo o estudo de métodos e modelos alternativos ao proposto por W. Spirk, e que é adoptado na ISO 9459-5.

4. Projecto e concepção da instalação experimental

Para o desenvolvimento do projecto e para fazer a validação dos métodos e modelos alternativos referidos ao método DST, objectivos do projecto referido anteriormente, foi necessário construir de raiz um circuito hidráulico de ensaio, onde pudessem ser ensaiados dois sistemas solares térmicos. Neste ponto será feita uma descrição do projecto, instalação, equipamentos usados, bem como uma descrição do sistema de aquisição de dados e o sistema de controlo de temperatura instalados. Também serão descritos os sistemas solares térmicos utilizados no âmbito do projecto.

4.1 Projecto da instalação experimental

A instalação experimental foi desenhada para ser instalada num edifício adjacente ao Laboratório de Energia Solar (LES), do LNEG, e tem como função servir ao ensaio a dois sistemas solares térmicos. No âmbito do projecto, foram instalados no exterior do edifício referido, dois sistemas solares térmicos do tipo *kit* termossifão.

No momento do desenho do circuito hidráulico houve a preocupação de evitar o consumo de água da rede, com a adopção de depósitos de armazenamento de grande volume para evitar o abastecimento pela água da rede. Actualmente, no LES, para realizar os ensaios é usado um circuito hidráulico que utiliza a água da rede como água de alimentação aos sistemas solares térmicos, podendo haver um consumo de água de cerca de 1500 litros por dia, num sistema de 300 litros. Com a utilização dos depósitos de armazenamento pode-se ter a mesma água a circular em circuito fechado, evitando os elevados consumos a cada dia de ensaio, como acontece actualmente no LES. Este aspecto é muito importante e a informação prática adquirida através dos ensaios a este tipo de circuito poderá ser usada para a definição de futuros circuitos de ensaio no LES ou mesmo em outros laboratórios semelhantes.

Com a instalação deste circuito hidráulico, será possível fazer o ensaio a dois sistemas solares térmicos e fazer a simulação de diversos perfis de consumo, bem como fazer o cálculo do comportamento térmico a longo prazo através de ensaios.

Os resultados experimentais obtidos através da monitorização dos sistemas por um período de pelo menos um ano, permitirá fazer a validação de um modelo matemático actualmente a ser desenvolvido no LNEG, no âmbito do projecto “Sistemas solares térmicos pré fabricados – nova modelação para ensaio dinâmico e validação por monitorização de comportamento térmico a longo prazo”.

O projecto da instalação foi iniciado em Outubro de 2009, partindo de um esquema base de um circuito hidráulico já existente no laboratório. Depois de analisadas várias configurações possíveis, chegou-se ao esquema final indicado na Figura 11.

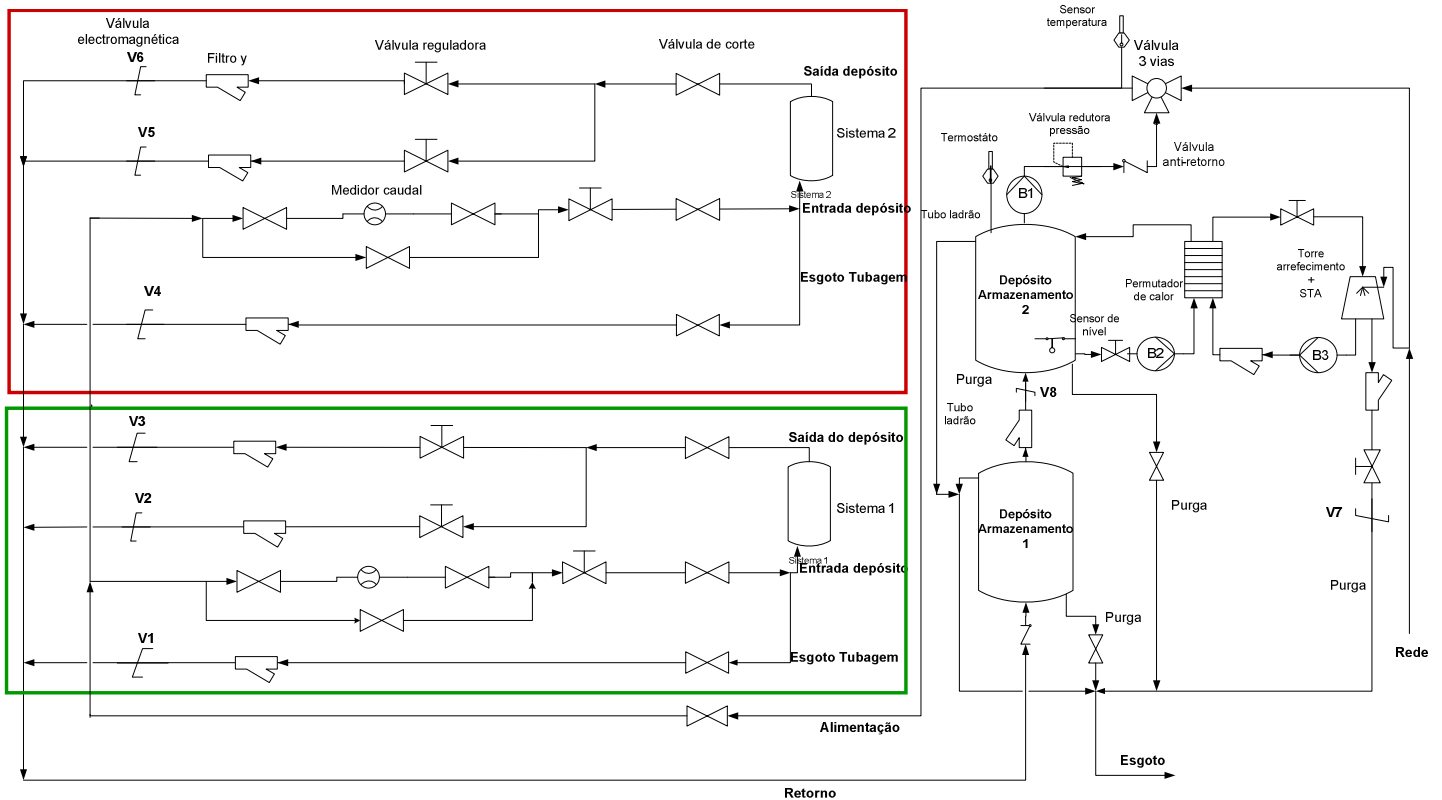


Figura 11 – Esquema final do circuito hidráulico instalado para realização de ensaios a sistemas solares térmicos. A verde é indicada a parte do circuito do sistema solar 1 e a vermelho a parte do circuito destinado ao sistema solar 2.

Princípio de funcionamento

O banco de ensaio em questão é constituído por um circuito hidráulico que abastece com água dois sistemas solares térmicos em ensaio. A tubagem do circuito é em cobre e isolada termicamente com isolamento do tipo *Armaflex*. Os troços no exterior tiveram isolamento com fita de alumínio para proteger o isolamento *Armaflex* da radiação.

São usados dois depósitos de armazenamento para permitir que a água que é extraída dos sistemas solares térmicos seja armazenada no depósito 1. No depósito 2 é armazenada a água que será circulada para os sistemas solares térmicos, no momento das extracções.

Na Figura 12 podem-se observar os sistemas solares térmicos ensaiados no âmbito deste projecto. No ponto “4.4 Descrição dos sistemas ensaiados” serão detalhados os sistemas solares térmicos em questão.



Figura 12 – Sistemas solares térmicos ensaiados no decorrer do projecto. Da direita para a esquerda, sistemas 1 e 2, com depósitos com capacidade para 275 e 200 litros respectivamente.

Água é fornecida aos dois sistemas solares térmicos a uma temperatura próxima da temperatura ambiente, passando num medidor de caudal antes de entrar nos sistemas solares térmicos. Quando é necessário fazer extracções aos sistemas para simular consumos reais, são actuadas as válvulas electromagnéticas, circulando a água contida dos sistemas solares térmicos para o depósito de armazenamento 1.

Durante todo o período de ensaio aos sistemas solares, o depósito 1 tem a função de receber a água proveniente dos sistemas solares térmicos durante as extracções, que será depois encaminhada, por força da gravidade (o depósito 1 fica fisicamente acima do depósito 2) para o depósito 2, que terá a função de fornecer água aos dois sistemas solares térmicos a uma temperatura próxima da temperatura ambiente (entre 15 e 25 °C). Esta temperatura deverá permanecer constante num determinado valor ± 1 °C durante o período de entrada da água para os sistemas solares térmicos. Na Figura 13 estão representados os depósitos de armazenamento instalados no circuito hidráulico. Ambos os depósitos têm capacidade para 2000 litros.



Figura 13 – Localização dos dois depósitos de armazenamento e torre de arrefecimento.

Caso a temperatura da água no depósito de armazenamento 2 não seja suficientemente baixa para o ensaio, a água pode ser misturada com a água da rede, havendo uma válvula misturadora de três vias motorizada com sonda de temperatura a jusante que possibilitará ajustar a temperatura da água para os sistemas solares térmicos.

Associado ao depósito de armazenamento 2, há uma torre de arrefecimento (Figura 14) que tem como função arrefecer, durante um período entre extracções, ou mesmo durante o período nocturno, a água proveniente dos sistemas solares térmicos, para na extracção ou dia seguinte, ser novamente usada a uma temperatura entre 15 e 25 °C. Toda a água extraída das tubagens, bem como dos sistemas solares térmicos, é canalizada para o depósito de armazenamento 1.

O sistema de arrefecimento é constituído por uma torre de arrefecimento, permutador de calor de placas com área de 1,82 m², duas bombas circuladoras (B2 e B3), válvulas reguladoras de caudal, filtro e uma válvula electromagnética V7 que servirá para fazer uma purga constante ao sistema de arrefecimento. Na Figura 14 podem-se observar estes equipamentos. As bombas B2 e B3, ventilador da torre de arrefecimento e válvula electromagnética V7 são actuados no quadro eléctrico através de um relógio temporizador programável. O sistema de arrefecimento é assim accionado através do relógio temporizador durante o período nocturno ou em qualquer outra altura em que seja necessário arrefecer a água e também quando a temperatura for superior a uma qualquer temperatura escolhida no termóstato.

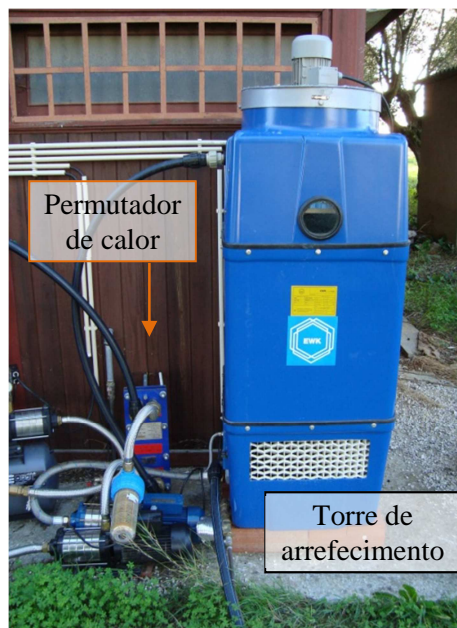


Figura 14 – Equipamentos usados para o arrefecimento da água fornecida aos sistemas solares térmicos.

Em relação ao funcionamento das válvulas, quando é necessário fazer uma extracção de água ao sistema 1, para simular consumos reais, é accionada a válvula electromagnética V1, de modo a ser extraída a água que se encontra na canalização de entrada no sistema solar térmico 1. A função desta extracção é retirar a água que se encontra na tubagem de entrada do depósito. Isto é importante quando, por exemplo, a tubagem de entrada está ao sol, aquecendo a água contida nela. É assim necessário evitar que, no momento da extracção ao depósito, esta água com temperatura mais elevada e que está na tubagem de entrada, seja enviada para o depósito, alterando os valores de temperatura que são medidos no início do ensaio e introduzindo água mais quente no depósito.

Seguidamente são accionadas as válvulas electromagnéticas V2 e V3 para serem efectuadas extracções ao sistema solar a 2 l/min e 10 l/min, respectivamente. A válvula V2 é accionada primeiro para ser efectuada uma extracção de 2 litros durante um minuto. Esta extracção, com a duração de cerca de um minuto, tem como função evitar erros de medição devido à inércia dos sensores de temperatura.

Do mesmo modo, para fazer extracções ao sistema solar térmico 2, é accionada inicialmente a válvula electromagnética V4, de forma a ser extraída a água que se encontra na canalização de entrada no sistema 2, sendo a sua função a mesma da válvula V1, já explicada anteriormente. De seguida são accionadas as válvulas electromagnéticas V5 e V6 para serem efectuadas extracções a 2 l/min e 10 l/min, respectivamente. A bomba B1 é uma bomba com reservatório pressurizado, actuada através de um pressostato que mantém a pressão dentro de uma gama definida.

A válvula V8 controla a passagem de água do depósito 1 para o depósito 2 e é aberta através dum sinal proveniente do quadro eléctrico regulado por um temporizador e sempre que o nível da água no depósito 2 desça abaixo de determinado nível, usando um sensor de nível introduzido no depósito 2 para este efeito. Este sensor assegura que as tubagens onde estão inseridas as bombas estão sempre preenchidas com líquido para o correcto funcionamento das mesmas.

As válvulas electromagnéticas instaladas no circuito hidráulico são semelhantes à representada na Figura 15.



Figura 15 – Válvula electromagnética com activação através de um sinal digital proveniente do sistema de aquisição de dados.

A válvula de três vias motorizada montada no circuito dá prioridade à água proveniente do depósito de armazenamento 2 e só mistura com a água da rede quando a temperatura no depósito for superior ao *setpoint* definido. As electroválvulas V1 a V6 são actuadas por meio de um sinal TTL entre 0 e 5 V, que actuará um relé que por sua vez actuará a válvula com tensão 24 V DC. Este sinal TTL é enviado pelo sistema de aquisição de dados.



Figura 16 – Bomba B1, utilizada para circular a água contida no depósito 2 para os sistemas solares térmicos.

Para fazer a regulação do caudal extraído dos sistemas solares térmicos, optou-se por utilizar válvulas de regulação automáticas, denominadas válvulas *autoflow*, que permitem fazer um ajuste automático do caudal para as gamas utilizadas durante as extracções, nomeadamente 2 l/min e 10 l/min.

Cada válvula *autoflow* tem no seu interior um cartucho que funciona numa determinada gama de caudal e pressão, que foi previamente verificada e assim foram adquiridas as válvulas necessárias aos ensaios neste circuito. Estas válvulas são muito sensíveis a variações de pressão, e fora do seu intervalo de pressão, o seu funcionamento é afectado, havendo variações de caudal significativas, não compatíveis com as normas de ensaio. Foi necessário escolher a gama correcta de funcionamento para cada linha do circuito e foram instalados os cartuchos adequados em cada válvula *autoflow*.

De modo a garantir um perfeito funcionamento das válvulas, foi também necessário instalar na saída da bomba B1 uma válvula redutora de pressão (Figura 17), que foi ajustada para evitar flutuações de caudal e de pressão.



Figura 17 – Válvula redutora de pressão, utilizada para assegurar o correcto funcionamento das válvulas *autoflow*.

Os componentes do circuito hidráulico colocados no interior do edifício, tais como medidores de caudal, válvulas, filtros, etc., foram montados numa estrutura metálica, que por sua vez foi fixa na parede de madeira interior do edifício.

Também foi instalado um quadro eléctrico para fornecer alimentação ao circuito hidráulico e ao sistema de arrefecimento.

Na Figura 18 pode-se observar a parte do circuito hidráulico localizada no interior do edifício, e os seus componentes mais relevantes, depois de terminada a instalação.

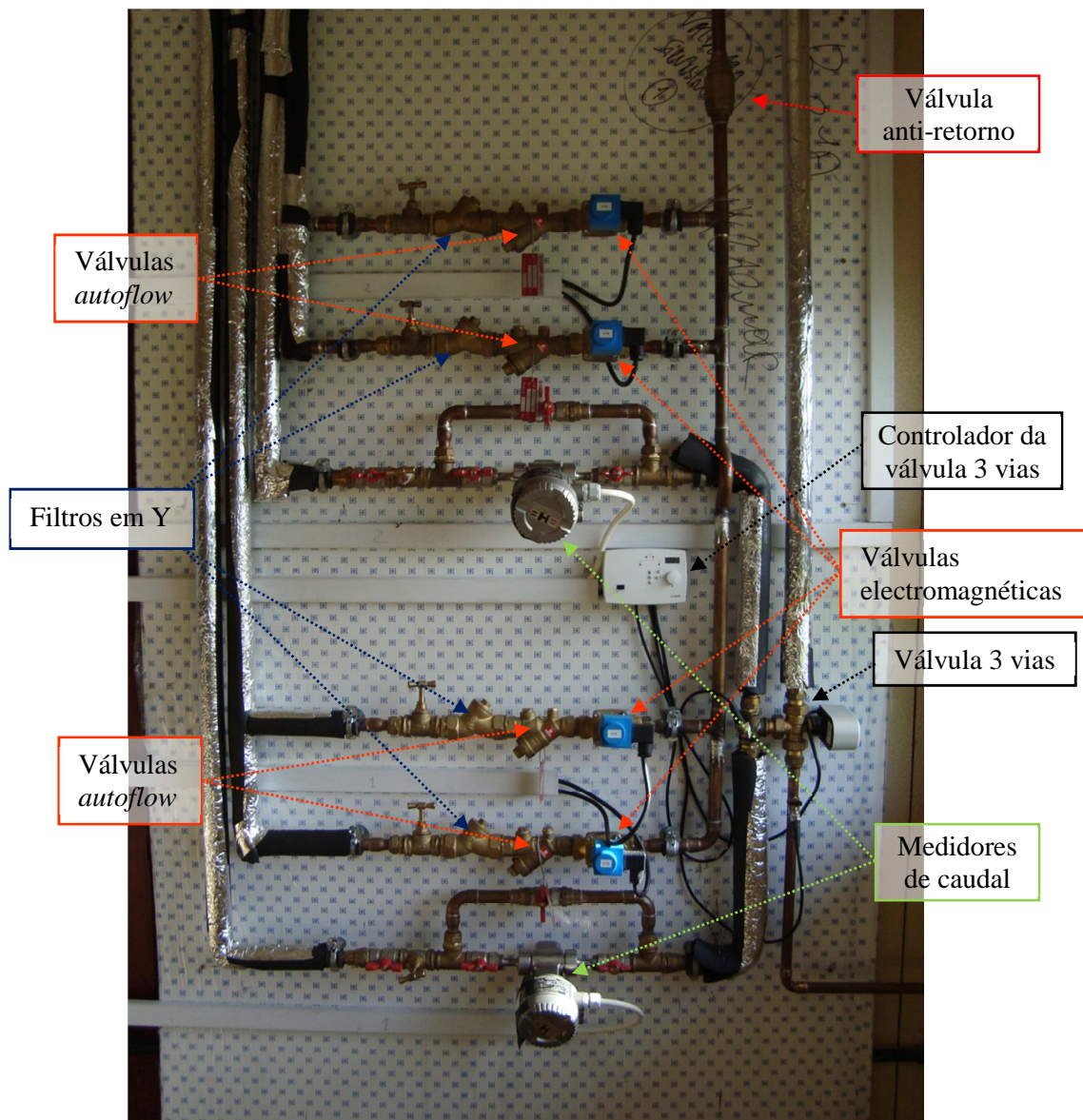


Figura 18 – Circuito hidráulico instalado no interior do edifício.

4.2 Sistema de aquisição de dados

Paralelamente ao projecto do circuito, foram adquiridos os equipamentos necessários à aquisição de dados, nomeadamente:

- Sondas de temperatura PT100-Classe A;
- Medidores de caudal ABB/ISOIL DN10/15;
- Piranómetro Kipp & Zonen CMP3;
- Sistema de aquisição de dados com Multímetro digital e placas de aquisição de dados.

O sistema de aquisição de dados foi instalado no interior do edifício onde se localiza o circuito hidráulico e é constituído por um multímetro digital *Keithley 2700* e duas placas para aquisição de dados. Para operar o sistema de aquisição de dados foi instalado um computador pessoal.

Na primeira placa de aquisição de dados foram ligados todos os sensores de temperatura, medidores de caudal e o piranómetro. Estes equipamentos são lidos no multímetro apenas como função de leitura.

A segunda placa de aquisição tem como função fazer o controlo da bomba B1 e também das electroválvulas V1 a V6.

O *software* de aquisição de dados envia um sinal ao multímetro, que através de um sinal TTL entre 0 e 5 V, actuará um relé, que por sua vez actuará cada uma das electroválvulas V1 a V6.

O *software* de aquisição de dados para o ensaio aos dois sistemas solares térmicos foi desenvolvido no LNEG pelo Eng. José Dias Gomes, que já tinha participado no desenvolvimento do *software* de ensaio actualmente em uso no LES.

Foi necessário proceder a alterações em relação ao *software* antigo, de modo a permitir ter uma maior flexibilidade em termos de agendamento de sequências de ensaio e melhor definição das extracções, podendo ser pré-definidas pelo utilizador. Depois da alteração por parte do Eng. José Dias Gomes, foi necessário realizar alguns testes a esta nova versão do *software* e foram fornecidas sugestões para corrigir alguns problemas.

O programa permite neste momento escolher várias extracções durante o dia, definindo para cada uma destas o volume de extracção pretendido. Com isto pode-se obter perfis de extracção variados e até seguir uma abordagem diferente em relação aos métodos de ensaio correntes a sistemas solares térmicos.

Na Figura 19 está representado o quadro de agendamento do ensaio “*Ad-hoc*” que permite agendar as extracções consoante qualquer hora do dia e qualquer que seja o volume de extracção pretendido, permitindo fazer simulações de consumos muito semelhantes aos reais. Deste modo foi possível ensaiar os sistemas solares térmicos para horas de consumo “reais” tais como as horas de maior consumo de água quente, tipicamente o período à volta das 8:00, 13:00 e 19:00.

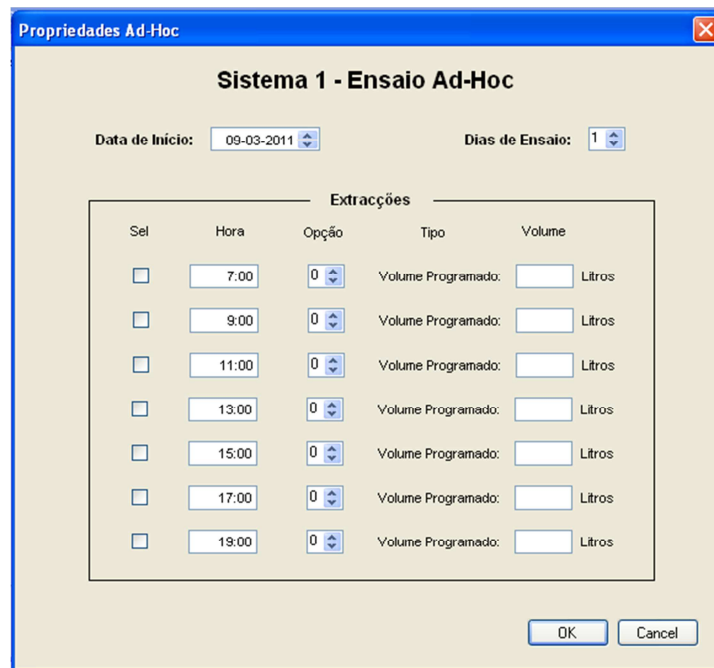


Figura 19 – Quadro de propriedades do ensaio “Ad-hoc”. Podem ser definidos ensaios de acordo com as normas de ensaio ou definir ensaios para qualquer hora e dia, bem como qualquer volume de extracção.

A Figura 20 apresenta o ecrã de operação do *software* de aquisição de dados desenvolvido no LNEG e utilizado para os vários tipos de ensaios, permitindo o ensaio até 3 sistemas solares térmicos simultaneamente.

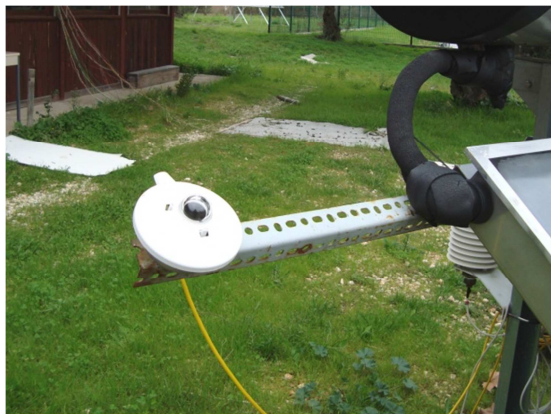


Figura 20 – Quadro de operação do *software* de aquisição de dados. São registadas as temperaturas de entrada e saída da água no depósito, caudal e volume extraído. As extracções são realizadas sempre de acordo com a hora solar. É também indicada a temperatura ambiente e irradiância a cada instante de aquisição.

Durante cada dia de ensaio, o *software* vai registando num ficheiro de texto todos os valores medidos pelos sensores. A cada novo dia de ensaio, vai sendo criado um novo ficheiro de dados, que posteriormente será tratado, fazendo a conversão das grandezas medidas.

Na Figura 21 estão os equipamentos utilizados para fazer a aquisição de dados, nomeadamente: piranómetro para medir irradiância incidente no plano do colector, sondas de temperatura na entrada e saída dos depósitos, medidor de caudal e computador pessoal e sistema de aquisição de dados bem como os conversores dos medidores de caudal.

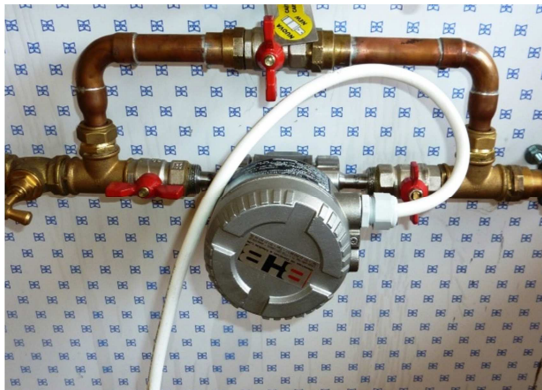
Todos os sensores utilizados no âmbito deste projecto foram calibrados no LES antes da sua utilização nos ensaios. Todas as calibrações foram realizadas de acordo com os procedimentos de calibração de piranómetros, de sondas de temperatura de fluidos, de temperatura ambiente e de medidores de caudal, constantes no manual da qualidade do LES.



a)



b)



c)



d)

Figura 21 – Equipamentos para fazer a recolha de dados dos sistemas: a) piranómetro para recolher os valores de irradiância no plano dos colectores, b) sondas de temperatura à entrada e saída dos depósitos, c) medidor de caudal e d) sistema de aquisição de dados e computador de apoio.

4.3 Construção do circuito de ensaio

Em Novembro de 2009 foi iniciada a consulta a várias empresas para apresentação de orçamentos para a aquisição e instalação do circuito hidráulico e equipamentos necessários para o ensaio aos sistemas solares térmicos que entretanto foram instalados no local de ensaio. Às empresas contactadas foi fornecido um esquema de princípio, mapa de quantidades e um documento com uma breve descrição do circuito a instalar, documentos anexos a este trabalho (ver Anexo 1 e Anexo 2).

Após um período inicial de consulta a vinte e três empresas da área, foram excluídas cinco empresas por se recusarem a apresentar proposta e a realizar o trabalho em questão. Onze das empresas contactadas não apresentaram a proposta no prazo indicado ou não apresentaram sequer proposta. Restando sete empresas com orçamentos apresentados, uma foi excluída por não aceitar as condições de pagamento do LNEG e outra foi excluída por não ter respondido às solicitações de alteração da proposta e não ter fornecido documentação adequada quando pedida. As restantes cinco propostas foram então analisadas detalhadamente.

Foi solicitado a todas as empresas uma visita às instalações onde seria instalado o circuito hidráulico e também uma reunião para discutir detalhes das propostas apresentadas.

Depois de análise detalhada das várias propostas, verificou-se que a maior parte das empresas consultadas apresentaram equipamentos pouco adequados à função de arrefecimento, através de equipamentos que não faziam um arrefecimento adequado, ou atribuindo valores muito elevados para a torre de arrefecimento. Optou-se assim por realizar uma consulta separada para a torre de arrefecimento e sistema de tratamento de água, sendo no entanto da responsabilidade da empresa escolhida a instalação destes equipamentos. O dimensionamento do sistema de arrefecimento e o processo de aquisição destes equipamentos foi feito pelo Doutor Jorge Facão, do LES.

Após um período de reuniões com as empresas consultadas, de algumas alterações ao esquema inicial do circuito, e após análise detalhada das propostas apresentadas, foi escolhida a empresa para fazer a montagem do circuito hidráulico.

A escolha foi baseada em alguns aspectos importantes tais como o tipo de materiais e equipamentos apresentados no orçamento, o facto de ser a proposta com custos inferiores, ou a disponibilidade apresentada para fazer alterações ou modificações, bem como aconselhamento no projecto/instalação do circuito.

Depois de serem ultrapassados alguns obstáculos, por ser uma instalação experimental e pouco convencional em termos de instalações solares térmicas típicas, a instalação do circuito hidráulico e montagem de todos os equipamentos, que foi iniciada em Julho de 2010, foi concluída em Outubro de 2010.

Simultaneamente com a montagem do circuito hidráulico, foi desenvolvido o *software* usado para aquisição de dados. Este *software* foi desenvolvido no LNEG, em conjunto com o Eng. José Dias Gomes, também no âmbito do mesmo projecto. O *software* permite fazer o controlo do ensaio a um, dois ou três sistemas solares térmicos em simultâneo, permitindo programar diferentes extracções e definir várias sequências de ensaio, fazendo a recolha de toda a informação necessária.

No Anexo 3 estão indicadas, por ordem cronológica, as principais actividades desenvolvidas desde o início deste trabalho.

4.4 Descrição dos sistemas ensaiados

Os dois sistemas solares térmicos ensaiados no âmbito deste trabalho, foram previamente ensaiados no LES. O comportamento térmico destes sistemas foi determinado por ensaios através do método dinâmico. Também foram realizados ensaios de fiabilidade, no âmbito da certificação dos sistemas.

A montagem dos sistemas foi realizada de acordo com as indicações fornecidas pelos fabricantes e instalados com orientação sul e com 45 graus de inclinação, usando para este efeito as estruturas já utilizadas quando os sistemas foram instalados no LES.

Ambos os sistemas são termossifão e são sistemas indirectos. Seguidamente, os sistemas serão apresentados em detalhe. Cada sistema tem dois colectores planos ligados em paralelo. Na Tabela 9 é apresentada a informação detalhada dos colectores e na Tabela 10 é apresentada a informação acerca do depósito de cada um dos sistemas.

Tabela 9 – Descrição detalhada dos colectores solares térmicos.

Sistema de 275 litros – sistema 1		Sistema de 200 litros – sistema 2	
Tipo colector	Plano	Tipo colector	Plano
Área total	2000x1000 mm	Área total	2015x1015 mm
Área de abertura	1955x953 mm	Área de abertura	1967x966 mm
Área de absorsor	1937x930 mm	Área de absorsor	1932x909 mm
Material da cobertura	Vidro	Material da cobertura	Vidro
Material do isolamento	Lã de rocha	Material do isolamento	Lã de rocha
Espessura do isolamento	40 mm	Espessura do isolamento	40 mm
Material da caixa	Alumínio	Material da caixa	Alumínio
Peso do colector	39 kg	Peso do colector	53 kg
Material do absorsor	Alumínio	Material do absorsor	Cobre
Espessura do absorsor	0,5 mm	Espessura do absorsor	0,2 mm
Material dos tubos	Cobre	Material dos tubos	Cobre

Tabela 10 – Descrição detalhada dos depósitos acumuladores.

Sistema de 275 litros – sistema 1		Sistema de 200 litros – sistema 2	
Volume do depósito	275 litros	Volume do depósito	200 litros
Diâmetro exterior	580 mm	Diâmetro exterior	490 mm
Comprimento exterior	2000 mm	Comprimento exterior	1850 mm
Material do isolamento	Poliuretano	Material do isolamento	Poliuretano
Espessura do isolamento	50 mm	Espessura do isolamento	55 mm
Tipo de permutador de calor	Dupla camisa	Tipo de permutador de calor	Tubo em serpentina

Durante o período de Inverno, devido às baixas temperaturas registadas em Lisboa, optou-se por fazer o reenchimento do circuito primário, adicionando anti-congelante em ambos os sistemas. O anti-congelante foi misturado com água nas quantidades indicadas pelos fabricantes dos sistemas e o enchimento realizado de acordo com as indicações nos respectivos manuais.

Deste modo, para o sistema 1 (sistema de 275 litros), foram adicionados 3 litros de anti-congelante, sendo adicionados mais 11,3 litros de água, totalizando 14,3 litros de fluido no circuito primário.

Em relação ao sistema 2 (sistema de 200 litros), foram adicionados 2 litros de anti-congelante, com mais 9,4 litros de água, totalizando 11,4 litros de fluido no circuito primário deste sistema.

5. Resultados

5.1 Validação do circuito de ensaio

Um dos principais objectivos com a realização deste trabalho experimental foi, para além da futura validação experimental do modelo em desenvolvimento no LNEG, a construção de um circuito novo que permitisse o ensaio a sistemas solares térmicos segundo a norma EN12976-2, tendo em consideração a redução dos consumos de água.

Após instalação do circuito hidráulico procederam-se a vários ensaios para verificar se a operação do mesmo era feita de acordo com o esperado e com o exigido pelas normas de ensaio.

No ponto “5.1.5 Problemas observados e melhoria do circuito” são apresentadas as observações mais importantes sobre o funcionamento, dificuldades encontradas durante a instalação e durante os ensaios realizados, resolução de alguns problemas e oportunidades de melhoria do circuito hidráulico.

5.1.1 Tubagem

A norma ISO 9459-5 refere que a tubagem do circuito de ensaio deve ser o mais curta possível, para minimizar os efeitos do ambiente nas tubagens e consequentemente na temperatura de entrada dos sistemas. Por diversas condicionantes, como não foi possível construir o circuito com um comprimento de tubagem reduzido, foi necessário isolar muito bem todo o circuito para evitar perdas térmicas.

5.1.2 Temperatura da água de entrada nos sistemas

Na norma ISO 9459-5, é referido na secção “6.2.1 Temperatura de água da rede” que a temperatura de água da rede não se deve afastar ± 10 K da temperatura ambiente e que se deve manter entre os 5 °C e 25 °C em todas as sequências de ensaio (ISO 9459-5). Apenas em alguns ensaios, devido a temperaturas ambiente extremamente elevadas no período de Verão, se verificaram temperaturas acima dos 25 °C para a água da rede, mas em nenhum dos ensaios realizados se verificaram diferenças superiores a 10 K em relação à temperatura ambiente.

Outro aspecto importante refere-se à variação da temperatura da água da rede ou mais correctamente a temperatura de entrada da água no depósito do sistema solar, uma vez que neste caso o objectivo seria evitar o abastecimento através da água da rede e fazê-lo a partir do depósito de armazenamento 2 durante a extracção. A ISO 9459-5 refere que a temperatura da água à entrada do depósito deve manter-se constante dentro de 3 K em cada sequência de ensaio e a sua variação deve ser inferior a 2 K/hora.

Observando a Figura 22, que representa uma extracção durante um dia de ensaio, pode-se confirmar que a temperatura de entrada no sistema se mantém dentro dos valores indicados na norma, havendo uma variação muito reduzida. Em condições normais de funcionamento e para a maior parte dos ensaios realizados até Março de 2011, observou-se que a variação máxima da temperatura de entrada nos sistemas foi inferior a 1 K durante um dia de ensaio. No caso das sequências de ensaio realizadas pelo método DST, a diferença de temperatura em toda a sequência de ensaio foi inferior a 3 K.

Com o aumento da temperatura ambiente nos meses de Maio e de Verão, e devido ao depósito 2 não ter isolamento térmico, foi difícil manter constante a temperatura da água de entrada nos sistemas dentro de 3 K, principalmente nos dias em que ocorreram grandes diferenças de temperatura entre a temperatura mínima e a temperatura máxima. Durante parte do dia o depósito também recebia radiação solar, contribuindo para o aumento da temperatura da água no seu interior. No ponto “5.1.5 Problemas observados e melhoria do circuito”, são apontados os principais problemas observados no circuito e são apresentadas sugestões de melhoria para resolver alguns dos problemas do circuito hidráulico.

O abastecimento de água aos sistemas solares térmicos em todos os ensaios foi realizado apenas com água proveniente do depósito de armazenamento 2, tendo este depósito capacidade para 2000 litros. Deste modo a água circula sempre em circuito fechado e não existe consumo adicional de água da rede.

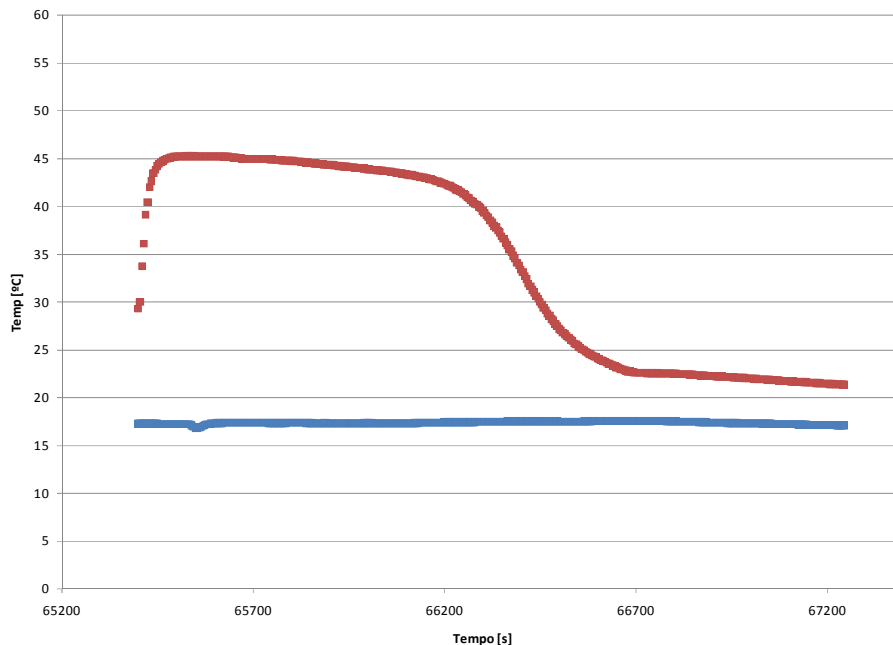


Figura 22 – Perfil de extração realizado ao sistema solar térmico 1, para um volume de extração de 275 l. A azul está indicada a temperatura de entrada do depósito do sistema solar térmico e a vermelho a temperatura de saída do mesmo depósito.

5.1.3 Sistema de arrefecimento

O sistema de arrefecimento opera sempre que necessário, devendo ser ligado directamente no quadro eléctrico pelo utilizador ou podendo ser programável através do relógio temporizador existente no mesmo quadro eléctrico.

Dependendo das extracções que se pretendam, pode haver necessidade de actuar o sistema de arrefecimento para arrefecer a água de abastecimento aos sistemas solares térmicos. No entanto e em relação aos ensaios realizados durante o período de Novembro de 2010 a Fevereiro de 2011, não houve necessidade de actuar o sistema de arrefecimento para a água contida no depósito de armazenamento 2, pelo facto de haver um grande período de tempo disponível para fazer o arrefecimento natural durante o período nocturno (pelo menos 10 horas), período este em que são atingidas temperaturas ambiente mínimas muito baixas. Assim, ao início do dia ou em outra altura do mesmo, e nesta altura do ano (Novembro - Fevereiro), a água de abastecimento aos sistemas solares térmicos mantém-se sempre dentro dos valores exigidos, (5-25 °C) sem necessidade de actuação da torre de arrefecimento.

Em relação ao período de Verão, devido à temperatura ambiente elevada, foi necessário actuar o sistema de arrefecimento de modo a ter a temperatura desejada antes da realização da extração. Consoante o tipo de extração e a hora a que é realizada, é utilizado o relógio temporizador para actuar a torre de arrefecimento.

Devido a uma menor utilização da torre de arrefecimento em períodos do ano com temperaturas baixas, foi necessário evitar o crescimento de algas e outros microrganismos, pelo que foi adquirido junto com a torre de arrefecimento um líquido biocida, que foi aplicado na torre de arrefecimento nas quantidades indicadas pelo fabricante.

5.1.4 Caudal de extracção

A regulação do caudal de extracção apresentou-se uma tarefa difícil de realizar. A regulação do caudal de extracção foi sempre assegurada pelas válvulas *autoflow*, que fazem uma regulação automática do caudal numa determinada gama de pressão.

Depois de um período inicial, em que foi necessário fazer o ajuste da gama de pressão em que a bomba opera, foi possível atingir um caudal estável de 2,1 l/min para o início de extracção (tal como indicado na norma) e 9,3 a 10 l/min para o restante período de extracção realizada aos dois sistemas solares térmicos (a norma refere 10 ± 1 l/min).

A Figura 23 apresenta os valores de caudal registados pelo medidor de caudal 2, para uma extracção de 200 litros, ao sistema solar térmico 2 (extracção realizada em Fevereiro de 2011). Pela análise do gráfico, pode observar-se que o caudal mantém-se constante durante o período de extracção, com uma pequena variação, mas com o caudal a manter-se sempre entre 9,4 e 9,7 l/min.

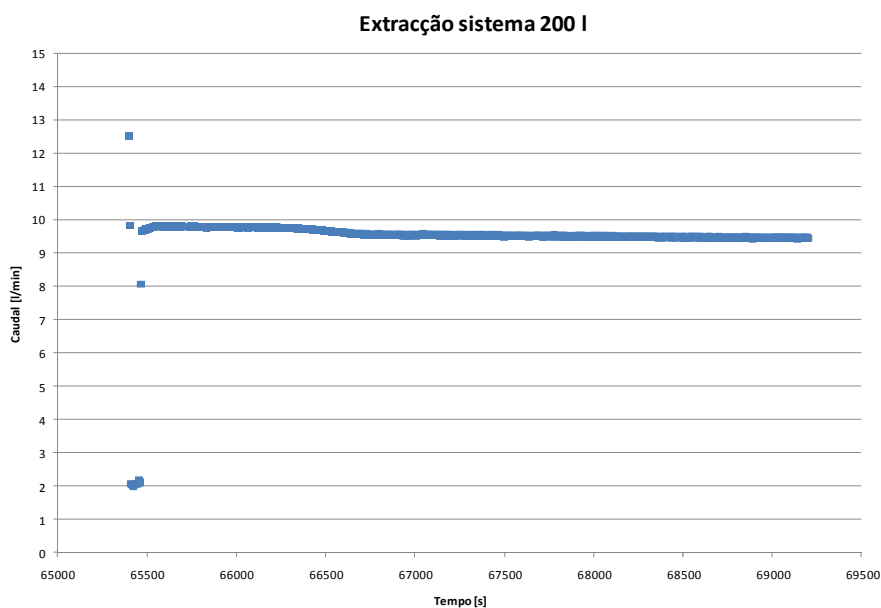


Figura 23 – Extracção realizada ao sistema solar térmico 2, com o caudal registado dentro dos valores exigidos pela norma ISO 9459-5.

Uma vez que o sistema solar térmico 2 tem um volume de depósito de 200 litros e o sistema solar térmico 1 tem um volume de 275 litros, a extracção ao sistema 2 termina antes do final do sistema 1, que vai continuar em extracção durante mais uns minutos, operando individualmente. Verificou-se inicialmente que quando a extracção se realizava apenas ao sistema solar térmico 1, este caudal reduzia-se para 8,7 l/min no final da extracção, tal como se pode observar na Figura 24.

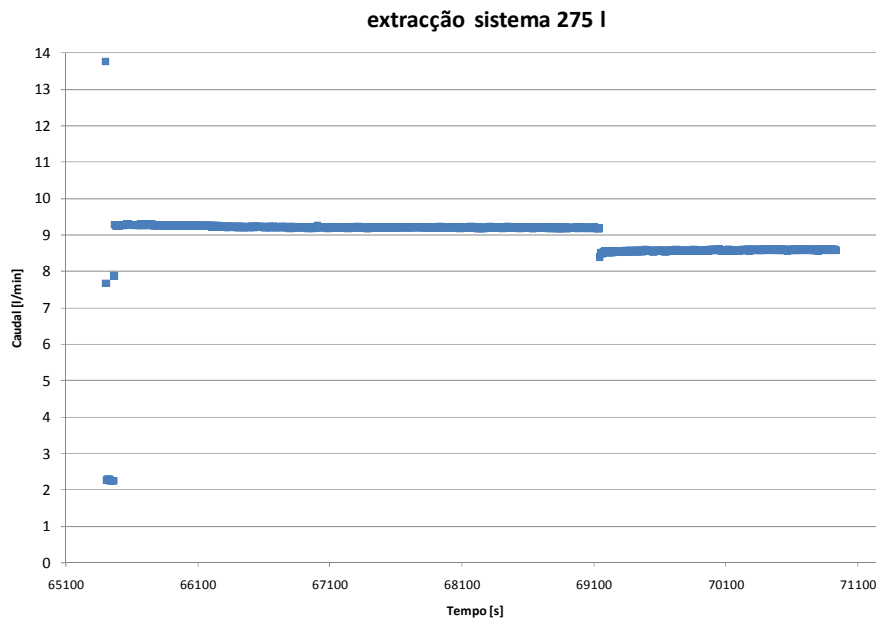


Figura 24 – Extracção realizada ao sistema solar térmico 1, onde se observa diminuição do caudal de extracção após o fim da extracção ao sistema solar térmico 2, de menor volume de depósito.

Este fenómeno poderá ter ocorrido devido a alguma obstrução na tubagem que fornece água ao sistema solar térmico 1. Após manutenção realizada ao circuito hidráulico, nomeadamente limpeza dos filtros em Y, válvulas electromagnéticas e também às válvulas *autoflow*, deixou de se observar durante alguns ensaios esta redução brusca quando o sistema solar térmico 1 operava individualmente. A partir desta manutenção, verificou-se caudal estável durante as extracções, em ambos os sistemas solares, tanto em operação em simultâneo, como em operação individual, onde se verificava o problema de redução de caudal.

Na Figura 25 ainda se pode observar uma variação, embora menos evidente, circulando o caudal ainda dentro de 10 ± 1 l/min.

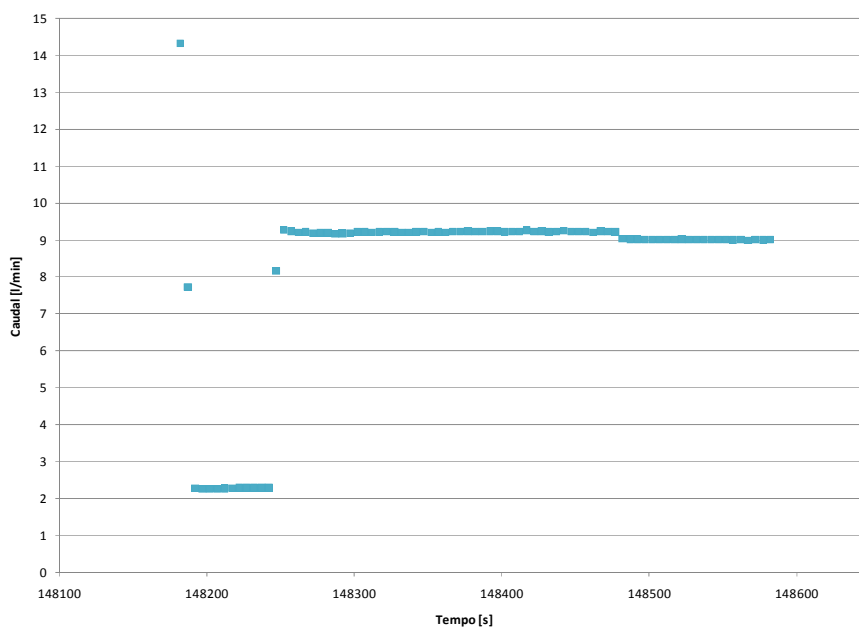


Figura 25 – Caudal estável em 2,3 l/min no início da extracção e entre 9,3 e 9,0 l/min durante uma extracção ao sistema 1.

Infelizmente e após alguns dias de ensaios, o problema da redução de caudal no sistema 1 voltou a observar-se. No ponto “5.1.5 Problemas observados e melhoria do circuito”, é analisado com maior detalhe este problema.

5.1.5 Problemas observados e melhoria do circuito

Durante o funcionamento do circuito hidráulico, foram observados alguns problemas, alguns já apontados no decurso deste trabalho.

Os principais problemas observados na realização dos ensaios foram:

- Regulação do caudal durante as extracções a 10 l/min
- Temperatura da água de entrada nos sistemas solares térmicos

Relativamente ao caudal durante as extracções, o principal problema residiu na regulação durante as extracções a 10 l/min no circuito hidráulico do sistema 1. Esta linha do circuito apresentou sempre um caudal inferior quando se tentava realizar extracções aos dois sistemas em simultâneo. Este problema já apontado em “5.1.4 Caudal de extracção”, tentou resolver-se com uma limpeza ao circuito hidráulico, nomeadamente às válvulas electromagnéticas, filtros em Y, válvulas *autoflow* e torre de arrefecimento. Esta solução apenas resolveu o problema parcialmente e temporariamente, com a extracção do sistema 1 a funcionar, embora durante pouco tempo, a cerca de 9,1 l/min em vez dos 8,7 l/min já apontados.

Uma possível explicação poderá ser a entrada de ar no circuito quando este opera com apenas uma extracção ou mesmo com o funcionamento da bomba circuladora, que não é a bomba mais indicada para este tipo de circuito. No entanto, e devido à indisponibilidade da empresa instaladora em fornecer a bomba que tinha sido pedida no momento da instalação, optou-se por esta solução para evitar mais atrasos.

Uma sugestão de melhoria seria a colocação de um purgador de ar automático, num ponto alto do circuito, para remover bolhas de ar que se possam acumular na tubagem do circuito hidráulico. Esta solução implica a abertura do circuito e brassagem da tubagem de cobre.

Outra opção poderia ser a substituição da bomba circuladora ou mesmo a substituição das válvulas *autoflow* por válvulas de regulação do tipo TA, que têm boa precisão e são fiáveis. Este tipo de válvulas é usado no LES para fazer a regulação de caudal em diversos ensaios.

Em relação à temperatura da água de entrada nos sistemas solares térmicos, após a instalação dos depósitos e os primeiros testes para fazer a validação e verificação do correcto funcionamento do circuito, observou-se que o depósito de armazenamento 2, do qual é enviada a água para os sistemas solares térmicos, recebia radiação solar durante parte do dia. Como o depósito tem cor preta (ver Figura 13), durante algumas horas o sol aquecia o depósito, elevando a temperatura da água no seu interior.

Para resolver o problema referido, optou-se por uma solução simples mas eficaz, fazendo o isolamento do depósito com um material reflector. A opção usada no isolamento foi um material constituído por uma espuma de cerca de três milímetros com uma película plástica reflectora à superfície.

Na Figura 26 pode-se observar a alteração realizada, que evitou o aquecimento do depósito devido à radiação solar.



Figura 26 – Depósito de armazenamento 2, isolado com uma capa reflectora, evitando o aquecimento da água devido à exposição à radiação solar.

Esta alteração no circuito hidráulico reduziu a temperatura de entrada da água nos sistemas solares térmicos, que principalmente no período de Verão era afectada pelo facto dos depósitos de armazenamento aquecerem devido à radiação solar, aumentando ao longo do dia a temperatura da água de entrada nos sistemas para além dos ± 3 °C exigidos pela ISO 9459-5.

Antes da alteração, durante algumas horas, o depósito recebia radiação solar, aquecendo a água que era depois enviada para os sistemas. A variação durante um dia de ensaio era por vezes superior a 5 °C, muito superior aos ± 3 °C exigidos.

Depois de efectuadas as alterações, foram realizados ensaios para verificar se a variação de temperatura da água de entrada nos sistemas estava de acordo com a norma. Para isto foram realizados ensaios segundo o método DST, sequências do tipo A e B.

Na Figura 27 observa-se que a temperatura de entrada nos sistemas começou nos 19,4 °C e ao longo do dia chega a atingir os 23,5 °C. Na Figura 27, os pontos mais abaixo compreendidos entre os 20 e 25 °C representam a temperatura de entrada no sistema e os pontos mais acima representam a temperatura de saída do sistema. É visível um aumento da temperatura de entrada no sistema ao longo do dia devido ao aquecimento da água contida no depósito.

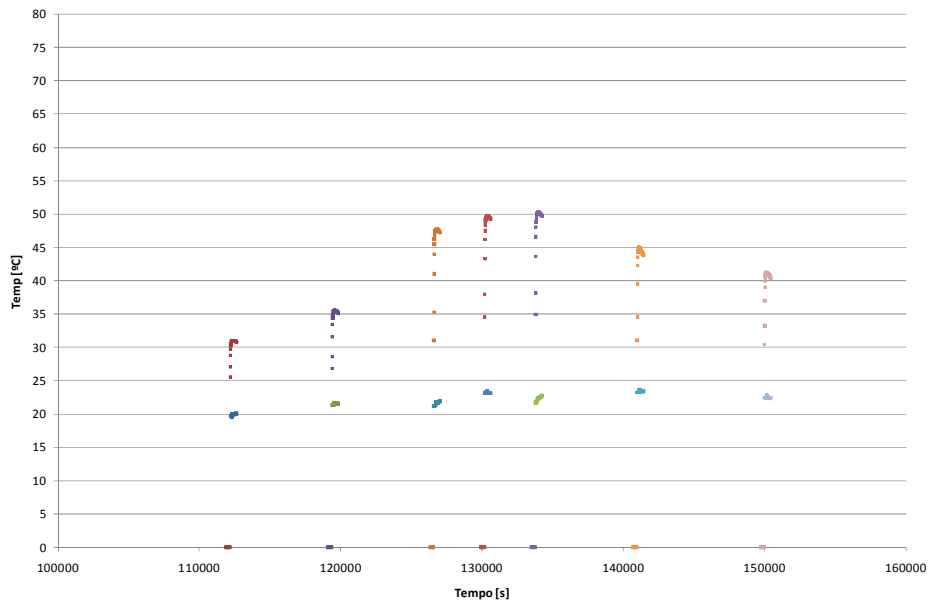


Figura 27 – Perfil de extração de um dia de ensaio pelo método DST, ao sistema 1, de 275 l. Sequência de ensaio do tipo DST-A, com 7 extrações diárias realizadas.

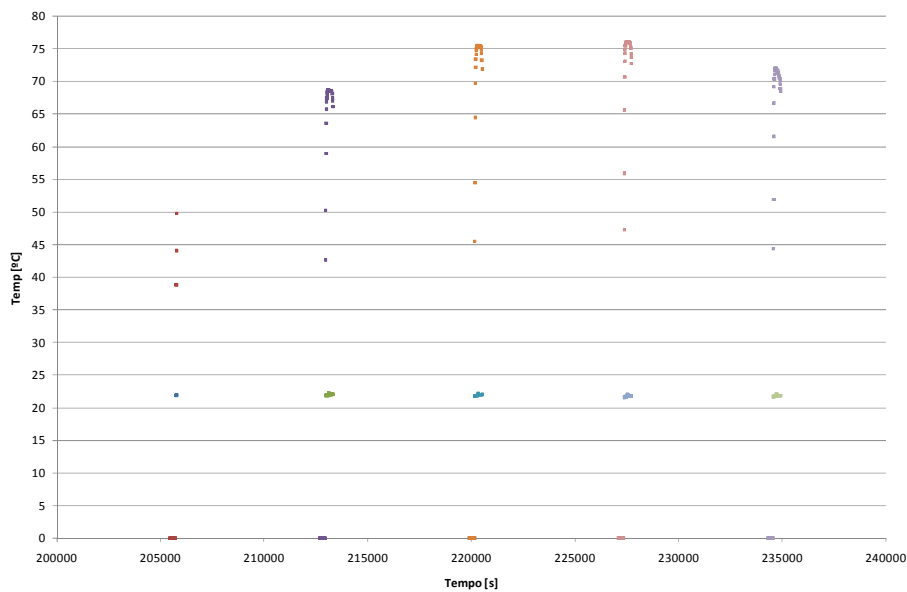


Figura 28 – Perfil de extração de um dia de ensaio pelo método DST, ao sistema 1, de 275 l, depois do isolamento do depósito, onde se observa a temperatura de entrada constante ao longo de todo o dia. Sequência de ensaio do tipo B, com 5 extrações realizadas

Na Figura 28, os pontos mais abaixo, compreendidos entre os 20 e 25 °C, representam a temperatura de entrada no sistema e os pontos mais acima representam a temperatura de saída do sistema.

Com os novos ensaios realizados após a colocação da capa reflectora, comprovou-se que a temperatura de entrada da água nos sistemas mantinha-se constante ao longo do dia, com variações sempre inferiores a 3 °C. No dia de ensaio pelo método DST, sequência do tipo B, apresentado na Figura 28, a variação é inferior a 1 °C.

Uma observação final referente à capacidade dos depósitos deve ser feita. Apesar da capacidade anunciada ser de 2000 litros, os depósitos têm uma geometria que não permite que toda a água contida neles consiga ser recuperada, uma vez que a saída dos depósitos é feita a alguns centímetros do fundo e parte da água contida no lado esquerdo do depósito não escoa naturalmente para a saída. Isto vai fazer com que exista sempre alguma água que não vai sair do depósito para os sistemas solares

térmicos, sendo necessário enviar água do depósito de armazenamento anterior para compensar esta falha.

5.2 Resultados obtidos com o método DST

5.2.1 Determinação dos parâmetros característicos

Foram realizadas sequências de ensaio segundo a norma ISO 9459-5 para tentar reproduzir as sequências de ensaio já realizadas no LES, durante os ensaios de certificação realizados aos sistemas em análise. Um dos principais objectivos destes ensaios foi confirmar os parâmetros dos sistemas já obtidos através dos ensaios usando o método DST.

Foram realizadas sequências de ensaio do tipo A, B e sequência de perdas (ver ponto 3.2.2.1 Procedimento e condições do ensaio DST), de acordo com a norma ISO 9459-5. Os dados obtidos dessas sequências de ensaio foram tratados recorrendo ao *software* DST, que é o utilizado no LES para obter os parâmetros característicos dos sistemas e para determinar o comportamento térmico a longo prazo do sistema. O *software* DST corre em ambiente DOS e usa um método de ajuste dinâmico para a determinação dos parâmetros (Spirkl, W et al., 1992).

Os procedimentos seguidos, tanto ao nível do ensaio, como do tratamento de dados pós-ensaio foram os usados no LES.

Depois de realizadas as várias sequências de ensaio, foram determinados os conjuntos necessários para a obtenção dos parâmetros. Foram criados dois conjuntos de sequências A, B e perdas para cada sistema solar térmico. Desses dois conjuntos, foi escolhido o que apresentava melhor qualidade em termos de resultados, sendo esta escolha feita pelos parâmetros que apresentavam o menor valor da função “*objective*”. O “*objective*” traduz a diferença entre a potência medida experimentalmente e a potência simulada com um conjunto de parâmetros determinado.

Para o sistema 1, de 275 l, a determinação de parâmetros resultou nos valores apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Comparação entre parâmetros característicos obtidos para o sistema 1, de 275 l.

	A_C^* (m^2)	u_C^* ($W K^{-1} m^{-2}$)	U_S ($W K^{-1}$)	C_S ($MJ K^{-1}$)	D_L (-)	S_C (-)	objective (W)
Ensaio LES (2008)	1,996	8,456	2,783	1,087	0,094	0,051	27,989
desvio padrão	0,027	0,464	0,212	0,018	0,019	0,009	-
Ensaio Projecto (Abril-Junho 2011)	1,759	3,090	3,213	1,123	0,049	0,000	28,394
desvio padrão	0,030	0,534	0,266	0,014	0,010	0,006	-

No sistema de 275 l, observa-se uma maior diferença entre parâmetros, sendo mais visível nos parâmetros A_C^* e u_C^* .

No entanto, a previsão realizada no ponto “5.3 Simulação de perfis de consumo e previsão a curto prazo”, veio comprovar que os parâmetros obtidos nos ensaios do projecto, em 2011, mostram um melhor ajuste aos ensaios de previsão a curto prazo. Este melhor ajuste fornece resultados muito semelhantes entre os dados experimentais e a modelação realizada pelo *software*, ao contrário do que se tinha inicialmente, usando os parâmetros característicos do sistema, com ensaios do LES em 2008.

A comparação entre os parâmetros característicos do sistema 2, de 200 l, obtidos através dos ensaios realizados entre Abril e Maio de 2011, e os obtidos através dos ensaios realizados anteriormente no LES, em 2009, é apresentada na Tabela 12.

Tabela 12 – Comparação entre parâmetros característicos obtidos para o sistema 2, de 200 l.

	A_c^* (m ²)	u_c^* (W K ⁻¹ m ⁻²)	U_s (W K ⁻¹)	C_s (MJ K ⁻¹)	D_L (-)	S_c (-)	objective (W)
Ensaio LES (2009)	2,067	6,458	2,372	0,719	0,271	0,002	32,276
desvio padrão	0,033	0,314	0,184	0,016	0,041	0,019	-
Ensaio Projecto (Abril-Maio 2011)	2,124	8,690	2,978	1,190	0,042	0,109	31,374
desvio padrão	0,040	0,670	0,250	0,016	0,010	0,014	-

A comparação de parâmetros é difícil de realizar, já que os vários parâmetros estão relacionados entre si e mesmo havendo uma diferença mais clara, por exemplo no parâmetro u_c^* (Coeficiente de perdas efectivo do colector), esta diferença pode ser compensada por outro parâmetro. Na matriz de correlação, não existe nenhum parâmetro com correlações superiores a 0,56. Parâmetros com uma elevada correlação, acima de 0,9 poderão ter que ser calculados novamente pela incerteza associada aos mesmos.

5.2.2 Determinação do comportamento térmico a longo prazo

Após a determinação dos parâmetros para cada sistema, foi feito o cálculo do comportamento térmico a longo prazo de ambos os sistemas.

No âmbito dos ensaios de certificação de sistemas solares térmicos e segundo a norma EN 12976-2, a determinação do comportamento térmico a longo prazo é realizado segundo o ponto “5.8 Caracterização do rendimento térmico” da EN 12976-2, que depois remete para os métodos de ensaio da ISO 9459-5.

A norma especifica condições de referência uniformes para o cálculo do comportamento térmico anual dos sistemas. No caso de sistemas solares térmicos sem apoio, como os dois sistemas ensaiados neste projecto, os indicadores de rendimento calculados são:

- Energia fornecida pelo sistema solar térmico (Q_L)
- Fração solar (F_{sol})

A fração solar é calculada através da divisão entre a energia fornecida pelo sistema solar térmico e a energia total necessária ao consumo (Q_d), tal como representado na Equação (8).

$$F_{sol} = \frac{Q_L}{Q_d} \quad (8)$$

A EN 12976-2 indica quatro cidades para as quais os cálculos devem ser realizados, sendo estas Atenas, Davos, Estocolmo e Wurzburg. Os cálculos são realizados tendo em conta dados climáticos destas cidades e diferentes volumes de consumo diários.

Estes cálculos foram realizados usando os parâmetros obtidos durante os ensaios DST no LES e também para os novos parâmetros obtidos nos ensaios DST mais recentes.

Os resultados obtidos do comportamento térmico a longo prazo para o sistema 1, de 275 l, são apresentados na Tabela 13.

Q_d representa a energia total necessária para o volume de consumo indicado, Q_L a energia fornecida pelo sistema solar térmico e F_{sol} a fração solar. Nas primeiras colunas (DST Projecto) são indicados os valores calculados com base nos ensaios realizados no âmbito deste trabalho, e nas colunas

seguintes (DST LES), são apresentados os resultados obtidos com base nos ensaios realizados no LES, no âmbito dos ensaios de certificação dos sistemas.

Tabela 13 - Resultados da previsão do comportamento térmico a longo prazo para o sistema 1, de 275 l, usando o método DST.

Local	DST Projecto			DST LES			Diferença entre Fsol LES e Fsol Projecto (%)
	Q _d (MJ)	Q _L (MJ)	Fsol (%)	Q _d (MJ)	Q _L (MJ)	Fsol (%)	
Consumo 170 l/dia							
Estocolmo	9492	4888	51,6	9492	4667	49,3	2,3
Wurzburgo	9114	5077	55,6	9114	4793	52,8	2,8
Davos	10281	7285	70,9	10281	6938	67,2	3,7
Atenas	7064	5992	84,9	7064	5866	82,8	2,1
Consumo 200 l/dia							
Estocolmo	11164	5361	47,9	11164	5140	46,1	1,8
Wurzburgo	10691	5582	52,1	10691	5330	49,7	2,4
Davos	12110	7884	65,2	12110	7537	62,3	2,9
Atenas	8326	6717	80,9	8326	6591	79,2	1,7
Consumo 250 l/dia							
Estocolmo	13939	5897	42,2	13939	5708	40,9	1,3
Wurzburgo	13371	6213	46,4	13371	5992	44,7	1,7
Davos	15137	8515	56,3	15137	8262	54,6	1,7
Atenas	10407	7726	74,3	10407	7632	73,3	1,0
Consumo 300 l/dia							
Estocolmo	16746	6118	36,6	16746	5992	35,9	0,7
Wurzburgo	16052	6528	40,6	16052	6370	39,6	1,0
Davos	18165	8799	48,4	18165	8641	47,5	0,9
Atenas	12488	8483	68,1	12488	8420	67,5	0,6
Consumo 400 l/dia							
Estocolmo	22327	6244	27,9	22327	6213	27,8	0,1
Wurzburgo	21413	6654	31,0	21413	6591	30,8	0,2
Davos	24220	8925	36,8	24220	8862	36,6	0,2
Atenas	16651	9335	56,2	16651	9303	55,9	0,3

A análise dos resultados obtidos para o sistema 1, de 275 l, mostra que a diferença entre as fracções solares é inferior a 4 %, indicando uma boa relação entre os parâmetros dos dois ensaios e uma previsão a longo prazo muito semelhante nos dois casos.

Os resultados obtidos para o sistema 2, de 200 l, estão indicados na Tabela 14. Do mesmo modo que para o caso anterior, Q_d representa a energia total necessária para o volume de consumo indicado, Q_L a energia fornecida pelo sistema solar térmico e Fsol a fracção solar.

Tabela 14 – Resultados da previsão do comportamento térmico a longo prazo para o sistema 2, de 200 l, usando o método DST.

Local	DST Projecto			DST LES			Diferença entre Fsol LES e Fsol Projecto (%)
	Q _d (MJ)	Q _L (MJ)	Fsol (%)	Q _d (MJ)	Q _L (MJ)	Fsol (%)	
Consumo 140 l/dia							
Estocolmo	7821	4289	55,1	7821	4226	54,2	0,9
Wurzburgo	7506	4384	58,3	7506	4289	57,2	1,1
Davos	8483	6433	75,9	8483	6339	74,8	1,1
Atenas	5834	5172	88,7	5834	5109	87,8	0,9
Consumo 170 l/dia							
Estocolmo	9492	4888	51,7	9492	4762	50,2	1,5
Wurzburgo	9114	5014	55,1	9114	4888	53,6	1,5
Davos	10281	7285	70,8	10281	7096	69,0	1,8
Atenas	7064	6023	85,3	7064	5897	83,6	1,7
Consumo 200 l/dia							
Estocolmo	11164	5424	48,7	11164	5140	46,1	2,6
Wurzburgo	10691	5582	52,2	10691	5330	49,8	2,4
Davos	12110	8010	66,2	12110	7632	63,0	3,2
Atenas	8326	6812	82,1	8326	6591	79,3	2,8
Consumo 250 l/dia							
Estocolmo	13939	6150	44,0	13939	5550	39,7	4,3
Wurzburgo	13371	6370	47,7	13371	5834	43,7	4,0
Davos	15137	8925	58,9	15137	8136	53,8	5,1
Atenas	10407	7979	76,7	10407	7537	72,4	4,3
Consumo 300 l/dia							
Estocolmo	16746	6559	39,2	16746	5708	34,0	5,2
Wurzburgo	16052	6906	43,1	16052	6055	37,6	5,5
Davos	18165	9461	52,1	18165	8294	45,7	6,4
Atenas	12488	8893	71,3	12488	8168	65,3	6,0

A comparação dos resultados obtidos do comportamento térmico a longo prazo, para o sistema 2, mostra que os valores calculados pelo *software* DST, tanto para os parâmetros do LES, como para os parâmetros do Projecto, são muito aproximados, tendo um valor máximo de diferença de 6 %, quando a simulação é feita para um consumo de 300 l/dia.

Deste modo, mesmo verificando-se algumas diferenças na determinação de parâmetros, o comportamento térmico a longo prazo não apresenta diferenças elevadas para ambos os sistemas, estando os valores obtidos dentro das incertezas habitualmente associadas ao método de ensaio usado ($\pm 5\%$).

Nota-se que no caso do sistema 1, de 275 l, a diferença das fracções solares diminui com o aumento do consumo, enquanto no sistema 2 acontece o contrário, havendo um aumento da diferença entre fracções solares.

5.3 Simulação de perfis de consumo e previsão a curto prazo

5.3.1 Descrição das sequências de ensaio

Com a instalação totalmente operacional, foram realizadas várias sequências de ensaio e simulados vários perfis de consumo de modo a obter-se uma previsão da energia ou potência que o sistema solar térmico consegue fornecer, com base em determinadas condições climáticas e perfis de extracção.

Com a monitorização de sequências diárias, obtém-se informação prática sobre o funcionamento do sistema solar térmico obtendo-se diferentes perfis de extracção dos sistemas. Estas sequências podem depois ser usadas para fazer a validação de modelos que simulem o comportamento térmico dos sistemas, um dos objectivos do projecto no qual está inserido este trabalho.

Inicialmente optou-se por fazer simulação de consumo de uma vez o volume do depósito, consumo este realizado ao final de cada dia, às 18:00 (hora solar), com extracção de um total de água equivalente ao volume do depósito de cada sistema solar térmico em ensaio.

Devido às condições climáticas pouco favoráveis que se verificaram durante o período de Outubro a Dezembro de 2010, foi difícil obter sequências de ensaio que pudessem ser correctamente analisadas para o cálculo do comportamento térmico do sistema. De qualquer modo conseguiu-se obter alguns conjuntos de dados que permitiram obter a potência fornecida pelos sistemas solares térmicos em cada sequência de ensaio.

As sequências de ensaio iniciais foram realizadas entre os dias 29 de Outubro e 16 de Dezembro de 2010. Neste período os sistemas solares térmicos continham apenas água no seu circuito primário. Após o fim desta sequência de ensaio, foi adicionado anti-congelante aos circuitos primários dos sistemas 1 e 2, como forma de precaução, para não haver a possibilidade de congelamento durante os períodos nocturnos ou períodos de não funcionamento dos sistemas.

Já com anti-congelante em ambos os sistemas, foram realizadas mais sequências de ensaio, mas com um perfil de extracção diário diferente. No período de 30 de Dezembro de 2010 a 8 de Janeiro de 2011, de 1 a 13 de Fevereiro de 2011 e de 25 de Junho a 7 de Julho, foi definido um perfil de extracção com três extracções diárias, sendo realizadas às 8:00, 13:00 e 19:00 (hora solar) de acordo com a Tabela 15. O volume diário extraído correspondeu sempre ao volume do depósito, sendo 275 litros no sistema 1 e 200 litros no sistema 2.

Tabela 15 – Configuração do perfil de extracção para as sequências de ensaio com 3 extracções diárias.

Sistema 1 – 275 l		Sistema 2 – 200 l	
Horário extracção (hora solar)	Volume extracção (l)	Horário extracção (hora solar)	Volume extracção (l)
8:00	110	8:00	80
13:00	55	13:00	40
19:00	110	19:00	80

De 22 de Fevereiro a 8 de Março de 2011, foram novamente realizados ensaios diários, apenas com uma extracção às 18:00 (hora solar). A última sequência de ensaios realizada foi de 25 de Junho a 7 de Julho de 2011, novamente com três extracções diárias.

5.3.2 Tratamento de dados e resultados obtidos

Foram realizadas várias sequências de ensaio e todos os dados foram tratados com uma ferramenta disponível no LES que permite, com base nos *inputs* fornecidos (irradiância, temperatura ambiente, caudal e temperaturas de entrada e saída do depósito do sistema solar térmico), calcular a energia fornecida pelo sistema para essa sequência de ensaio. Esta ferramenta é designada por *Short Term Prediction* (STP) e faz parte do *software* DST, desenvolvido pela *InSitu Software*, já referido em “3.2.2 Método DST”.

A ferramenta STP faz uma previsão do valor de potência média fornecida pelo sistema, usando para isso os parâmetros característicos do sistema (já determinados no LES através do método DST) e os dados experimentais dos ensaios realizados. São apresentados os valores efectivamente medidos e também os valores modelados pelo programa, bem como o erro associado. Os valores são apresentados em W.

Cada dia de ensaio gera um ficheiro de dados com uma elevada quantidade de informação, já que o sistema de aquisição de dados grava num ficheiro de texto medições de sessenta em sessenta segundos, com a frequência a aumentar para de cinco em cinco segundos durante os períodos em que são realizadas extracções aos sistemas solares térmicos.

Como o STP não está preparado para tratar ficheiros com sequências de dez dias e com taxa de amostragem de 1 minuto, foi necessário fazer uma “compressão” dos ficheiros originais, usando uma macro em *Excel*, de forma a reduzir a dimensão de cada ficheiro, mantendo no entanto toda a informação necessária para os cálculos. Esta redução de tamanho levou a reduzir-se o tempo entre aquisições de sessenta em sessenta segundos para 660 em 660 segundos, gerando ficheiros de dados mais reduzidos e adequados ao tratamento pelo STP, embora mantendo-se nos períodos de extracção, toda a informação que já tinha sido registada de cinco em cinco segundos, sem haver perda de resolução significativa.

Depois de reduzidos os ficheiros de dados, estes foram fornecidos ao programa STP, através da criação de um ficheiro *batch*, que inclui os vários dias de cada sequência de ensaio. Neste ficheiro *batch* também é fornecido o “caminho” do ficheiro de parâmetros característico de cada sistema, obtido através dos ensaios já realizados no LES. Finalmente, é gerado um ficheiro de texto com os resultados de cada sequência.

Os resultados do sistema 1, de 275 l, são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados obtidos para o sistema 1, de 275 l, através da ferramenta STP, para as várias sequências de ensaio. O volume diário extraído em cada sequência foi 275 l.

Sistema 1 - 275 l						
Sequência de ensaio	STP valor previsto (parâmetros DST LES) (W)	STP valor medido (W)	Diferença entre previsto e medido (parâmetros DST LES) (%)	STP valor previsto (novos parâmetros - DST Projecto) (W)	STP valor medido (W)	Diferença entre previsto e medido (novos parâmetros - DST Projecto) (%)
1 extracção diária (18:00)						
29 Out – 6 Nov	251	319	21	324	319	-2
10 Nov – 13 Nov	136	183	26	185	183	-1
17 Nov – 20 Nov	173	227	24	232	227	-2
1 Dez – 4 Dez	192	246	22	250	246	-2
7 Dez – 16 Dez	158	201	21	207	201	-3
3 extracções diárias (8:00, 13:00, 19:00)						
31 Dez – 8 Jan	77	120	36	110	120	8
8 Feb – 13 Feb	146	262	44	205	262	22
1 extracção diária (18:00)						
22 Feb – 28 Feb	331	413	20	437	413	-6
1 Mar – 8 Mar	250	303	17	331	303	-9
3 extracções diárias (8:00, 13:00, 19:00)						
25 Jun – 7 Jul	304	283	-7	410	283	-45

A análise destes resultados indica uma grande diferença entre o valor estimado pelo STP e o valor efectivamente medido experimentalmente, tal como se pode observar na quarta coluna da Tabela 16, assinalados a vermelho. Estes valores foram obtidos usando os parâmetros característicos do sistema, obtidos através dos ensaios realizados no LES, em 2009.

Foi feita uma nova verificação da operação do circuito, confirmando a correcta operação do mesmo e a correcta leitura de todos os sensores, colocou-se a possibilidade destas diferenças elevadas estarem relacionadas com os parâmetros característicos do sistema, determinados nos ensaios realizados no LES e usados para este cálculo.

Após uma nova determinação dos parâmetros característicos deste sistema, através do método DST, (resultados no ponto “5.2.1 Determinação dos parâmetros característicos”), obteve-se uma melhor aproximação aos resultados obtidos de previsão a curto prazo (ensaios realizados nas datas indicadas na primeira coluna da Tabela 18 e da Tabela 16). Os resultados que comprovam esta melhor aproximação, já calculados com os novos parâmetros dos sistemas, estão indicados nas últimas três colunas da Tabela 16.

Mesmo com a nova determinação de parâmetros, pode-se observar que a diferença entre os valores previstos e medidos para as sequências de ensaio realizadas a partir de 31 de Dezembro de 2010, apresentam uma pequena diferença em relação às sequências anteriores.

Pode-se observar que a diferença entre os valores previstos e os medidos é reduzida em relação aos valores inicialmente calculados, embora em alguns casos continue a haver uma diferença superior ao esperado, como o caso da sequência de 25 de Junho a 7 de Julho, em que existe uma diferença de -45 % entre o medido e o estimado pelo STP. Nesta sequência ocorreu uma inversão, já que os valores calculados com base nos parâmetros determinados no LES revela uma melhor aproximação do que os

calculados com base nos parâmetros DST Projecto. Tal como já foi referido, as sequências de ensaio realizadas após 31 de Dezembro foram realizadas com anti-congelante no circuito primário e poderá esta ser uma explicação para esta maior diferença.

O facto da determinação de parâmetros ser diferente entre um ensaio realizado no LES e a determinação realizada no âmbito deste trabalho, poderá estar relacionado com um deficiente enchimento do circuito primário antes dos ensaios realizados no LES, ou pode também estar relacionado com as já referidas diferenças na quantidade de anti-congelante colocado nos circuitos primários de ambos os ensaios (LES e Projecto).

Para o sistema 1, as diferenças que se observam entre os resultados obtidos para cada conjunto de valores, consoante são usados os parâmetros DST LES, ou DST Projecto, estão evidenciadas na Tabela 17.

Tabela 17 – Diferença entre valores obtidos usando diferentes conjuntos de parâmetros para o sistema 1, de 275 l.

Sistema 1 - 275 l			
Sequência de ensaio	Diferença entre previsto e medido (parâmetros DST LES) (%)	Diferença entre previsto e medido (novos parâmetros – DST Projecto) (%)	Diferença entre dois conjuntos de valores (%)
1 extracção diária (18:00)			
29 Out – 6 Nov	21	-2	23
10 Nov – 13 Nov	26	-1	27
17 Nov – 20 Nov	24	-2	26
1 Dez – 4 Dez	22	-2	24
7 Dez – 16 Dez	21	-3	24
3 extracções diárias (8:00, 13:00, 19:00)			
31 Dez – 8 Jan	36	8	28
8 Fev – 13 Fev	44	22	22
1 extracção diária (18:00)			
22 Fev – 28 Fev	20	-6	26
1 Mar – 8 Mar	17	-9	26
3 extracções diárias (8:00, 13:00, 19:00)			
25 Jun – 7 Jul	-7	-45	37

Em relação ao sistema 2, de 200 l, os resultados obtidos de previsão a curto prazo estão compilados na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados obtidos para o sistema 2, de 200 l, através da ferramenta STP, para as várias sequências de ensaio. O volume diário extraído em cada sequência foi 200 l.

Sistema 2 - 200 l			
Sequência de ensaio	STP valor previsto (W)	STP valor medido (W)	Diferença entre previsto e medido (%)
1 extracção diária (18:00)			
29 Out – 6 Nov	238	239	0
10 Nov – 13 Nov	133	136	2
17 Nov – 20 Nov	164	169	3
1 Dez – 4 Dez	193	189	-2
7 Dez – 16 Dez	151	149	-1
3 extracções diárias (8:00, 13:00, 19:00)			
31 Dez – 8 Jan	68	37	-84
8 Fev – 13 Fev	136	131	-4
1 extracção diária (18:00)			
22 Fev – 28 Fev	319	332	4
1 Mar – 8 Mar	248	249	0
3 extracções diárias (8:00, 13:00, 19:00)			
25 Jun – 7 Jul	286	319	10

Os resultados obtidos mostram uma boa modelação por parte do *software* STP, indicando valores de potência fornecida pelo sistema muito semelhantes aos efectivamente medidos. As diferenças entre o valor medido e o valor previsto são na quase totalidade dos casos menor ou igual a 5 %.

A sequência de ensaio referente ao período entre 31 de Dezembro e 8 de Janeiro apresenta uma diferença de 81 %, que se pode explicar pelas condições meteorológicas. O modelo não é capaz de fazer uma previsão correcta para dias de muito baixa irradiância, sendo isto perfeitamente normal, já que sem irradiância também não se consegue um bom funcionamento de um sistema solar térmico.

No ensaio realizado entre 25 de Junho e 7 de Julho, obteve-se uma diferença de 10 %, valor superior ao esperado e que não se consegue explicar com base na informação disponível actualmente.

Espera-se que com um maior número de ensaios se consiga perceber e explicar melhor estas diferenças entre sequências mais recentes.

6. Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

Os objectivos inicialmente propostos para este trabalho, no âmbito da *Task 4* do projecto “Sistemas solares térmicos pré-fabricados – nova modelação para ensaio dinâmico e validação por monitorização de comportamento térmico a longo prazo”, foram:

- Desenho e instalação de um circuito hidráulico e de sensores de medida (sondas de temperatura, piranómetro e medidores de caudal)
- Desenvolvimento de um programa de aquisição de dados e instalação do sistema de aquisição de dados e respectivas ligações
- Monitorização de ensaios pré-definidos, com vista à obtenção de sequências de ensaio experimentais e de comportamento térmico a longo prazo para validação de ferramentas de cálculo
- Validação dos resultados obtidos nas *Task 2* e *3* do projecto

Pode-se afirmar que o trabalho desenvolvido até ao momento neste trabalho experimental, tem todos os seus objectivos quase finalizados, no que diz respeito à parte relacionada apenas com a *Task 4*. Os ensaios continuarão a ser realizados para fazer a monitorização dos sistemas em diferentes condições climáticas e em diferentes períodos do ano.

Com os ensaios realizados, espera-se que no futuro seja feita a validação dos resultados obtidos nas *Task 2* e *3* do projecto, uma vez que o trabalho destes grupos ainda está em desenvolvimento.

Em relação aos ensaios realizados, foi possível observar que o circuito instalado cumpre o que inicialmente se pretendia, um circuito capaz de realizar ensaios a sistemas solares térmicos de acordo com a norma EN 12976-2, no que diz respeito à caracterização do comportamento térmico de sistemas solares térmicos.

Por não ser uma instalação convencional do tipo “chave na mão”, as várias empresas consultadas mostraram algumas dificuldades em apresentar uma proposta adequada, e mesmo a empresa escolhida para fazer a instalação do circuito, colocou alguns problemas durante a fase de construção do mesmo. Com base na experiência deste trabalho, pode-se afirmar que não é fácil encontrar uma empresa que tenha em atenção todos os aspectos importantes na construção de um banco de ensaio para instalações solares térmicas.

Por se tratar de uma instalação experimental, a construção do circuito hidráulico apresentou problemas que foi necessário ultrapassar. Durante a instalação foi necessário fazer algumas alterações ao projecto inicial, o que originou alguns atrasos e problemas de instalação. Também aconteceram alguns problemas relacionados com os prazos, tanto prazos de entrega de fornecedores, como prazos de montagem por parte da empresa instaladora. Em alguns momentos, houve também alguma indisponibilidade para resolver problemas relacionados com a montagem. No momento da instalação também foram colocadas algumas dificuldades por parte da empresa instaladora, relacionados com o fornecimento de algum material previamente acordado.

No entanto, e apesar de tudo, o trabalho foi realizado, na sua grande maioria, de acordo com o inicialmente previsto no projecto. Fez-se o projecto do circuito hidráulico, a consulta a várias empresas instaladoras, a montagem do circuito, as calibrações e montagem de todos os sensores, bem como a ligação do sistema de aquisição de dados e respectivo *software*, e os ensaios inicialmente previstos no âmbito do projecto foram realizados.

Em relação aos resultados obtidos dos ensaios realizados, pode-se dizer que os resultados do comportamento térmico a longo prazo, calculado através de ensaios DST, são muito satisfatórios.

No sistema 1, de 275 l, os resultados obtidos do comportamento térmico a longo prazo, indicam uma diferença, na fracção solar, sempre inferior a 4 % entre os ensaios realizados no LES e os realizados no âmbito deste trabalho.

Para o sistema 2, de 200 l, a determinação dos parâmetros e o cálculo do comportamento térmico a longo prazo realizado com ensaios no âmbito deste trabalho, mostrou uma diferença na fracção solar, em relação aos ensaios realizados no LES, sempre igual ou inferior a 6 %, com este valor atingido apenas para uma simulação de consumo de 300 l no sistema 2. Considerando a incerteza de 5 % associada ao método de ensaio, pode-se concluir que os resultados são muito satisfatórios.

Para a previsão a curto prazo, realizada através da ferramenta STP, observaram-se algumas variações em termos de resultados:

No sistema 1, os resultados iniciais de valor previsto pelo STP, tinham variações muito grandes em relação ao valor medido experimentalmente. Depois de uma nova determinação de parâmetros característicos do sistema, conseguiu-se uma melhor aproximação destes parâmetros, obtendo-se resultados mais coerentes e com diferenças menores em relação ao valor efectivamente medido experimentalmente. No entanto, a última sequência de ensaio realizada, mostra uma melhor aproximação aos parâmetros dos ensaios DST-LES ao contrário das restantes sequências, que mostram uma melhor aproximação com os parâmetros determinados através dos ensaios DST-Projecto.

No sistema 2, os valores previstos do STP também foram muito próximos, com excepção da última sequência de ensaio, que apresentou uma diferença de 10 % em relação aos valores medidos. Não se consegue explicar porque nesta sequência de ensaio houve uma diferença tão elevada em relação às restantes sequências, no entanto pretende-se, com a realização de mais ensaios e futuro tratamento de dados, perceber melhor estes resultados.

É importante salientar alguns pontos deste trabalho, que pelo seu carácter prático podem ser importantes para trabalhos futuros:

- Um dos aspectos que foram tidos em conta no momento do projecto do circuito hidráulico foi evitar o consumo excessivo de água da rede, através do abastecimento por um depósito de armazenamento com capacidade suficiente para o ensaio a dois sistemas solares térmicos. Pode-se dizer que este aspecto foi conseguido, uma vez que se usou sempre a água proveniente deste depósito, sem haver consumo de água da rede.

Espera-se que este e outros aspectos utilizados neste circuito sejam úteis para uma possível replicação ou adaptação num futuro circuito hidráulico a instalar no LES.

- A construção do circuito foi realizada por uma empresa instaladora de sistemas solares térmicos, com experiência na área de instalações solares térmicas e fotovoltaicas. No entanto, importa referir que é necessário fazer uma procura exaustiva de empresas competentes e com disposição para este tipo de instalações experimentais. É importante que a empresa esteja aberta a alterações que sejam necessárias realizar e que contribua para uma melhoria do circuito através dos conhecimentos que possam transmitir em determinadas situações do projecto/instalação. O dinheiro disponível para a realização do circuito hidráulico também é um factor limitante. Poderão haver outras empresas mais qualificadas para realizar este tipo de instalações experimentais, no entanto, o preço a pagar por um melhor serviço poderá ser muito mais elevado.

Em trabalhos futuros que seja necessário instalar um circuito hidráulico, é recomendado haver um compromisso com a empresa instaladora, de todos os materiais a adquirir antes da adjudicação, para evitar uma subida do preço final do trabalho em relação ao orçamento apresentado.

Em termos de trabalho futuro a realizar no âmbito do projecto, continuarão a ser realizados ensaios para simulação de diferentes perfis de consumo e continuarão a realizar-se sequências de ensaio experimentais a longo prazo, tentando obter-se sequências mais longas. Foram realizadas algumas tentativas para explicar os resultados menos satisfatórios, no entanto não se chegou a uma conclusão relativamente a este assunto. Espera-se que com um maior número de ensaios e com posterior tratamento desses dados se consiga uma explicação adequada.

Também seria interessante fazer ensaios com diferentes perfis de consumo a outro tipo de sistemas solares térmicos, por exemplo um sistema de tubos de vácuo ou um sistema ICS.

Por fim, serão melhor estudadas as alterações propostas ao circuito hidráulico que não foram implementadas, sendo necessário estudar o custo-benefício da sua implementação para se poder decidir pela melhor opção.

7. Referências

- INETI, 2007. Instalações solares térmicas, Manual do curso de Instaladores Solares Térmicos, INETI, Lisboa.
- Kalogirou, S., 2009. Solar Energy Engineering: Processes and Systems, 1st ed., 760 pp, Elsevier.
- Joshi, S.V., Bokil R.S., Nayak, J.K., 2005. Test standards for thermosyphon-type solar domestic hot water system: review and experimental evaluation. Solar Energy, Volume 78, Issue 6, June 2005, Pag. 781-798.
- Decreto Lei n.º 80/2006, de 4 de Abril: Aprova o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE).
- EN 12975-1:2006. Thermal solar systems and components – Solar collectors - Part 1: General requirements.
- EN 12975-2:2006. Thermal solar systems and components – Solar collectors - Part 2: Test methods.
- EN 12976-1:2006. Thermal solar systems and components – Factory made systems – Part 1: General requirements.
- EN 12976-2:2006. Thermal solar systems and components – Factory made systems – Part 2: Test methods.
- EN 12977-3:2008. Thermal solar systems and components – Custom built systems – Part 3: Performance characterization of stores for solar heating systems.
- EN ISO 9488:1999. Solar energy – Vocabulary (ISO 9488:1999).
- ISO 9459-2:1995 - Solar heating - Domestic water heating systems - Part 2: Outdoor test methods for system performance characterization and yearly performance prediction of solar-only systems, International Standard – 1995.
- Dynamic System Testing Program Manual, version 2.7 - InSitu Scientific Software, c/o W. Spirkel, Kriegerstr. 23d, D 82110 Germering, September 1997.
- ISO 9459-5:2007 – Solar heating – Domestic water heating systems – Part 5: Systems performance characterization by means of whole-system tests and computer simulation, International Standard – 2007.
- Carvalho, M.J., 2009. Ensaio de Sistemas Solares Térmicos, Acção de Formação para Certif, 10 de Dezembro de 2009, PPT.
- Spirkel, W., Mushawek, J., 1992. General Model for Dynamic Testing of Solar Domestic Hot Water Systems. Solar Energy Materials & Solar Cells, 28: pag. 93 – 102.
- CEN-TS 12977-1:2010. Thermal solar systems and components – Custom built systems – Part 1: General requirements.
- CEN-TS 12977-2:2010. Thermal solar systems and components – Custom built systems – Part 2: Test methods.
- CEN/TS 12977-4:2010. Thermal solar systems and components – Custom built systems – Part 4: Performance test methods for solar combistores.
- CEN/TS 12977-5:2010. Thermal solar systems and components – Custom built systems – Part 5: Performance test methods for control equipment.

Websites:

- www.techno-solis.com (data de consulta: Julho de 2010)
- www.fujisol.com (data de consulta: Julho de 2010)
- www.artsolar.pt (data de consulta: Março de 2011)
- www.homefreesolar.com (data de consulta: Agosto de 2010)

8. Anexos

Anexo 1 – Memória descritiva entregue às empresas instaladoras consultadas no âmbito do projecto.

Anexo 2 – Mapa de quantidades entregue às empresas instaladoras consultadas no âmbito do projecto.

Anexo 3 – *Roadmap* do projecto.

Anexo 1 – Memória descritiva entregue às empresas instaladoras consultadas no âmbito do projecto

Descrição do circuito hidráulico para ensaio de sistemas solares térmicos

O circuito hidráulico a ser instalado ficará localizado no edifício U do Campus do Lumiar do LNEG. O circuito tem como função servir ao ensaio a 2 sistemas solares térmicos do tipo “kit”, já existentes na zona exterior ao edifício U, com volumes de depósito máximos de 300 l.

A empreitada compreende aquisição e instalação, em condições técnicas adequadas, dos equipamentos identificados no mapa de quantidades em anexo e no esquema de princípio indicado na Figura abaixo, parte integrante desta consulta. A empresa adjudicatária deverá assegurar a manutenção do circuito por período de pelo menos 18 meses.

A tubagem do circuito será em cobre/inox, com diâmetro 22 mm e com comprimento total de aproximadamente 136 m, que deverá ser isolada termicamente com isolamento do tipo “Armaflex”, devendo ter protecção mecânica nos troços instalados no exterior, com excepção da linha de retorno dos sistemas solares térmicos até ao depósito de armazenamento 1.

Os acessórios, filtros e válvulas a instalar são os que constam no diagrama em anexo e indicados no mapa de quantidades.

O circuito hidráulico será constituído por dois depósitos de armazenamento, com capacidade de 2000 litros cada. Durante todo o período de ensaio aos sistemas solares, o depósito 1 terá a função de receber a água proveniente dos sistemas solares térmicos, que será depois encaminhada, por força da gravidade (depósito 1 fica fisicamente em cima do depósito 2) para o depósito 2, que terá a função de fornecer água aos dois sistemas solares térmicos a uma temperatura entre 15 a 25 °C (Esta temperatura deverá permanecer constante num determinado valor +/- 1°C durante o período de entrada da água para os sistemas solares térmicos). Caso a temperatura da água no depósito de armazenamento não seja suficientemente baixa para o ensaio, a água pode ser misturada com a água da rede, havendo uma válvula misturadora de 3 vias motorizada com sonda de temperatura a jusante que possibilitará ajustar a temperatura da água para os sistemas solares térmicos. Associado ao depósito de armazenamento 2, haverá uma torre de arrefecimento que terá como função arrefecer, durante a noite, a água proveniente dos sistemas solares térmicos para no dia seguinte ser novamente usada. O arrefecimento será feito de no máximo 35 °C ao final da tarde para uma temperatura próxima da temperatura de bolbo húmido, no início do dia seguinte. Existem assim cerca de 12 horas para o arrefecimento.

O sistema de arrefecimento, será constituído por uma torre de arrefecimento, sistema de tratamento de água (fora do âmbito desta consulta), permutador de calor de placas com área de 1,82 m², duas bombas circuladoras (B2 e B3), válvulas reguladoras de caudal, filtro e uma válvula electromagnética V7 que servirá para fazer uma purga constante ao sistema de arrefecimento. As bombas B2 e B3, ventilador da torre de arrefecimento e válvula electromagnética V7 são actuados no quadro eléctrico através de um relógio temporizador programável. Estes equipamentos deverão ainda ser desligados sempre que a temperatura no depósito 2 desça abaixo duma temperatura escolhida no termóstato (~15°C).

Acerca do funcionamento das válvulas, quando é necessário fazer uma extracção de água ao sistema 1, para simular consumos reais, é accionada a válvula electromagnética V1, de modo a ser extraída a água que se encontra na canalização de entrada no sistema solar térmico 1. Seguidamente são accionadas as válvulas electromagnéticas V2 e V3 para serem efectuadas extracções ao sistema solar a 2 l/min e 10 l/min, respectivamente. Do mesmo modo, para fazer extracções ao sistema solar térmico 2, é accionada inicialmente a válvula electromagnética V4, de forma a ser extraída a água que se encontra na canalização de entrada no sistema 2. De seguida são accionadas as válvulas electromagnéticas V5 e V6 para serem efectuadas ao sistema extracções a 2 l/min e 10 l/min, respectivamente. Ao ser accionada qualquer das válvulas electromagnéticas V1 – V6 deverá ser também accionada a bomba B1.

Toda a água extraída das tubagens, bem como dos sistemas solares 1 e 2, é novamente canalizada para o depósito de armazenamento 1.

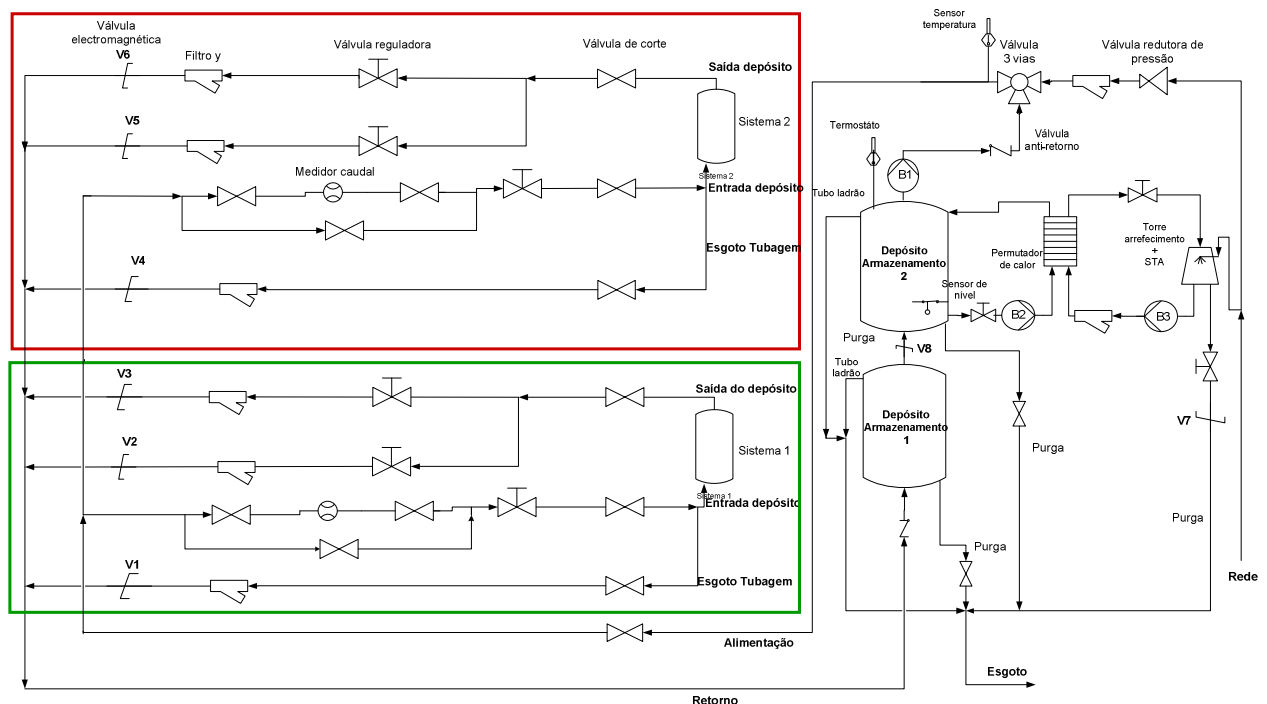
Os componentes do circuito hidráulico que serão colocados no interior do edifício U, tais como medidores de caudal, válvulas, filtros, etc., deverão ser montados numa estrutura metálica, que por sua vez será fixa na parede de madeira do edifício U. Esta estrutura poderá ser, por exemplo, em chapa perfurada, e deverá ter aproximadamente as seguintes dimensões: 2000 mm x 1200 mm. A espessura da chapa metálica deverá ser a adequada à correcta fixação e estabilidade dos componentes.

Deve também ser fornecido um quadro eléctrico que forneça a alimentação ao circuito hidráulico e também ao sistema de arrefecimento:

A válvula de 3 vias motorizada deve dar prioridade à água proveniente do depósito de armazenamento 2 e só misturar com a água da rede quando a temperatura seja mais elevada que o *setpoint* definido. As electroválvulas V1 a V6, bomba circuladora B1 e válvula V8 são actuadas por meio de um sinal TTL entre 0 e 5 V, que actuará um relé que por sua vez actuará a válvula com tensão 24 V DC. Este sinal TTL virá de um sistema de aquisição de dados fora do âmbito desta consulta, no entanto é necessário fazer a ligação das válvulas ao quadro eléctrico. A válvula V8 será aberta através dum sinal proveniente do quadro eléctrico (via sinal TTL) e sempre que o nível da água no depósito 2 desça abaixo do nível escolhido para o sensor de nível introduzido no depósito. Este sensor assegura que as tubagens onde estão inseridas as bombas estão sempre preenchidas com líquido para o correcto funcionamento das mesmas.

Nota: Não será necessário fornecer os sistemas solares térmicos, os medidores de caudal, sondas de temperatura e sistema de tratamento de água.

Representação esquemática do circuito hidráulico:



Anexo 2 – Mapa de quantidades entregue às empresas instaladoras consultadas no âmbito do projecto.

Mapa de quantidades para instalação de circuito hidráulico			
Código	Componente	Quantidade	unid
	Válvula electromagnética ON-OFF válvulas com funcionamento 24V DC	8	
	Válvula reguladora do tipo TA	9	
	Válvula de corte	15	
	Filtros em Y	8	
	Válvula motorizada 3 vias com ajuste de temperatura manual ou no quadro eléctrico. Esta válvula deverá ter uma precisão de +ou- 1 °C e capaz de trabalhar com temperaturas entre 15 e 25 °C.	1	
	Válvula redutora de pressão	1	
	Válvula anti-retorno	2	
	Tubagem de ligação ao circuito hidráulico com tubo rígido inox ou cobre 22mm (19m x 2sistemas x 2ent.saída)	90	m
	Tubagem do circuito hidráulico no interior do edifício com tubo rígido Inox ou cobre 22mm (2m/linha x 14linhas)	46	m
	total tubagem	136	m
	Isolamento tipo Armaflex 22mm	78	m
	Acessórios de cravar (sede cónica/porca louca)		
	Torre arrefecimento ou unidade de arrefecimento com capacidade para arrefecer água durante o período nocturno de aprox. 35 °C para temperatura de bolbo húmido. (período de não funcionamento dos sistemas solares térmicos) - ter em conta período de verão com temperaturas elevadas	1	
	Depósito de água sem permutador de calor e com capacidade para 2000 l (o depósito 1 será obrigatoriamente para funcionar à pressão atmosférica e pode ser em plástico)	2	
	Permutador de calor de placas com área permuta 1,82 m ²	1	
	Bomba circuladora para caudal de 10 l/min e perda de carga $\Delta P=6$ bar	1	B1
	Bomba circuladora para caudal de 5 l/min $\approx 0,3$ m ³ /h e $\Delta P=3$ bar	2	B2, B3
	Placard de fixação metálico por exemplo em chapa perfurada (2000x1200m)	1	
	Quadro eléctrico, instalação eléctrica e sistema de comando e controlo dos equipamentos , nomeadamente bombas circuladoras, válvula 3 vias e válvulas electromagnéticas através de sinal TTL 0 a 5 V. Ligação do sistema de arrefecimento e sistema de tratamento ao quadro eléctrico.	1	
	Sensor de nível	1	
	Termostato programável	1	
	Programador horário	1	
	Abraçadeiras		

Anexo 3 - Roadmap do projecto

