



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo de acumulação sazonal de calor para incremento do aproveitamento de energia solar térmica em sistemas domésticos

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Autor

Joaquim Gonçalo Lobo da Costa Ferreira Cabral

Orientadores

Sr. Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo

Sr. Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar

Júri

Presidente Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva Ribeiro
Professor da Universidade de Coimbra

Vogal Professor Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites
Investigador da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar
Professor da Universidade de Coimbra

Coimbra, setembro, 2015

À minha Família.

Agradecimentos

O trabalho apresentado nas próximas páginas surge fundamentalmente graças aos meus queridos Pais, que muito se sacrificaram para me darem todas as condições de poder estudar e construir uma vida apoiada em fundações verdadeiras com base em valores, princípios e educação.

Aos meus queridos irmãos. Espero que a conclusão desta etapa seja, para eles, um exemplo de determinação e valorização pessoal.

Um grande obrigado as minhas queridas Tias Lailinha, Candidinha, Constancinha e Otelinda, por me terem acompanhado, aconselhado, ensinado, enfim, por terem estado sempre ao meu lado durante esta jornada, certificando-se que nada me faltaria especialmente em semanas que não ia a Casa.

Aos meus orientadores, António Raimundo e Adélio Gaspar, pela paciência e ensinamentos ao longo deste trabalho.

Ao Marco Fernandes pela pronta disponibilidade em me esclarecer perguntas e dúvidas.

Aos meus amigos e parceiros, com quem vivi e dividi Casa ao longo destes seis anos de faculdade. Ao Tio Pedro, ao António, ao Acácio e ao Francisco, a quem posso chamar, de alguma maneira, Família.

Por fim, não poderia acabar sem deixar algumas palavras muito especiais ao Afonso, ao Martim, ao André, ao Cristiano e a Ana por tudo o que são como Homens e Amigos. Um imenso obrigado por fazerem parte da minha vida, pelo companheirismo e pela amizade que me têm.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo a concepção e estudo de diferentes configurações de sistemas solares térmicos domésticos para promover a acumulação sazonal de calor, que poderá contribuir, de alguma forma, em ajudar no desenvolvimento de técnicas sustentáveis de otimização de utilização energética, de uma forma limpa e inesgotável.

São idealizados três sistemas solares para uma residência familiar de quatro pessoas: sistema solar térmico com carregamento apenas do “depósito solar”, sistema solar térmico de carregamento dos depósitos em série e sistema solar térmico de carregamento dos depósitos em paralelo.

As configurações definidas serão implementadas no programa de simulação TRNSYS para teste e pós-processamento de resultados, com vista a identificar a solução que permite atingir, em termos anuais, a maior fração solar e, deste modo, reduzir o consumo de energia não renovável pelo sistema de apoio. Ao longo das simulações serão variadas as áreas de coletores desde 4 m² até 10 m² bem como a capacidade de volume de acumulação desde 600 a 1900 litros.

Concluiu-se que o sistema solar térmico com maior capacidade em satisfazer as necessidades de consumo anuais utilizando menor quantidade de energia auxiliar e, por conseguinte, o sistema com maior fração solar, foi o sistema solar térmico com carregamento apenas do “depósito solar” para 10 m² de área de coletores e um volume total de acumulação de 1900 litros. Chegou-se também à conclusão que, para menor volumes totais de acumulação, o modelo que potência a maior fração solar é o sistema solar térmico de carregamento dos depósitos em paralelo.

Palavras-chave: Acumulação de calor, acumulação sazonal de energia, sistemas solares térmicos, energia solar, fração solar, TRNSYS.

Abstract

This work aims to design different configurations of domestic solar thermal systems to promote seasonal heat accumulation, which can contribute in some way, in the help of building a sustainable technics for energy use optimization, cleanly and inexhaustible.

It's idealized three solar systems for a family residence of for: solar thermal system charging only the "solar storage", solar thermal system loading storages in series and solar thermal system loading storages in parallel.

The configuration settings will be implemented in TRNSYS simulation program for testing and post-processing of results, in order to identify the solution that achieves, in annual terms, the largest solar fraction and thus reduce non-renewable energy consumption by support system. Throughout simulations will be varied collectors areas from 4 m² up to 10 m² and the accumulation volume capacity from 600 to 1900 liters

It was concluded that the solar thermal system better able to meet the annual consumption using the smaller amount of auxiliary energy and, therefore, the system with the highest percentage of solar fraction was the solar thermal system charging only the "solar storage" with 10 m² of collector area and a total volume capacity of 1900 liters of accumulation. It is also concluded that for smaller volumes of accumulation, the model witch power the most solar fraction it's the solar thermal system loading storages in parallel.

Keywords Heat accumulation, seasonal accumulation of energy, solar thermal system, solar energy, solar fraction, TRNSYS.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Estado da arte.....	5
2. ACUMULAÇÃO EM SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS ATIVOS INDIRETOS	17
3. SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS DOMÉSTICOS CONCEBIDOS E SUA MODELAÇÃO NO TRNSYS	33
3.1. Modelo 1 – Sistema com carregamento apenas do “depósito solar”	33
3.2. Modelo 2 – Sistema com carregamento dos depósitos em série.....	35
3.3. Modelo 3 – Sistema com carregamento dos depósitos em paralelo	36
3.4. Modelação dos sistemas solares térmicos no TRNSYS	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1. Modelo 1 - Sistema com carregamento apenas do "depósito solar"	40
4.2. Modelo 2 - Sistema com carregamento dos depósitos em série	43
4.3. Modelo 3 - Sistema com carregamento dos depósitos em paralelo	45
4.4. Análise e discussão	47
5. CONCLUSÕES	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
ANEXO A: ESQUEMAS DOS SISTEMAS NO TRNSYS	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição do potencial energético dos recursos energéticos a nível mundial (adaptado de Murphy, 2009)	3
Figura 2 – Radiação incidente em Portugal (Esquerda); Insolação em Portugal (Direita) (Portal Energias, 2004).....	5
Figura 3 – (a) Sistema solar térmico passivo de funcionamento em termosifão; (b) Sistema solar térmico ativo de funcionamento direto (adaptado de Cruickshank, 2009).....	8
Figura 4 – Esquema dos tipos de armazenamento de energia	9
Figura 5 – Comparação entre as capacidades de acumulação de calor sensível e latente consoante a temperatura	12
Figura 6 – Sistemas de depósitos ligados em série (Direita); Sistemas de depósitos ligados em paralelo (Esquerda) (adaptado de Cruickshank, 2009).....	15
Figura 7 – Conjunto de gráficos sobre a radiação incidente para diferentes ângulos (Esquerda) e ângulo ótimo para os diferentes meses do ano para a localização da residência (Direita), (dados do IET, 2014).....	19
Figura 8 – Distribuições médias das temperaturas da cidade de Coimbra (dados do IPMA, 2010).....	19
Figura 9 – Conjunto de gráfico de propriedades termofísicas das misturas à base de glicol (Medeiros <i>et al.</i> , 2010)	22
Figura 10 – Ponto de solidificação das misturas à base de glicol (Medeiros <i>et al.</i> , 2010)...	23
Figura 11 – Variação da temperatura para permutador de calor em contra-corrente (adaptado da sebeta de Transmissão de Calor II, José Costa, 1990).....	24
Figura 12 – Materiais com potencial para isolamento térmico dos depósitos de acumulação (Terry, N. <i>et al.</i> , 2012).....	28
Figura 13 – Variação do sinal do controlador (TRNSYS Manuals).....	30
Figura 14 – Sistema solar térmico com carregamento apenas do depósito solar	34
Figura 15 – Sistema solar térmico com carregamento dos depósitos em série	35
Figura 16 – Sistema solar térmico com carregamento dos depósitos em paralelo	36
Figura 17 – Fração solar [%] do sistema com carregamento apenas do "depósito solar" (Modelo 1).....	42
Figura 18 – Fração solar [%] sistema com carregamento dos depósitos em série (Modelo 2)	44
Figura 19 – Fração solar Fração solar [%] sistema com carregamento dos depósitos em paralelo (Modelo 3)	46

Figura 20 – Variação das temperaturas do depósito de consumo, no Verão, do sistema com carregamento apenas do depósito de consumo (Modelo 1)	48
Figura 21 – Variação das temperaturas do depósito solar, no verão, do sistema com carregamento apenas do "depósito solar" (Modelo 1)	48
Figura 22 – Variação das temperaturas do depósito de consumo, no inverno, sistema com carregamento apenas do depósito de consumo (Modelo 1)	49
Figura 23 – Variação das temperaturas do depósito solar, no inverno, do sistema com carregamento apenas do "depósito solar" (Modelo 1)	50
Figura 24 – Sistema com carregamento apenas do "depósito solar" (Modelo 1), (retirado do TRNSYS).....	55
Figura 25 – Sistema com carregamento dos depósitos em série (Modelo 2), (retirado do TRNSYS).....	56
Figura 26 – sistema com carregamento dos depósitos em paralelo (Modelo 3), (retirado do TRNSYS).....	57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Representação de diversas propriedades climatéricas de Coimbra (dados do IET, 2014)	18
Tabela 2 – Propriedades termofísicas de uma mistura de 20% à base de glicol a 4 °C (Medeiros <i>et al.</i> , 2010)	23
Tabela 3 – Coeficiente de transmissão de calor do permutador em função do aumento da área de coletor	26
Tabela 4 – perfil de consumo residencial	32
Tabela 5 – Resultados do sistema com carregamento apenas do "depósito solar" (Modelo 1).....	42
Tabela 6 – Resultados do sistema com carregamento dos depósitos em série (Modelo 2). 44	
Tabela 7 – Resultados do sistema com carregamento dos depósitos em paralelo (Modelo 3)	46

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

A – Área [m^2]

A_{col} – Área de coletores [m^2]

a_1 – Coeficiente linear de perdas térmicas [$W.m^{-2}.K^{-1}$]

a_2 – Coeficiente quadrático de perdas térmicas [$W.m^{-2}.K^{-2}$]

C_p – Calor específico [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]

C_{p_f} – Calor específico do fluido frio no permutador de calor [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]

C_{p_l} – Calor específico do fluido na fase líquida [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]

C_{p_q} – Calor específico do fluido quente no permutador de calor [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]

C_{p_s} – Calor específico do fluido na fase sólida [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]

F_{sol_anual} – Fração solar anual [%]

$F_{sol_diária}$ – Fração solar diária [%]

ΔT – Variação da temperatura [$^{\circ}C$]

ΔT_H – Maior diferença de temperaturas em *dead band* [$^{\circ}C$]

ΔT_L – Menor diferença de temperaturas em *dead band* [$^{\circ}C$]

ΔT_{ml} – Diferença média logarítmica da temperatura no permutador [$^{\circ}C$]

η – Rendimento

η_o – Rendimento ótico do coletor

G – radiação solar [$W.m^{-2}$]

h_{fg} – Entalpia de mudança de fase [J]

k_a – Condutividade térmica do aerogel [$W.m^{-1}.K^{-1}$]

k_p – Condutividade térmica do poliestireno [$W.m^{-1}.K^{-1}$]

L_a – Comprimento característico aerogel [m]

L_p – Comprimento característico poliestireno [m]

m – Massa [Kg]

\dot{m}_{col} – Caudal mássico de circulação no coletor [$kg.s^{-1}$]

- \dot{m}_f – Caudal mássico do fluido frio no permutador de calor [kg.s⁻¹]
 \dot{m}_q – Caudal mássico do fluido quente no permutador de calor [kg.s⁻¹]
 m_{sis} – Massa do sistema [Kg]
 Q – Energia [J]
 \dot{Q} – Potência térmica [W]
 $R_{isolamento}$ – Resistência térmica de isolamento [K.W⁻¹]
 $R_{t_{cond}}$ – Resistência térmica de condução [K.W⁻¹]
 R_{total} – Resistência térmica total [K.W⁻¹]
 T_{amb} – Temperatura ambiente [°C]
 T_{col} – Temperatura do fluido no coletor [°C]
 T_f – Temperatura de mudança de fase [°C]
 t_f – Tempo final [s]
 $T_{f,i}$ – Temperatura do fluido frio à entrada do permutador de calor [°C]
 $T_{f,o}$ – Temperatura do fluido frio à saída do permutador de calor [°C]
 T_H – Temperatura de controlo mais alta [°C]
 t_i – Tempo inicial [s]
 T_L – Temperatura de controlo mais baixa [°C]
 $T_{q,i}$ – Temperatura do fluido quente à entrada do permutador de calor [°C]
 $T_{q,o}$ – Temperatura do fluido quente à saída do permutador de calor [°C]
 T_{sup} – Temperatura de superfície [°C]
 T_2 – Temperatura final [°C]
 T_1 – Temperatura inicial [°C]
 U – Coeficiente global de transferência de calor [W/m]
 v_{col} – Caudal volúmico de circulação no coletor [m³.s⁻¹]
 γ_i – Função de controlo do controlador
 γ_0 – Função de controlo da bomba
 ρ – Massa volúmica [Kg.m⁻³]

Siglas

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

IET – Institute of Energy and Transport

IPMA – Instituto Português do Mar e Atmosfera

TRNSYS – Transient System Simulation

DGEG – Direção Geral da Energia e da Geologia

AQS – Aquecimento de Água Sanitárias

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Nos dias de hoje o acesso à energia, para as mais diferentes utilidades, é um forte indicador e fator de desenvolvimento da qualidade de vida de uma população. A energia é necessária para toda e qualquer atividade: setor de atividade industrial, setor de atividade agrícola, setor residencial, setor de atividade pública, entre outros. Desta forma, a sua procura e utilização torna-se indispensável para uma sociedade moderna e desenvolvida, assente em mercados e economias globais. Isto é, o crescimento de um País tem como um dos principais pilares a sua capacidade de criar riqueza, de forma própria e autónoma, procurando alcançar o máximo de independência externa para criar mais-valias económicas.

Contudo, a realidade do nosso País tem uma história particular. Portugal sempre teve como solução a importação de energia para alimentar os mais diferentes setores e serviços. Depois da Revolução Industrial, e posteriormente com entrada nos mercados globais, naturalmente, a procura de energia aumentou enormemente para fazer face à procura. Assim, pode dizer-se que, de certa forma, o desenvolvimento foi estabelecido numa base não pensada e insustentável.

De acordo com a Direção Geral da Energia e da Geologia (DGEG, 2010) o consumo de energia em Portugal, no final de 2010, estava distribuído da seguinte forma: 36,7% para o setor dos transportes; 29,6% para o setor industrial; 16,6% para o setor doméstico e familiar; 11,4% para setor dos serviços e 5,8% para setor da agricultura, pescas, construção e obras públicas. Deste total de energia consumida, somente cerca de 24% provinha de fontes renováveis de energia. Ou seja, 74% das nossas necessidades energéticas provêm de importações, mais concretamente do petróleo, fonte esgotável e poluente. Já que, historicamente, em cada dez anos o preço da energia tem tendência a duplicar, não é necessário um grande exercício intelectual para mostrar que existe uma enorme margem para melhorar a forma como obtemos a energia de que necessitamos para o nosso crescimento, bem-estar e evolução social.

É neste contexto que se centra a área de estudo do trabalho apresentado ao longo das próximas páginas – desenvolvimento de uma forma alternativa de transformação e armazenamento de energia. São ainda escassos os estudos sobre captação e acumulação de energia solar, durante um longo período de tempo em residências familiares. Por isso, esta investigação tem como objetivo principal aprofundar técnicas de acumulação sazonal de calor que possam levar a um retorno energético durante os meses de inverno produzindo sistemas solares térmicos mais sustentáveis e autossuficientes, (Dincer and Rosen, 1998).

O Sol é o centro do nosso sistema solar. Todos os dias, esta estrela emite radiação que atinge o nosso planeta Terra, aquecendo, alimentando e criando vida. É o combustível da natureza e dos mais diversos ecossistemas vivos. Ao longo de centenas de milhares de anos, as plantas captam esta energia e transformam-na em matéria orgânica – a Fotossíntese. É graças a este fenómeno que vida na Terra é possível tal qual a conhecemos.

Apesar da infinidade de tecnologias, de conhecimentos e, da própria forma como o estilo de vida evoluiu, existe cada vez mais uma preocupação mundial com as contrapartidas inerentes a esta mudança, como demonstra a Figura 1. Esta preocupação vem de encontro à forma como obtemos grande parte da energia de que necessitamos. Como sabemos, esta vem da queima de combustíveis fósseis, fontes energéticas poluentes, esgotáveis e com custos de exploração. Porém, bastaria parte da energia solar incidente na Terra para satisfazer todas as necessidades energéticas anuais (Murphy, 2009). Mais ainda, a energia fornecida pelo Sol durante um quarto de hora é superior à energia utilizada mundialmente, durante um ano (Portal-Energia, 2004). Mais concretamente, os valores anuais da radiação solar global variam entre 1400 e 1800 kWh/m² (Portal-Energia, 2004).

Assim o recurso à energia solar constitui uma solução para muitos problemas sociais associados ao consumo de combustíveis fósseis. O problema concentra-se na conversão da energia solar em energia útil e na forma de a armazenar.

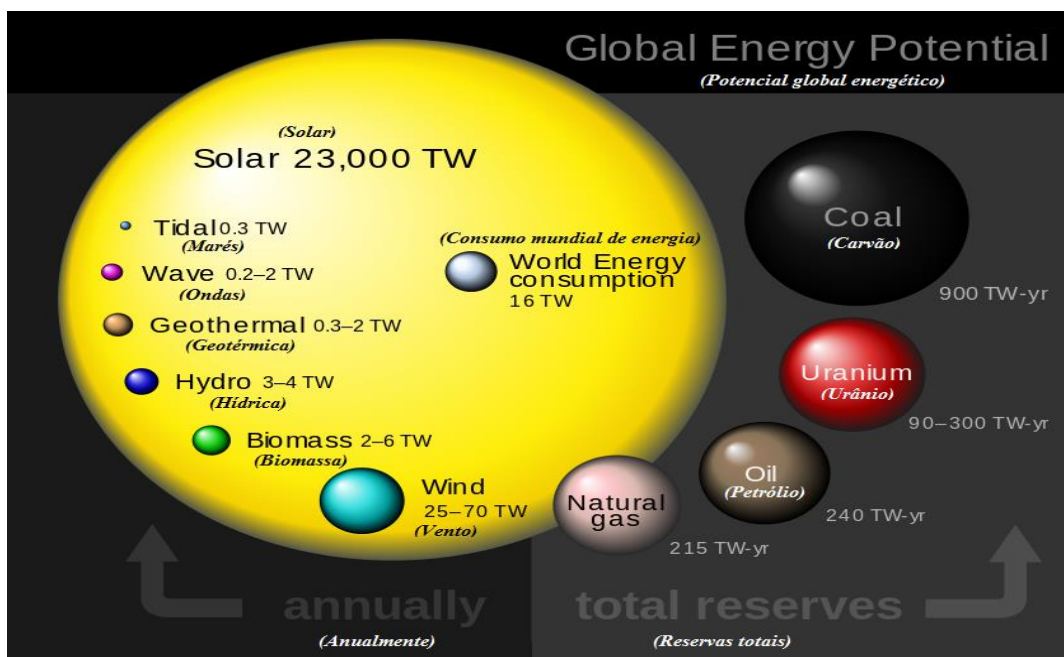


Figura 1 – Distribuição do potencial energético dos recursos energéticos a nível mundial (adaptado de Murphy, 2009)

1.2. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é o estudo da possibilidade de satisfazer o consumo anual doméstico, recorrendo a sistemas solares térmicos, através do conceito de acumulação sazonal de calor.

São idealizados e concebidos sistemas solares térmicos projetados em função da capacidade de acumulação, que possam captar a radiação solar incidente, transformá-la em energia térmica e armazená-la, do verão para o inverno, com o intuito de chegar a sistemas solares térmicos independentes de energia externa.

Para isso, o trabalho está estruturado nos próximos cinco capítulos da seguinte forma:

No capítulo 1, é feito o enquadramento do tema e apresentado o estado da arte relativamente aos conceitos sobre o sol e a energia solar, lançando as bases para o desenvolvimento dos sistemas solares térmicos.

No capítulo 2, é caracterizado o sistema solar térmico. São desenvolvidos parâmetros e detalhes importantes para a definição dos sistemas propostos no trabalho.

No capítulo 3, são apresentados os projetos de acumulação sazonal de calor, detalhando o seu funcionamento, e explicando também a modelação dos sistemas solares térmicos no programa de simulação dinâmica TRNSYS.

No capítulo 4, analisam-se os resultados, variando diferentes parâmetros, com vista a identificar a melhor configuração para acumulação sazonal de calor.

No capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões sobre os sistemas solares térmicos propostos e dadas sugestões de trabalho futuro.

1.3. Estado da arte

A) ENERGIA SOLAR, PORTUGAL E O SOL

A maior fonte de energia que temos ao nosso dispor, quer seja renovável, quer seja não renovável, é fornecida pelo Sol. Esta provem de um processo de fusão nuclear, onde fundem-se dois átomos de hidrogénio transformando-se assim num de hélio, radiando para o espaço enormes quantidades de energia. A energia é transportada por ondas eletromagnéticas que atravessam sensivelmente 143 milhões de quilómetros até chegarem à Terra (Phillips, 1995)

Como sabemos, Portugal encontra-se numa posição geográfica privilegiada em termos de exposição solar, com é observável pela distribuição da radiação e insolação solar da Figura 2. Portugal e Espanha estão entre os países europeus com maiores taxas de insolação e radiação incidentes anualmente, o que nos torna um país com enorme capacidade para acumulação de energia solar. Agora, esta potencialidade só se poderá tornar realidade se houver investimento em conhecimento e infraestruturas neste domínio.

De acordo com Cabeza (2015), Espanha foi quem mais investiu em centrais solares e, isso permite-lhe ser o país com maior potencial de poupança de eletricidade na Europa, provando deste modo que Portugal também o pode vir a ser.

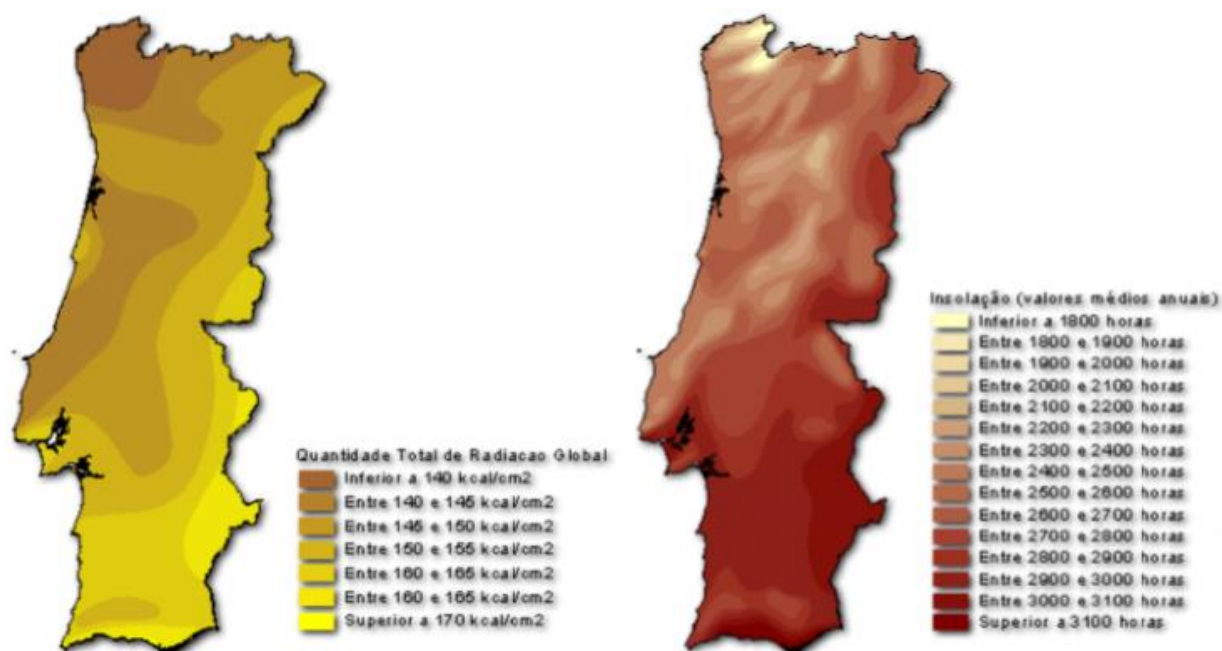


Figura 2 – Radiação incidente em Portugal (Esquerda); Insolação em Portugal (Direita) (Portal Energias, 2004)

B) SISTEMAS DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA SOLAR

Em primeiro lugar, para aproveitamento de energia solar, é necessário implementar sistemas que sejam capazes de captar a radiação e transformá-la em energia útil. Existem dois métodos para captação desta energia. Ou através de sistemas fotovoltaicos ou de sistemas solares térmicos. Os sistemas fotovoltaicos transformam a energia solar em elétrica e os sistemas solares térmicos, como o próprio nome indica, captam e acumulam a energia solar na forma de calor. Concretamente, este trabalho dirigiu-se para a conceção de sistemas solares de armazenamento de calor.

Segundo Sadoway (2013), a acumulação de energia com maior versatilidade e futuro será na forma elétrica, fazendo jus aos sistemas de captação fotovoltaica. Contudo, a escolha de acumulação na forma de calor justifica-se, por tipicamente, os sistemas solares térmicos serem duas a quatro vezes tão eficientes quanto os sistemas fotovoltaicos mas com um custo de 1/3 a 1/2 menor, o que faz uma enorme diferença para a maior parte das famílias do nosso País – Mais precisamente, os sistemas solares térmicos representam um dos melhores rácios custo-eficiência, que fazem uso de energias renováveis na concorrência ao combustíveis fósseis – (Cruickshank, 2009).

Sistemas solares térmicos

Qualquer sistema solar térmico tem, como primeira e principal função, converter a radiação incidente em calor, da maneira mais eficiente.

Independentemente da sua aplicação, um sistema solar térmico é tipicamente constituído por um coletor solar, cuja função é capturar a energia na forma de radiação e convertê-la em calor, um sistema de circulação para transportar o calor capturado até um sistema de armazenamento.

A energia é retirada do coletor por transferência de calor à medida que o fluido de transporte energético é bombeado através dele. Após o aquecimento do fluido, este tanto pode ser direcionado para um depósito de armazenamento térmico ou diretamente para satisfazer alguma necessidade de consumo, dependendo do funcionamento e do número de circuitos que constituem o sistema solar térmico. Todo o funcionamento é corretamente definido por um controlador, que faz a gestão das diferenças de temperatura entre o coletor e o depósito de acumulação térmica.

Sistemas solares térmicos domésticos

Os sistemas solares térmicos domésticos são, maioritariamente, concebidos para aquecimento de águas quentes sanitárias. Conceptualmente, uma casa familiar constituída por quatro indivíduos deverá ter uma área de coletores entre 3 a 4 m² para satisfazer um consumo de águas quentes de 150 até 300 litros diários.

Desde há vários de anos que os sistemas solares térmicos apareceram no mercado, mas só na década de 70 é que houve uma grande preocupação no seu desenvolvimento e otimização. Tudo teve a ver com o aumento crescente dos preços dos combustíveis fósseis e até com a consciencialização do perigo da energia nuclear (Cruickshank, 2009).

Desde essa época que o desenvolvimento desta tecnologia levou à conceção e classificação dos sistemas de aquecimento de águas quentes. São classificados de acordo com o seu *design* e funcionamento. Tanto podem ser sistema solares passivos ou ativos, de circulação direta ou indireta, (Pinel, 2011).

Sistemas passivos e ativos diferem entre si pela forma como fazem a circulação do fluido. Em sistemas passivos, a circulação do fluido é autorregulada e auto bombeada. Basicamente, a circulação é realizada por forças de flutuação termicamente induzidas. Um dos casos mais simples destas forças de flutuação é o efeito de termossifão. Por outro lado, sistemas ativos precisam de introdução de energia para movimentar o fluido ao longo do sistema. Devido à necessidade energética são acoplados bombas e controladores para definir e regular as taxas de circulação. Consequentemente, a utilização destes sistemas pode estar, em muito, condicionada pela quantidade de radiação solar incidente ou por condições económicas.

Sistemas passivos são mais indicados para climas mais quentes, onde a probabilidade de congelamento é reduzida. O funcionamento mais simples é o *design* do sistema termossifão, representado na Figura 3 (a). O sistema de armazenamento localiza-se em cima, ou até integrado no coletor solar. A água armazenada circula por convecção natural a partir do nascer do sol. Ou seja, a água contida no coletor aquece, tornando-se menos densa. Devido à diminuição de densidade, e na presença de água fria (e por isso mais densa) localizada no depósito e nas tubagens, dá-se a circulação. Estas forças de flutuação termicamente induzidas no aquecimento pelo sistema solar continuam até ao pôr-do-sol, carregando o sistema com água quente. Geralmente este mecanismo de

aquecimento de águas quentes sanitárias (AQS) é mais fiável e barato que os sistemas diretos, já que eliminam a utilização de bombas e controladores eletrónicos para operarem. Contudo, estão sujeitos a maiores perdas térmicas devido ao posicionamento dos sistemas de armazenamento.

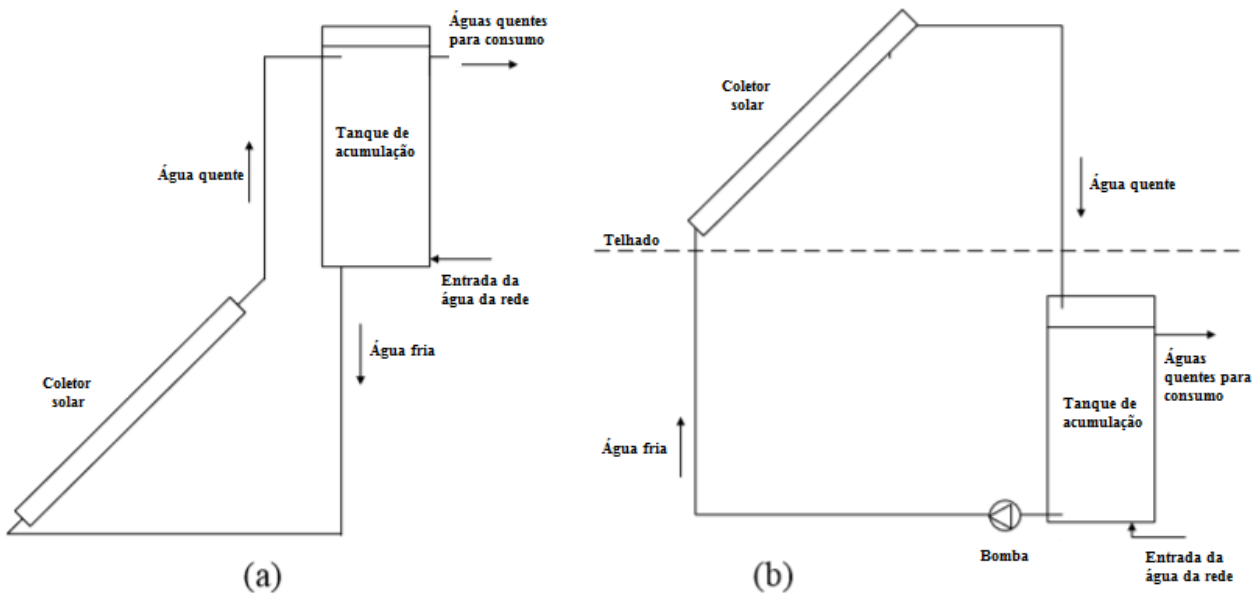


Figura 3 – (a) Sistema solar térmico passivo de funcionamento em termosifão; (b) Sistema solar térmico ativo de funcionamento direto (adaptado de Cruickshank, 2009)

Devido a circulação forçada, os sistemas solares ativos, Figura 3 (b), têm maiores possibilidades de *design*. Isto reflete-se na liberdade de localização dos sistemas de armazenamento, pois a introdução de uma bomba responsável pela circulação do fluido permite que este chegue onde for preciso. Portanto, o armazenamento tanto pode ser feito imediatamente abaixo do coletor como na cave da casa.

Sistemas diretos e indiretos caracterizam-se pela utilização do fluido. Por um lado os sistemas indiretos utilizam, em circuito fechado, um fluido intermediário, ou seja, um fluido de transporte de energia captada no coletor, que, aquando da chegada ao sistema de armazenamento, se transfere por troca de calor graças à utilização de um permutador de calor. Por outro, os sistemas diretos utilizam somente água, que, ao entrar no coletor, recebe a radiação solar e aquece; posteriormente é simplesmente acumulada no sistema de armazenamento ou circulada diretamente para satisfação de consumo doméstico.

C) ACUMULAÇÃO DE ENERGIA

A acumulação de energia pressupõe o armazenamento da energia solar captada. Não só porque a energia solar estará sempre dependente das condições meteorológicas e climatéricas, mas também pela necessidade de armazenamento para utilização posterior. Isto torna impreterivelmente importante a capacidade de retenção energética por períodos de tempo mais longos.

Existem várias formas de acumular energia. A acumulação pode ser realizada de forma mecânica, elétrica, química ou térmica. Todos estes métodos têm inúmeras possibilidades e ramificações. Mais concretamente, tendo em conta que o presente trabalho aborda a temática de sistemas solares térmicos, as opções de acumulação reduzem-se a um leque mais restrito (Figura 4).

Segundo Sharma e Tyagi (2009) e, posteriormente, em uma compilação sobre acumulação de energia em sistemas térmicos, editado por Cabeza (2015), o armazenamento térmico divide-se em dois grupos principais: armazenamento térmico e armazenamento termoquímico.

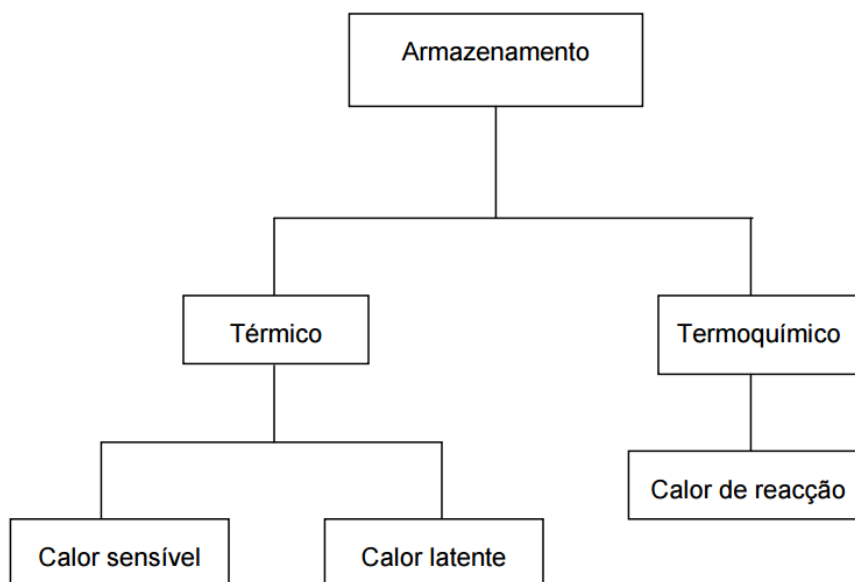


Figura 4 – Esquema dos tipos de armazenamento de energia

Armazenamento de Energia Térmica

O armazenamento térmico pressupõe qualquer mecanismo de aumento de temperatura da substância responsável pela acumulação do calor. É no gradiente térmico que está a ciência da acumulação térmica. Este processo está ramificado na acumulação de calor sensível e acumulação de calor latente.

- **Acumulação de calor sensível**

A acumulação térmica na forma de calor sensível é a forma mais comum de armazenamento de energia térmica (Figura 5). Basta que para isso se aumente a temperatura de certa substância, armazenando calor por causa da variação de energia interna do material. Não existe mudança de fase ou reação química no processo de aquecimento e a capacidade de armazenamento de energia é proporcional ao calor específico da substância, da massa total de armazenamento e da variação da temperatura associada. A quantidade de energia armazenada por calor sensível é expressa de seguinte forma:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \tag{1}$$

onde Q corresponde à quantidade de energia que pode ser armazenada, em Joule, m é a massa da substância que está a receber calor, c_p a massa específica da mesma substância e ΔT a diferença da temperatura inicial e final.

De acordo com Cruickshank (2009), para aumentar densidade energética, ou melhor, a capacidade de acumulação por unidade de volume, os melhores candidatos são sólidos e líquidos de massa e calor específico elevado. É também uma característica importante pois, quanto maior for a densidade de energia do material, menor poderá ser o sistema de armazenamento e, conseqüentemente, menor áreas de depósito e de contato, diminuindo perdas e custos.

Por fim, a água é um excelente meio de acumulação sensível para intervalos de temperatura, até 100°, por causa da sua alta capacidade volumétrica de calor, baixo custo e abundância.

- **Acumulação de calor latente**

A acumulação térmica através de calor latente traduz-se por um incremento de temperatura suficiente, para promover a mudança de fase da substância que está receber calor. O armazenamento de calor latente usa a energia absorvida ou libertada durante a mudança de fase (Figura 5).

Segundo Dincer e Rosen (2002), quando se recorre a um material que pressupõe mudança de fase, a energia total armazenada para o intervalo de temperaturas necessárias, T_1 para T_2 , está dependente de propriedades como o calor específico da substância nas várias fases e do calor latente, isto é, nas transições de entalpias associadas com às mudanças de fase. Assim, a energia armazenada na mudança de envolve a energia associada à mudança de fase propriamente dita e as energias sensíveis sofridas por ambas as fases, vindo:

$$Q = m \cdot C_{P_s} \cdot (T_f - T_1) + m \cdot h_{fg} + m \cdot C_{P_l} \cdot (T_2 - T_f) \quad (2)$$

onde T_f é a temperatura de mudança de fase, h_{fg} a entalpia associada na mudança de fase e C_{P_s} e C_{P_l} são o calor específico das duas fases. De acordo com o mesmo autor, a energia obtida com a mudança de fase de dada substância pode ser de várias ordens de grandeza superior à energia alcançada na variação de energia interna, que ocorre na acumulação sensível de calor.

Devido ao seu grande potencial de densidade de energia, os materiais de mudança de fase permitem armazenar grandes quantidades de energia em volumes pequenos. Contudo, para que se desenvolva fiavelmente este tipo de material de acumulação térmica, é necessário que o efeito de calor latente seja reversível, que possa reter energia na mudança de fase e que a liberte quando volte ao estado inicial, durante um grande número de ciclos sem degradação da substância. Deve ainda ter boas propriedades térmicas, obviamente para as duas fases, assegurando também baixas corrosões, toxicidades e mudanças de volume.

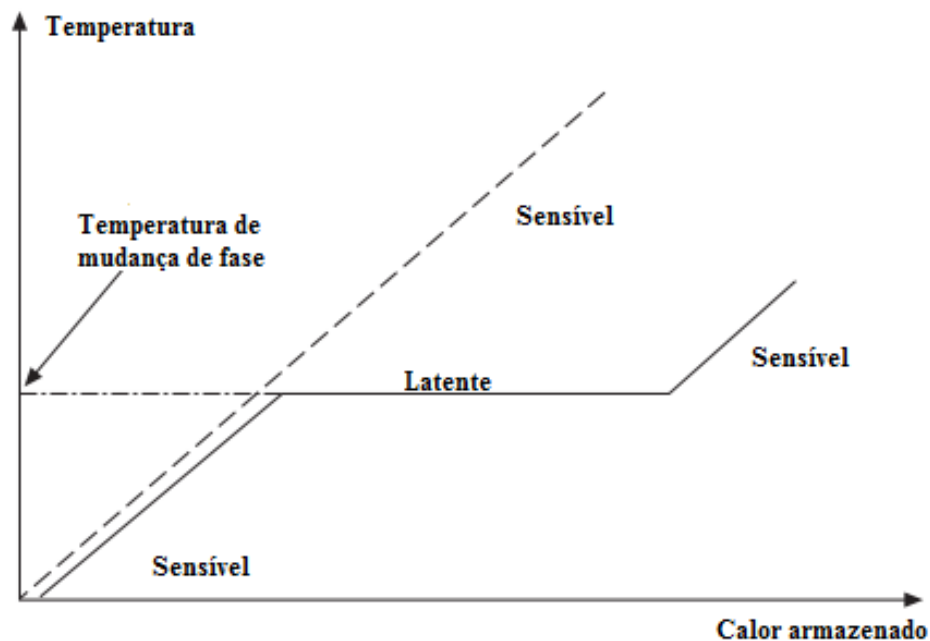


Figura 5 – Comparação entre as capacidades de acumulação de calor sensível e latente consoante a temperatura

Armazenamento de Energia Termoquímica

- **Acumulação de calor de reação**

O conceito de armazenamento por reação termoquímica faz uso de reações químicas para armazenar energia. Depende da energia absorvida e libertada durante a formação ou quebra de ligações da substância. As reações desejadas para esta acumulação de calor são reações químicas endotérmicas, que resultam em produtos da reação facilmente separáveis e que não permitem outro tipo de reações não desejadas. A eficiência deste processo químico depende do grau de conversão da reação, do calor da reação e de propriedades como a reversibilidade do processo para que seja possível a libertação de energia em qualquer momento desejado. Um exemplo prático para este processo de acumulação de energia são as reações de sorção ou dessorção, que consistem na quebra de ligações entre um dado fluido e uma substância absorvente ou adsorvente.

Apesar disto, de acordo com Duffie e Beckman (2006), não existe ainda um material adequado para as temperaturas envolvidas em sistemas solares térmicos.

Acumulação Sazonal de Calor e Sistemas Solares Térmicos domésticos

Acumulação sazonal de calor entende-se como método de armazenamento de calor durante longos períodos de tempo. Em sistemas de acumulação energética, a acumulação sazonal consiste na retenção do calor resultante da energia captada pelos coletores durante os meses mais quentes para posterior proveito energético durante os meses mais frios, aumentando, desta maneira, o aproveitamento de energia solar. Aumenta-se, assim, a eficiência energética dos sistemas solares térmicos, tornando-os mais sustentáveis e autossuficientes.

Existem, no mercado, diferentes tecnologias para acumulação sazonal de energia térmica. Tipicamente estes sistemas aproveitam mais-valias energéticas com recurso a fontes naturais subterrâneas, como aquíferos, águas e vapores quentes subterrâneos e tanques inseridos no subsolo, com a intenção de criar um sistema dinâmico, isolado pela área de terra circundante.

Objetivamente, qualquer sistema pode servir para este efeito, basta que para isso se consiga potencializar ao máximo a sua capacidade de armazenamento de energia ao longo do tempo. É fácil perceber que o aumento da capacidade de retenção da energia captada passa principalmente pelo volume disponível do sistema de acumulação. Por sua vez, grandes volumes de armazenamento condicionam a conceção dos sistemas sazonais simplesmente porque grandes volumes só se tornam economicamente viáveis para utilização em grande escala.

Ainda não existe nenhum conceito, tecnológica e/ou comercial, de sistemas solares térmicos domésticos de acumulação sazonal de calor. Contudo, o *design* e o projeto destes sistemas terá como premissas e parâmetros de conceção fatores como a percentagem de fração solar, o volume total do sistema de armazenamento, área de coletores que otimizem o aquecimento das águas para consumo, disposição e organização do sistema de circulação, materiais e isolamento dos depósito de acumulação térmica, energia extra do sistema de apoio, que terá que ser usada nos meses mais frios, e custo total de montagem e funcionamento dos sistemas solares.

D) SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA

Em sistemas solares térmicos a forma mais usual de fazer o armazenamento de energia é através de depósitos de acumulação de água. Existe uma enorme variedade deste tipo de equipamento, o que torna necessária a definição e explicação das características fundamentais dos diferentes tipos de depósitos disponíveis no mercado.

Em primeiro lugar, os depósitos de armazenamento de energia térmica podem variar entre si de acordo com o tamanho, geometria e isolamentos. Caso o sistema de armazenamento seja composto por mais que um depósito os sistema podem ainda variar pela forma como os depósitos estão ligados entre si, (Cruickshank, 2009 e Cabeza, 2015).

Tamanho e geometria dos depósitos de armazenamento

O tamanho e geometria dos depósitos são características fundamentais para alcançar melhores capacidades de retenção de energia em função do tempo. Isto é, determinam propriedades fundamentais para alcançar melhores capacidades de acumulação térmica devido a promoverem fenómenos térmicos de estratificação.

De acordo com Cruickshank (2009), o tamanho e geometrias ótimas dos depósitos de acumulação de energia térmica dependem de vários fatores, como a distribuição da temperatura fornecidas pela rede de abastecimento, temperatura requerida no sistema solar térmico, quantidade e distribuição das águas aquecidas para satisfação do consumo doméstico, durante o dia ou temporada, taxas de carga ou descarga da energia acumulada e espaço disponível para instalação do sistema de armazenamento.

Os depósitos, conceptualmente, tanto podem ser retangulares ou cilíndricos, verticais ou horizontais.

Sistemas de armazenamento compostos por vários depósitos

Se um sistema solar térmico for composto por um conjunto de depósitos é importante compreender a forma como estes estão ligados entre si (Figura 6). Existem duas grandes formas de ligação entre os depósitos. Ligação em paralelo ou em série.

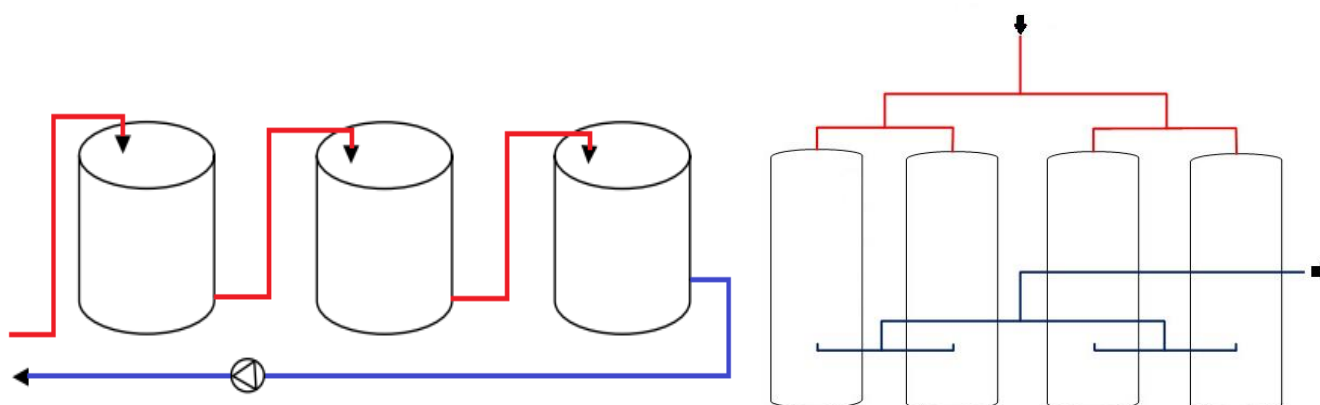


Figura 6 – Sistemas de depósitos ligados em série (Direita); Sistemas de depósitos ligados em paralelo (Esquerda) (adaptado de Cruickshank, 2009)

A distinção entre sistemas em série ou em paralelo reside na forma como o carregamento e descarregamento da energia acumulada no interior dos depósitos de água é realizado. Em sistemas de carregamento de energia térmica em série, o fluido quente proveniente dos coletores solares entra diretamente no primeiro depósito e continua a passar de depósito em depósito, sem haver carregamento em simultâneo de vários depósitos. Já nos sistemas em paralelo, o fluido quente é dividido à entrada dos depósitos, fazendo com que o carregamento de cada depósito seja feito em simultâneo.

Fundamentalmente, a diferença entre estes dois tipos de ligação de carregamento e descarregamento está na eficiência termodinâmica dos sistemas e comparativamente à utilização de um só depósito. De acordo com Sekulic e Krane (1992), a utilização de sistemas de carregamento em série permite reduzir em 38% a entropia (agitação de águas) dentro dos depósitos, traduzindo-se num benefício de melhor estratificação térmica, comparativamente ao carregamento com sistemas de um só depósito. Mais ainda, segundo testes realizados por Dickinson (2012) chegou-se à conclusão que os sistemas de arranjo em série possibilitam obter maior estratificação térmica na fase de carregamento e que sistemas de depósitos ligados em paralelo se comportam melhor aquando da descarga de energia do sistema.

2. ACUMULAÇÃO EM SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS ATIVOS INDIRETOS

O sistema solar térmico desenvolvido e detalhado neste capítulo tem em vista a acumulação sazonal calor, portanto acumulação de energia térmica durante todo o ano. Como o sistema solar é de funcionamento ativo indireto, divide-se em dois circuitos. O primeiro é o circuito constituído pelo coletor solar, por permutadores de calor externos e uma bomba. Utiliza uma mistura anticongelante de água-glicol como fluido de transporte de energia térmica. Este circuito é responsável pela captação de energia solar, carregamento e transporte energético graças ao fluido, tendo como objetivo final a transferência de calor através do permutador para o depósito de acumulação térmica.

Já o circuito secundário é composto por um conjunto de depósitos de água, bombas para fazer circulá-la em direção aos permutadores de calor. Um dos depósitos funciona como sistema de pré-aquecimento, que recebe água da rede, fazendo um primeiro estágio de aquecimento. O segundo depósito é responsável pela satisfação de águas quentes, dependendo das necessidades domésticas, onde a água é aquecida até a temperatura final desejada. É importante ainda referir que os depósitos têm volumes diferentes e, mais relevante, que são concebidos três tipos de sistemas solares térmicos distintos: um semelhante aos comuns no mercado, mas adaptado com dois depósitos de acumulação térmica, apenas com carregamento do “depósito solar” (Modelo 1), outro de carregamento energético em série (Modelo 2) e um outro de carregamento em paralelo (Modelo 3).

Posto isto, o presente capítulo visa a caracterização das variáveis, diretas e indiretas, que constituem e influenciam os sistemas térmicos concebidos independentemente do modelo em causa.

- **SOL E COIMBRA**

Neste trabalho é assumido que os sistemas solares térmicos analisados se encontram instalados e Coimbra. Esta cidade tem condições climáticas muito próprias.

Durante os meses mais frios, o inverno pode ser rigoroso e, durante os meses de verão, podem atingir-se temperaturas elevadas.

Para melhor ilustrar as diferentes variações do clima da cidade recorreu-se a informações disponíveis nos *sites* do *IET (Institute of Energy and Transport, 1962)*, e do *IPMA (Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 1964)*. Para obter os dados necessários definiu-se Polo 2 da Universidade de Coimbra como as coordenadas geográficas da residência doméstica em estudo. Apresentam-se na Tabela 1 e nas Figuras 7 e 8 parâmetros que caracterizam as condições climáticas do local de suposta instalação dos sistemas solares térmicos.

Tabela 1 – Representação de diversas propriedades climatéricas de Coimbra (dados do IET, 2014)

Mês	Radiação no plano horizontal (Wh/m ² /dia)	Radiação no plano de inclinação ótima, 35° (Wh/m ² /dia)	Radiação no plano a 45° (Wh/m ² /dia)	Radiação normal direta (Wh/m ² /dia)	Inclinação ótima (°)	Temperatura média diária (°C)
janeiro	2030	3420	3640	3040	63	8,9
fevereiro	3020	4510	4710	4070	56	9,9
março	4410	5490	5530	4610	42	12,7
abril	5130	5510	5340	4890	26	14
maio	6170	5960	5600	5700	13	16,7
junho	6960	6360	5870	6980	6	20,2
julho	7350	6890	6390	8030	10	20,9
agosto	6560	6830	6520	7490	22	21,8
setembro	5140	6250	6220	6290	38	20,5
outubro	3550	4990	5140	4490	51	16,8
novembro	2310	3760	3980	3380	61	12
dezembro	1810	3200	3430	2910	65	9,9
Média anual	4540	5270	5200	5160	35	15,4

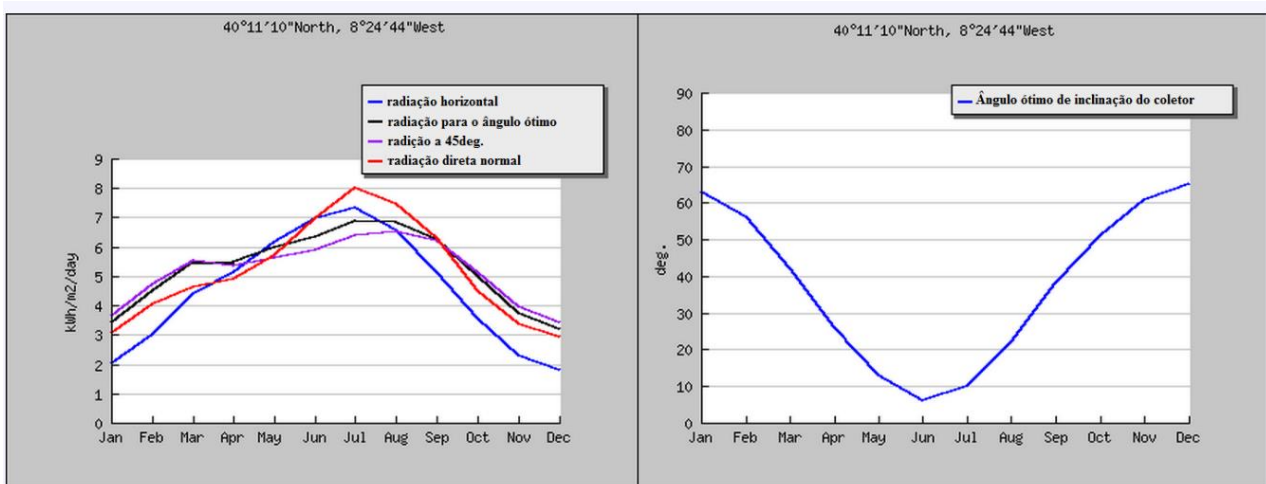


Figura 7 – Conjunto de gráficos sobre a radiação incidente para diferentes ângulos (Esquerda) e ângulo ótimo para os diferentes meses do ano para a localização da residência (Direita), (dados do IET, 2014)

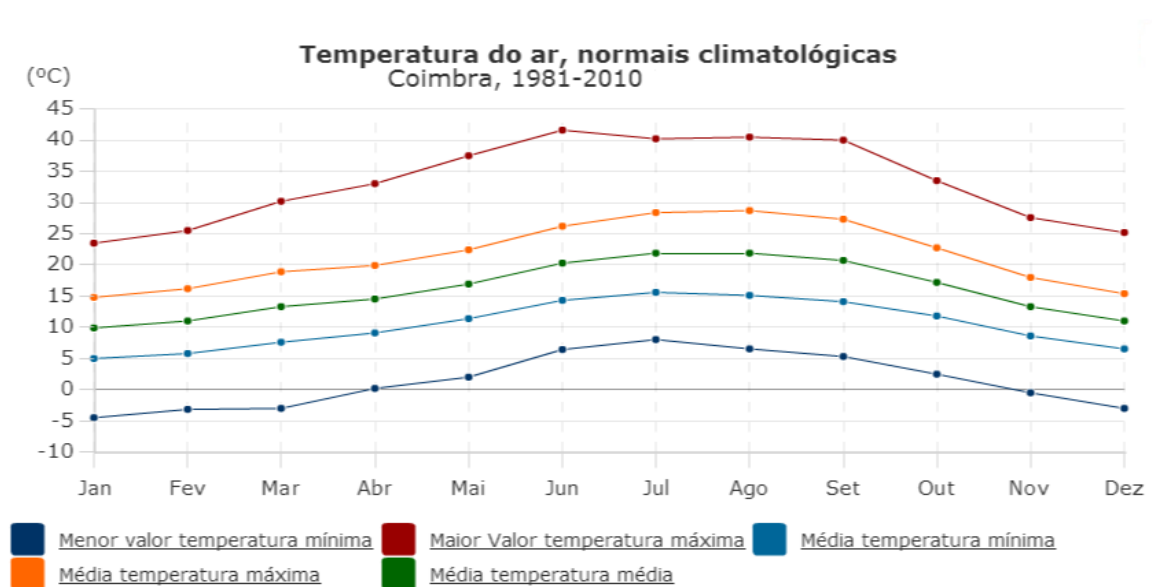


Figura 8 – Distribuições médias das temperaturas da cidade de Coimbra (dados do IPMA, 2010)

• COLETOR SOLAR

Os coletores solares são dispositivos capazes de absorver e transformar a radiação solar em energia na forma de calor e carregar o fluido de transporte térmico à medida que este passa pelo coletor.

De acordo com um documento compilado por Tian e Zhao (2013) de trabalhos realizados por Kalogirou (2009), existem vários tipos de coletor solares que se dividem em dois grandes grupos de acordo com o rácio de concentração da radiação solar incidente: coletores solares não concentradores e coletores solares concentradores. Para o interesse do presente documento interessam apenas os coletores solares planos, que se inserem no grupo dos painéis solares não concentradores.

A radiação solar, ao incidir no coletor, passa por uma superfície de vidro, com alta transmissividade à radiação com baixo comprimento de onda (na qual se insere o emitida pelo sol) e baixa transmissividade à radiação de alto comprimento de onda (como seja a emitida por superfícies a temperaturas inferiores a 100 °C). Este fenómeno é conhecido como “efeito de estufa” e, na prática, funciona com uma armadilha da radiação solar. A radiação solar atinge a superfície coletora, aquecendo-a. Esta assemelha-se a uma superfície de corpo negro, para captar a maior quantidade de calor possível. Por sua vez, o fluido circulante retira o calor captado pela superfície coletora e transmite-o ao módulo de acumulação. Por fim, a face inferior é revestida por uma camada isoladora para diminuir as perdas de calor.

O rendimento de coletores solares depende, fundamentalmente, de parâmetros como a radiação incidente na área de superfície do painel, temperatura ambiente e temperatura do fluido de transporte térmico que circula na tubagem do coletor. É calculado através da expressão:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \left(\frac{T_{col} - T_{amb}}{G} \right) - a_2 \left(\frac{(T_{col} - T_{amb})^2}{G} \right) \quad (3)$$

em que η é o rendimento, η_0 o rendimento ótico do coletor, T_{col} a temperatura do fluido a circular no coletor, T_{amb} a temperatura ambiente exterior, G a radiação que incide no coletor solar e a_1 e a_2 o coeficiente linear de perdas térmicas e coeficiente quadrático de perdas térmicas respetivamente.

O coletor escolhido foi o coletor plano pré-definido pela ASHRAE que está disponível na biblioteca do programa de simulação TRNSYS. Este coletor solar tem as seguintes características: rendimento ótico $\eta_0 = 0,8$, coeficiente linear de perdas térmicas $a_1 = 13 \text{ kJ}/(\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}) = 3,61 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; e um coeficiente quadrático de perdas térmicas $a_2 = 0,05 \text{ kJ}/(\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}) = 0,014 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^2)$.

Falta ainda estabelecer a área de coletores solares dos sistemas. Este parâmetro vai ser definido de acordo com a melhor percentagem de fração solar, percentagem de energia utilizada no aquecimento de água, que pode ser coberta pelo sistema solar, em função da capacidade de volume e dos diferentes sistemas solares térmicos apresentados.

• FLUIDO TÉRMICO

Para aproveitamento da energia solar captada pelo coletor e transferência dessa para as águas quentes sanitárias é utilizado um fluido de transporte de energia térmica, uma mistura anticongelante de água-glicol.

De acordo com Medeiros *et al.* (2010), os fluidos de transporte devem possuir propriedades essenciais tais como alto calor específico, boa condutividade térmica, não tóxico, baixos impactos ambientais, ser inerte quimicamente, abundância e disponibilidade comercial a bons preços. Esta solução anticongelante é hidrosscópica e também totalmente miscível em água.

Existem três tipos de misturas principais de água-glicol: etilenoglicol, propilenoglicol e glicerol. A escolha foi feita de acordo com características como as temperaturas médias mínimas de Coimbra, calor específico, condutividade térmica, massa específica e ponto de fusão, em função da percentagem de água na mistura. Estas características vêm resumidas nos gráficos apresentados nas Figuras 9 e 10 e na Tabela 2:

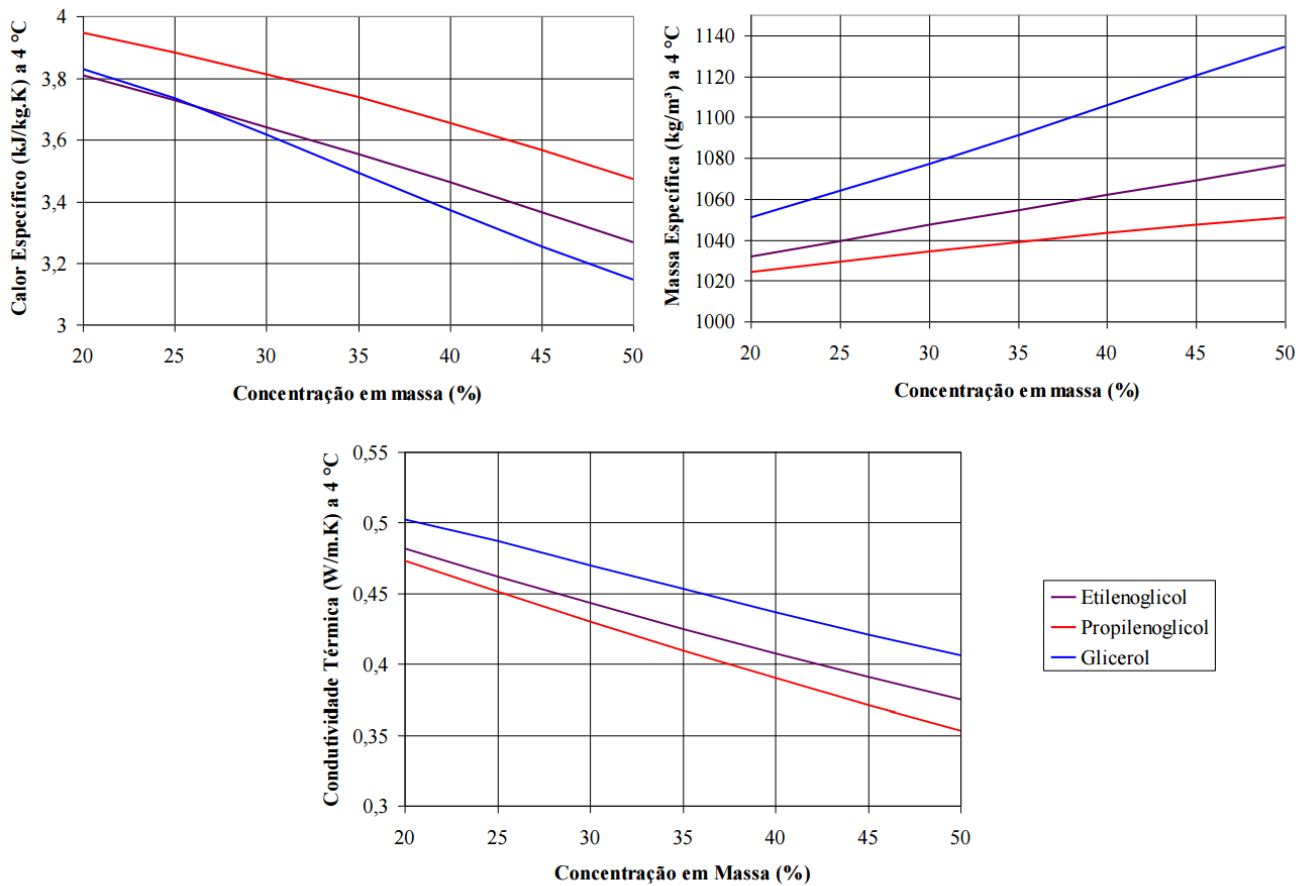


Figura 9 – Conjunto de gráfico de propriedades termofísicas das misturas à base de glicol (Medeiros *et al.*, 2010)

Como observado nos gráficos, a mistura de glicol potencialmente melhor para o transporte de energia térmica captada é o propilenoglicol, pois tem a melhor capacidade térmica para a menor condutividade e massa específica. Considerando também o próximo gráfico do ponto de solidificação, e sabendo que as temperaturas médias mínimas de Coimbra nunca descem dos -5°C, estamos em condições de escolher a percentagem de água-propilenoglicol. Assim, as propriedades da percentagem escolhida estão resumidas na Tabela 2.

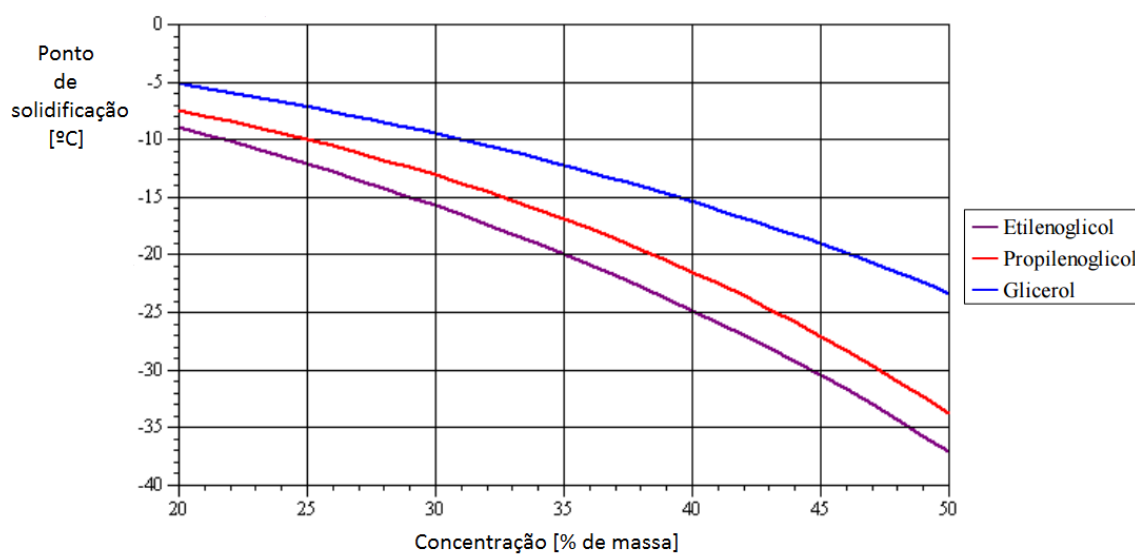


Figura 10 – Ponto de solidificação das misturas à base de glicol (Medeiros *et al.*,2010)

Tabela 2 – Propriedades termofísicas de uma mistura de 20% à base de glicol a 4 °C (Medeiros *et al.*, 2010)

Produto e Concentração	Propriedades Termofísicas			
	Ponto de Fusão (°C)	Massa Específica (kg/m ³)	Calor Específico (kJ/kg.K)	Condutividade Térmica (W/m.K)
20% a 4°C				
Etilenoglicol	-7,87	1031,6	3,809	0,4819
Propilenoglicol	-7,15	1024,0	3,945	0,4729
Glicerol	-5,12	1050,7	3,829	0,5024

• PERMUTADOR DE CALOR EXTERNO

O permutador de calor externo é o componente de ligação energética entre o circuito primário e o circuito secundário. Permite que a energia transportada pela mistura água-propilenoglicol seja transferida para a água armazenada no interior do depósito e consequentemente a aqueça.

O permutador de calor externo utilizado será do tipo de permutador de calor em contra-corrente. Nesta configuração (ver Figura 11) a transmissão de calor ocorre entre as porções mais quentes de ambos os fluidos (junto da entrada da mistura de água-propilenoglicol e saída da água proveniente do depósito), bem como entre as zonas mais frias (perto da saída do fluido do circuito primário e da entrada da água do depósito no permutador) de uma forma mais progressiva. Assim, a temperatura da água do circuito secundário à saída do permutador pode exceder a temperatura de saída do fluido de transporte energético do circuito primário.

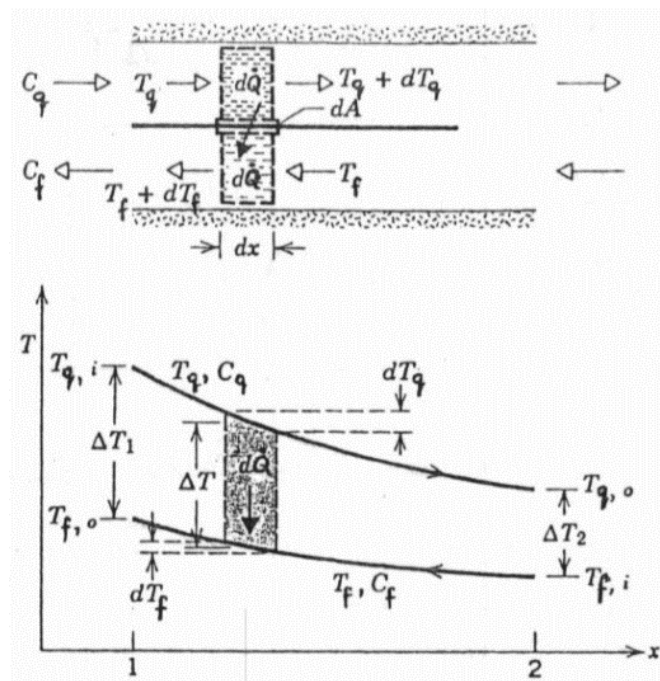


Figura 11 – Variação da temperatura para permutador de calor em contra-corrente (adaptado da sebenta de Transmissão de Calor II, José Costa, 1990)

Para calcular a potência térmica transferida num permutador de calor em que não existe mudança de fase ou reação química pode ser usada qualquer uma das expressões da equação (4).

$$\begin{cases} \dot{Q} = \dot{m}_q \cdot C_{p,q} \cdot (T_{q,i} - T_{q,o}) \\ \dot{Q} = \dot{m}_f \cdot C_{p,f} \cdot (T_{f,o} - T_{f,i}) \end{cases} \quad (4)$$

Estas equações relacionam parâmetros como: as temperaturas dos fluidos à entrada e à saída; o coeficiente global de transmissão de calor e a área total da superfície de transmissão de calor através de um balanço de energia dos fluidos frio e quente que circulam no permutador. É importante, ainda, referir que se consideram desprezáveis as trocas de calor entre o permutador e o ambiente e que os índices *i* e *o* se referem às condições de entrada e saída, respetivamente.

Define-se a taxa total de transmissão de calor, \dot{Q} , através da lei de arrefecimento de Newton, a partir da diferença de temperaturas do fluido quente e da água do depósito, bem como do coeficiente global de transmissão de calor do permutador.

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad (5)$$

em que ΔT_m é calculado com base na Figura 11 da seguinte forma:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Delta T_1 = T_{q,1} - T_{q,2} = T_{q,i} - T_{q,o} \\ \Delta T_2 = T_{f,2} - T_{f,1} = T_{f,o} - T_{f,i} \end{cases} \quad (7)$$

Assumindo como razoável que a potência do permutador (ou permutadores) de calor seja próxima da potência captada e sabendo que um coletor solar plano instalado em Coimbra é capaz de captar em média 500 W/m² e, considerando também, uma diferença média logarítmica igual a 10 °C como razoável, podemos especificar o coeficiente de transferência do permutador em função das áreas de coletor.

A potência térmica do permutador tem ser igual ou superior à potência térmica captada pelo coletor. Portanto, à medida que se aumenta a área de coletores, o coeficiente de transmissão de calor aumentará também, para que assim, se atinjam altas taxas de

transferência de calor do circuito primário para os sistemas de acumulação do circuito secundário.

Na tabela 3 é apresentada a evolução do coeficiente de transferência do permutador em função das áreas de coletores.

Tabela 3 – Coeficiente de transmissão de calor do permutador em função do aumento da área de coletor

Área de coletores [m²]	Coeficiente de transferência do permutador [W/°C]
4	200
6	300
8	400
10	500

• DEPÓSITOS DE ACUMULAÇÃO TÉRMICA

Os depósitos de acumulação fazem parte do circuito secundário e assumem uma importância vital no funcionamento do sistema. É graças aos depósitos de armazenamento que é possível acumular a energia solar térmica.

Antes de passar a detalhes sobre os depósitos de armazenamento de água é importante ter presente o funcionamento do conjunto de depósitos que compõem o circuito secundário. Este circuito é constituído por dois depósitos de volumes diferentes. Um deles está ligado diretamente à rede e funciona como depósito de pré-aquecimento de águas (designado neste trabalho por “depósito solar”). O segundo é responsável pela satisfação das necessidades de consumo recebendo as águas já pré-aquecidas (designado por “depósito de consumo”). Caso a água esteja à temperatura de *set-point* (definida na secção perfil de consumo AQS), esta, está pronta para consumo. Caso contrário, uma serpentina elétrica contida no interior do depósito, aquecê-la-á até à temperatura desejada.

Geometria dos depósitos

Para promover a eficiência de acumulação térmica é necessário promover a estratificação térmica. Segundo Cabeza (2015), a geometria que mais potencia a estratificação térmica é a forma cilíndrica vertical, assente sobre uma das bases e com uma altura bem superior ao diâmetro da base. Assim sendo, esta foi a geometria adotada em ambos os depósitos.

Volume

Segundo Rodríguez-Hidalgo (2011), o volume dos depósitos deve ser definido de acordo com a relação volume/área de coletor solar.

A definição do volume de cada depósito foi otimizada consoante os resultados obtidos na simulação dinâmica do sistema. De acordo com a fração solar, da área de coletores e do tipo de sistema solar modelado, testar-se-ão vários volumes para os depósitos de acumulação até se encontrar o volume ótimo de eficiência do sistema solar térmico.

Material de isolamento

Para reduzir as perdas de calor pelas paredes do depósito, é necessário revesti-lo com materiais isolantes. O objetivo destes materiais é aumentar a resistência térmica à passagem do calor o que, conseqüentemente, reduz o coeficiente de transmissão global de calor (parâmetro que descreve as perdas térmicas). Aumentar a espessura ou reduzir a condutividade irá aumentar a resistência térmica e reduzir as perdas. Portanto, materiais altamente isolantes têm muito baixa condutividade térmica, independentemente da espessura utilizada.

Segundo Terry, N. et al (2012), a partir da Figura 12 – gráfico dos coeficientes globais de transmissão de calor, pelo custo por metro dos diferentes materiais isoladores – definiu-se uma camada isoladora composta por aerogel, gel de sílica com nano poros, de 10 mm, e uma segunda camada em poliestireno expandido, com 100 mm.

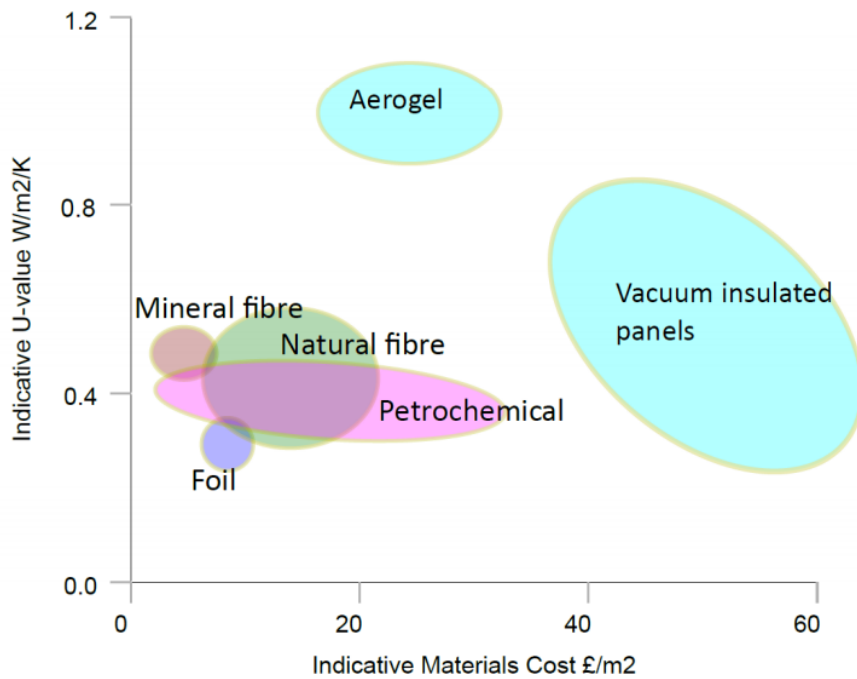


Figura 12 – Materiais com potencial para isolamento térmico dos depósitos de acumulação (Terry, N. et al., 2012)

Desta forma, o coeficiente global de transmissão de calor da camada isoladora calcula-se determinando as resistências térmicas:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{t_{cond_aerogel}} = \frac{L_a}{K_a} = \frac{0,1}{0,041} = 2,44 \text{ m}^2\text{KW}^{-1} \\ R_{t_{cond_poliestireno}} = \frac{L_p}{K_p} = \frac{0,01}{9,699 \times 10^{-3}} = 1,031 \text{ m}^2\text{KW}^{-1} \end{array} \right. \quad (8)$$

Assumindo os depósitos em poliestireno com uma espessura de 0,01 m e isolados com ma camada de 0,1 m de aerogel e desprezado as resistências térmica convectivas interior e exterior, a resistência térmica total da camada isoladora expressa-se de acordo com associação de resistências em série apresentada em (9):

$$R_{isolamento} = \sum R_{t_{cond_aerogel}} + R_{t_{cond_poliestireno}} = 3,471 \text{ m}^2\text{KW}^{-1} \quad (9)$$

Assim o coeficiente global de transmissão de calor define-se aplicando a fórmula:

$$U = \frac{1}{R_{isolamento}} = \frac{1}{3,471} = 0,288 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \quad (10)$$

Este valor será inserido na parametrização do depósito no programa de simulação TRNSYS.

• SISTEMA DE APOIO

Assume-se que o apoio ao sistema solar será realizado recorrendo a uma resistência elétrica de 2,5 kW inserida no depósito destinado ao armazenamento da água quente para consumo. Tem a função de aquecer a água até à temperatura definida de 45 °C. O seu funcionamento é controlado por um termostato, localizado no cimo do depósito de consumo, que ativa a resistência elétrica ao detetar uma temperatura de 5°C abaixo do valor de referência de 45 °C.

Este é um parâmetro importante porque faz parte do cálculo da fração solar. Ou seja, quanto menor for a quantidade de energia fornecida pela serpentina elétrica, em relação à quantidade de energia necessária para satisfazer anualmente o consumo da residência, maior será a percentagem da fração solar.

• CONTROLADOR

O controlador é um dispositivo eletrónico responsável pelo correto funcionamento do circuito primário e, por conseguinte, de todo o sistema solar térmico. Este dispositivo controla o funcionamento das bombas e, desta forma, a circulação do fluido de transporte de energia captada e das águas que entram no permutador de calor.

Dependendo dos valores pré-definidos dos *inputs* das funções de controlo da bomba do circuito primário (*control function*, γ_0) e do próprio controlador (*input control function*, γ_i) existem dois modos deste gerar a função de controlo da bomba. Sabendo que, no momento inicial, o valor da função de controlo do controlador foi pré-definido igual a zero, temos:

$$\text{Controlador desligado } (\gamma_i = 0), \quad \begin{cases} \Delta T_H \leq T_H - T_L \Rightarrow \gamma_0 = 1 \\ \Delta T_H > T_H - T_L \Rightarrow \gamma_0 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{Com } \Delta T_H = 8^\circ\text{C} \quad (12)$$

$$\text{Controlador Ligado } (\gamma_i = 1), \quad \begin{cases} \Delta T_L \leq T_H - T_L \Rightarrow \gamma_0 = 1 \\ \Delta T_L > T_H - T_L \Rightarrow \gamma_0 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{Com } \Delta T_L = 2^\circ\text{C} \quad (14)$$

na Figura 13 pode-se observar a alternância do sinal do controlador:

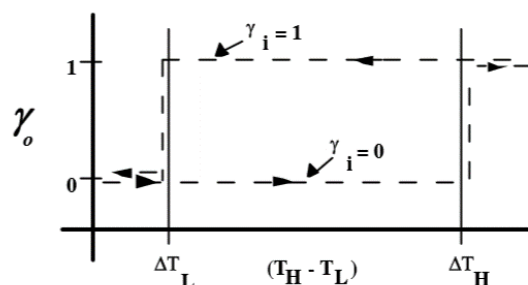


Figura 13 – Variação do sinal do controlador (TRNSYS Manuals)

em que ΔT_H é a maior diferença de temperatura em *dead band*; ΔT_L a menor diferença de temperatura em *dead band*; T_H a temperatura de controlo mais alta, ou seja, a temperatura à saída do coletor que entrar no primeiro permutador de calor; T_L corresponde à temperatura de controlo mais baixa, ou, por outras palavras, à temperatura do fluido à saída do permutador de calor que entrará no coletor novamente. Assim, enquanto ΔT_H seja menor ou igual que a diferença entre as temperaturas de entrada e saída do permutador de calor, a bomba estará sempre em funcionamento.

• CAUDAL DE FLUIDO EM CIRCULAÇÃO

O débito de circulação do sistema varia ao longo do tempo porque depende do caudal de circulação dos circuitos que compõem o sistema. Tipicamente, o caudal de circulação no circuito primário em coletores solares térmicos é $\dot{v} = 1 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ e pode ser expressa em unidades do sistema internacional da seguinte forma:

$$\dot{m}_{col} = \frac{\dot{v}_{col}}{1000} \cdot A_{col} \cdot \rho_{\text{água}} \cdot \frac{1}{60} \quad (15)$$

Como as áreas dos coletores solares térmicos são um parâmetro de ajuste de otimização de resultados, este parâmetro será ajustado ao longo da simulação energética.

Já o caudal de circulação nos depósitos é igual ao de consumo de água e é fornecida pela rede pública de abastecimento. À medida que seja necessária água na residência, entrará no circuito secundário do sistema solar térmico a mesma quantidade que saiu, a uma taxa de 100 kg/hr (=0,028 kg/s).

• CONJUNTOS DE VÁLVULAS

Para definir os sistemas de carregamento térmico dos depósitos ou em série ou paralelo, é necessário jogar com a circulação no sistema global. Assim, são utilizadas

válvulas simples de desvio de caudal no circuito primário, circuito de circulação do fluido de transporte de energia.

É ainda utilizada uma válvula termostática de maneira a que seja possível regular a temperatura de saída da água quente para consumo. Se a água, à saída do depósito de consumo, estiver mais quente, a válvula termostática mistura mais água fria, caso contrário, a água terá que ser aquecida pela serpentina elétrica (sistema de apoio) antes do consumo doméstico.

• PERFIL DE CONSUMO DE ÁGUAS QUENTES SANITÁRIAS

Uma das formas de definir as entradas e saídas de águas do sistema solar térmico foi a partir de um perfil de consumo de água. Basicamente, quando há necessidade de consumo, a água quente sai do depósito de consumo para o circuito de canalizações da residência e, por sua vez, entra a mesma quantidade de água no sistema dos depósitos. Após discussão com os superiores deste estudo, foi considerada uma temperatura de consumo de AQS (águas quentes sanitárias) de 45 °C (temperatura de *set-point*). Considerou-se ainda como valor razoável, para uma família de 4 pessoas, o consumo de 270 litros de AQS.

Para melhor ilustrar a distribuição do consumo de águas quentes, é apresentada a Tabela 4, que representa o consumo em litros para as diferentes horas do dia.

Tabela 4 – perfil de consumo residencial

Período [horas]	Consumo [litros]
[0 às 6[0
[6 às 9[90
[9 às 12[0
[12 às 14[90
[14 às 19[0
[19 às 22[90
[22 às 24[0

3. SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS DOMÉSTICOS CONCEBIDOS E SUA MODELAÇÃO NO TRNSYS

Neste trabalho são testadas três configurações possíveis para a preparação de AQS (águas quentes sanitárias) de uma família de 4 pessoas recorrendo a sistemas solares térmicos com acumulação sazonal. Todas as configurações estão equipadas com dois depósitos de acumulação, designados por "depósito solar" e por "depósito de consumo". O que distingue as configurações é o modo como o calor captado pelos coletores é fornecido aos dois depósitos de acumulação, ou seja o modo como é efetuado o carregamento térmico dos depósitos. Mais especificamente, neste trabalho são analisadas as seguintes configurações: (i) Modelo 1 - Sistema com carregamento apenas do "depósito solar"; (ii) Modelo 2 - Sistema com carregamento dos depósitos em série (1º o solar, 2º o de consumo); (iii) Modelo 3 - Sistema com carregamento dos depósitos em paralelo (carregamento em simultâneo de ambos os depósitos).

3.1. Modelo 1 – Sistema com carregamento apenas do “depósito solar”

Fundamentalmente, o Modelo 1 (esquematizado na Figura 14) corresponde a um sistema solar térmico doméstico adaptado com os dois depósitos de acumulação e é nada mais, nada menos, que um sistema ativo indireto, constituído por um coletor solar, uma bomba e um permutador de calor, para o circuito primário fechado, e por um depósito de pré-aquecimento (o "depósito solar"), uma bomba, um depósito de consumo e uma serpentina elétrica, para o circuito secundário do sistema.

O funcionamento do circuito primário do sistema solar térmico consiste na captação da radiação solar pelo coletor e pelas taxas de troca de calor no permutador. O fluido de transporte de energia térmica, mais propriamente a mistura de 80% de água com 20% de propileno-glicol, ao passar no coletor solar aquece e circula em direção do permutador de calor. Enquanto a diferença de temperaturas de entrada e saída do

permutador for inferior ou igual à maior diferença de temperatura em *dead band* definida, 8°C, a bomba estará sempre em funcionamento e, portanto, haverá sempre circulação. Basicamente é o circuito de aquecimento solar.

Para o circuito secundário o funcionamento caracteriza-se pela acumulação da energia solar captada. Em primeiro lugar a água proveniente da rede entra no depósito solar. Se a bomba estiver em funcionamento, pois também depende do sinal emitido pelo controlador, a água circula para o interior do permutador de calor e, desta forma, é pré-aquecida pelas trocas de calor da energia proveniente do circuito primário do sistema. Em seguida, dependendo das necessidades de consumo, a água pré-aquecida segue em direção ao depósito de consumo. Se a água contida neste depósito não estiver à temperatura de 45°C, a serpentina elétrica entra em funcionamento até que se atinja essa temperatura e assim possa satisfazer o consumo de águas quentes. Se, por outro lado, a água contida no depósito de consumo estiver já a uma temperatura superior aos 45°C, a válvula termostática mistura a quantidade de água fria necessária para que entre no circuito de consumo doméstico à temperatura desejada e, dessa forma, poupar energia do sistema de aquecimento auxiliar (serpentina elétrica).

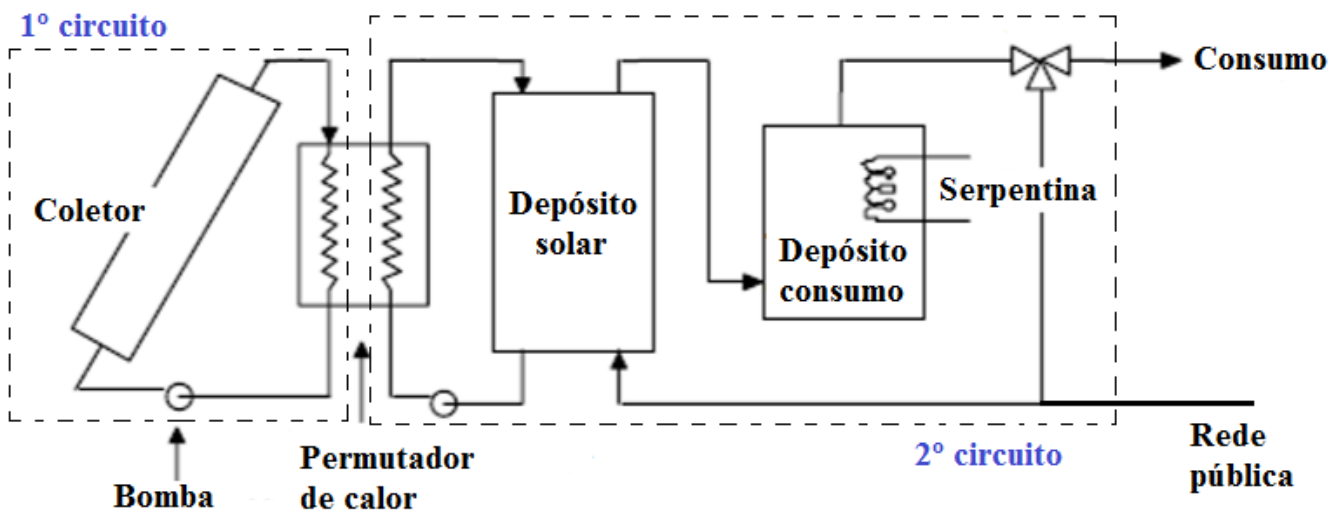


Figura 14 – Sistema solar térmico com carregamento apenas do depósito solar

3.2. Modelo 2 – Sistema com carregamento dos depósitos em série

O funcionamento do sistema solar térmico de carregamento em série (representado na Figura 15) é também um sistema ativo indireto e caracteriza-se essencialmente pelo circuito primário fechado de circulação do fluido de transporte de energia térmica. O fluido é aquecido no coletor e, em seguida, passa sucessivamente pelos permutadores de calor. Isto faz com que a temperatura do fluido no segundo permutador seja naturalmente inferior à temperatura no interior do primeiro. De resto, os princípios essenciais de funcionamento são em tudo semelhantes entre todos os sistemas solares térmicos, incluindo o sistema em paralelo.

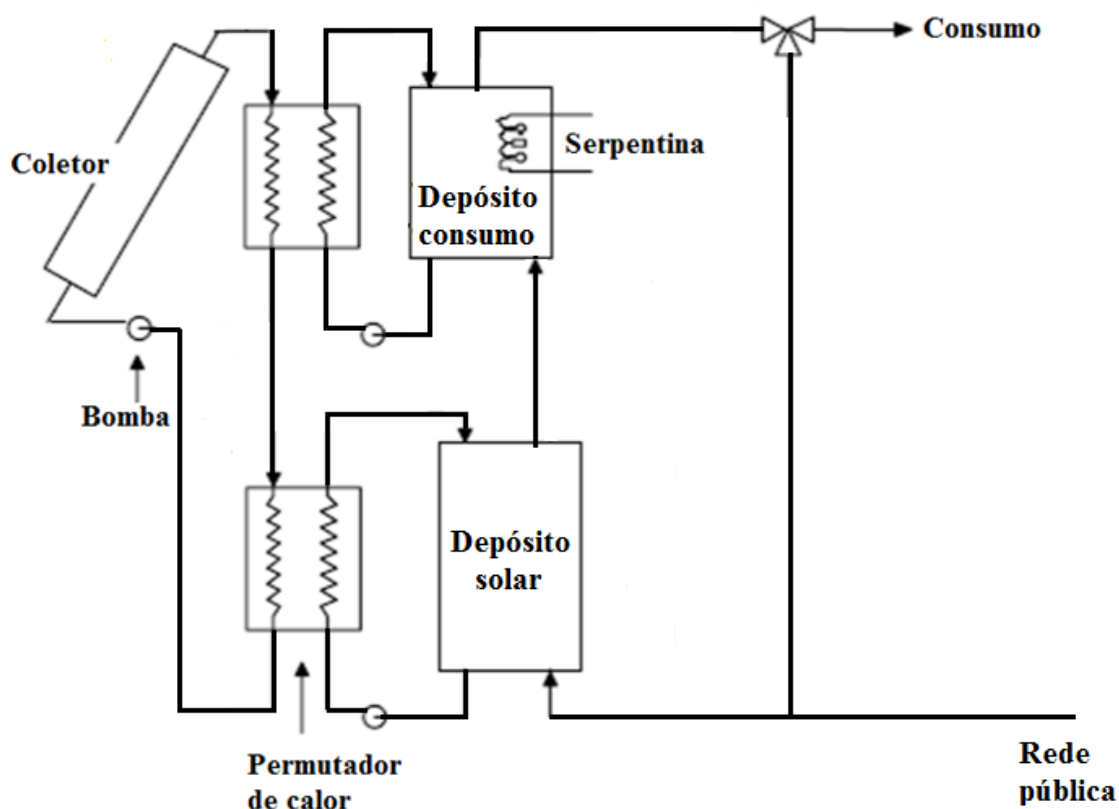


Figura 15 – Sistema solar térmico com carregamento dos depósitos em série

3.3. Modelo 3 – Sistema com carregamento dos depósitos em paralelo

Já o sistema solar térmico de carregamento em paralelo (representado na Figura 16) é novamente um sistema ativo indireto, mas constituído por mais um conjunto de válvulas desviadoras e misturadoras de caudais, em relação ao sistema solar em série. O fluido carregado energeticamente pelo coletor chega à válvula desviadora, para ser dividido em dois caudais iguais, a fim de circular simultaneamente à mesma temperatura para os dois permutadores de calor. Após as trocas de calor entre o fluido e a água proveniente dos depósitos, o fluido circula para a válvula misturadora para que, desta forma, volte a entrar no coletor solar com um só caudal.

Em princípio, este arranjo do sistema solar térmico terá maior potencial de taxas de transferência de calor, dado que a eficiência de aquecimento, quer do depósito que fornece a água quente para consumo, quer do depósito que serve de posto de pré-aquecimento (o depósito solar), não dependerem diretamente do tipo de circulação. Ou seja, devido à válvula desviadora de caudal, a temperatura de entrada nos permutadores de calor será igual, aumentado, portanto, a capacidade de aquecimento do depósito solar, muito embora o fluido possa entrar com metade do débito mássico.

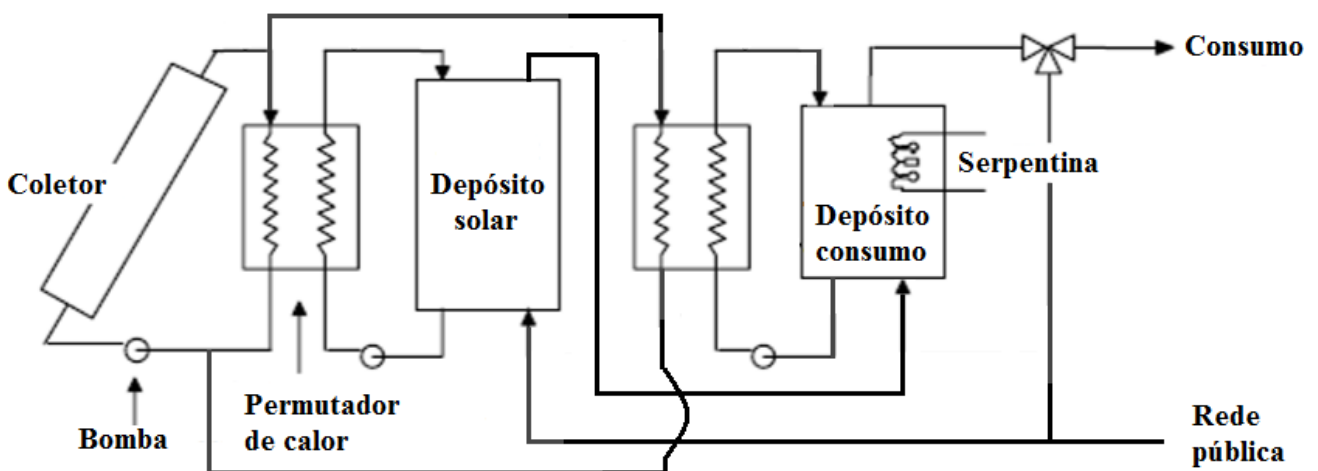


Figura 16 – Sistema solar térmico com carregamento dos depósitos em paralelo

3.4. Modelação dos sistemas solares térmicos no TRNSYS

Neste subcapítulo é explicada a modelação dos sistemas acima descritos no programa de simulação TRNSYS. As imagens esquemáticas, sobre as quais assenta a introdução de dados e a parametrização do modelo a simular, dos sistemas solares térmicos são apresentadas no Anexo A. Na interpretação destes esquemas deve ser levado em conta que:

- As linhas a roxo representam o circuito do fluido de transporte energético: circuito primário.

- A cheio, a vermelho ou azul, consoante as temperaturas quente ou fria da água nas tubagens, é o circuito de água para aquecimento e distribuição doméstica: circuito secundário.

- A tracejado, preto ou colorido, são as linhas de comando, ou seja, são funções restritivas que fornecem informação suplementar para definir o correto funcionamento de certos componentes. Por exemplo, a radiação que incide no coletor solar não pode ser representada da mesma forma que as ligações, como as do circuito de tubagens, por onde circula o fluido água-glicol ou a água. Para isso, utilizaram-se as linhas a tracejado entre o “Tempo” e o “Coletor”, que simplesmente fornece, os dados climáticos para que o coletor tenha a informação da radiação incidente. E assim por diante.

É ainda importante referir os componentes que calculam os *outputs* dos resultados. São os componentes que estão representados ou por uma calculadora ou por uma impressora. No componente calculadora, “consumo diário”, são introduzidas as seguintes equações para a temperatura da água proveniente da rede de abastecimento pública e quantidade de consumo doméstico:

$$\begin{cases} mdDHW = DHWProfil \\ TCold = 15 \text{ litros} \end{cases}$$

(16)

No componente calculadora, “Calculo”, são introduzidas essencialmente as equações de cálculo das frações solares diárias e totais, ou seja, anuais, calculadas através das quantidades de energia consumida pela residência, em águas quentes, e das quantidades de energia adicionada pelo sistema de aquecimento de apoio:

$$\begin{cases} \% FSol_{diária} = \left(\frac{Q_{DHW_diária} - Q_{Aux_diária}}{Q_{DHW_diária}} \right) \times 100 \\ \% FSol_{Anual} = \left(\frac{Q_{DHW_Anual} - Q_{Aux_Anual}}{Q_{DHW_Anual}} \right) \times 100 \end{cases}$$

(17)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apesar de já existirem em funcionamento algumas tecnologias viradas para acumulação sazonal de calor, principalmente nos Países Nórdicos da Europa ou no Canadá, este conceito é ainda experimental. Além do mais quando é adaptado para uma utilização doméstica. Por outro lado, pode ser altamente revolucionador. Permitir o desenvolvimento de tecnologias solares térmicas capazes de responder às necessidades de água quente durante todo o ano e, desta forma, impulsionar qualquer sistema doméstico no sentido da autossuficiência.

Posto isto, é indispensável estudar todas as variáveis que potenciem a *performance* dos sistemas solares térmicos de maneira a poder definir convenientemente os diferentes parâmetros. Naturalmente todo o processo de otimização dos modelos solares térmicos domésticos passou pelo ajuste destes parâmetros, sobretudo no que diz respeito à relação área coletores solares por volume de armazenamento em jogo, em função da percentagem de fração solar atingida em cada sistema solar térmico; parâmetros como a correta definição do sistema de controlo, mais precisamente da entrada em funcionamento das bombas, e a utilização de um perfil de consumo real e verdadeiro.

A relação da área de coletores em função do volume de capacidade dos depósitos de acumulação é o parâmetro mais importante para a otimização do sistema solar térmico.

A melhor forma de encontrar a área de coletores para as diferentes capacidades de volume de cada sistema solar térmico é através da percentagem de fração solar. Tendo presente que o sistema solar térmico tem em vista a acumulação sazonal de calor, é óbvio que o volume de água necessário seja bastante grande. Isto porque é preciso aquecer água durante o verão, para satisfazer não só as necessidades de consumo durante os meses mais quentes, mas também armazenar energia térmica para os meses mais frios, já que durante o inverno o rendimento do aquecimento é menor.

Assim sendo, não é difícil perceber que a análise dos resultados está intimamente relacionada com o volume de água no sistema. Isto porque em acumulação sazonal de calor não existe uma determinada capacidade de volume estabelecida *a priori*.

Existe, sim, uma necessidade de acumular energia térmica na forma de calor da estação mais quente para a estação mais fria e, conseqüentemente, grandes quantidades de água armazenada. Para ter uma ideia, um sistema solar térmico típico está preparado com depósitos de 270 litros de água e, por isso, se fizermos uma extrapolação para a ordem de grandezas dos modelos solares deste trabalho, chegamos à conclusão que são necessários em cada ano 98 550 litros de AQS (cerca de 100 m^3). Conclui-se assim que o consumo de AQS a $45 \text{ }^\circ\text{C}$ por cada pessoa é de aproximadamente $25 \text{ m}^3/\text{ano}$.

Para uma residência familiar de quatro pessoas a área de coletores para a capacidade de volume de 270 litros é, em média, 3 a 4 m^2 . Tendo em conta a sazonalidade do sistema, o aumento do volume tem de ser acompanhado com o aumento da área de coletores. Só assim é possível alcançar as temperaturas requeridas e as altas percentagens de fração solares desejadas. Ou seja, a partir do volume de capacidade total de ambos os depósitos determinam-se as áreas dos coletores. Obviamente que a relação área de coletores/volume de acumulação que tenha a maior percentagem de fração solar anual é a melhor solução.

Os resultados que se seguem, divididos pelos respectivos subcapítulos, dizem respeito a um ano de simulações, 8760 horas, começando em 1 de junho de um ano e acabando em 31 de maio do ano seguinte.

É também importante referir que o depósito com maior capacidade de acumulação é determinado através dos resultados da percentagem de fração solar, alternando a capacidade de volume dos depósitos. Isto é, colocam-se duas hipóteses, A e B, tendo a hipótese A maior capacidade de volume no depósito de consumo e a hipótese B a maior capacidade de armazenagem no depósito de depósito solar.

Para a capacidade de acumulação de 600 litros, que será o ponto de partida da investigação, o volume é simplesmente dividido de forma igual por ambos os depósitos.

4.1. Modelo 1 - Sistema com carregamento apenas do "depósito solar"

Apresenta-se na Tabela 5 e na Figura 17 a fração solar anual alcançada com o Modelo 1 (sistema solar em que existe carregamento térmico apenas do depósito solar),

para várias relações área coletora versus volume de acumulação. Podemos constatar que a melhor solução, a que apresenta maior percentagem de fração solar no sistema, é a hipótese A para 1900 litros de capacidade de acumulação total, distribuídos por 1300 litros, para o depósito de consumo, e 600 litros para o depósito solar. Para qualquer das áreas de coletores solares as percentagens das frações solares são acima dos 99%. O que de facto é ótimo tendo em conta o volume total de armazenagem.

Relembrando que se entende por fração solar a percentagem de energia que é coberta pelo sistema solar térmico no aquecimento de água, e, portanto, a capacidade de aquecimento do sistema de pré-aquecimento solar, podemos afirmar que quanto menor for o volume de água do depósito solar maior será a fração solar, pois terá menor volume de água para aquecimento (já que é o único depósito influenciado pelo circuito solar). Isto é constatado pelas diferenças de distribuição das frações solares entre as hipóteses A e B.

Porém é obrigatório chegar a um equilíbrio entre os volumes de ambos os depósitos. Isto porque se o volume do depósito de consumo for demasiado elevado, sem que haja um volume de águas quentes pré-aquecidas suficiente, haverá consequentemente uma necessidade de energia auxiliar significativo (que é coberta pela serpentina elétrica do depósito de consumo), o que, por sua vez, reduz a percentagem da fração solar do sistema. Este aspeto é observável nos resultados à medida que o volume de acumulação aumenta. Isto é, tendo uma boa relação área de coletores solares/volume de acumulação do sistema de pré-aquecimento, para um volume de águas capaz de satisfazer as necessidades de consumo, a maior parte da energia será transmitida pela energia solar captada. Falta depois passar e armazenar a energia acumulada no depósito solar, para que o processo recomece novamente. É aqui que o volume do depósito de consumo ganha importância.

Tendo maior capacidade de armazenar a energia que o sistema solar fornece, ou seja, maior capacidade de volume do depósito de consumo, haverá um decréscimo de necessidade de energia auxiliar. Por causa disto é que a fração solar aumenta em função do aumento do volume total e do volume do depósito de consumo (hipóteses A's). Desta forma é possível acumular maiores quantidades de águas quentes provenientes do depósito de pré-aquecimento, e só quando se perde alguma energia para o exterior, na forma de perdas de calor, é que a serpentina elétrica entra em funcionamento.

Assim sendo, a melhor solução será a hipótese A de 1900 litros para uma área de coletores de 10 m², garantindo uma percentagem de fração solar nos 99,92%.

Tabela 5 – Resultados do sistema com carregamento apenas do "depósito solar" (Modelo 1)

Fração Solar [%]					
Área \ Volume	600 L	900 L		1900 L	
		A	B	A	B
4 m ²	93,59	99,38	92,87	99,84	97,96
6 m ²	95,17	99,62	94,77	99,88	98,79
8 m ²	95,92	99,67	95,50	99,89	98,79
10 m ²	96,28	99,74	96,05	99,92	98,86

Nota: (1) 900 L distribuídos, na HIPÓTESE A, por 600 L no depósito de consumo e 300 L no depósito solar; Na HIPÓTESE B, o contrário. **(2)** 1900 L distribuídos, na HIPÓTESE A, por 1300 L no depósito de consumo e 600 L no depósito solar; Na HIPÓTESE B, o contrário.

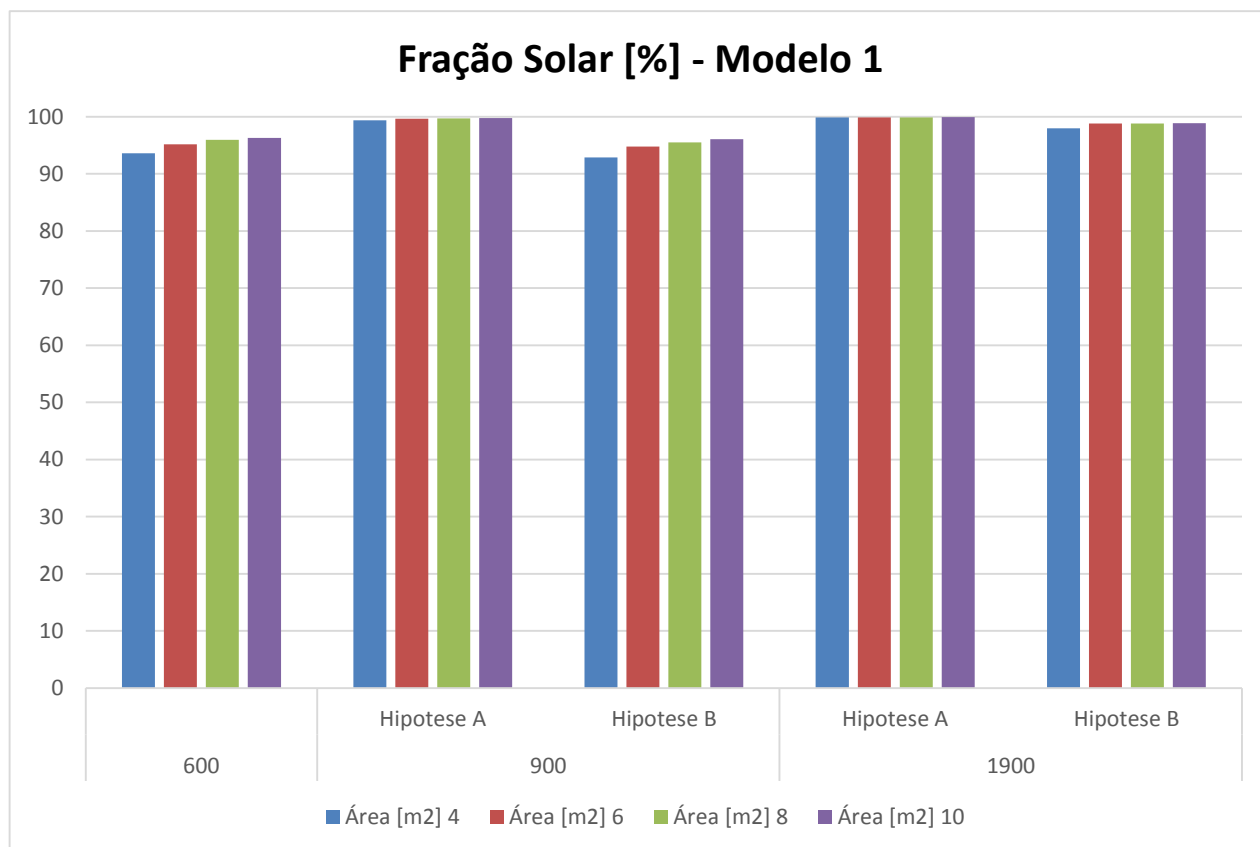


Figura 17 – Fração solar [%] do sistema com carregamento apenas do "depósito solar" (Modelo 1)

4.2. Modelo 2 - Sistema com carregamento dos depósitos em série

Apresenta-se na Tabela 6 e na Figura 18 a fração solar anual alcançada com o Modelo 2 (sistema solar em que existe carregamento térmico dos depósitos em série: em primeiro o de consumo em segundo o solar ou de pré-aquecimento), para várias relações área coletora versus volume de acumulação. No sistema solar térmico de carregamento em série (Modelo 2) as percentagens da fração solar decrescem em relação ao sistema solar térmico doméstico em que existe apenas carregamento térmico do depósito solar (Modelo 1).

Assiste-se novamente ao aumento da percentagem da fração solar em função do aumento da relação área de coletores/volume de acumulação. Contudo, existe uma inflexão da percentagem da fração solar entre os 900 litros e 1900 litros do volume total de armazenagem. Isto é devido ao próprio funcionamento do sistema porque, à medida que se aumenta o volume do depósito de consumo, terá que haver maiores percentagens de transferência de calor para este depósito, não havendo, depois, energia suficiente para aquecer o depósito solar.

Portanto, enquanto a energia captada pelos coletores solares e, consequentemente, enquanto as taxas de transferências de calor forem suficientes para o volume de acumulação, a hipótese A de distribuição dos volumes será a mais rentável. Isto porque haverá energia suficiente para compensar o pré-aquecimento das águas de forma a reduzir a energia auxiliar adicionada. A partir do ponto de volume de inflexão, a hipótese B será melhor, porque compensará, na globalidade de funcionamento do sistema, no processo de aquecimento, menores taxas de transferências de calor para o mesmo gradiente de temperaturas (por causa do menor volume do depósito de consumo). Dessa forma haverá um aquecimento relevante da água do depósito solar.

Em suma, para volumes de acumulação menores que os 1900 litros, a hipótese A encontrará um melhor equilíbrio de aquecimento para ambos os depósitos. Por outro lado, para volumes iguais ou superiores aos 1900 litros, a hipótese B será mais eficaz.

Tabela 6 – Resultados do sistema com carregamento dos depósitos em série (Modelo 2)

Fração Solar [%]					
Volume \ Área	600 L	900 L		1900 L	
		A	B	A	B
4 m ²	32,99	42,21	34,31	35,08	38,78
6 m ²	76,09	83,67	77,44	79,35	82,82
8 m ²	90,27	94,70	91,13	93,52	94,69
10 m ²	95,09	97,29	95,92	96,99	97,08

Nota: (1) 900 L distribuídos, na HIPÓTESE A, por 600 L no depósito de consumo e 300 L no depósito solar; Na HIPÓTESE B, o contrário. **(2)** 1900 L distribuídos, na HIPÓTESE A, por 1300 L no depósito de consumo e 600 L no depósito solar; Na HIPÓTESE B, o contrário.

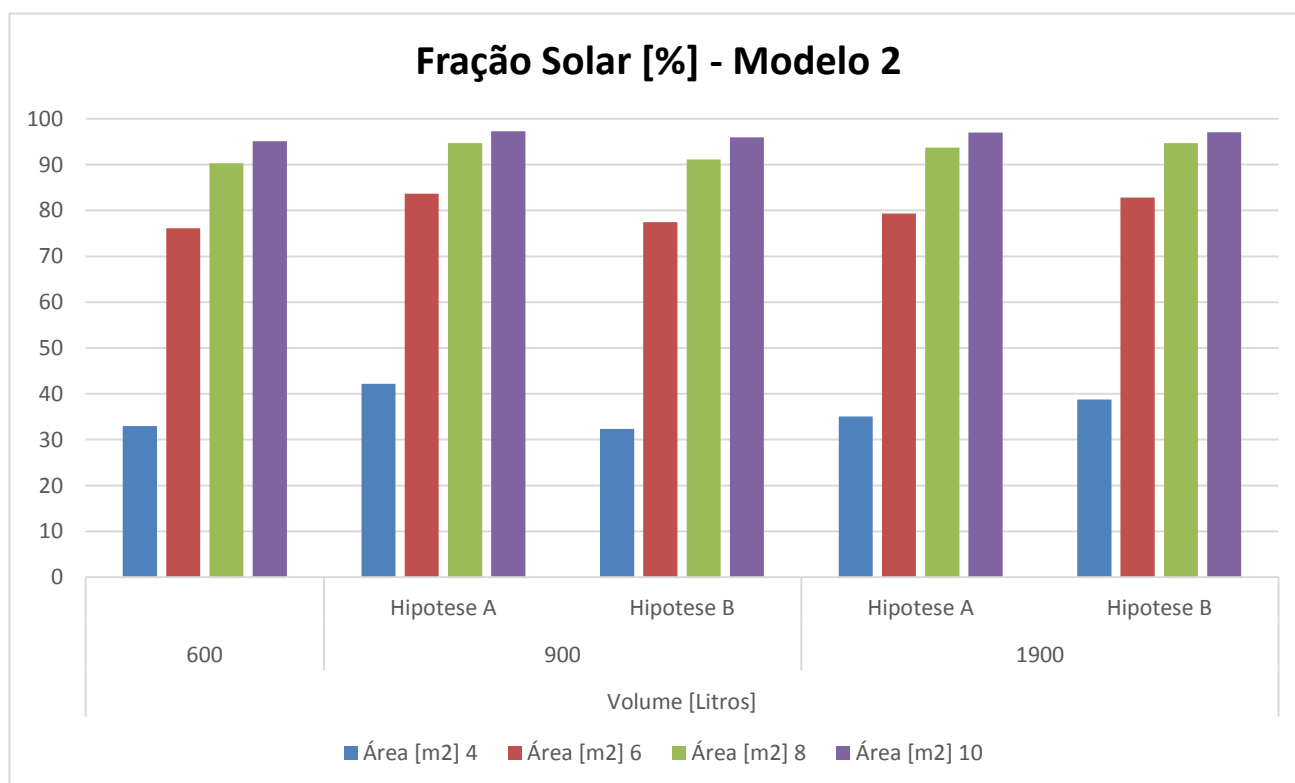


Figura 18 – Fração solar [%] sistema com carregamento dos depósitos em série (Modelo 2)

4.3. Modelo 3 - Sistema com carregamento dos depósitos em paralelo

Apresenta-se na Tabela 7 e na Figura 19 a fração solar anual alcançada com o Modelo 3 (sistema solar em que existe carregamento térmico dos depósitos em paralelo), para várias relações área coletora versus volume de acumulação.

No sistema solar térmico de carregamento em paralelo (Modelo 3), acontece exatamente o que se podia prever. Devido ao seu funcionamento o fluido de transporte energético circula pelo circuito primário do sistema à mesma temperatura nos permutadores de calor. Pela ordem de ideias que já foram referidas e justificadas nos pontos 4.1. e 4.2, é de esperar que a fração solar aumente em função do aumento da área de coletores, mas, obviamente que decresça com o aumento do volume total de acumulação. Efetivamente para maiores quantidades de volume, maiores terão que ser as taxas de transferência de calor do primeiro para o circuito secundário do sistema.

Relativamente às hipóteses de distribuição do volume pelos depósitos de armazenagem, como o circuito do fluido de transporte térmico envolve transferências de calor para ambos os depósitos de acumulação, é mais eficiente concentrar a maior quantidade de volume de água no depósito solar, ou seja, hipóteses B, pelo facto de não ser prioritário escoar a energia para armazenar no depósito de consumo. Ambos os depósitos fazem parte integral da forma de acumulação de energia, diferente do funcionamento do sistema solar térmico doméstico adaptado com dois depósitos de acumulação. Por conseguinte, aumenta-se a percentagem de fração solar reduzindo a quantidade de energia adicionada pela serpentina elétrica, devido à menor quantidade de volume do depósito de consumo, quando comparado com a hipótese A.

Tabela 7 – Resultados do sistema com carregamento dos depósitos em paralelo (Modelo 3)

Fração Solar [%]					
Área \ Volume	600 L	900 L		1900 L	
		A	B	A	B
4 m ²	97,97	96,51	97,91	83,67	96,67
6 m ²	98,67	97,59	98,84	91,21	98,13
8 m ²	98,82	98,07	98,88	93,05	98,27
10 m ²	98,94	98,23	98,88	94,23	98,35

Nota: (1) 900 L distribuídos, na HIPÓTESE A, por 600 L no depósito de consumo e 300 L no depósito solar; Na HIPÓTESE B, o contrário. (2) 1900 L distribuídos, na HIPÓTESE A, por 1300 L no depósito de consumo e 600 L no depósito solar; Na HIPÓTESE B, o contrário.

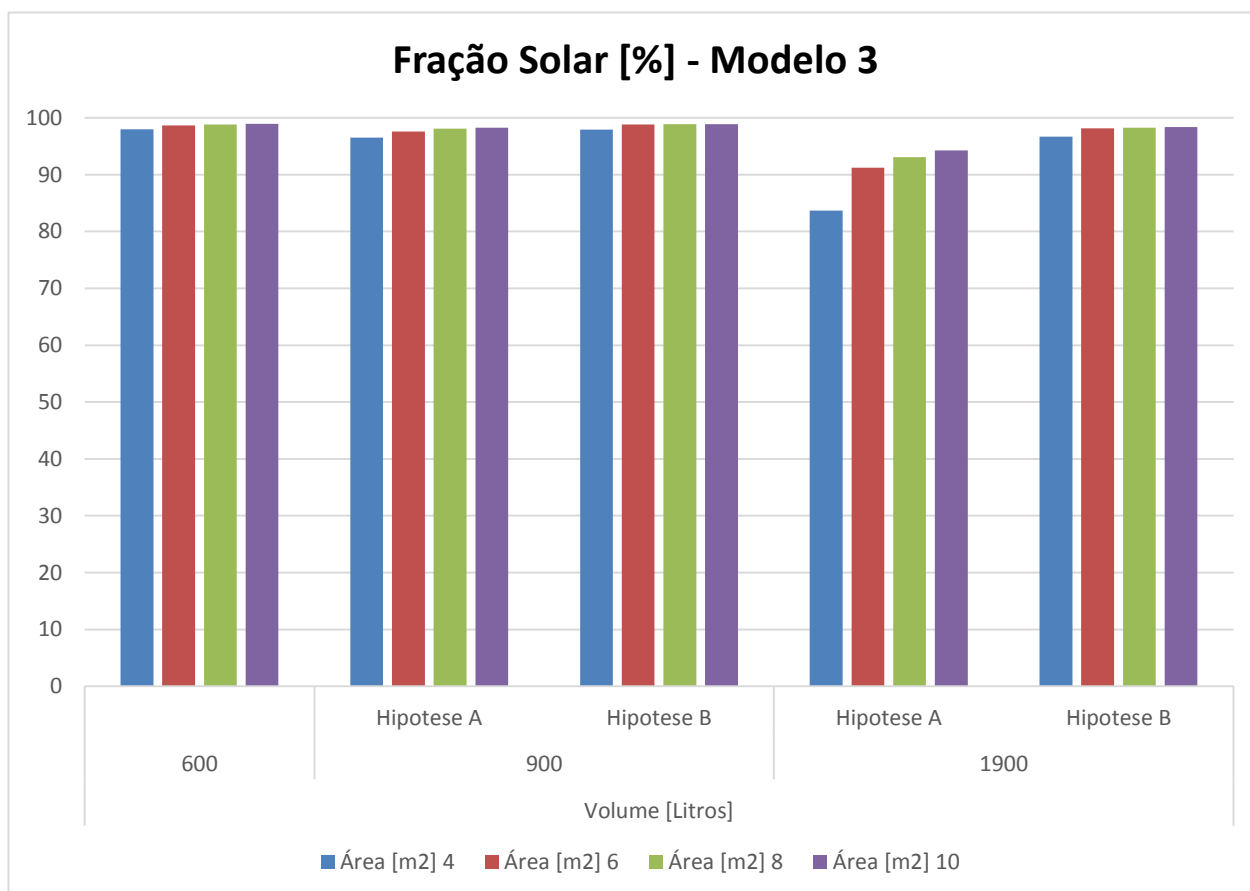


Figura 19 – Fração solar Fração solar [%] sistema com carregamento dos depósitos em paralelo (Modelo 3)

4.4. Análise e discussão

Pelas considerações feitas nos pontos anteriores, é fácil perceber qual dos sistemas solares térmicos potencia a acumulação sazonal de calor: sistema solar térmico doméstico adaptado com dois depósitos de capacidade de 1900 litros, repartidos por 1300 litros no depósito de consumo e 600 litros no depósito solar (pré-aquecimento), para uma área de coletores de 10 m².

Assim sendo, com o objetivo de fornecer mais informação e verificar a validade dos resultados das frações solares do sistema solar térmico em causa, são apresentadas e analisadas as variações das temperaturas, em ambos os depósitos, para as estações astronómicas extremas do verão e inverno, que compõem parte do ano das simulações do TRNSYS.

- **VARIAÇÃO DAS TEMPERATURAS DOS DEPÓSITOS PARA UMA AMOSTRA EM DIAS DE VERÃO**

Sabemos que quando existem necessidades de consumo, a água sairá para o circuito de doméstico pela parte superior do depósito de consumo. Por isso, observando a Figura 20, em primeiro lugar podemos constatar que o requisito dos 45°C para a temperatura de consumo das águas domésticas é cumprido. A temperatura do topo do depósito está acima dos 45°C, enquanto não há consumo, descendo quando é satisfeito esse mesmo consumo. Depois, o controlador inicia o processo de aquecimento, ou seja, envia o sinal para as bombas e estas fazem circular o fluido de transporte energético e a água proveniente do depósito solar em direção ao permutador de calor. Desta forma, as temperaturas do depósito voltam à temperatura de *set-point*. Observamos também que o sistema de apoio não entra em funcionamento, o que é normal dado que estamos na estação mais quente, e, por isso, a radiação solar incidente é mais do que suficiente para fornecer a energia necessária para o carregamento do depósito.

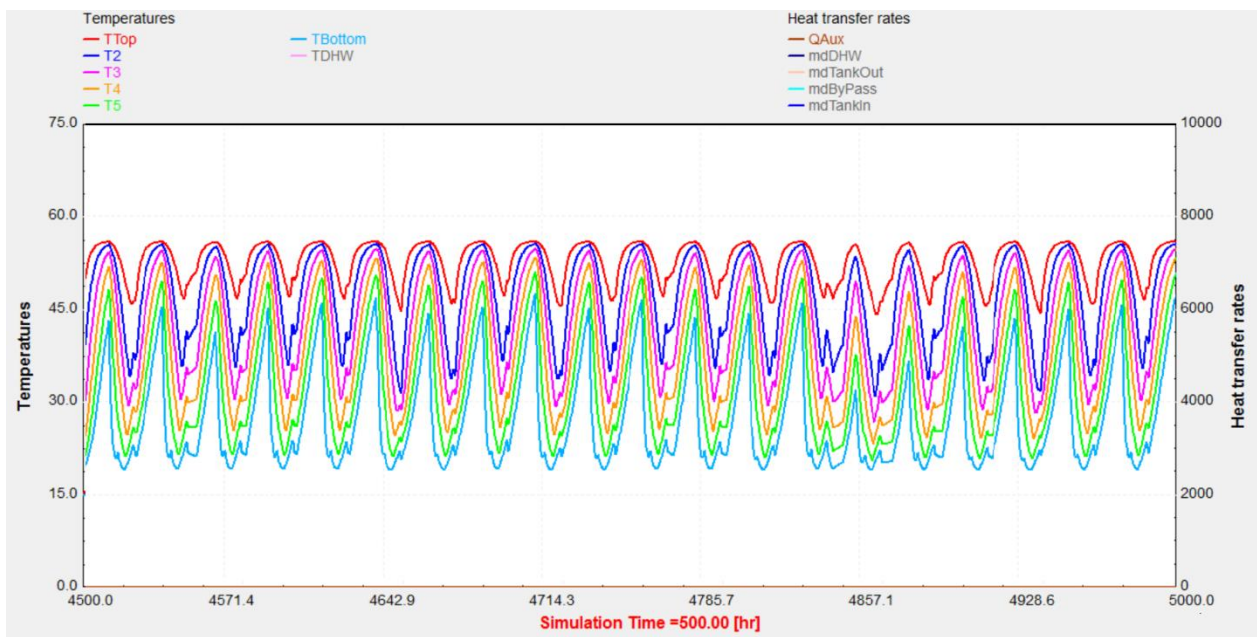


Figura 20 – Variação das temperaturas do depósito de consumo, no Verão, do sistema com carregamento apenas do depósito de consumo (Modelo 1)

Focando agora na Figura 21, como o depósito solar é de menor volume, não tem capacidade de acumular tanta energia para que a distribuição das temperaturas seja semelhante às do depósito de consumo. Verifica-se uma capacidade de aquecer a água até aos 45°C mas depois, com a entrada em funcionamento dos circuitos, toda a energia é escoada e acumulada no depósito de consumo.

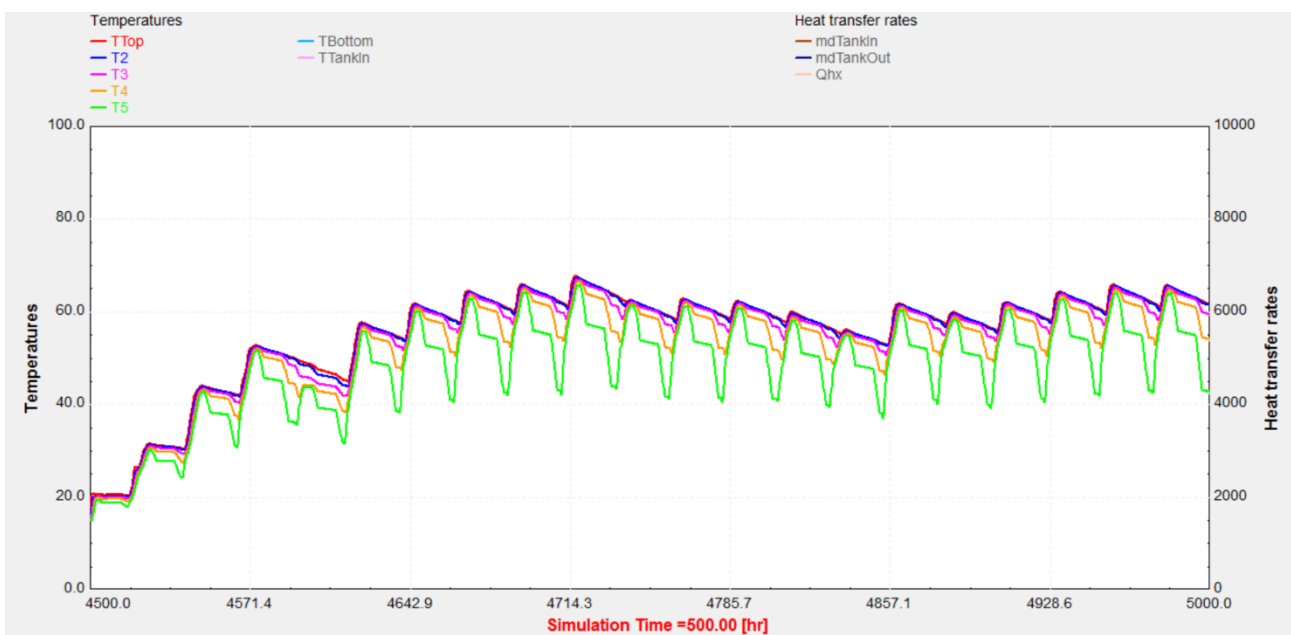


Figura 21 – Variação das temperaturas do depósito solar, no verão, do sistema com carregamento apenas do "depósito solar" (Modelo 1)

- **DISTRIBUIÇÃO DAS TEMPERATURAS DOS DEPÓSITOS PARA UMA AMOSTRA EM DIAS DE INVERNO**

Analisando a Figura 22 e 23 das amostras do inverno, acontece o que se previa. Verifica-se a manutenção da temperatura de *set-point* imposta, contudo isso só sucede com a entrada em funcionamento do sistema de apoio. Isto deve-se fundamentalmente à falta de radiação solar, por causa do inverno, e, conseqüentemente, falta de capacidade de transferência energética para o depósito solar, que, por sua vez, força a entrada em funcionamento da serpentina elétrica.

O facto da distribuição das temperaturas ainda ser francamente boa, tendo em conta que desde o final do verão até à amostra do inverno, passaram sensivelmente cinco meses, demonstra a capacidade de retenção de energia para altos volumes de capacidade, comprovando a possibilidade, ou até mesmo a viabilidade, da acumulação sazonal de calor.

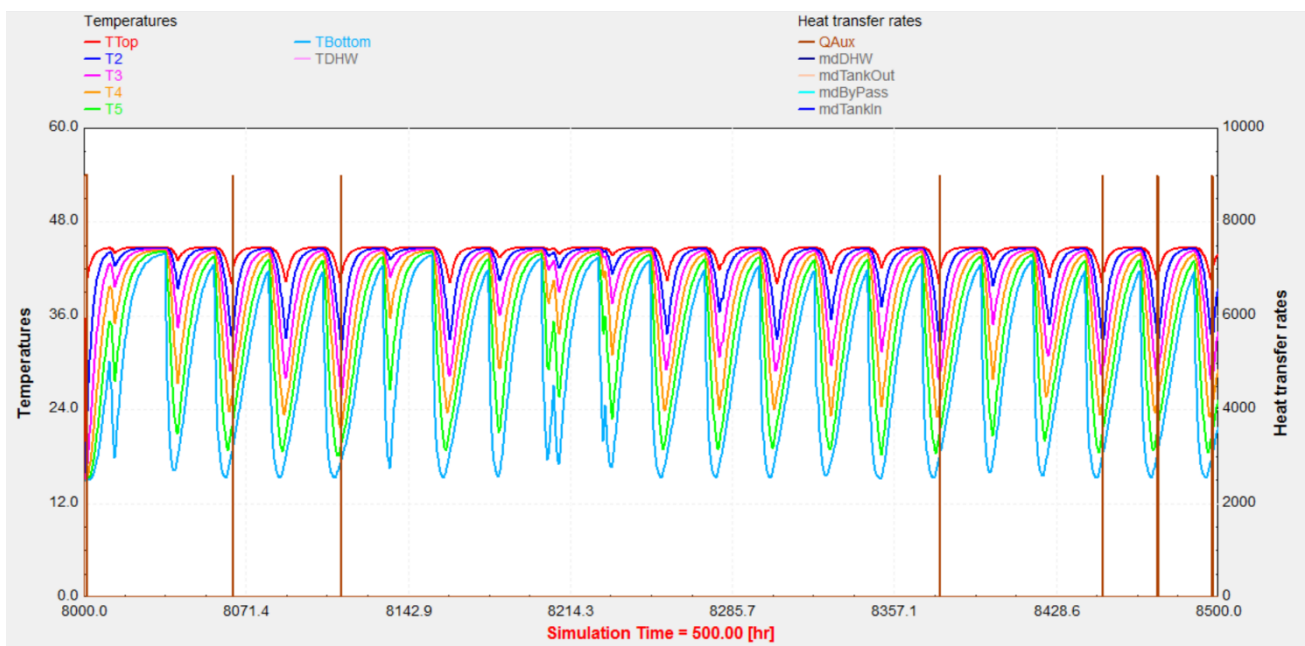


Figura 22 – Variação das temperaturas do depósito de consumo, no inverno, sistema com carregamento apenas do depósito de consumo (Modelo 1)

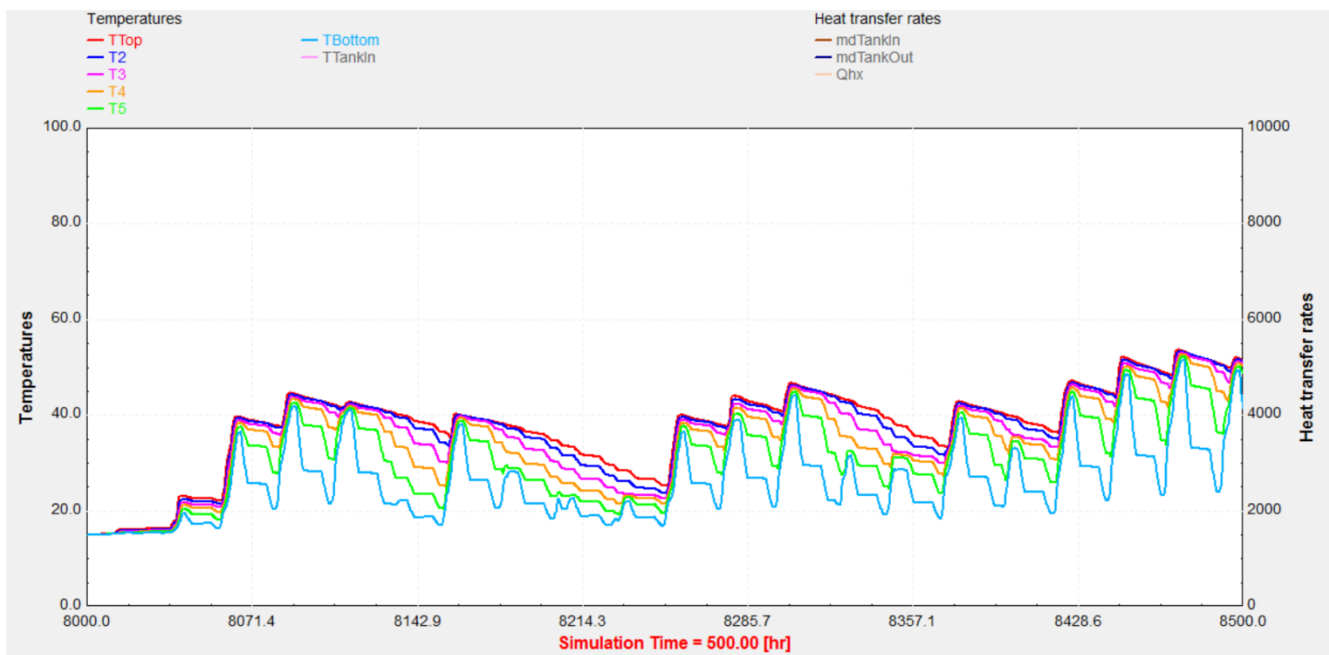


Figura 23 – Variação das temperaturas do depósito solar, no inverno, do sistema com carregamento apenas do "depósito solar" (Modelo 1)

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram analisadas três configurações possíveis para a preparação de AQS (águas quentes sanitárias) de uma família de 4 pessoas recorrendo a sistemas solares térmicos com acumulação sazonal. Todas as configurações estão equipadas com dois depósitos de acumulação, designados por "depósito solar" e por "depósito de consumo". O que distingue as configurações é o modo como o calor captado pelos coletores é fornecido aos dois depósitos de acumulação, ou seja o modo como é efetuado o carregamento térmico dos depósitos. Mais especificamente, neste trabalho foram analisadas as seguintes configurações: (i) Modelo 1 - Sistema com carregamento apenas do "depósito solar"; (ii) Modelo 2 - Sistema com carregamento dos depósitos em série (1º o solar, 2º o de consumo); (iii) Modelo 3 - Sistema com carregamento dos depósitos em paralelo.

Feita a análise dos resultados dos diferentes modelos, observou-se que o modelo com melhores percentagens de fração solar, é o sistema solar térmico com carregamento apenas do "depósito solar", para uma área de coletor de 10 m² e um volume total de acumulação de 1900 litros. Por conseguinte, é o sistema mais eficaz, para a acumulação sazonal de calor. Contudo qualquer hipótese A para um volume total de acumulação de 900 litros ou 1900 litros seria uma ótima solução, interessando deste modo, a solução que minimiza-se os custos de instalação.

Constatou-se que o sistema com carregamento térmico dos depósitos em paralelo (Modelo 3), é mais eficaz do que o sistema com carregamento térmico dos depósitos em série (Modelo 2). Isto é essencialmente corroborado pelos resultados das percentagens da fração solar, mas também, pelas explicações da forma como são aquecidos os depósitos. Pode-se observar ainda que o sistema com carregamento térmico dos depósitos em paralelo, é o modelo que atinge as melhores frações solares para menores volumes totais de acumulação, e que o sistema solar térmico com carregamento dos depósitos em série, é o que alcança menores rentabilidades ou eficiências, com as menores áreas de coletor solar.

Gostaria ainda de deixar sugestões de trabalho futuro. Fazer uma análise económica dos custos e período de retorno dos sistemas solares térmicos. Seria interessante, também, a construção e desenvolvimento de um protótipo do sistema solar térmico doméstico adaptado com dois depósitos de acumulação sazonal de calor, ou seja, da solução com maior percentagem de fração solar anual, de maneira a validar de forma real o sistema concebido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cabeza, L. F. (2015), “Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications”. Woodhead Publications Series in Energy, Elsevier.
- Costa, J. J. (1990), “Permutadores de Calor”. Transmissão de Calor II, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Cruickshank, C. A. (2009), “Evaluation of a Stratified Multi-Tank Thermal Storage for Solar Heating Applications”. PhD thesis Submitted to the Department of Mechanical and Materials Engineering. Queens’s University – Kingston, Ontario, Canada.
- DGEG – “Caracterização Energética Nacional 2010”. Acedido em 11 de Março de 2015, <http://www.dgeg.pt/>.
- Dickinson, R. M., Cruickshank, C. A. e Harrison, S. J. (2012), “Charge and Discharge Strategies for a Multi-Tank Thermal Energy Storage”, Applied Energy 109(2013) 366-373, Elsevier.
- Dincer, I. e Rosen, M. A. (1998), “A Worldwide Perspective on Energy, Environment and Sustainable Developmet”. International Journal of Energy Res. 22(5), 1305-1321.
- Dincer, I. e Rosen, M. A. (2002), “Thermal Energy Storage: Systems and Applications”. John Wiley & Sun, York, New York.
- Duffie, J. A. e Beckman, W. A. (2006), “Solar Engineering of Thermal Process”, John Wiley & Sons, York, New York.
- Medeiros, P. S., Barbosa, C. R. e Oliveira Fontes, F. (2010), “Propriedades Termofísicas de Fluidos Secundários à Base de Alcool para Termoacumulação”. Grupo de Estudos em Sistemas Térmicos, Laboratório de Energia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- IET – Institute for Energy and Transport (1962). Acedido em 24 de Julho de 2015, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>.
- IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera (1946), “Distribuições médias das temperaturas da Cidade Coimbra”. Acedido em 5 de Julho de 2015, <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/1981-2010/006/>.
- Kalogirou, S. (2009), “Solar Energy Engineering: Processes and Systems”, Elsevier.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Munson, B. R. e DeWitt, D. P (2003), “Introduction to Thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics and Heat Transfer”, John Wiley & Sons, Inc.
- Murphy, P. (2009), “Solar Heating and Cooling Programme”. International Energy Agency, 2008 Annual Report.
- Philips, K. J. H. (1995), “Guide to the Sun”. Cambridge University Press.
- Pinel, P., Cruickshank, C. A. (2011), “A Review of Available Methods for Seasonal

- Storage of Solar Thermal Energy in Residential Applications”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(7): 3341-3359.
- Portal Energia: Energias Renováveis (2004), “Energia Solar Térmica: Manual sobre Tecnologias, Projecto e Instalação”. Acedido em 29 de Fevereiro de 2015, <http://www.portal-energia.com/>.
- Rodríguez-Hidalgo, M. C., Rodríguez-Aumente, P. A., Lecuona, A. e, Legrand, M. e Ventas, R. (2011), “Domestic Hot Water Consumption vs. Solar Thermal Energy Storage: The Optimum Size of the Storage Tank”. *Applied Energy* 97 (2012) 897-906, Elsevier.
- Sadoway, D. et al. (2013), “Liquid Metal Batteries: Past, Present and Future”. *Chem Rev.*, 113, 2075-2099.
- Sharma, N. e Tyagi, V. V. (2009), “Review on Thermal Energy Storage with Change Materials and Applications”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(2) 318-345
- Sekulic, D. P. e Krane, R. J. (1992), “The use of Multiple Storage Elements to Improve the Second Law Efficiency of Thermal Energy Storage Systems, Part I: Analysis of the Storage Process”, *Proceedings the Ecos 92 on Efficiency, Costs, Optimization and Simulation of Energy Systems*, Asme, New York, 61-66.
- Terry, N., Palmer, J. e Cooper, I. (2012), “State-of-the-Art Review: Insulation and Thermal Storage Materials”. CAR/Eclipse Research Consultants (eds.).
- Tian, Y. e Zhao, C. Y. (2013), “A Review of Solar Collectors and Thermal Energy Storage in Solar Thermal Applications”. *Applied Energy* 104 (2013) 538-553.
- TRNSYS Manuals – Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison

ANEXO A: ESQUEMAS DOS SISTEMAS NO TRNSYS

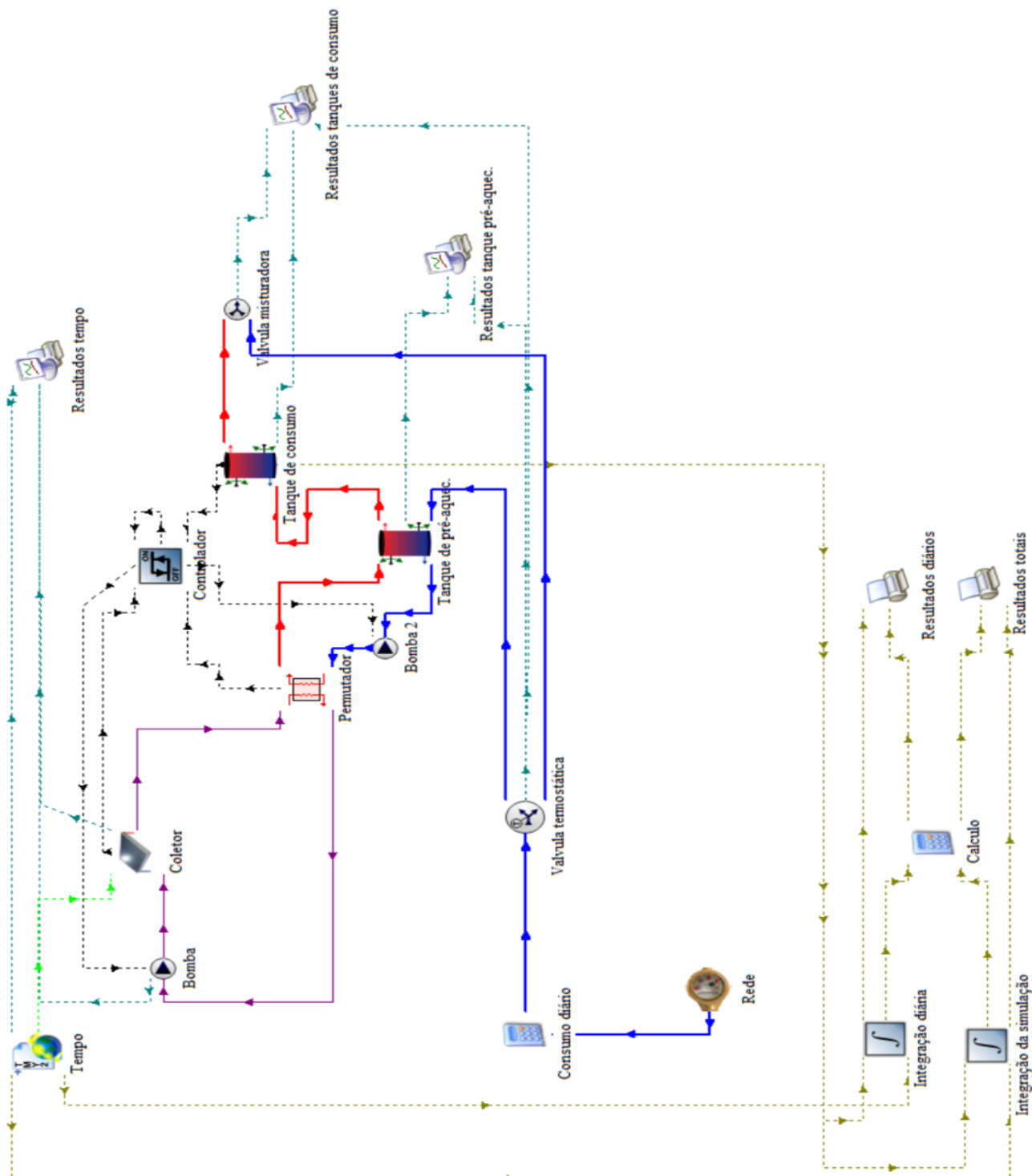


Figura 24 – Sistema com carregamento apenas do "depósito solar" (Modelo 1), (retirado do TRNSYS)

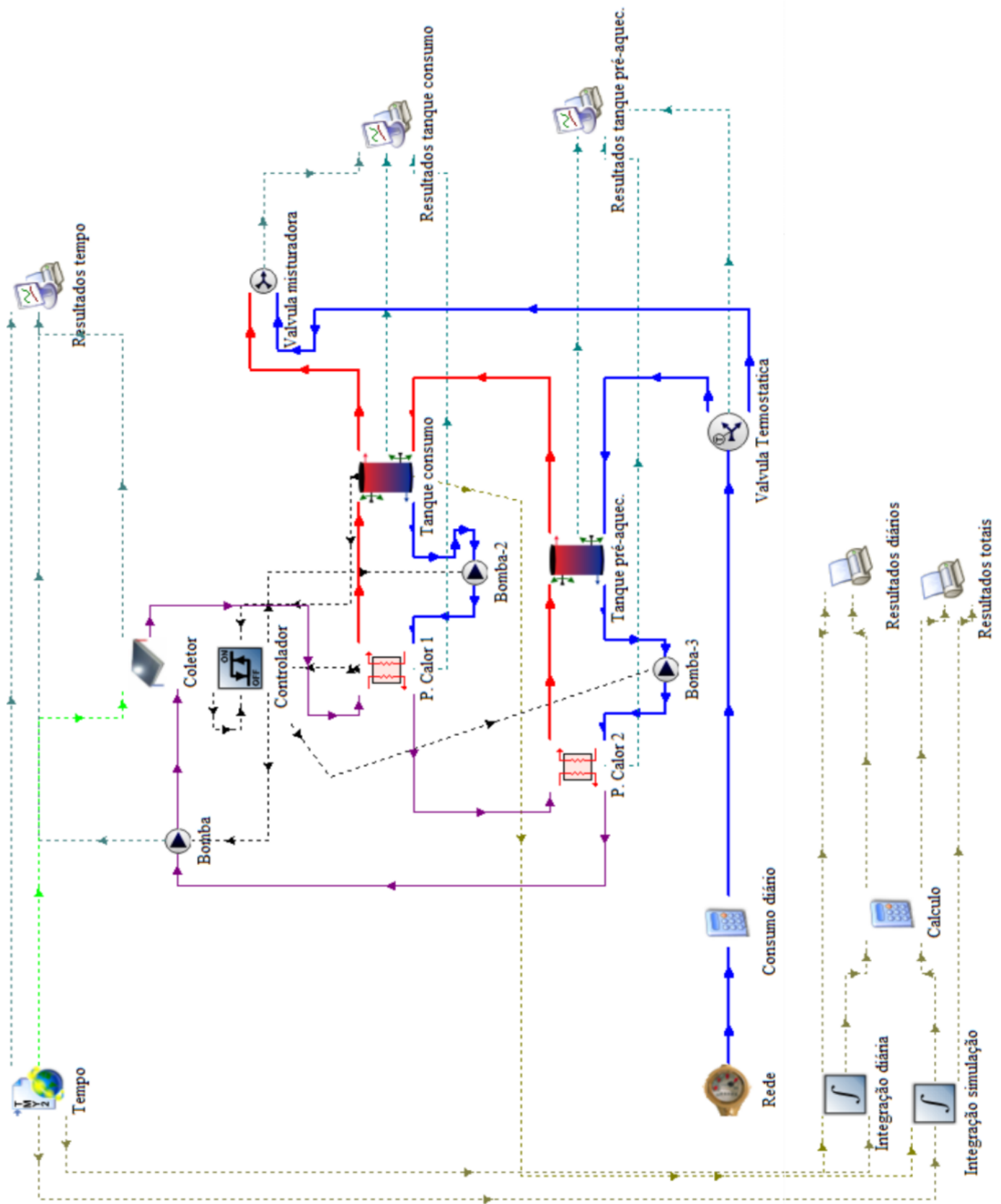


Figura 25 – Sistema com carregamento dos depósitos em série (Modelo 2), (retirado do TRNSYS)

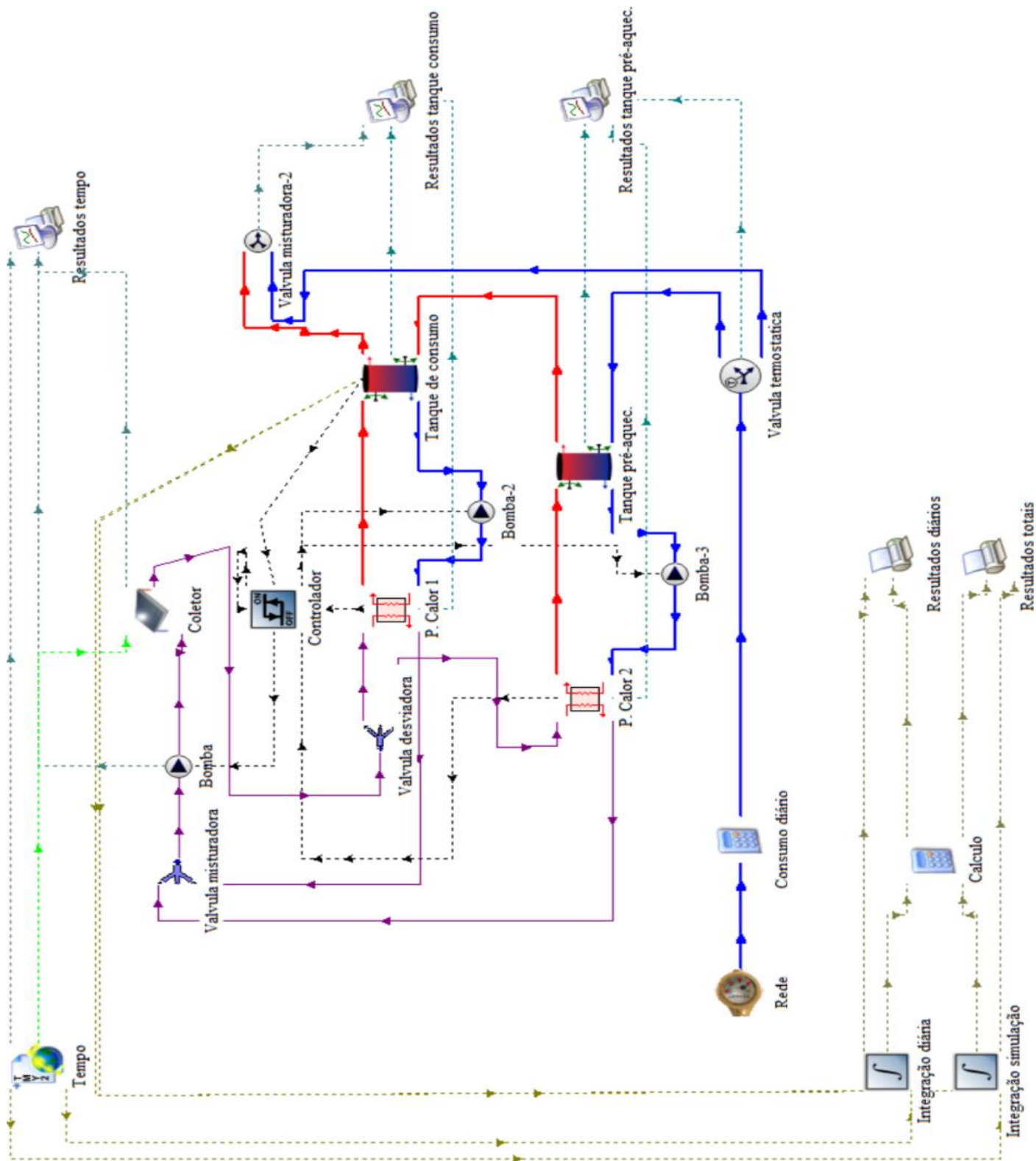


Figura 26 – sistema com carregamento dos depósitos em paralelo (Modelo 3), (retirado do TRNSYS)