

# **Influência das condições de uso na eficiência de Sistemas Solares Térmicos**

*Willian Pires Afonso*

**Relatório do Projecto Final / Dissertação do MIEM**

Orientador na FEUP: Prof. Vítor Leal



# **FEUP**

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica – Energia Térmica**

Junho 2012

*A todos os meus familiares e amigos,  
e em especial à Joana*

# Resumo

A escassez da disponibilidade dos recursos fósseis, associada ao aumento significativo do consumo de energia à escala mundial e à tomada de consciência da necessidade de preservar o meio ambiente levou, nos últimos anos, a uma aposta crescente em energias alternativas, de cariz renovável e ambientalmente “limpas”, tendo-se assistido a evoluções tecnológicas notáveis para a exploração das mesmas.

Com a entrada em vigor do decreto-lei 80/2006 (RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios) tornou-se obrigatório que, em todos os edifícios abrangidos por este regulamento em que exista uma exposição solar adequada definida pelo mesmo, se instalem colectores solares para aquecimento de águas sanitárias. Este ponto constituiu um marco importante que reflecte bem a importância do investimento neste tipo de recursos.

Neste contexto, tendo em conta a crise energética que o mundo atravessa e em particular a crise económica que se instalou em Portugal nos últimos anos, este trabalho surge com o objectivo de apresentar propostas que permitam tirar o máximo partido de sistemas solares térmicos existentes no mercado, melhorando a sua eficiência através de alterações das condições de uso destes sistemas, estando este estudo associado sobretudo a aplicações domésticas. Esta análise parte da elaboração de um modelo dinâmico que permite calcular a evolução da temperatura no interior de um depósito de acumulação de um sistema solar do tipo termossifão e aplicar esse modelo para avaliar o impacto de diferentes hipóteses ao nível do uso deste sistema na sua eficiência. Foram testadas hipóteses relacionadas com os padrões temporais de consumo de água quente, a localização do sistema de apoio eléctrico ao sistema e a temporização do mesmo. Os resultados foram analisados com base na comparação dos gastos de energia associados ao sistema de apoio eléctrico para os diferentes cenários de trabalho.

As conclusões obtidas a partir da análise aos resultados indicam ao utilizador de um sistema deste tipo uma série de combinações de hipóteses de uso deste sistema que permitem maximizar a sua eficiência. Destaca-se neste aspecto o facto de a utilização de um depósito complementar ao sistema que albergue a resistência eléctrica de apoio constituir uma solução vantajosa tanto a nível energético como, eventualmente, a nível económico.

# Abstract

The scarce availability of fossil resources, coupled with the increasingly consumption of energy on a global scale and the growth in awareness about environmental problems has generated a growth in the investment in alternative energies, using renewable resources and environmentally “clean”, with substantial technological developments being made in recent years.

With the approval of executive order 80/2006 (RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios) every building covered by this regulation, which has an adequate solar exposition, is obliged to have solar hot water collectors for domestic hot water use.

Having in mind the energy crisis the world is going through and in particular the economic crisis that affects Portugal, this work has the objective to present proposals that allow taking the most advantage out of the solar hot water systems available in the market, improving their efficiency by changing the conditions of how the system is used. These changes are user oriented and can be made by the people who use the system. This analysis is based on the elaboration of a dynamic model that allows calculating the temperature evolution inside the hot water accumulator of a thermosiphon domestic hot water system and applies that model to evaluate the impact in system efficiency of using different conditions. Several water consumption schedules were tested, the place of electric back-up heat system and on/off schedule of that system. The results were analyzed in comparison with the energy costs associated with a system with electric back-up heat for different work scenarios.

After analyzing the results it was concluded that there are several combinations of using conditions, for the user of the system to choose, that allow maximum efficiency. The use of a complimentary deposit which incorporates that electric back-up heat stands out as it is an advantageous solution both energy wise and economically.

# **Agradecimentos**

Agradeço a colaboração e orientação do Prof. Vítor Leal, pelos conhecimentos transmitidos e pelo apoio imprescindível dado ao desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus amigos e familiares pela companhia e disponibilidade ao longo do curso e na elaboração deste trabalho.

# Conteúdo

1. Introdução.....	1
1.1. Contexto e objectivos.....	2
1.2. Metodologia geral.....	3
2. Energia solar .....	5
2.1. Geometria solar.....	5
2.1.1. Coordenadas equatoriais horárias.....	6
2.1.2. Coordenadas horizontais.....	10
2.2. Radiação solar .....	12
2.3. Colector solar térmico plano .....	16
2.3.1. Balanço energético de um colector solar plano .....	19
2.3.2. Parâmetros de desempenho do colector.....	20
2.3.3. Rendimento do colector.....	23
2.4. Sistemas solares térmicos.....	26
2.4.1. Sistema de circulação forçada.....	27
2.4.2. Sistema termossifão.....	29
3. Modelação térmica dinâmica .....	31
3.1. Colector solar.....	32
3.1.1. Rendimento do colector solar .....	32
3.1.2. Geometria solar .....	33
3.1.3. Cálculo da radiação global incidente na superfície (inclinada) do colector ..	34
3.1.4. Cálculo dos ganhos (potência) resultantes da energia captada no colector...	36
3.2. Consumo .....	37
3.2.1. Caudal de água quente consumido .....	37
3.2.2. Cálculo da potência perdida devido ao consumo de água quente.....	39
3.3. Depósito de acumulação .....	39
3.3.1. Cálculo (aproximado) do coeficiente de perdas de energias para o exterior .	39
3.3.2. Cálculo da potência calorífica perdida pela envolvente do depósito do termossifão .....	41

3.4. Balanço energético do depósito de acumulação .....	42
3.5. Depósito complementar .....	42
3.5.1. Consumo .....	44
3.5.2. Perdas pela envolvente .....	45
3.5.3. Balanço energético ao depósito complementar .....	46
4. Quadro de estudos e resultados .....	49
5. Análise dos resultados .....	55
5.1. Impacto dos padrões temporais de consumo de água quente .....	55
5.2. Impacto das diferentes temporizações do sistema de apoio .....	56
5.3. Efeito dos diferentes ajustes da Temperatura de Acumulação definida pela Resistência (TAR) .....	57
5.4. Impacto da localização do sistema de apoio .....	58
5.5. Análise económica .....	60
5.5.1. Análise económica do depósito auxiliar .....	60
5.5.2. Análise económica do sistema solar térmico .....	62
6. Conclusões .....	65
7. Referências .....	67
8. Anexos .....	69
8.1. Anexo A – Dados técnicos do colector .....	69
8.2. Anexo B – Dados técnicos do sistema termossifão .....	70
8.3. Anexo C – Dados técnicos dos termoacumuladores .....	71
8.3.1. FAGOR CB-150N (150 litros) .....	71
8.3.2. FAGOR M-300SS (300 litros) .....	72

# Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> - Trajectória da Terra em torno do Sol e representação da inclinação do seu eixo de rotação.....	6
<b>Figura 2</b> – Representação esquemática do ângulo horário ( $ah$ ). .....	7
<b>Figura 3</b> – Representação gráfica da equação do tempo $ET$ . .....	9
<b>Figura 4</b> – Esquema representativo das coordenadas horizontais $a$ e $h$ e ângulo de incidência $i$ . .....	11
<b>Figura 5</b> – Relações angulares que permitem o cálculo da radiação solar incidente num qualquer plano a partir da radiação incidente num plano horizontal .....	14
<b>Figura 6</b> – Efeito da variação do ângulo de incidência $i$ na quantidade de radiação recebida numa determinada área de referência.....	15
<b>Figura 7</b> – Esquema de um colector solar térmico plano – pormenores construtivos. ..	17
<b>Figura 8</b> – Efeito da inclinação e orientação de um colector na energia anual captada.	19
<b>Figura 9</b> – Esquema do perfil da placa absorvedora de um colector solar térmico plano. ....	21
<b>Figura 10</b> - a) Esquema de um sistema termossifão, com circuito directo; b) Esquema de um sistema termossifão, com circuito indirecto e permutador interno do tipo serpentina.....	26
<b>Figura 11</b> – Esquema de um sistema em circulação forçada directa. ....	28
<b>Figura 12</b> - Esquema de um sistema em circulação forçada, com circuito indirecto e permutador externo. ....	28
<b>Figura 13</b> - Imagem de um sistema solar do tipo termossifão instalado.....	29
<b>Figura 14</b> - Esquema do sistema solar térmico do tipo termossifão. ....	31
<b>Figura 15</b> – Esquema do funcionamento da válvula termo-reguladora. ....	38
<b>Figura 16</b> - Esquema do sistema solar térmico do tipo termossifão com apoio eléctrico localizado num depósito complementar.....	43
<b>Figura 17</b> - Resultados: energia gasta anualmente pela resistência eléctrica de apoio ao sistema solar, para cada combinação de hipóteses consideradas.....	52

# Índice de Tabelas

<b>Tabela 1</b> – Valores médios dos parâmetros de eficiência (rendimento óptico e coeficiente de perdas) para diferentes tipos de colectores. ....	25
<b>Tabela 2</b> – Características e dimensões do acumulador do sistema termossifão (superfície curva). ....	40
<b>Tabela 3</b> – Características e dimensões do acumulador do sistema termossifão (superfície plana). ....	40
<b>Tabela 4</b> – Diferentes perfis de consumo de água quente analisados. ....	49
<b>Tabela 5</b> - Resultados: energia gasta anualmente pela resistência eléctrica de apoio ao sistema solar, para cada combinação de hipóteses consideradas.....	51
<b>Tabela 6</b> - Resultados: energia gasta anualmente num sistema de aquecimento de água totalmente eléctrico.....	53
<b>Tabela 7</b> – Percentagem de energia poupada no período de um ano como resultado da definição mensal da TAR em relação à definição anual da mesma.....	57
<b>Tabela 8</b> – Preço médio dos dois depósitos complementares testados. ....	60
<b>Tabela 9</b> – Comparação entre os valores mínimos de energia eléctrica gasta anualmente num sistema com o apoio eléctrico localizado no TS300 e num sistema com apoio no DC150. ....	61
<b>Tabela 10</b> – Resultados: tempo necessário para amortizar o valor investido na instalação de um sistema com DC150 face à instalação de um sistema solar térmico simples.....	61
<b>Tabela 11</b> – Comparação entre os valores mínimos de energia eléctrica gasta anualmente num sistema solar térmico com o apoio localizado no TS300 e num sistema totalmente eléctrico.....	62
<b>Tabela 12</b> – Resultados: tempo necessário para amortizar o valor investido na instalação de um sistema solar térmico simples (apoio no TS300) face à instalação de um sistema totalmente eléctrico.....	63
<b>Tabela A1</b> – Dados técnicos do colector solar térmico que serve de referência neste trabalho (Lightsun FKB).....	69
<b>Tabela A2</b> – Dados técnicos do sistema termossifão que serve de referência neste trabalho (300 litros).....	70
<b>Tabela A3</b> – Dados técnicos do termoacumulador FAGOR CB-150N (150 litros).....	71
<b>Tabela A4</b> – Dados técnicos do termoacumulador FAGOR M-300SS (300 litros).....	72

# Lista de símbolos

Símbolo	Descrição	Unidades
$A_{col}$	Área útil de abertura dos colectores	[m <sup>2</sup> ]
$A_e$	Área exterior	[m <sup>2</sup> ]
$A_i$	Área interior	[m <sup>2</sup> ]
$a$	Azimute solar	[°]
$a_1$	Coefficiente de perdas primário	[W/(m <sup>2</sup> .K)]
$a_2$	Coefficiente de perdas secundário	[W/(m <sup>2</sup> .K <sup>2</sup> )]
$a_{sup}$	Azimute da superfície do colector	[°]
$ah$	Ângulo horário	[°]
$b$	Largura da ligação tubo/placa do colector	[m]
$C_l$	Coefficiente de transferência de calor por condução através da ligação tubo/placa do colector	[W/(m.K)]
$C_p$	Calor específico da água	[J/(kg.K)]
$D$	Diâmetro externo do tubo do colector	[m]
$D_i$	Diâmetro interno do tubo do colector	[m]
$d$	Dia do ano contado a partir do dia 1 de Janeiro	[-]
$ET$	Equação do tempo	[min]
$e$	Espessura média da ligação tubo/placa do colector	[m]
$F$	Rendimento padrão da alheta	[-]
$F_R$	Factor de remoção de calor	[-]
$F'$	Factor de eficiência	[-]
$h$	Altura solar	[°]
$\dot{I}_0$	Radiação solar incidente no topo da atmosfera	[W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{I}_{dif,H}$	Radiação difusa incidente numa superfície horizontal	[W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{I}_{dir,n}$	Radiação directa incidente numa superfície perpendicular aos raios solares	[W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{I}_{dif,\beta}$	Radiação difusa incidente na superfície do colector	[W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{I}_{dir,H}$	Radiação directa incidente numa superfície horizontal	[W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{I}_{dir,\beta}$	Radiação directa incidente na superfície do colector	[W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{I}_{global,\beta}$	Radiação global incidente na superfície do colector	[W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{I}_{ref,\beta}$	Radiação reflectida incidente na superfície do colector	[W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{I}_\beta$	Radiação global incidente na superfície do colector	[W/m <sup>2</sup> ]

$i$	Ângulo de incidência	[°]
$K$	Coefficiente global de perdas no colector	[W/(m <sup>2</sup> .K)]
$L$	Comprimento do depósito do termosifão	[m]
$m$	Massa de água	[kg]
$\dot{m}$	Caudal de fluido de trabalho	[kg/s]
$\dot{m}_{\text{água quente}}$	Caudal de consumo de água quente	[kg/s]
$\dot{m}_{\text{consumo}}$	Caudal de consumo	[kg/s]
$\dot{m}_{\text{rede}}$	Caudal de consumo de água da rede	[kg/s]
$\dot{Q}_{\text{absov}}$	Potência absorvida no colector	[W]
$\dot{Q}_{\text{apoio}}$	Potência fornecida pelo apoio	[W]
$\dot{Q}_{\text{colector}}$	Potência ganha no colector efectivamente transferida para a água do acumulador	[W]
$\dot{Q}_{\text{consumo}}$	Potência perdida/ganha devido ao consumo de água quente	[W]
$\dot{Q}_{\text{incidente}}$	Potência incidente no colector	[W]
$\dot{Q}_{\text{perdas}}$	Potência perdida por transferência de calor no acumulador/colector	[W]
$\dot{Q}_{\text{perdas estáticas a 65°C}}$	Potência perdida por transferência de calor no termoacumulador (água a 65°C)	[W]
$\dot{Q}_{\text{útil}}$	Potência útil (ganha pelo fluido de trabalho no colector)	[W]
$\dot{Q}_{\text{útil máxima}}$	Potência útil máxima que pode ser ganha no colector	[W]
$R_{\text{cil}}$	Resistência global à transferência de calor da parte curva do acumulador	[K/W]
$R_e$	Raio exterior	[m]
$R_{\text{equivalente}}$	Resistência (global) equivalente à transferência de calor do acumulador	[K/W]
$R_i$	Raio interior	[m]
$R_{\text{lat}}$	Resistência global à transferência de calor da parte plana do acumulador	[K/W]
$T_{\text{ac}}$	Temperatura da água no acumulador (inicial)	[°C]
$T_{\text{ac final}}$	Temperatura final da água no acumulador	[°C]
$T_{\text{consumo}}$	Temperatura da água de consumo	[°C]
$T_{\text{dc}}$	Temperatura da água no depósito complementar (inicial)	[°C]
$T_{\text{dc final}}$	Temperatura final da água no depósito complementar	[°C]

---

$T_{envolvente}$	Temperatura envolvente ao depósito auxiliar	[°C]
$T_{ext}$	Temperatura exterior	[°C]
$T_{in}$	Temperatura de entrada do fluido no colector	[°C]
$T_{placa}$	Temperatura média da placa absorvedora do colector	[°C]
$T_{rede}$	Temperatura da água da rede	[°C]
$UA$	Coeficiente global de perdas por transferência de calor para o exterior	[W/K]
$V_{ac}$	Volume de água no acumulador	[m <sup>3</sup> ]
$V_{dc}$	Volume de água no depósito complementar	[m <sup>3</sup> ]
$W$	Distância entre tubos no colector	[m]
$\alpha$	Coeficiente de absorção da placa	[-]
$\alpha_e$	Coeficiente de transferência de calor exterior	[W/(m <sup>2</sup> .K)]
$\alpha_i$	Coeficiente de transferência de calor interior	[W/(m <sup>2</sup> .K)]
$\beta$	Ângulo de inclinação do colector	[°]
$\Delta a$	Diferença entre o azimute solar e o azimute da superfície do colector	[°]
$\delta$	Declinação	[°]
$\eta$	Rendimento do colector	[-]
$\eta_0$	Rendimento óptico	[-]
$\lambda$	Longitude	[°]
$\lambda$	Condutibilidade térmica	[W/(m.K)]
$\lambda_l$	Condutibilidade térmica através da ligação tubo/placa do colector	[W/(m.K)]
$\rho$	Albedo	[-]
$\rho_{ac}$	Massa volúmica da água no acumulador	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{dc}$	Massa volúmica da água no depósito complementar	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau$	Coeficiente de transmissibilidade do vidro do colector	[-]
$\varphi$	Latitude	[°]

---

# Lista de abreviaturas

<b>Sigla</b>	<b>Terminologia</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>DC150</b>	Depósito complementar de 150 litros
<b>DC300</b>	Depósito complementar de 300 litros
<b>RCCTE</b>	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
<b>TAR</b>	Temperatura de acumulação definida pela resistência de apoio
<b>TL</b>	Tempo legal
<b>TMG</b>	Tempo no meridiano de Greenwich
<b>TS300</b>	Acumulador do termossifão de 300 litros
<b>TSM</b>	Tempo solar médio
<b>TSV</b>	Tempo solar verdadeiro
<b>WMO</b>	<i>World Metereological Organization</i>



# 1. Introdução

A história da exploração energética mundial apresenta um percurso curioso. Antes da revolução industrial, iniciada em meados do séc. XVIII, existia uma exploração energética com tecnologias rudimentares a partir de fontes renováveis de energia. Com a revolução industrial surgiu a descoberta de novas fontes de energia como causa e consequência de um desenvolvimento tecnológico acentuado. Começou por surgir o carvão, associado à máquina a vapor, e, posteriormente, como a descoberta dos princípios da termodinâmica e evolução dos transportes, surgem o petróleo e o gás natural. A partir daí, a aposta exagerada neste tipo de recursos como resposta a um consumo desmedido de energia a nível mundial levou ao despertar da consciência de que estes recursos são finitos. Além disso, a utilização excessiva destes recursos contribui significativamente para aumentar as quantidades de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> na atmosfera, facto que é considerado pela maior parte dos especialistas como sendo o principal responsável pela alteração climática global nos últimos anos, nomeadamente o aumento da temperatura média anual no planeta.

Na tentativa de inverter esta situação, fala-se cada vez mais nos últimos anos na ideia de desenvolvimento sustentável que passa pela tomada de consciência da necessidade de racionalizar os gastos de energia e investir na exploração de fontes de energia renováveis. São consideradas “energias renováveis” todas aquelas formas de energia cuja taxa de utilização é inferior à sua taxa de renovação. Verifica-se assim, neste período, um recuperar da ideologia antiga no que toca à exploração das fontes renováveis de energia, sendo que actualmente essa exploração recorre a tecnologias altamente sofisticadas.

Existem várias formas de energias renováveis, classificadas de acordo com a sua fonte. Este trabalho, tendo em conta os seus objectivos, passará por uma análise à produção de energia térmica como resultado do aproveitamento directo da energia contida na radiação solar. É comum designar esta forma de energia por “energia solar”, sendo que em rigor a energia solar contempla outras formas de energia que de forma indirecta estão associadas ao Sol, como é o caso da energia eólica ou das ondas, por exemplo.

*“O recurso a sistemas de colectores solares térmicos para aquecimento de água sanitária nos edifícios abrangidos pelo RCCTE é obrigatório sempre que haja uma*

*exposição solar adequada (...) em terraço ou nas vertentes orientadas no quadrante sul, entre sudeste e sudoeste, (...) que não sejam sombreadas por obstáculos significativos no período que se inicia diariamente duas horas depois do nascer do Sol e termina duas horas antes do ocaso.” [1]*

Esta obrigatoriedade imposta pelo Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) enfatiza a crescente necessidade em recorrer a fontes de energia renováveis, nomeadamente energia solar, para aumentar a eficiência energética dos edifícios.

Este trabalho surge enquadrado neste contexto, na medida em que procura, através do estudo de várias hipóteses, analisar a influência das diferentes condições de uso na eficiência de um sistema solar térmico, neste caso do tipo termossifão. Naturalmente, esta análise permitirá melhorar a eficiência de um sistema deste tipo, recorrendo a alterações na sua utilização que em alguns casos poderão ser bastante simples.

No final deste documento são apresentados os resultados para a combinação de diferentes hipóteses, sendo efectuadas várias análises de sensibilidade. A comparação destas hipóteses é avaliada não só a partir dos resultados obtidos através de uma análise energética, mas também fruto de uma análise económico-financeira.

O presente projecto insere-se no projecto final do mestrado integrado em engenharia mecânica na opção de energia térmica.

## **1.1. Contexto e objectivos**

Apesar de normalmente avaliada em condições de referência, sabe-se que a eficiência de sistemas solares térmicos para aquecimento de água depende de condições particulares. Pretende-se neste trabalho desenvolver um modelo dinâmico simples para a temperatura da água armazenada num sistema solar termossifão, e posteriormente aplicar esse modelo para o estudo das seguintes questões:

- Impacto dos padrões temporais de uso de água quente na eficiência do sistema;
- Impacto da temporização do sistema de apoio;

- Impacto da localização do sistema de apoio (termossifão ou depósito complementar);
- Comparação da energia eléctrica gasta pelo apoio com a energia gasta por um sistema totalmente eléctrico, isto é, sem colectores solares;
- Estudo da viabilidade económica da instalação de um sistema solar do tipo termossifão com e sem depósito complementar;

## 1.2. Metodologia geral

O modelo dinâmico que permite obter a evolução da temperatura da água num acumulador foi desenvolvido recorrendo aos conhecimentos de transferência de calor e implementado na ferramenta de cálculo *Microsoft Excel*. Depois de definidos os gastos médios diários de água quente com o consumo padrão (considerou-se uma família de quatro pessoas), foi escolhido um sistema do tipo termossifão adequado a essas necessidades. Os valores, utilizados nos cálculos, que definem as características do acumulador e dos colectores solares (dois colectores) que constituem o sistema são definidos pelo fabricante. No caso dos parâmetros que definem o rendimento do colector, foram utilizados valores típicos para colectores desse tipo.

Os valores da temperatura exterior e radiação incidente em superfície horizontal foram obtidos a partir de um ficheiro com os dados climáticos (base de dados do software *SOLTERM*, clima Porto), apresentados em intervalos de uma hora, para um ano típico. Uma vez que o modelo dinâmico desenvolvido efectua o cálculo da temperatura de acumulação em intervalos de dez minutos houve necessidade interpolar os valores dados para os intervalos considerados.

Partindo dos conceitos de geometria solar foi calculada a radiação incidente na superfície inclinada do colector, que juntamente com os restantes dados e características do sistema permitiram calcular, para cada instante considerado, os ganhos solares úteis no colector bem como as perdas por transferência de calor para o exterior no depósito de acumulação. Os ganhos de energia introduzidos pela resistência de apoio e as perdas (no caso da existência de um depósito complementar podem resultar em ganhos) resultantes do consumo de água quente dependem dos diferentes cenários testados. Posteriormente foi efectuado, para cada combinação de hipóteses estudadas, o balanço

energético que permitiu obter o valor da temperatura de acumulação em cada instante de tempo considerado.

Finalmente foi avaliado o impacto das diferentes variáveis estudadas através de uma análise energética e económica aos resultados.

## 2. Energia solar

O sol, sendo a estrela central do nosso sistema solar, está relacionado com praticamente todos os fenómenos que ocorrem na Terra, proporcionando as condições necessárias para a existência de vida neste planeta. É uma estrela com  $13,9 \times 10^5$  km de diâmetro, composta por vários gases diferentes e que se encontra a uma distância da Terra de  $15,0 \times 10^7$  km.

A grande quantidade de energia radiada para o espaço resulta das reacções de fusão dos núcleos dos átomos de hidrogénio, originando núcleos de hélio.

Da energia solar que chega a este planeta, apenas uma pequena parte é aproveitada do ponto de vista tecnológico. Para se ter uma ideia, o Sol fornece anualmente, para a atmosfera terrestre, uma quantidade de energia avaliada em  $1,5 \times 10^{18}$  kWh. Ora, sendo o consumo anual de energia pela humanidade cerca de  $10^{14}$  kWh, verifica-se que o Sol fornece ao planeta 10000 vezes mais energia do que a que consumimos durante esse período, o que significa ainda que o Sol, numa hora, disponibiliza mais energia do que a energia consumida num ano inteiro. [3][4] No entanto, o aproveitamento da energia disponibilizada por esta fonte implica a existência de consideráveis superfícies de captação, sendo que o rendimento na transformação desta energia em outras formas de energia não é elevado, sobretudo no caso da tecnologia fotovoltaica, em que o rendimento das células fotovoltaicas comerciais é apenas da ordem dos 16%, podendo o rendimento máximo de uma célula de investigação atingir os 30%. No caso dos sistemas solares térmicos o rendimento é superior, assumindo um valor médio de aproximadamente 50%.

### 2.1. Geometria solar

É de fundamental interesse neste trabalho um conhecimento preciso da posição do Sol em relação à superfície terrestre em cada instante ao longo do ano. Este conhecimento torna possível determinar o ângulo entre os raios solares e a superfície do colector solar, permitindo quantificar o potencial energético disponibilizado pelo Sol que atinge o colector.

Sabe-se que a Terra possui um movimento de rotação e um movimento de translação. No primeiro, a Terra gira em volta do seu próprio eixo dando origem à sequência dos dias e das noites. No segundo, a Terra descreve um movimento elíptico em torno do Sol (encontrando-se este num dos focos da elipse) com a duração de um ano (365 dias e 6 horas). Além disso, o plano equatorial da Terra possui uma inclinação de  $23.5^\circ$  em relação ao plano que contém a trajetória elíptica, o que faz com que os dois hemisférios do planeta recebam quantidades distintas de energia ao longo do ano, dividindo-o em diferentes períodos: os solstícios (Verão e Inverno) e os equinócios (Primavera e Outono). A existência desta declinação do eixo de rotação terrestre é ainda responsável pela variação sazonal da duração dos dias e das noites. Desta forma, verifica-se a mesma duração dos dias e das noites nos equinócios e durações diferentes destes períodos nos solstícios.



Figura 1- Trajetória da Terra em torno do Sol e representação da inclinação do seu eixo de rotação.

A posição do Sol em relação à terra pode ser definida geometricamente com base em dois sistemas de coordenadas.

### 2.1.1. Coordenadas equatoriais horárias

Estas coordenadas definem-se a partir dos ângulos fundamentais medidos com base no plano onde se dá o movimento aparente do Sol. Este sistema é representado por duas coordenadas: a declinação e o ângulo horário.

- Declinação ( $\delta$ )

Esta coordenada define-se como sendo o ângulo entre o plano equatorial e o plano da elíptica, medido sempre sobre a linha imaginária que une o Sol à Terra. Assim, o valor desta coordenada varia entre -23,45 (solstício de Dezembro) e 23,45 (solstício de Junho). O seu valor pode ser obtido, matematicamente, da seguinte forma:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin(0,986 \cdot d - 80) \quad [^\circ]$$

(Eq. 1)

Sendo  $d$  o dia contado a partir de 1 de Janeiro.

- Ângulo horário ( $ah$ )

Representa o ângulo entre o plano meridional do lugar e o círculo horário (plano que contém o eixo de rotação da Terra e o Sol). Quando no tempo solar verdadeiro é meio-dia, o valor desta coordenada é zero. À tarde apresenta valores positivos e de manhã negativos.

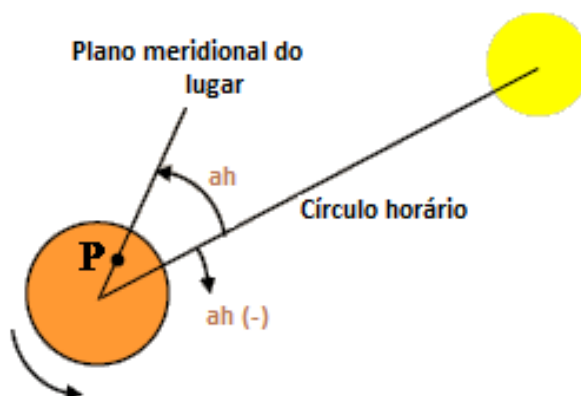


Figura 2 – Representação esquemática do ângulo horário ( $ah$ ).

Uma rotação da terra – cuja duração equivale a 24 horas – corresponde a  $360^\circ$  de ângulo horário, portanto, cada  $15^\circ$  correspondem a 1 hora. Desta forma, o ângulo horário será,

$$ah = 15 \cdot (TSV - 12) \quad [^\circ] \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo  $TSV$  o tempo solar verdadeiro em horas.

O  $TSV$  varia, para um determinado instante, de forma linear em função da variação da longitude. Ora, como é sabido, o tempo legal,  $TL$ , que é o tempo aceite num dado Estado, pode ser, naturalmente, o mesmo para locais com longitudes diferentes. Contudo, o  $TSV$ , além de variar com a longitude, também varia de dia para dia, relativamente ao mesmo  $TL$ . Isto deve-se ao facto de a velocidade de translação da Terra não ser uniforme. Assim, os meios-dias solares em dias consecutivos não ocorrem no mesmo  $TL$ .

Para converter  $TL$  em  $TSV$  parte-se do seguinte pressuposto:

Considerar um tempo solar médio,  $TSM$ , que equivaleria ao  $TSV$  se este fosse uniforme (velocidade de translação da Terra constante). Mas como na realidade essa uniformidade não se verifica, surge a equação do tempo,  $ET$ , que permite, para cada dia, obter o  $TSV$  em função do  $TSM$ .

$$TSV = TSM + \frac{ET}{60} \quad [horas] \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo a  $ET$  função do dia do ano,  $d$ , contado a partir do dia 1 de Janeiro, e pode ser calculada da seguinte forma:

$$ET = 229,18 \cdot (0,000075 + 0,001868 \cdot \cos \gamma - 0,032077 \cdot \sin \gamma - 0,014615 \cdot \cos (2\gamma) - 0,040849 \cdot \sin(2\gamma)) \quad [minutos] \quad (\text{Eq. 4})$$

Com,

$$\gamma = \frac{2\pi}{365} \cdot (d - 1) \quad [rad] \quad (\text{Eq. 5})$$

A seguir está representada, graficamente, a equação do tempo, *ET*.

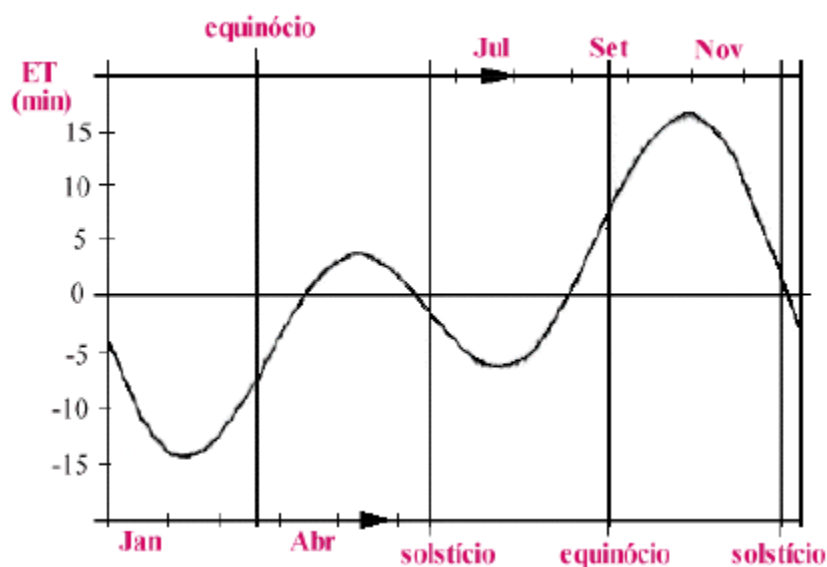


Figura 3 – Representação gráfica da equação do tempo *ET*.

Como já foi referido, o TSV varia com a variação longitude. Tendo em conta que, cada 15° de variação da longitude equivale a uma variação de 1 hora no TSV, facilmente se obtém a seguinte relação:

$$TSM = TMG + \frac{\lambda}{15} \quad [horas]$$

(Eq. 6)

Em que,

O tempo no meridiano de Greenwich, TMG, representa o tempo solar médio neste meridiano de referência (longitude 0°);

$\lambda$  representa a longitude do local em relação ao meridiano de referência (-8,6° para o Porto).

Em Portugal continental, o tempo legal, TL, coincide com TMG. Contudo, e como em vários países, existem no nosso país dois horários legais: o horário de inverno e o de verão. Consequentemente, pode-se estabelecer a relação seguinte:

$$TMG = TL - \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad [horas]$$

(Eq. 7)

Efectuando-se a subtracção por 1 na equação anterior entre fim de Abril e fim de Outubro.

Substituindo na equação 3 obtém-se,

$$TSV = TL + \frac{\lambda}{15} + \frac{ET}{60} - \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad [horas]$$

(Eq. 8)

### 2.1.2. Coordenadas horizontais

Existem ainda outro tipo de coordenadas que representam a posição relativa do sol. Estas coordenadas definem-se a partir dos ângulos fundamentais medidos com base no plano do horizonte do local. Este sistema é representado por duas coordenadas: altura solar e azimute.

- Altura solar ( $h$ )

É calculada com base na seguinte relação:

$$\sin h = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos(ah)$$

(Eq. 9)

Sendo  $\varphi$  a latitude do local pretendido ( $41^\circ$  no caso do Porto)

- Azimute ( $a$ )

Este parâmetro é calculado através da seguinte relação:

$$\cos a = \frac{\sin h \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h \cdot \cos \varphi}$$

(Eq. 10)

O valor obtido da equação anterior para o azimute é sempre positivo, ou seja, representa apenas o valor absoluto desta coordenada. No caso deste trabalho o

colector solar estará orientado a Sul, portanto o azimute solar em relação ao colector coincide com o azimute solar em relação a Sul obtido pela equação. Sendo que para o cálculo da inclinação dos raios solares em relação ao colector só interessa o valor absoluto do azimute, o facto de a equação apresentar o valor do azimute sempre positivo não influencia os resultados. Em rigor, o valor real do azimute será igual ao valor absoluto obtido pela equação, apenas acrescentando o facto de este ser negativo de manhã e positivo à tarde.

Na figura estão representadas esquematicamente as coordenadas horizontais, bem como o ângulo  $i$  que representa a inclinação dos raios solares em relação à superfície inclinada de um colector.

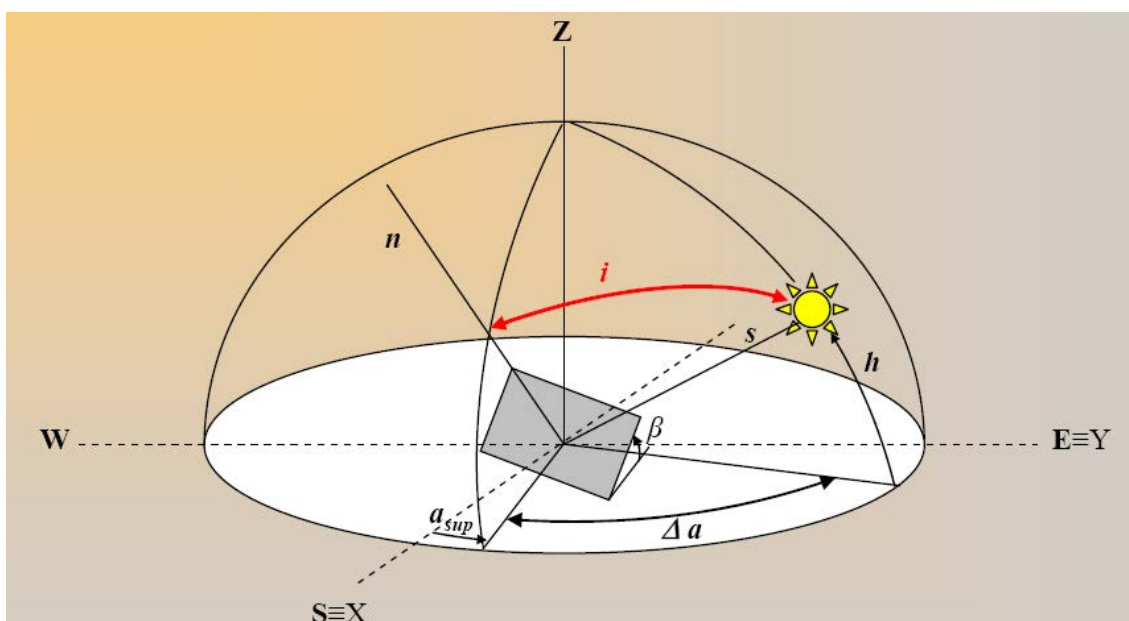


Figura 4 – Esquema representativo das coordenadas horizontais  $a$  e  $h$  e ângulo de incidência  $i$ .

As duas coordenadas horizontais, altura solar e azimute, variam instantaneamente durante cada dia, uma vez que ambas acabam por depender do tempo solar verdadeiro (TSV). Essa variação traduz-se na trajetória que o Sol efectua no nosso horizonte visual, tendo como referências a superfície de Terra e a direcção sul. É, assim, fundamental o conhecimento destas coordenadas em cada instante (posteriormente definidos) ao longo do dia, a fim de conhecer também nesses mesmos instantes a inclinação ( $i$ ) dos raios solares em relação à superfície inclinada do colector. Esta

inclinação ( $i$ ) será essencial para o cálculo da radiação incidente na superfície do colector em cada instante considerado.

Para o caso particular de o colector estar virado a sul, o que se verifica neste estudo, o azimute da superfície ( $a_{sup}$ ) é igual a zero. Assim o azimute solar em relação ao colector ( $\Delta a$  da figura) coincide com o azimute solar propriamente dito. Desta forma pode-se escrever:

$$\cos i = \sin h \cdot \cos \beta + \cos h \cdot \sin \beta \cdot \cos a$$

(Eq. 11)

## 2.2. Radiação solar

O estudo das características da radiação emitida pelo sol e da sua intensidade é de extrema importância para, neste trabalho específico e em conjunto com os conceitos de geometria solar vistos no capítulo 2.1, quantificar a potência calorífica que advém da existência do colector solar no modelo estudado.

Segundo dados recentes da WMO (*World Meteorological Organization*), o valor médio da radiação solar incidente no topo da atmosfera, numa superfície perpendicular à direcção dos raios solares, é aproximadamente constante e de valor  $1353 \text{ W/m}^2$ . Este valor denomina-se “constante solar”. Na realidade, o valor desta radiação varia durante o ano em função da distância ao Sol, num intervalo entre mais e menos 3,5% da constante solar. A seguinte equação traduz essa variação, em função do dia do ano ( $d$ ) a contar desde 1 de Janeiro.

$$i_0 = 1353 \cdot \left( 1 + 0,033 \cdot \cos \frac{360d}{365} \right) \quad [\text{W/m}^2]$$

(Eq. 12)

No entanto, ao atravessar a atmosfera (onde ocorre a reflexão e absorção de parte de radiação) e considerando um dia de céu relativamente limpo, apenas cerca de 70% desta radiação atinge a superfície terrestre, ou seja, uma radiação máxima de  $1000 \text{ W/m}^2$ . A sua distribuição espectral inclui radiação na gama dos raios ultra-violetas (7%), luz

visível (47%) e raios infra-vermelhos (46%), sendo que 99% da radiação solar apresenta comprimentos de onda entre 0,15 e 4  $\mu\text{m}$ .

A radiação solar que atinge a superfície terrestre pode ainda ser decomposta em três componentes:

- *Radiação directa*  
É a parte da radiação vinda directamente do Sol (sem mudanças de direcção) que atinge a superfície.
- *Radiação difusa*  
Resulta de reflexões e dispersão na atmosfera terrestre e atinge a superfície proveniente de todas as direcções. Esta componente da radiação também existe em dias de céu nublado, onde toda a radiação directa se dispersa nas nuvens.
- *Radiação reflectida*  
É a menos significativa e resulta da reflexão da radiação directa ou difusa no solo e em objectos circundantes. A esta componente da radiação está associado um coeficiente médio de reflexão da envolvente, denominado albedo ( $\rho$ ), que representa a parte da radiação incidente que é reflectida. No caso do solo, a albedo varia entre 0,2 e 0,3.

A soma destas três componentes da radiação solar tem o nome de radiação global, sendo o valor desta o usado no cálculo dos ganhos solares num colector.

Existem ficheiros climáticos que contém, para cada região, valores da radiação solar instantânea, apresentados com uma determinada periodicidade (mensal, diária, horária...), para um ano. Estes valores consistem na média das medições efectuadas em vários anos para cada instante considerado, podendo ser interpretados como os valores da radiação solar para um ano típico. Estas medições da radiação são efectuadas para uma superfície horizontal.

A partir dos dados da radiação incidente numa superfície horizontal, é possível calcular o valor de cada componente (directa, difusa e reflectida) da radiação incidente na superfície inclinada do colector, obtendo-se posteriormente o valor da radiação global na superfície considerada.

- Radiação directa na superfície inclinada  $\dot{I}_{dir,\beta}$

Esta radiação pode ser caracterizada para um dado instante através de relações angulares nesse mesmo instante, que definem a posição do sol em relação ao colector.

Sabendo a radiação directa incidente num plano horizontal  $\dot{I}_{dir,H}$  é possível obter a radiação directa incidente num plano cuja normal apresenta a direcção dos raios solares  $\dot{I}_{dir,n}$  e, conseqüentemente, a radiação directa incidente na superfície inclinada do colector  $\dot{I}_{dir,\beta}$ .

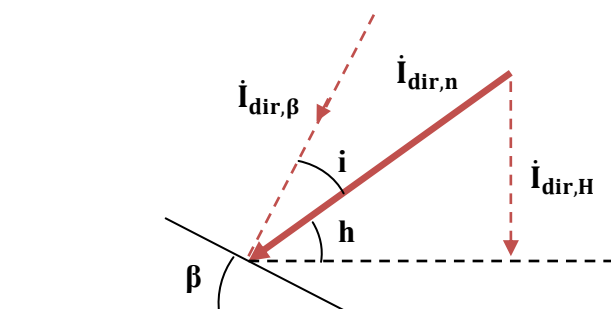


Figura 5 – Relações angulares que permitem o cálculo da radiação solar incidente num qualquer plano a partir da radiação incidente num plano horizontal  $\dot{I}_{dir,H}$ .

Note-se que na figura 5, as relações geométricas estabelecidas funcionam apenas como metodologia de cálculo da quantidade radiação solar incidente num qualquer plano por unidade de área. Assim, o ângulo entre um determinado plano e os raios solares continua a ser uma variável definida pelas coordenadas horizontais.

De acordo com a figura anterior pode-se escrever as seguintes relações:

$$\dot{I}_{dir,n} = \frac{\dot{I}_{dir,H}}{\sin h} \quad [W/m^2] \quad (\text{Eq. 13})$$

E ainda,

$$\dot{I}_{dir,\beta} = \dot{I}_{dir,n} \cdot \cos i \quad [W/m^2] \quad (\text{Eq. 14})$$

Finalmente, a radiação  $\dot{I}_{dir,\beta}$  pode ser escrita a partir da radiação  $\dot{I}_{dir,H}$

$$\dot{I}_{dir,\beta} = \dot{I}_{dir,H} \cdot \frac{\cos i}{\sin h} \quad [W/m^2]$$

(Eq. 15)

Sabendo que, para uma superfície orientada a sul,

$$\cos i = \sin h \cdot \cos \beta + \cos h \cdot \sin \beta \cdot \cos a$$

(Eq. 16)

A figura seguinte mostra, de uma forma mais intuitiva e prática, como o aumento da inclinação ( $i$ ) dos raios solares em relação a uma superfície provoca a diminuição da radiação incidente numa área de referência.

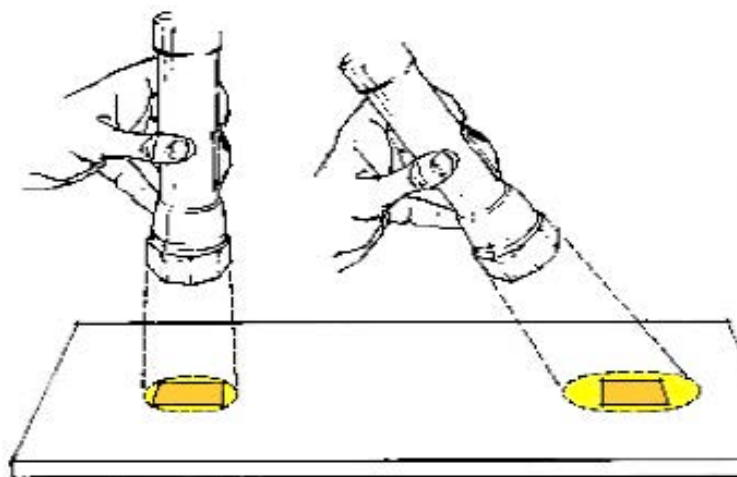


Figura 6 – Efeito da variação do ângulo de incidência  $i$  na quantidade de radiação recebida numa determinada área de referência. [2]

- Radiação difusa na superfície inclinada  $\dot{I}_{dif,\beta}$

A radiação difusa admite-se ser isotrópica e uniforme em todas as direcções, assim, uma superfície recebe radiação difusa em função da proporção do hemisfério celeste que “vê”.

A radiação difusa na superfície inclinada do colector  $\dot{I}_{dif,\beta}$  vem, portanto, em função da radiação difusa no plano horizontal  $\dot{I}_{dif,H}$  sendo este valor conhecido, e em função do ângulo de inclinação  $\beta$  do colector.

$$\dot{I}_{dif,\beta} = \dot{I}_{dif,H} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad [W/m^2]$$

(Eq. 17)

- Radiação reflectida na superfície inclinada  $\dot{I}_{ref,\beta}$

Esta radiação contabiliza-se considerando a fracção da radiação global incidente no plano horizontal que é reflectida. Essa fracção é representada pelo albedo  $\rho$ . A superfície considerada recebe radiação reflectida em função da fracção complementar do hemisfério celeste de onde recebe radiação difusa.

$$\dot{I}_{ref,\beta} = \rho \cdot \dot{I}_{global,H} \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad [W/m^2]$$

(Eq. 18)

A radiação global incidente na superfície inclinada do colector,  $\dot{I}_{global,\beta}$ , é a soma das três parcelas anteriores.

$$\dot{I}_{global,\beta} = \dot{I}_{dir,\beta} + \dot{I}_{dif,\beta} + \dot{I}_{ref,\beta} \quad [W/m^2]$$

(Eq. 19)

## 2.3. Colector solar térmico plano

Um colector solar térmico é um equipamento que absorve a energia fornecida pelo Sol, sob a forma de radiação, convertendo-a em energia térmica que será responsável pelo aquecimento de um fluido de trabalho que circula no interior do colector.

De entre os vários tipos de colectores existentes no mercado, o colector solar térmico plano terá aqui especial destaque, uma vez que é este o tipo de colector utilizado no modelo dinâmico definido neste trabalho.

Este colector é o mais comum, sobretudo no que toca ao aquecimento de águas domésticas ou mesmo águas para aquecimento ambiente, uma vez que apresenta uma boa razão rendimento/custo para a gama de temperaturas característica destas aplicações.

Existe uma série de características construtivas deste tipo de colectores que permite uma maior eficiência na transformação da radiação captada em energia térmica.

O componente principal destes colectores é a sua placa de absorção. Esta absorve a radiação fornecida pelo Sol e aquece, transferindo essa energia, sob a forma de calor, para o fluido térmico que circula por uma série de tubos ligados à placa, concebidos com materiais bons condutores térmicos. Normalmente o absorvedor é revestido com uma superfície selectiva, que absorvem muita radiação, mas emite pouca, aumentando assim o rendimento.

Sobre a placa de absorção existe uma cobertura de vidro (com área semelhante à da placa), de uma ou mais camadas, formando com a placa uma “caixa-de-ar”. Assim, a radiação passa através do vidro, aquecendo a placa absorvedora, que passa a emitir radiação num comprimento de onda maior, para o qual o vidro é opaco, criando-se o chamado “efeito estufa”, que associado à existência da “caixa-de-ar” que reduz significativamente as perdas térmicas por radiação e convecção para o exterior.

Este tipo de colector é ainda constituído, lateralmente e por baixo, por uma caixa rígida, que contacta com o exterior, que serve para dar rigidez e proteger o interior do colector dos agentes externos, permitindo ainda uma boa fixação do sistema aquando da sua instalação. Entre esta caixa e os constituintes interiores do colector existe um material isolante que permite reduzir significativamente as perdas térmicas por condução para o ambiente. [5][6]

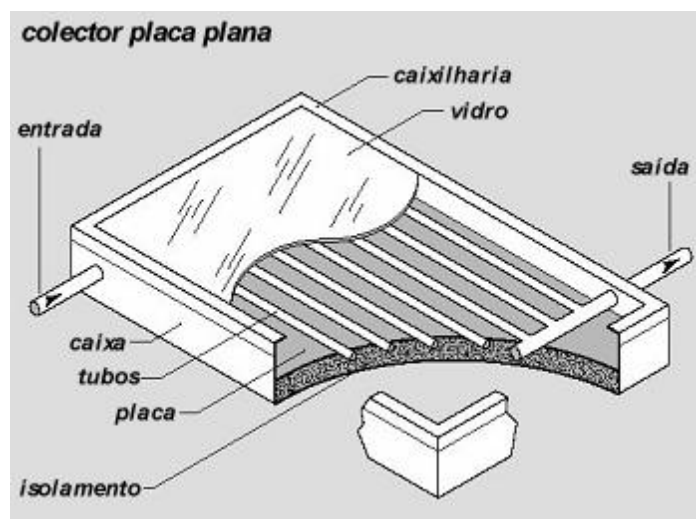


Figura 7 – Esquema de um colector solar térmico plano – pormenores construtivos. [2]

De forma a maximizar a quantidade de energia absorvida pelo colector, este deve possuir uma inclinação e orientação específicas, que varia consoante a latitude da região em que se pretende instalar um sistema deste tipo. No caso particular de Portugal, estando o colector permanentemente numa posição fixa, este deve estar virado para sul. Relativamente à inclinação ideal do colector para uma determinada região, esta varia de acordo com as necessidades dos utilizadores.

Se a instalação tiver como objectivo produzir água quente cuja utilização será permanente, a inclinação ideal deve permitir captar a maior quantidade de energia durante todo o ano. Neste caso, a inclinação corresponde à latitude do local menos 5°.

Por outro lado existem situações em que as necessidades de água quente não são constantes o ano todo, estando um maior consumo associado, normalmente, ao semestre de verão ou ao de inverno. Neste caso, a inclinação ideal deverá permitir uma maior captação de energia na temporada de maior utilização. Assim, se o objectivo for captar mais energia no verão, a inclinação ideal corresponde à latitude do local menos 15°. Se, no entanto, o objectivo for maximizar a energia captada no inverno, a inclinação ideal corresponde à latitude do local mais 15°.

Por vezes, por razões de segurança ou até estéticas é preferível assumir desvios em relação à inclinação e/ou orientação ideais do colector. Desvios até 20° (para Este ou Oeste) na orientação e/ou até 15° na inclinação não prejudicam em mais de 5% na captação de energia. [8]

A figura seguinte permite avaliar qual o impacto da inclinação e orientação de um colector na energia anual captada. O eixo das abcissas corresponde à inclinação do colector e o eixo das ordenadas representa a percentagem de energia anual captada em relação à energia máxima que pode ser captada nesse mesmo período. As diferentes curvas do gráfico equivalem a diferentes valores de orientação (azimute) do colector, que vão desde 0° a 90° de desvio em relação a Sul, que corresponde à orientação ideal.

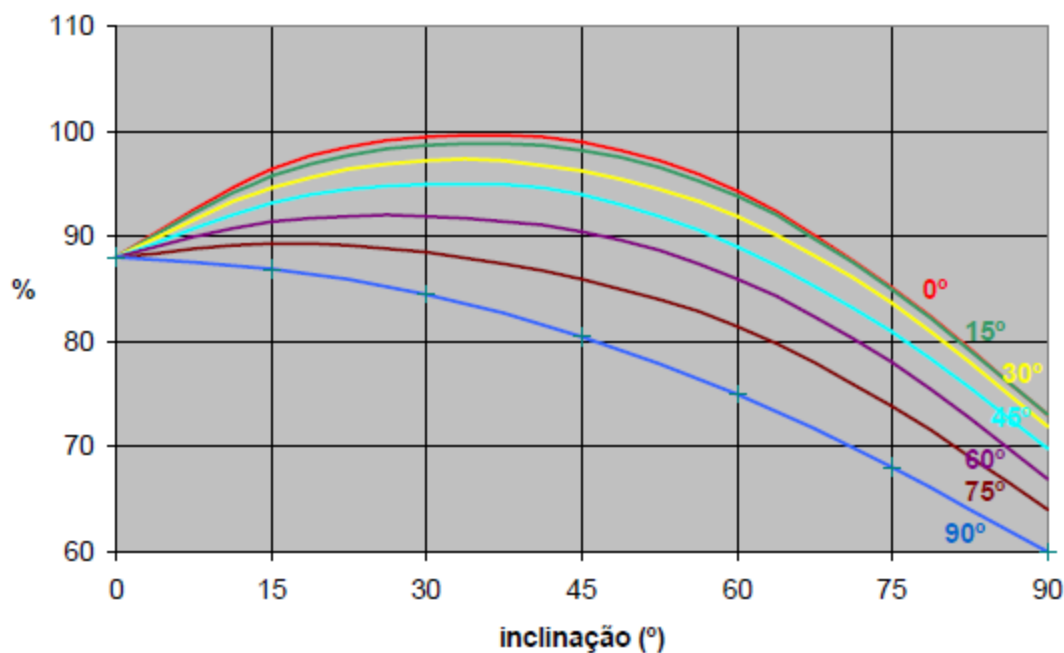


Figura 8 – Efeito da inclinação e orientação de um coletor na energia anual captada. [2]

Como se pode observar na figura 8, para um determinado desvio na inclinação em relação ao valor ideal (mantendo a orientação óptima), a energia captada pelo coletor é menor do que para o mesmo desvio na orientação (mantendo a inclinação óptima). Ou seja, pode-se afirmar que deve haver mais rigor, aquando da instalação de um coletor, no valor inclinação do que no da orientação, tentando, no entanto, aproximar sempre que possível estes valores aos valores óptimos.

### 2.3.1. Balanço energético de um coletor solar plano

O desempenho de um coletor solar pode ser descrito através de um balanço energético feito ao mesmo. A radiação solar instantânea ganha pelo coletor consiste na parcela da radiação incidente que passa através do vidro e é absorvida pela placa de absorção. Este valor depende da radiação instantânea global incidente  $\dot{I}_\beta$ , da área útil de abertura do coletor  $A_{col}$  e dos coeficientes de transmissibilidade do vidro  $\tau$  e absorção da placa  $\alpha$ .

$$\dot{Q}_{absorv} = A_{col} \cdot \tau \alpha \cdot \dot{I}_\beta \quad [W]$$

(Eq. 20)

Em rigor, a radiação directa e a radiação difusa deveriam ser tratadas cada uma em particular, uma vez que o coeficiente de transmissibilidade do vidro  $\tau$  depende do ângulo de incidência dos raios solares na superfície do colector. Na radiação directa esse ângulo é variável e definido de acordo com os parâmetros de geometria solar anteriormente vistos, enquanto na radiação difusa se considera um ângulo de incidência médio constante de  $60^\circ$ . Neste trabalho, não é conveniente fazer essa distinção, essencialmente por uma questão de melhor aproveitamento dos parâmetros fornecidos pelo fabricante do colector, considerando-se para a radiação incidente um valor global resultante da soma das diferentes componentes da mesma.

As perdas térmicas do colector para o meio ambiente por condução, convecção e radiação infra-vermelha podem ser associadas ao produto do coeficiente global de perdas  $K$  pela área útil de abertura do colector  $A_{col}$  vezes a diferença entre a temperatura média da placa de absorção  $T_{placa}$  e a temperatura ambiente  $T_{ext}$ .

$$\dot{Q}_{perdas} = A_{col} \cdot K \cdot (T_{placa} - T_{ext}) \quad [W] \quad (\text{Eq. 21})$$

Portanto, a potência calorífica útil transmitida ao fluido de trabalho que circula no interior dos tubos do colector corresponde à diferença entre a potência absorvida e a potência perdida para o ambiente.

$$\dot{Q}_{util} = \dot{Q}_{absorv} - \dot{Q}_{perdas} \quad [W] \quad (\text{Eq. 22})$$

E substituindo na equação 22,

$$\dot{Q}_{util} = A_{col} \cdot [\tau\alpha \cdot j_{\beta} - K \cdot (T_{placa} - T_{ext})] \quad [W] \quad (\text{Eq. 23})$$

### 2.3.2. Parâmetros de desempenho do colector

*Factor de eficiência do colector  $F'$*

A figura 9 representa o esquema do perfil da placa absorvedora de um colector solar plano associada aos tubos que transportam o fluido de trabalho. Na figura estão ainda

representadas algumas dimensões características fundamentais para a definição do factor de eficiência.

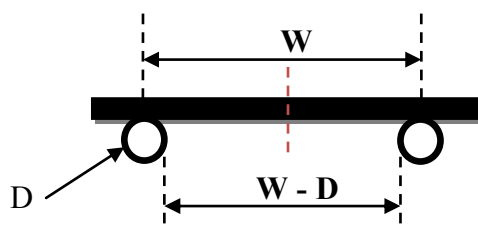


Figura 9 – Esquema do perfil da placa absorvedora de um coletor solar térmico plano.

Este factor está directamente relacionado com os parâmetros geométricos apresentados na figura anterior e com as características dos materiais.

$$F' = \frac{1/K}{W \left[ \frac{1}{K[D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_l} + \frac{1}{\pi D_i \alpha_i} \right]}$$

(Eq. 24)

Onde  $D_i$  representa o diâmetro interno do tubo e  $\alpha_i$  o coeficiente de transferência de calor entre o fluido e a parede do tubo. O parâmetro  $C_l$  corresponde ao coeficiente de transferência de calor por condução através da ligação entre o tubo e a placa, por unidade de comprimento, podendo ser escrito em função da condutibilidade térmica da ligação  $\lambda_l$ , da sua espessura média  $e$ , e da sua largura  $b$ .

$$C_l = \frac{\lambda_l b}{e}$$

(Eq. 25)

Na dedução deste factor, considerou-se que a região entre o tubo e a linha média que separa os dois tubos (figura 9), de comprimento  $(W - D)/2$ , pode ser considerada como um problema clássico de alhetas. Desta forma, o parâmetro  $F$  indica o rendimento padrão da alheta.

O factor de eficiência de um coletor pode ser interpretado fisicamente como a razão entre a energia útil real ganha no coletor (energia transferida para o fluido de trabalho) e a energia útil ganha se a temperatura da superfície absorvedora do coletor estivesse à temperatura do fluido local. Analisando esta razão de energias, o facto de se considerar a temperatura média da placa absorvedora igual à temperatura média do fluido leva a

que haja menos perdas de energia para o ambiente, mantendo-se o mesmo valor para energia absorvida pela placa, ou seja, a energia útil ganha neste caso seria maior (equação 22). Isto explica o facto de o factor de eficiência ser sempre inferior à unidade. Este factor, apesar de depender de variáveis que são função da temperatura, pode ser considerado constante, uma vez que a sua variação com a temperatura é muito pouco significativa. [7]

*Factor de remoção de calor do colector  $F_R$*

O factor de remoção de calor de um colector pode ser medido experimentalmente ou calculado analiticamente de forma simples com base na seguinte equação:

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_{col}K} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{A_{col}KF'}{\dot{m}C_p}\right) \right]$$

(Eq. 26)

De um ponto de vista prático, este factor relaciona a energia útil ganha no colector, que como já foi referido depende da temperatura média da placa absorvedora, com a energia útil que seria ganha se toda a superfície da placa estivesse à temperatura de entrada do fluido no colector. Pode ser interpretado como a razão entre essas duas energias, sendo que, tal como o factor de eficiência, é sempre menor que a unidade.

Para uma determinada radiação incidente, o valor máximo da energia útil ganha pelo colector ocorre quando os valores das perdas são os mínimos. Tendo em conta que se considera que as perdas seriam as mínimas se toda a superfície da placa absorvedora estivesse à temperatura de entrada do fluido  $T_{in}$ , o factor de remoção de calor é também considerado como sendo a razão entre a energia útil ganha e a energia útil máxima que poderia ser ganha. Esta relação permite chegar a uma equação de grande importância que permite calcular a energia (ou potência) útil ganha no colector sem recorrer à temperatura média da placa absorvedora  $T_{placa}$ . [7]

$$\dot{Q}_{util} = F_R \cdot \dot{Q}_{util\ máxima} \quad [W]$$

(Eq. 27)

Mas sabe-se que,

$$\dot{Q}_{\text{útil máxima}} = A_{\text{col}} \cdot [\tau\alpha \cdot \dot{I}_{\beta} - K \cdot (T_{\text{in}} - T_{\text{ext}})] \quad [W] \quad (\text{Eq. 28})$$

Substituindo,

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = F_R A_{\text{col}} \cdot [\tau\alpha \cdot \dot{I}_{\beta} - K \cdot (T_{\text{in}} - T_{\text{ext}})] \quad [W] \quad (\text{Eq. 29})$$

### 2.3.3. Rendimento do colector

O rendimento de um colector resulta precisamente do balanço energético feito ao colector e define-se como sendo a proporção de radiação incidente que é convertida em potência útil.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{\dot{Q}_{\text{incidente}}} \quad (\text{Eq. 30})$$

Substituindo,

$$\eta = \frac{A_{\text{col}} \cdot (\tau\alpha \cdot \dot{I}_{\beta} - K \cdot (T_{\text{placa}} - T_{\text{ext}}))}{A_{\text{col}} \cdot \dot{I}_{\beta}} = \tau\alpha - \frac{K \cdot (T_{\text{placa}} - T_{\text{ext}})}{\dot{I}_{\beta}} \quad (\text{Eq. 31})$$

O problema desta equação é que o valor da temperatura média do absorvedor  $T_{\text{placa}}$  é muito difícil de se calcular ou medir, uma vez que depende do design do colector, da radiação solar incidente e das condições do fluido à entrada do colector.

A equação 31 pode, no entanto, ser reformulada para que o rendimento instantâneo do colector não dependa da temperatura  $T_{\text{placa}}$  mas sim da temperatura de entrada do fluido no colector  $T_{\text{in}}$ . Para isso, basta utilizar no cálculo do rendimento a potência útil ganha pelo colector  $\dot{Q}_{\text{útil}}$  calculada com base no factor de remoção de calor  $F_R$  (equação 32).

$$\eta = F_R \tau \alpha - \frac{F_R K (T_{in} - T_{ext})}{\dot{I}_\beta}$$

(Eq. 32)

Existem vários modelos, uns mais detalhados do que outros, que permitem calcular o rendimento instantâneo de um colector partindo da equação 31. O grau de complexidade dos modelos aumenta com o número de parâmetros da equação referida que são considerados como variáveis. Assim, o modelo mais complexo considera a dependência angular (ângulo de incidência) do parâmetro  $\tau\alpha$  e a dependência da temperatura do coeficiente de perdas  $K$  e do parâmetro  $F_R$ .

Por exemplo, um dos métodos vulgarmente utilizados considera uma dependência linear da temperatura por parte do coeficiente global de perdas  $K$ . [7]

$$K = a + b(T_{in} - T_{ext})$$

(Eq. 33)

Os parâmetros  $a$  e  $b$  da equação são constantes para uma velocidade do vento particular. Este modelo teria parâmetros adicionais caso se considerasse a dependência da velocidade do vento. Tendo em conta este método, o rendimento instantâneo do colector pode ser escrito através da substituição da equação 33 na equação 32 do rendimento.

$$\eta = F_R \tau \alpha - \frac{F_R a (T_{in} - T_{ext})}{\dot{I}_\beta} - \frac{F_R b (T_{in} - T_{ext})^2}{\dot{I}_\beta}$$

(Eq. 34)

Assumindo o factor  $F_R$  como sendo constante e desprezando a dependência angular do parâmetro  $\tau\alpha$  (assumindo este o valor para um ângulo de incidência nulo), é comum os fabricantes dos colectores fornecerem os valores dos parâmetros constantes da equação do rendimento, para cada colector. Esses parâmetros ( $\eta_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$ ) vêm destacados na equação seguinte, obtida a partir da equação 34.

$$\eta = \eta_0 - \frac{a_1 (T_{in} - T_{ext})}{\dot{I}_\beta} - \frac{a_2 (T_{in} - T_{ext})^2}{\dot{I}_\beta}$$

(Eq. 35)

Onde,

$\eta_0 (F_R(\tau\alpha)_n)$  tem o nome de rendimento óptico;

$a_1 (F_R a)$  apresenta-se como coeficiente de perdas linear primário [ $\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ ];

$a_2 (F_R b)$  denomina-se coeficiente de perdas secundário [ $\text{W}/\text{m}^2/\text{K}^2$ ].

Note-se que estes factores ( $\eta_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$ ) são, neste caso, baseados no factor de remoção de calor  $F_R$ . Dependendo do fabricante, estes podem ser apresentados, por exemplo, em função do factor de eficiência  $F'$ , sendo que neste caso não seria a temperatura de entrada do fluido no colector  $T_{in}$  a figurar na equação 35, mas sim a temperatura média do fluido.

No caso de simulações térmicas de processos, os modelos mais simples para o cálculo do rendimento instantâneo do colector podem ser igualmente adequados. Uma vez que os valores maiores de radiação incidente se verificam para ângulos de incidência baixos, e os parâmetros  $F_R$  e  $K$  não variam muito para a gama de temperaturas de funcionamento do colector,  $F_R(\tau\alpha)_n$  e  $F_R K$  podem-se assumir como os dois parâmetros (constantes) necessários para calcular o rendimento de um colector. Existem valores destes parâmetros associados a cada tipo de colector que permitem calcular de forma expedita o seu rendimento para um dado instante, recorrendo à substituição desses valores directamente na equação 32 do rendimento.

Colector	Rendimento óptico $F_R(\tau\alpha)_n$	Coefficiente de perdas $F_R K$ [ $\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ ]
<b>Placa plana, sem vidro</b>	0,94	20 – 25
<b>Placa plana, vidro simples, não selectivo</b>	0,8	7 – 8
<b>Placa plana, vidro simples, selectivo</b>	0,8	4 – 5
<b>Placa plana, vidro duplo, selectivo</b>	0,72	3 – 4
<b>Tubo de vácuo, selectivo</b>	0,8	1 – 2

Tabela 1 – Valores médios dos parâmetros de eficiência (rendimento óptico e coeficiente de perdas) para diferentes tipos de colectores.

## 2.4. Sistemas solares térmicos

Existem vários tipos de sistemas solares térmicos, sendo estes escolhidos de acordo com a com os objectivos e as restrições das aplicações a que se destinam. De entre as principais especificações que definem um tipo de sistema, podem-se destacar as seguintes:

*Princípio de circulação do fluido* – De acordo com esta especificação os sistemas pode ser do tipo termossifão ou circulação forçada. No primeiro, a circulação do fluido que passa no interior do colector ocorre naturalmente, enquanto no segundo são necessárias bombas para promover a circulação do fluido em causa.

*Transferência de calor entre o colector e o depósito* – A energia útil ganha no colector pode ser transferida para o depósito de acumulação recorrendo a sistemas com circuito directo ou com circuito indirecto. No primeiro, a água da rede é aquecida directamente no colector, ou seja, o fluido de trabalho que circula no colector é a própria água de consumo. No segundo sistema, existe um circuito primário, onde circula um determinado fluido de trabalho, normalmente anti-congelante, que passa no interior do colector onde recebe a energia que depois transfere para o circuito secundário, onde circula a água da rede, através de um permutador.

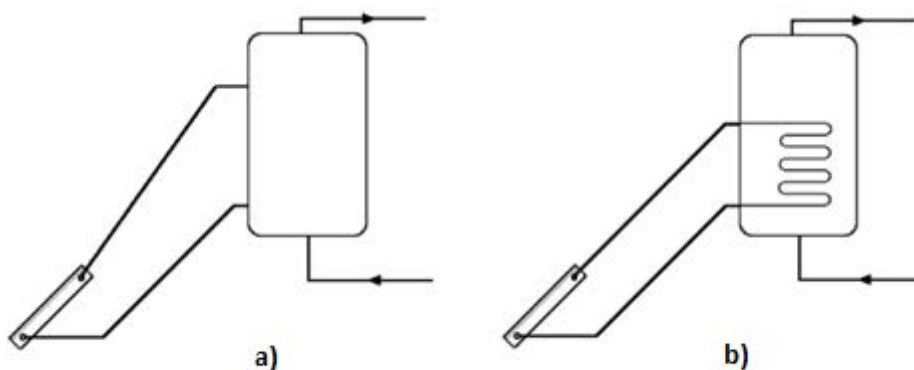


Figura 10 - a) Esquema de um sistema termossifão, com circuito directo; b) Esquema de um sistema termossifão, com circuito indirecto e permutador interno do tipo serpentina.

Na escolha de um sistema solar térmico deve-se ter especial atenção a alguns factores que, além de diminuírem a eficiência da instalação, podem torná-la inutilizável. Por exemplo, não são aconselhadas instalações de aquecimento directo em locais com águas

duras, pois favorecem a deposição de calcário que chega a obstruir as tubagens do colector. Este tipo de instalação também não é adequado em locais onde existe risco de congelamento durante a noite. Nestes casos deve-se optar por um sistema de aquecimento indirecto, ou seja, em que existe um circuito primário independente, com fluido anticongelante, que transfere calor para o circuito secundário através de um permutador. No caso de se optar por uma instalação de aquecimento directo, pode-se contornar estes problemas através de um tratamento prévio da água que circula nos colectores ou, no caso de risco de congelação, conceber o sistema para que esvazie durante os períodos em que há esse risco, que é o caso de alguns países em que é proibida a utilização de anti-congelante devido ao risco de contaminação da água de consumo.

### **2.4.1. Sistema de circulação forçada**

O que caracteriza o sistema de circulação forçada é a existência de uma bomba que assegura a circulação do fluido de trabalho. Esta circulação só faz sentido se houver ganhos de energia no colector, ou seja, se o fluido aumentar a sua temperatura ao passar pelo mesmo. Assim, a bomba é comandada para promover a circulação do fluido em função da diferença de temperaturas entre o fluido à saída do colector e a água na parte mais baixa do depósito de acumulação. Para prevenir a circulação inversa, no caso da temperatura do fluido no colector ser inferior à temperatura no depósito, devem ser instaladas válvulas de anti-retorno. [9]

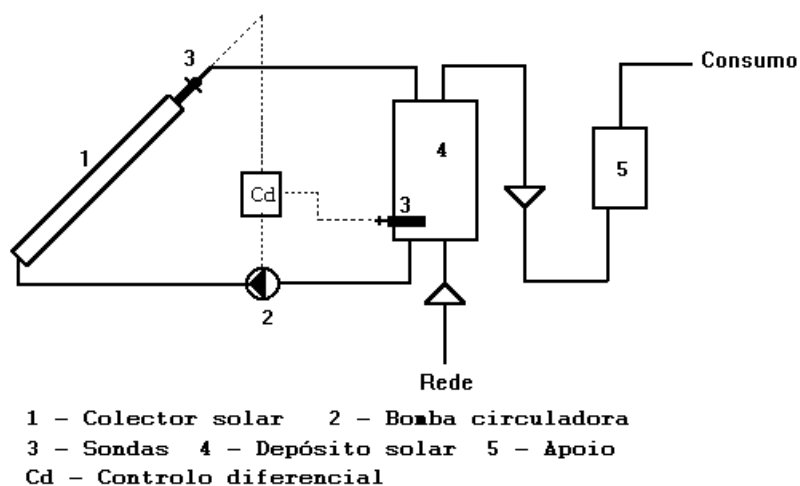


Figura 11 – Esquema de um sistema em circulação forçada directa.

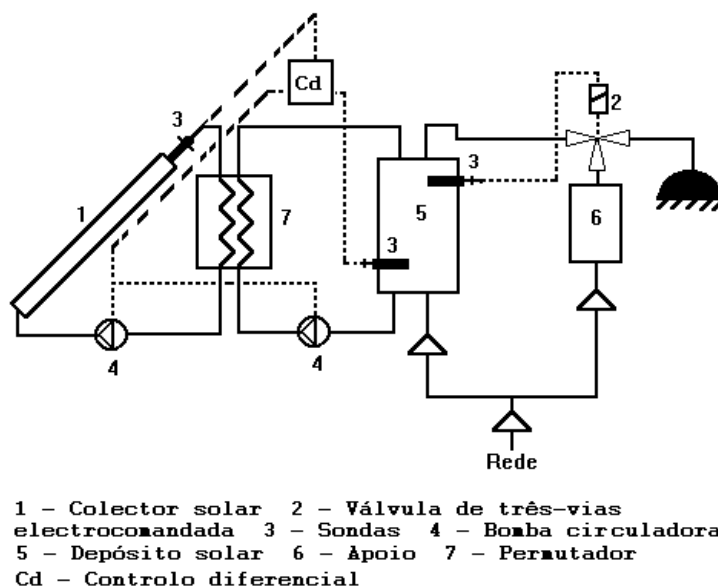


Figura 12 - Esquema de um sistema em circulação forçada, com circuito indirecto e permutador externo.

## 2.4.2. Sistema termossifão

Este tipo de sistema é constituído por um ou mais colectores ligados a um depósito bem isolado posicionado a um nível superior aos colectores.

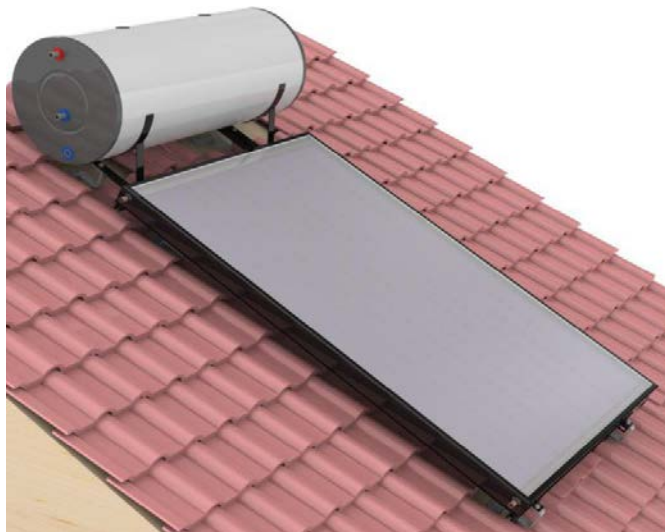


Figura 13 - Imagem de um sistema solar do tipo termossifão instalado.

Ao contrário da circulação forçada, este sistema não necessita de bombas que promovam circulação do fluido entre o colector e o depósito de acumulação. A circulação do fluido faz-se por convecção natural devido a diferença de densidade entre a água quente e a fria. Assim, o funcionamento deste sistema baseia-se no seguinte princípio: no colector é transferida energia para o fluido de trabalho, que aumenta a sua temperatura; esse aumento provoca a diminuição da sua densidade, fazendo com que este suba para a parte superior do circuito, entrando no depósito de acumulação (pela parte superior); no interior do depósito (permutador), o fluido perde energia para a água acumulada ficando mais frio e aumentando a sua densidade, deslocando-se para a parte de baixo do depósito (entrada do colector); no caso de se tratar de circulação directa, o princípio mantém-se, sendo que a água quente oriunda do colector entra para o depósito pela parte superior, ocorrendo no interior deste a movimentação da água mais fria (mais densa) para a parte inferior (entrada do colector); no colector o ciclo recomeça.

O caudal de circulação aumenta com o aumento da energia ganha no colector, existindo apenas circulação caso haja realmente ganhos de energia, ou seja, a

diferença entre a energia absorvida no colector proveniente da radiação solar e a energia perdida por este para o ambiente seja positiva.

A água da rede (mais fria) entra pela parte inferior do depósito, sendo da parte superior retirada a água para consumo, uma vez que a água mais quente, devido à menor densidade, se situa nesta parte do acumulador.

A necessidade de colocar necessariamente o depósito num nível superior em relação aos colectores pode ser um inconveniente para a utilização deste tipo de sistema, uma vez que em muitos casos existem restrições que condicionam, sobretudo, o peso do sistema a instalar. [9]

### 3. Modelação térmica dinâmica

Considere-se o sistema solar térmico da figura 14, que representa um sistema de termossifão, com circuito indirecto, para aquecimento de águas, e que servirá de base para a elaboração de um modelo para o cálculo dinâmico da temperatura da água armazenada num sistema deste tipo.

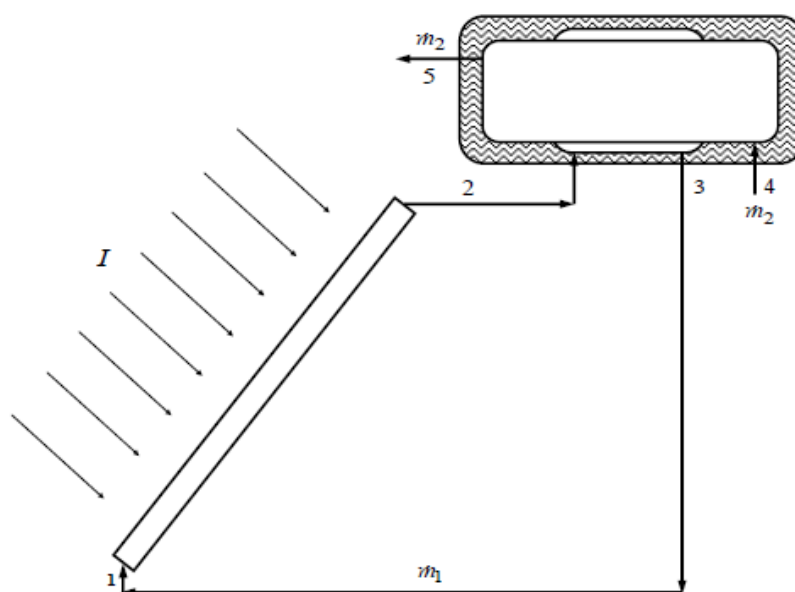


Figura 14 - Esquema do sistema solar térmico do tipo termossifão.

O cálculo instantâneo da temperatura no interior do acumulador resulta de um balanço energético feito ao próprio depósito. Esse balanço pode ser representado pela seguinte equação:

$$mC_p \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{colector} - \dot{Q}_{consumo} - \dot{Q}_{perdas} + \dot{Q}_{apoio}$$

(Eq. 36)

Onde,

- $m$  é a massa de água que o acumulador contém [kg];
- $C_p$  é o calor específico médio [J/(kg.K)];

- $\frac{dT}{dt}$  representa a variação da temperatura num intervalo de tempo infinitesimal [K/s];
- $\dot{Q}_{colector}$  é a potência calorífica ganha pela água como resultado dos ganhos no colector [W];
- $\dot{Q}_{consumo}$  corresponde à potência perdida devido ao consumo de água quente [W];
- $\dot{Q}_{perdas}$  representa a potência perdida no depósito por transferência de calor para o ambiente [W];
- $\dot{Q}_{apoio}$  é a potência transmitida pela resistência de apoio para a água de acumulação [W].

Nos subcapítulos seguintes apresentam-se os desenvolvimentos de cada parâmetro da equação 36.

### 3.1. Colector solar

A potência calorífica resultante dos ganhos solares no colector pode ser calculada fazendo um balanço energético ao próprio colector. Contudo, existem formas de calcular essa potência sem entrar em pormenores que exigiriam uma análise mais exaustiva ao colector e às trocas de energia no seu interior.

#### 3.1.1. Rendimento do colector solar

Recordando o ponto 2.3.3, pode-se definir o rendimento instantâneo de um colector solar através da seguinte equação:

$$\eta = F_R \tau \alpha - \frac{F_R K (T_{in} - T_{ext})}{\dot{I}_{global, \beta}}$$

(Eq. 37)

Como simplificação, e considerando a existência de uma mistura perfeita da água no depósito de acumulação, assumiu-se que a temperatura de entrada do fluido no colector  $T_{in}$  é igual à temperatura da água no acumulador  $T_{ac}$ . De acordo com os pontos assinalados na figura 14, o rendimento do colector pode ser escrito:

$$\eta = F_R \tau \alpha - \frac{F_R K (T_3 - T_{ext})}{\dot{I}_{global, \beta}} \quad (\text{Eq. 38})$$

Considerando o modelo mais simples para cálculo do rendimento instantâneo de um colector, descrito no ponto 2.3.3, pode-se escrever:

$$\eta = F_R (\tau \alpha)_n - \frac{F_R K (T_3 - T_{ext})}{\dot{I}_{global, \beta}} \quad (\text{Eq. 39})$$

Onde as constantes  $F_R (\tau \alpha)_n$  e  $F_R K$  representam, respectivamente, o rendimento óptico e o coeficiente de perdas do colector.

Para a elaboração deste modelo considerou-se um colector plano, com vidro simples e placa selectiva. Recorrendo à tabela 1, usaram-se os seguintes valores para os parâmetros de eficiência do colector:

- $F_R (\tau \alpha)_n = 0,8$
- $F_R K = 4,5$

### 3.1.2. Geometria solar

No ponto 2.1, foi definido o método de cálculo dos parâmetros de geometria solar, que permitem definir, em cada instante, a posição exacta do Sol em relação a um qualquer objecto situado na superfície de Terra. É através da definição destas coordenadas que, conhecendo a orientação e inclinação de um colector, se consegue determinar para cada instante o ângulo de incidência  $i$  entre os raios solares e a superfície do colector.

Assim, para cada instante de tempo considerado na simulação dinâmica (de dez em dez minutos) foi necessário efectuar o cálculo de cada coordenada de geometria solar.

- Declinação –  $\delta$  [°]
- Ângulo horário –  $ah$  [°]
- Altura solar –  $h$  [°]
- Azimute -  $a$  [°]

Todo o método de cálculo destas coordenadas está pormenorizado no capítulo 2.1, correspondente a este tema, bem como o cálculo de outros parâmetros fundamentais relacionados. Os valores dos parâmetros fixos, latitude e longitude, necessários para o cálculo destas coordenadas são os referentes à região do Porto (41° Norte de latitude e 8,6° Oeste de longitude).

A ferramenta utilizada para todo o processo de simulação foi a folha de cálculo do *Microsoft Excel*.

### **3.1.3. Cálculo da radiação global incidente na superfície (inclinada) do colector**

Os dados climáticos utilizados nesta simulação, foram obtidos através base de dados do software *SOLTERM*, para o município do Porto. Desta forma foi possível ter acesso aos valores das radiações directa, difusa e global medidos numa superfície horizontal ao longo de um ano característico e apresentados com a periodicidade de uma hora.

Uma vez que se pretende com este modelo o cálculo da temperatura de acumulação em intervalos de dez minutos, foi necessário efectuar interpolações para cada intervalo de uma hora com o objectivo de obter os dados climáticos para cada instante de tempo considerado.

No capítulo 2.2, referente à radiação solar, é apresentado o todo processo de cálculo da radiação global incidente na superfície do colector de uma forma mais detalhada.

Resumindo, a partir dos valores da radiação retirados do ficheiro climático ( $\dot{I}_{dir,H}$ ,  $\dot{I}_{dif,H}$ ,  $\dot{I}_{global,H}$ ), calcularam-se os seguintes parâmetros:

- Radiação directa na superfície inclinada  $\dot{I}_{dir,\beta}$

$$\dot{I}_{dir,\beta} = \dot{I}_{dir,H} \cdot \frac{\cos i}{\sin h} \quad [W/m^2] \quad (\text{Eq. 40})$$

Sabendo que,

$$\cos i = \sin h \cdot \cos \beta + \cos h \cdot \sin \beta \cdot \cos a \quad (\text{Eq. 41})$$

No cálculo deste parâmetro foram efectuadas algumas considerações importantes do ponto de vista matemático e geométrico. Assim, na folha de cálculo introduziram-se as seguintes condições: sempre que o valor absoluto da altura solar  $h$  for inferior a 3, esta é corrigida para -3. Isto deve-se ao facto de, como se pode observar na equação 40, para valores muito pequenos de  $h$ , o valor de  $\dot{I}_{dir,\beta}$  pode disparar para valores muito elevados que não correspondem à realidade; sempre que o valor do azimute  $a$  for superior a  $90^\circ$ , o valor de  $\dot{I}_{dir,\beta}$  corresponde a zero. Uma vez que o colector está orientado a sul (azimute igual a zero) esta condição é óbvia do ponto de vista geométrico; finalmente, sempre que o valor de  $\dot{I}_{dir,\beta}$  for negativo, o que não faz sentido matematicamente, este é corrigido para zero.

- Radiação difusa na superfície inclinada  $\dot{I}_{dif,\beta}$

$$\dot{I}_{dif,\beta} = \dot{I}_{dif,H} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad [W/m^2] \quad (\text{Eq. 42})$$

- Radiação reflectida na superfície inclinada  $\dot{I}_{ref,\beta}$

$$\dot{I}_{ref,\beta} = \rho \cdot \dot{I}_{global,H} \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad [W/m^2] \quad (\text{Eq. 43})$$

Em que se assumiu 0,25 (valor típico) como coeficiente de reflexão da envolvente  $\rho$ .

A inclinação  $\beta$  do colector usada neste modelo é de  $40^\circ$  (aproximadamente igual à latitude do local).

A radiação global incidente na superfície inclinada do colector  $\dot{I}_{global,\beta}$  corresponde à soma das três parcelas anteriores.

$$\dot{I}_{global,\beta} = \dot{I}_{dir,\beta} + \dot{I}_{dif,\beta} + \dot{I}_{ref,\beta} \quad [W/m^2]$$

(Eq. 44)

### 3.1.4. Cálculo dos ganhos (potência) resultantes da energia captada no colector

A potência calorífica transmitida ao fluido que circula no colector em cada instante considerado será:

$$\dot{Q}_{\acute{u}til} = \eta \cdot \dot{I}_{global,\beta} \cdot A_{col} \quad [W]$$

(Eq. 45)

Contudo, uma vez que a eficiência do permutador de calor existente no termosifão não é 100%, a temperatura do fluido à entrada do colector não será na realidade a temperatura de acumulação  $T_{ac}$  como considerado, mas sim uma temperatura superior, levando a que o rendimento real do colector  $\eta$  seja menor e conseqüentemente  $\dot{Q}_{\acute{u}til}$  real seja também menor. Além disso, para calcular a potência calorífica transmitida à água do acumulador resultante dos ganhos solares, seria necessário fazer um balanço energético ao próprio permutador (neste caso do tipo dupla envolvente), que também introduz perdas para o ambiente. Esta análise revelar-se-ia complexa uma vez que seria necessário conhecer o caudal de fluido que circula no colector em cada instante.

Para simplificar este processo optou-se por considerar que a potência calorífica oriunda do fluido de aquecimento que passa na camisa de permuta (potência efectivamente transferida para a água do acumulador) será 90% do valor da  $\dot{Q}_{\acute{u}til}$  anteriormente definido.

$$\dot{Q}_{colector} = 0,9 \cdot \dot{Q}_{útil} = 0,9 \cdot \eta \cdot \dot{I}_{global, \beta} \cdot A_{col} \quad [W] \quad (\text{Eq. 46})$$

Nesta equação o valor da área útil de abertura do colector é o único parâmetro fixo, sendo o seu valor igual a 4,52 m<sup>2</sup>. Este valor resulta da soma das áreas de dois colectores cujas dimensões correspondem às do colector de modelo LightSun (FKB) da Vulcano (dados técnicos em anexo). No entanto os parâmetros de eficiência, definidos no ponto 3.1.1, utilizados neste modelo não correspondem a este colector em particular, mas a um colector genérico deste tipo.

## 3.2. Consumo

O caudal de água quente consumido durante o período de banhos introduz perdas de energia consideráveis.

Para o cálculo destas perdas é importante definir alguns parâmetros relativos aos padrões de consumo.

- Assume-se um consumo diário médio de 40 litros/pessoa e considerando uma família de 4 pessoas tem-se um consumo diário total de 160 litros.
- Considera-se a duração dos banhos como sendo 10 minutos para cada pessoa, resultando num caudal de 4 litros/minuto.
- A temperatura da água da rede considera-se constante para todo o ano, sendo o seu valor igual a 15°C.

### 3.2.1. Caudal de água quente consumido

O caudal total de consumo já foi definido anteriormente como sendo 4 l/min. Considerando a massa volúmica da água como sendo aproximadamente igual a 1000 kg/m<sup>3</sup>, tem-se um caudal mássico de consumo de 0,067 kg/s.

Este caudal não equivale, contudo, ao caudal de água quente consumido, devido à existência de uma válvula termo-reguladora que faz uma mistura entra a água quente

que sai do acumulador, de caudal  $\dot{m}_2$ , e a água da rede, com o objectivo de manter a água para a utilização a 45°C (ver figura 15).

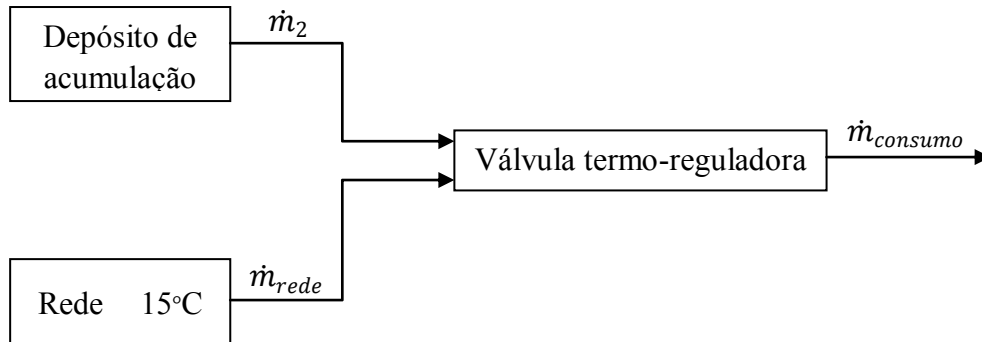


Figura 15 – Esquema do funcionamento da válvula termo-reguladora.

O caudal de água quente que sai do acumulador  $\dot{m}_2$  pode ser dado em função do caudal de consumo (conhecido)  $\dot{m}_{consumo}$  e da temperatura da água no depósito de acumulação  $T_5$ .

Considerando o calor específico da água  $C_p$  como sendo fixo para esta gama de temperaturas, tem-se:

$$\dot{m}_2 T_5 + \dot{m}_{rede} T_{rede} = \dot{m}_{consumo} T_{consumo} \quad (\text{Eq. 47})$$

E,

$$\dot{m}_{consumo} = \dot{m}_2 + \dot{m}_{rede} \quad (\text{Eq. 48})$$

Substituindo a equação 48 na equação 47,

$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{m}_{consumo} (T_{consumo} - T_{rede})}{(T_5 - T_{rede})} \quad [\text{kg/s}] \quad (\text{Eq. 49})$$

Com,

$$T_{consumo} = 45^{\circ}\text{C}$$

$$T_{rede} = 15^{\circ}\text{C}$$

### 3.2.2. Cálculo da potência perdida devido ao consumo de água quente

A potência calorífica perdida devido ao consumo de água quente será dada pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_{consumo} = \dot{m}_{\text{água quente}} C_p (T_{ac} - T_{rede}) \quad [W] \quad (\text{Eq. 50})$$

Uma vez que se considera uma mistura perfeita no depósito de acumulação, e utilizando os pontos assinalados na figura 14,

$$\dot{Q}_{consumo} = \dot{m}_2 C_p (T_5 - T_4) \quad [W] \quad (\text{Eq. 51})$$

## 3.3. Depósito de acumulação

Para o desenvolvimento deste modelo foi escolhido como referência um termossifão da vulcano com 300 litros de capacidade, cujas características e dados técnicos se encontram em anexo.

### 3.3.1. Cálculo (aproximado) do coeficiente de perdas de energias para o exterior

A metodologia utilizada para o cálculo deste coeficiente consistiu em considerar o depósito como sendo aproximadamente de formato cilíndrico. Assim, consideraram-se duas resistências à transferência de calor: a resistência da parte cilíndrica (superfície curva) e a das laterais ou topo (superfície plana).

Dados do acumulador (parte cilíndrica):

Comprimento (L) = 1,85 m

Área interior cilíndrica = 2,56 m<sup>2</sup>

Área exterior cilíndrica = 3,37 m<sup>2</sup>

	Raio interior [m]	Raio exterior [m]	Espessura [m]	Condutibilidade térmica [W/(m.K)]
<b>Revestimento interior (Aço)</b>	0,22	0,23	0,01	50
<b>Isolante (poliuretano)</b>	0,23	0,28	0,05	0,037
<b>Revestimento exterior (Aço)</b>	0,28	0,29	0,01	50

Tabela 2 – Características e dimensões do acumulador do sistema termossifão (superfície curva).

Dados do acumulador (laterais):

Área das laterais (total) = 0,30 m<sup>2</sup>

	Espessura [m]	Condutibilidade térmica [W/(m.K)]
<b>Revestimento interior (Aço)</b>	0,01	50
<b>Isolante (poliuretano)</b>	0,05	0,037
<b>Revestimento exterior (Aço)</b>	0,01	50

Tabela 3 – Características e dimensões do acumulador do sistema termossifão (superfície plana).

Cálculo das resistências à transferência de calor:

Resistência da parte cilíndrica:

$$R_{cil} = \frac{1}{A_i \alpha_i} + \frac{\ln(R_e/R_i)}{2\pi L \lambda_{aço_i}} + \frac{\ln(R_e/R_i)}{2\pi L \lambda_{poliuretano}} + \frac{\ln(R_e/R_i)}{2\pi L \lambda_{aço_e}} + \frac{1}{A_e \alpha_e}$$

$$= 0,48 [K/W]$$

(Eq. 52)

Resistência das laterais:

$$R_{lat} = \frac{1}{A_{lat}} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_i} + \frac{e}{\lambda_{aço_i}} + \frac{e}{\lambda_{poliuretano}} + \frac{e}{\lambda_{aço_e}} + \frac{1}{\alpha_e} \right) = 4,64 \text{ [K/W]}$$

(Eq. 53)

Os coeficientes de convecção interior e exterior ( $\alpha_i$  e  $\alpha_e$ ) não foram calculados. Considerou-se que estes assumem valores típicos, respectivamente, 100 e 20 [w/(m<sup>2</sup>K)], sendo este último um coeficiente global de transferência de calor, uma vez que engloba também a componente de radiação.

A resistência total à transferência de calor (ou equivalente) resulta da associação em paralelo das duas resistências anteriormente calculadas.

Assim, tem-se,

$$R_{equivalente} = \left[ \frac{1}{R_{cil}} + \frac{1}{R_{lat}} \right]^{-1} = 0,43 \text{ [K/W]}$$

(Eq. 54)

E o coeficiente de perdas para o exterior será,

$$UA = \frac{1}{R_{equivalente}} = 2,32 \text{ [W/K]}$$

(Eq. 55)

### 3.3.2. Cálculo da potência calorífica perdida pela envolvente do depósito do termossifão

Considerando os parâmetros anteriormente calculados, a potência perdida por transferência de calor através da envolvente do depósito de acumulação será,

$$\dot{Q}_{perdas} = UA(T_{ac} - T_{ext}) \quad [W]$$

(Eq. 56)

### 3.4. Balanço energético do depósito de acumulação

Tendo-se já calculado cada parcela da equação do balanço energético ao depósito de acumulação (termossifão), e uma vez que foram considerados intervalos de 10 minutos para a simulação dinâmica da temperatura de acumulação, tem-se:

$$\begin{aligned} \rho_{ac} V_{ac} C_p \cdot \frac{T_{ac\ final} - T_{ac}}{600} \\ = 0,9 \cdot \eta \cdot i_{global,\beta} \cdot A_{col} - \dot{m}_{\acute{a}gua\ quente} C_p (T_{ac} - T_{rede}) \\ - UA(T_{ac} - T_{ext}) + \dot{Q}_{apoio} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 57})$$

A metodologia utilizada para obter a evolução da temperatura da água do depósito ao longo do tempo consiste em calcular, para cada intervalo de tempo de dez minutos considerado, a temperatura da água no final desse intervalo, que corresponderá à temperatura no início do intervalo seguinte. Para tal definiu-se uma temperatura no início do processo correspondente à temperatura de acumulação definida pela resistência de apoio. Partindo da equação 57, chega-se à expressão que permite calcular a temperatura final da água em cada intervalo de tempo  $T_{ac\ final}$ , sabendo a temperatura inicial nesse mesmo intervalo  $T_{ac}$ .

$$\begin{aligned} T_{ac\ final} \\ = \frac{\left[ 0,9 \cdot \eta \cdot i_{global,\beta} \cdot A_{colector} - \dot{m}_{\acute{a}gua\ quente} \cdot C_p \cdot (T_{ac} - T_{rede}) - UA \cdot (T_{ac} - T_{ext}) + \dot{Q}_{apoio} \right] \cdot 600}{\rho_{ac} \cdot V_{ac} \cdot C_p} \\ + T_{ac} \quad [^{\circ}\text{C}] \end{aligned} \quad (\text{Eq. 58})$$

### 3.5. Depósito complementar

A figura 16 representa um sistema solar termossifão ligado a um depósito complementar, no qual está localizado o sistema de apoio eléctrico.

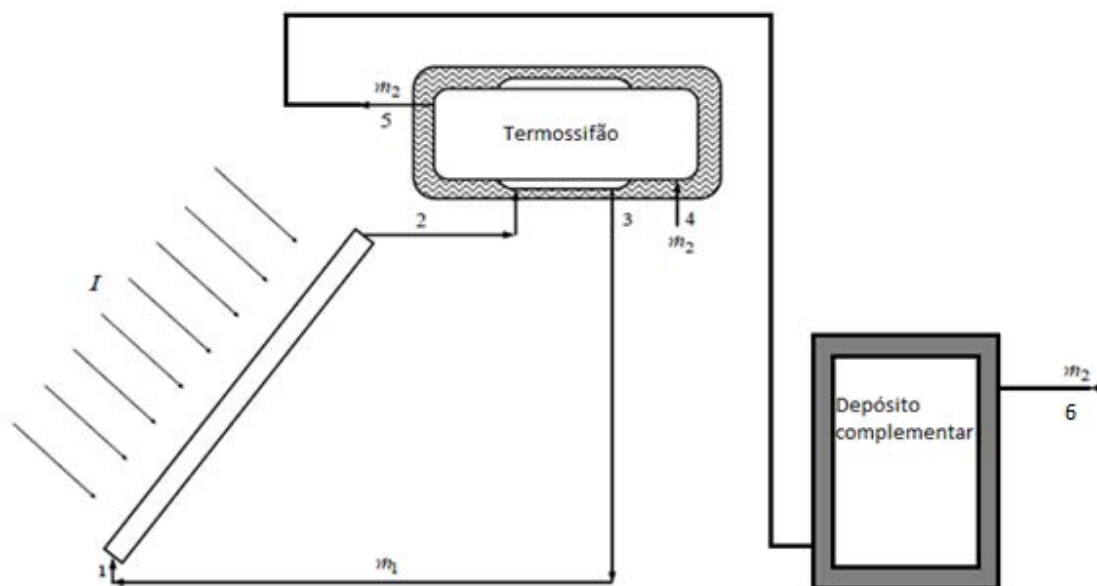


Figura 16 - Esquema do sistema solar térmico do tipo termossifão com apoio eléctrico localizado num depósito complementar.

Foram efectuadas simulações para 2 volumes distintos do termoacumulador, com o objectivo de aferir qual o impacto do volume de acumulação no depósito complementar nos resultados.

Para tal, consideraram-se como referência os termoacumuladores FAGOR CB-150N (150 litros) e FAGOR M-300SS (300 litros). As suas características técnicas encontram-se em anexo.

Para calcular a temperatura da água no termoacumulador em cada instante, é necessário efectuar um balanço energético a este depósito. Assim, pode-se estabelecer a seguinte equação:

$$mC_p \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{consumo} - \dot{Q}_{perdas} + \dot{Q}_{apoio}$$

(Eq. 59)

Em que,

- $m$  é a massa de água que o depósito complementar contém [kg];
- $C_p$  é o calor específico médio [J/(kg.K)];

- $\frac{dT}{dt}$  representa a variação da temperatura num intervalo de tempo infinitesimal [K/s];
- $\dot{Q}_{consumo}$  corresponde à potência ganha (ou perdida se tiver valor negativo) devido ao consumo de água quente [W];
- $\dot{Q}_{perdas}$  representa a potência perdida neste depósito por transferência de calor para a envolvente exterior [W];
- $\dot{Q}_{apoio}$  é a potência transmitida pela resistência de apoio para a água de acumulação [W].

Nos pontos seguintes apresentam-se os desenvolvimentos para cada parâmetro da equação 59.

### 3.5.1. Consumo

$\dot{Q}_{consumo}$  representa a potência dos ganhos devidos ao consumo. Dependendo da temperatura da água que vem do depósito do termossifão  $T_5$  quando comparada com a temperatura de armazenamento em cada instante no depósito complementar  $T_6$  (ou  $T_{dc}$ ) esta parcela pode ser positiva, sendo efectivamente um ganho, ou negativa, consistindo numa perda de potência. Assim, a potência ganha devido ao consumo vem,

$$\dot{Q}_{consumo} = \dot{m}_{\text{água quente}} C_p (T_{ac} - T_{dc}) \quad (\text{Eq. 60})$$

E, tendo em conta os pontos definidos na figura 16,

$$\dot{Q}_{consumo} = \dot{m}_2 C_p (T_5 - T_6) \quad (\text{Eq. 61})$$

$T_{ac}$  (ou  $T_5$ ) representa a temperatura da água no termossifão em cada instante. Esta temperatura é obtida através do balanço energético realizado no capítulo 3.4 ao termossifão, mas sem considerar a potência recebida pela resistência de apoio, uma vez que neste caso essa resistência se encontra no depósito complementar, e considerando o caudal de consumo  $\dot{m}_2$  como sendo o caudal de consumo de água quente resultante desta análise ao termoacumulador complementar.

Tal como no caso em que o apoio de localiza no termossifão, o caudal de água quente utilizado para consumo  $\dot{m}_2$  não corresponde efectivamente ao caudal de consumo, devido à existência de uma válvula termo-reguladora que faz a mistura entre a água quente que sai do termoacumulador e a água fria da rede. O caudal  $\dot{m}_2$  é, portanto, obtido a partir do caudal de consumo e da temperatura da água no depósito complementar através da relação calculada no capítulo 3.2.1,

$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{m}_{consumo} \cdot (T_{consumo} - T_{rede})}{(T_6 - T_{rede})} \quad [kg/s] \quad (\text{Eq. 62})$$

Com,

$$\begin{aligned} T_{consumo} &= 45^\circ\text{C} \\ T_{rede} &= 15^\circ\text{C} \end{aligned}$$

### 3.5.2. Perdas pela envolvente

A potência calorífica perdida para o exterior pelo termoacumulador pode ser calculada recorrendo à seguinte equação:

$$\dot{Q}_{perdas} = UA \cdot (T_{dc} - T_{envolvente}) \quad [W] \quad (\text{Eq. 63})$$

Que, com base na figura 16, pode ser escrita,

$$\dot{Q}_{perdas} = UA \cdot (T_6 - T_{envolvente}) \quad [W] \quad (\text{Eq. 64})$$

A temperatura envolvente ao depósito complementar  $T_{envolvente}$  foi considerada, para o cálculo dinâmico, como sendo constante e de valor igual a  $15^\circ\text{C}$  para todo o ano.

O coeficiente de perdas  $UA$  pode ser calculado a partir dos dados técnicos de cada termoacumulador considerado neste estudo. Ou seja, conhecendo o valor das perdas estáticas do termoacumulador a  $65^\circ\text{C}$ , e admitindo que este valor foi medido para uma

temperatura envolvente ao depósito de 15°C, foi possível obter um valor aproximado para o coeficiente  $UA$  de cada depósito.

Os termoacumuladores FAGOR CB-150N (150 litros) e FAGOR M-300SS (300 litros) apresentam valores de perdas estáticas a 65 °C (ver anexo) correspondentes a 1.51 e 2.60 [kWh/24 horas], que resultam em 62.92 e 108.33 Watts respectivamente.

Tendo em conta estes dados, tem-se que,

$$UA = \frac{\dot{Q}_{perdas\ estáticas\ a\ 65^{\circ}C}}{(65 - 15)} \quad (\text{Eq. 65})$$

Assim, obtiveram-se coeficientes de perdas  $UA$  (considerados constantes) de 1,26 e 2,17 [W/K] para os termoacumuladores de menor e maior volume respectivamente.

### 3.5.3. Balanço energético ao depósito complementar

Finalmente, tendo-se já calculado cada parcela da equação do balanço energético ao depósito complementar (termoacumulador), e uma vez que foram considerados intervalos de 10 minutos para a simulação dinâmica da temperatura de acumulação, tem-se:

$$\begin{aligned} \rho_{dc} V_{dc} C_p \cdot \frac{T_{dc\ final} - T_{dc}}{600} \\ = \dot{m}_{\text{água quente}} C_p (T_{ac} - T_{dc}) - UA(T_{dc} - T_{envolvente}) + \dot{Q}_{\text{apoio}} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 66})$$

Considerando constante e igual a 15°C a temperatura envolvente do termoacumulador para todo o ano e utilizando com referência os pontos assinalados na figura 16,

$$\rho_{dc} V_{dc} C_p \cdot \frac{T_{6\ final} - T_6}{600} = \dot{m}_2 C_p (T_5 - T_6) - UA(T_6 - 15) + \dot{Q}_{\text{apoio}} \quad (\text{Eq. 67})$$

Partindo da equação 67, chega-se à expressão que permite calcular a temperatura final da água em cada intervalo de tempo  $T_{dc\ final}$  (temperatura inicial do intervalo seguinte), sabendo a temperatura inicial nesse mesmo intervalo  $T_{dc}$ .

$$T_{dc\ final} = \frac{\left[ \dot{m}_{\text{água quente}} C_p (T_{ac} - T_{dc}) - UA(T_{dc} - 15) + \dot{Q}_{\text{apoio}} \right] \cdot 600}{\rho_{ac} V_{ac} C_p} + T_{dc} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

(Eq. 68)



## 4. Quadro de estudos e resultados

Sendo um dos objectivos deste estudo avaliar o impacto dos padrões temporais de uso de água quente na eficiência do sistema, estabeleceram-se três tipos de perfis de consumo. Associou-se também, o consumo de água quente exclusivamente à realização de banhos, estando as características deste consumo definidas no ponto 3.2.

Na seguinte tabela pode-se observar os três padrões de consumo de água quente escolhidos associados à realização de banhos.

<b>Perfis de realização de banhos</b>	<b>Horário dos banhos</b>
<b>1 - Noite</b>	22:00h
	22:10h
	22:20h
	22:30h
<b>2 - Manhã</b>	8:00h
	8:10h
	8:20h
	8:30h
<b>3 - Repartidos</b>	8:00h
	8:10h
	22:00h
	22:10h

Tabela 4 – Diferentes perfis de consumo de água quente analisados.

Outro objecto de estudo deste trabalho consistiu em estudar o impacto da localização do sistema de apoio ao sistema solar. Isto levou à realização de simulações de essencialmente dois tipos:

1. Localização do sistema de apoio (resistência eléctrica) no próprio depósito do termossifão;
2. Existência de um depósito complementar com o sistema de apoio no seu interior. Para esta segunda hipótese foram ainda testadas duas variantes: termoacumulador de 150 e 300 litros.

Considerou-se igualmente pertinente avaliar o impacto da existência, ou não, de temporização do sistema de apoio. Neste sentido, foi alvo de estudo os seguintes cenários de hipóteses:

1. Ausência de temporização da resistência de apoio;
2. Temporização nocturna A – sistema de apoio a funcionar entre as 18:30h e as 8:30h;
3. Temporização nocturna B – sistema de apoio a funcionar entre as 17:00h e as 20:00h.

Para cada uma das hipóteses relativas ao tipo de temporização, considerou-se ainda duas variantes relativas aos valores da TAR (temperatura de acumulação definida pela resistência de apoio). Assim tem-se:

1. Existência de um único valor da TAR para todo o ano - anual;
2. Valores da TAR definidos mensalmente consoante as necessidades de cada mês - mensal.

Para todos os cenários de estudo definidos anteriormente consideraram-se as seguintes condições:

1. Potência da resistência de apoio constante e igual a 3 kW, para todas as hipóteses em estudo;
2. Existência de uma histerese de 4°C no funcionamento do apoio eléctrico em relação à temperatura de acumulação definida, ou seja, a resistência liga quando a temperatura tiver descido 2°C abaixo da temperatura de *set-point*, e desliga ultrapassados 2°C dessa temperatura de *set-point*.
3. A TAR tem que garantir que a temperatura da água de consumo nunca baixe dos 45°C, havendo no entanto uma tolerância de 5°C, no máximo, em certas situações esporádicas.

Na tabela 5 são apresentados os resultados da simulação do ponto de vista da energia eléctrica gasta por ano pela resistência de apoio ao colectador solar. Os valores representados a sombreado correspondem à TAR mínima que permite, para cada caso, garantir os objectivos mínimos relativos à temperatura da água de consumo, ou seja, que esta nunca baixe dos 45°C. No caso de a TAR estar definida mensalmente, como existe um valor específico para cada mês, esses valores não se encontram representados na tabela.

Localização do apoio eléctrico	Horário dos banhos	Energia de apoio gasta por ano [kWh]								
		Sem temporização		Temporização nocturna A 18:30h – 8:30h		Temporização nocturna B 17:00h – 20:00h		Anual	Mensal	
		Anual	Mensal	Anual	Mensal	Anual	Mensal			
<b>Termossifão (300l)</b>	Noite	60	1165	1065	55	1000	980	65	780	755
	Manhã	60	1250	1130	60	810	805		845	820
	Repart.	50	905	905	50	730	730		815	785
<b>Depósito complementar (150l)</b>	Noite	60	765	585	55	640	550	70	960	725
	Manhã	60	870	665	65	970	750		1025	785
	Repart.	50	560	560	50	560	560		990	755
<b>Depósito complementar (300l)</b>	Noite	50	700	700	50	705	705	60	1040	820
	Manhã	50	800	800	55	965	850		1105	890
	Repart.	50	740	740	50	745	745		1070	850

Tabela 5 - Resultados: energia gasta anualmente pela resistência eléctrica de apoio ao sistema solar, para cada combinação de hipóteses consideradas.

Na figura 17, são apresentados os mesmos resultados mostrados anteriormente, mas desta vez dispostos num gráfico de dispersão, com o objectivo de facilitar a sua análise e comparação. Assim, organizaram-se e representaram-se os valores obtidos da seguinte forma:

- *Localização do sistema de apoio*  
 Depósito do termossifão 300 litros – primeiro terço do gráfico.  
 Depósito complementar 150 litros – segundo terço do gráfico.  
 Depósito complementar 300 litros – terceiro terço do gráfico.
- *Padrões temporais de consumo*  
 Banhos à noite (N) – marcadores azuis.  
 Banhos de manhã (M) – marcadores amarelos.  
 Banhos repartidos (R) – marcadores verdes.
- *Tipos de temporização*  
 Sem temporização (ST) – losangos.  
 Temporização nocturna do tipo A (TA) – círculos.  
 Temporização nocturna do tipo B (TB) – quadrados.
- *Valores da temperatura de acumulação definida pela resistência de apoio (TAR)*  
 Anual (A) – marcadores preenchidos.  
 Mensais (DM) – marcadores sem preenchimento.

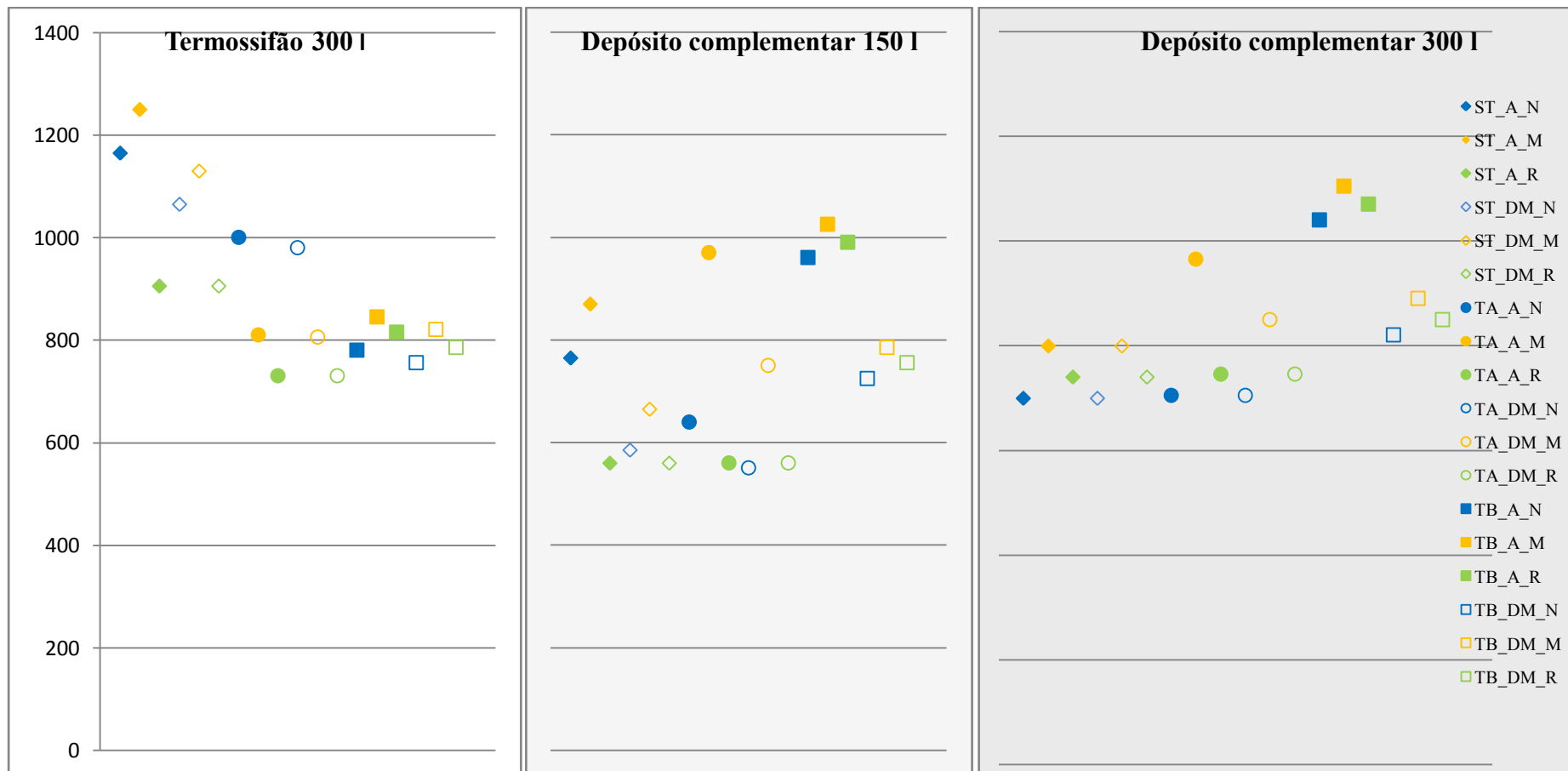


Figura 17- Resultados: energia gasta anualmente pela resistência eléctrica de apoio ao sistema solar, para cada combinação de hipóteses consideradas.

Com o intuito de demonstrar a mais-valia que pode advir da existência de um sistema solar térmico no aquecimento de água, achou-se pertinente neste trabalho comparar a energia gasta anualmente num sistema deste tipo com apoio eléctrico com a energia que se gastaria num sistema apenas eléctrico, mantendo os mesmos requisitos para a água disponível para consumo. Na tabela 6 apresentam-se os resultados obtidos para um sistema de aquecimento de água totalmente eléctrico.

Localização da resistência	Horário dos banhos	Energia gasta por ano [kWh]					
		Sem temporização		Temporização nocturna A 18:30h – 8:30h		Temporização nocturna B 17:00h – 20:00h	
<b>Termoacumulador (150l)</b>	Noite	70	2640	65	2580	80	2455
	Manhã	70	2640	75	2555		2590
	Repart.	55	2485	55	2435		2525
<b>Termoacumulador (300l)</b>	Noite	55	2795	55	2795	65	2735
	Manhã	55	2795	60	2765		2845
	Repart.	50	2720	50	2665		2785

Tabela 6 - Resultados: energia gasta anualmente num sistema de aquecimento de água totalmente eléctrico.

A definição do modelo deste sistema baseou-se no modelo utilizado na simulação para o sistema solar térmico, analisando-se o efeito das mesmas variáveis. Os termoacumuladores de 150 e 300 litros são equivalentes ao DC150 e ao DC300 do sistema solar térmico, sendo consideradas também as mesmas características da envolvente dos depósitos.



## 5. Análise dos resultados

### 5.1. Impacto dos padrões temporais de consumo de água quente

A questão que se coloca neste ponto é saber em que medida os diferentes padrões temporais de consumo de água quente influenciam a eficiência do sistema em termos de gastos de energia. Naturalmente surge a necessidade de tirar conclusões acerca de qual dos perfis de consumo testados é mais vantajoso no geral ou numa situação particular.

Da análise aos resultados obtidos apresentados na figura 17, tiraram-se as seguintes conclusões:

- O impacto dos diferentes padrões de consumo pode ser traduzido através do valor da energia poupada com recurso a um determinado perfil de consumo em relação a outro, para cada caso. Assim, variando apenas o tipo de padrão de consumo, conseguem-se reduções máximas nos gastos de energia entre 6% (apoio localizado no DC300, temporização do tipo B e TAR anual) e 42% (apoio localizado no DC150, temporização do tipo A e TAR anual).
- À excepção do caso de o apoio estar localizado no depósito do termossifão e existir temporização do tipo A, a realização de banhos de manhã acarreta sempre com mais gastos de energia do que a realização de banhos repartidos ou à noite.
- No caso de existir temporização do tipo B, os valores dos gastos de energia eléctrica entre os três perfis temporais de consumo são muito próximos, sendo que neste caso é ligeiramente mais eficiente optar pela realização de banhos à noite.
- No caso da opção por um sistema com apoio num DC300 (depósito complementar de 300 litros), a realização de banhos à noite constitui sempre uma opção mais eficiente, ainda que com pouca diferença relativamente à realização de banhos repartidos.
- Salvo as excepções enunciadas acima, a realização de banhos repartidos é sempre a mais eficiente, sendo que, em geral, se deve optar por este perfil de consumo.

A opção pela realização de banhos repartidos permite, entre cada dois banhos, recuperar a temperatura da água armazenada para os níveis normais. Isto leva a que se possa baixar a TAR, diminuindo-se as perdas de energia por transferência de calor para o exterior no acumulador, poupando-se energia. No caso da realização de banhos seguidos não há tempo para essa recuperação da temperatura, sendo necessária uma TAR maior para permitir que a temperatura da água pronta para consumo cumpra os requisitos mínimos. Na tabela 5 é possível observar, para cada perfil de consumo, as diferenças ao nível da TAR.

No caso da existência de uma temporização do tipo B, esse pressuposto não se verifica, uma vez que a temporização da resistência de apoio não permite o seu funcionamento durante o período nocturno entre os banhos, não sendo possível, através do recurso ao apoio eléctrico, a reposição da energia perdida devido ao consumo. Verifica-se assim, que no caso deste tipo de temporização, a TAR apenas varia com a localização do sistema de apoio.

## **5.2. Impacto das diferentes temporizações do sistema de apoio**

Foram testados neste estudo três tipos diferentes de temporização do sistema de apoio eléctrico: temporização do tipo A, temporização do tipo B e ausência de temporização (apoio eléctrico pronto a ligar em qualquer altura). A análise dos resultados obtidos a este nível será efectuada unicamente do ponto de vista energético. Do ponto de vista financeiro, esta análise só faria sentido se fosse considerada a existência de tarifas bi-horárias que permitissem acrescentar às possíveis vantagens energéticas associadas a um determinado tipo de temporização o peso da variação do preço da energia eléctrica para diferentes períodos do dia. Considerando a existência de tarifas simples relativas ao preço da electricidade, é suficiente a realização de uma análise energética a este nível.

- O impacto dos diferentes tipos de temporização pode ser traduzido através do valor da energia poupada com recurso a uma determinada temporização em relação a outra, para cada caso. Assim, variando apenas o tipo de temporização do apoio, conseguem-se reduções máximas nos gastos de energia entre 10%

(apoio localizado no DC300, banhos de manhã e TAR mensal) e 43% (apoio localizado no DC150, banhos repartidos e TAR anual).

- Observa-se na figura 17 que, em geral, a existência de uma temporização do tipo A permite um aproveitamento mais eficiente da energia solar por parte da instalação, gastando-se menos energia eléctrica no apoio.
- A temporização do tipo B, apesar de o apoio eléctrico estar pronto a funcionar durante um curto período de tempo (apenas 3 horas) é a menos eficiente nos casos em que o apoio se localiza num depósito complementar, uma vez que também requer maior TAR. Contudo, este tipo de temporização é a mais eficiente (considerando os gastos médios dos três padrões de consumo) no caso de a resistência de apoio estar localizada no depósito do termossifão (TS300).

### 5.3. Efeito dos diferentes ajustes da Temperatura de Acumulação definida pela Resistência (TAR)

Outro aspecto importante consiste em analisar o impacto da existência de uma TAR definida mensalmente face a uma TAR definida anualmente. Na tabela seguinte pode-se observar os valores da percentagem de energia poupada no período de um ano como resultado da definição mensal da TAR em relação à definição anual da mesma.

Localização do apoio eléctrico	Horário dos banhos	Sem temporização		Temporização nocturna A 18:30h – 8:30h		Temporização nocturna B 17:00h – 20:00h	
		Valor	%	Valor	%	Valor	%
<b>Termossifão (300l)</b>	Noite	60	8,6 %	55	2,0 %	65	3,2 %
	Manhã	60	9,6 %	60	0,6 %		3,0 %
	Repart.	50	0 %	50	0 %		3,7 %
<b>Depósito complementar (150l)</b>	Noite	60	23,5 %	55	14,1 %	70	24,5 %
	Manhã	60	23,6 %	65	22,7 %		23,4 %
	Repart.	50	0 %	50	0 %		23,7 %
<b>Depósito complementar (300l)</b>	Noite	50	0 %	50	0 %	60	21,2 %
	Manhã	50	0 %	55	11,9 %		19,5 %
	Repart.	50	0 %	50	0 %		20,6 %

Tabela 7 – Percentagem de energia poupada no período de um ano como resultado da definição mensal da TAR em relação à definição anual da mesma.

Os valores a sombreado representam a TAR definida anualmente para cada caso. Da análise à tabela 7 podem-se tirar as seguintes conclusões:

- A percentagem de energia poupada com a modelação mensal da TAR pode atingir no máximo cerca de 25% (apoio localizado no DC150, banhos à noite e temporização do tipo B).
- Uma vez que o valor mínimo que a TAR pode assumir para qualquer período é de 50 °C, sempre que esta assumir este valor quando definida anualmente, não há diferenças entre a energia gasta nas duas formas de a definir (anual ou mensal). Isto verifica-se na maior parte dos casos em que o apoio se localiza no DC300 e se utilize uma temporização do tipo A ou ausência da mesma. Com a excepção de uma temporização do tipo B, sempre que o consumo de água seja de forma repartida, este facto também se verifica.
- A percentagem de energia poupada é superior no caso de se optar por uma temporização do tipo B mantendo as restantes condições, com excepção do caso em que o apoio se localiza no TS300, em que a ausência de temporização permite uma maior poupança de energia com definição mensal da TAR.
- A localização do apoio no DC150 (termoacumulador de 150 litros) aumenta a percentagem de energia poupada com a opção da diferenciação mensal da TAR.

## 5.4. Impacto da localização do sistema de apoio

Tal como foi estudado no capítulo 2.3.3, o rendimento de um colector depende, além de outras variáveis, da temperatura de entrada do fluido  $T_{in}$  no próprio colector (equação 32). Essa temperatura foi considerada como sendo igual à temperatura de acumulação  $T_{ac}$ . Assim, para temperaturas de acumulação inferiores, mantendo os restantes parâmetros, o rendimento de um colector é superior. Esta análise permite concluir que a existência de um apoio eléctrico localizado no próprio TS300 pode prejudicar o rendimento do colector, na medida em que, o aumento da temperatura de acumulação, leva a haja mais perdas no colector, não se tirando o máximo partido da radiação solar absorvida.

É neste contexto que a opção por colocar o apoio eléctrico num depósito complementar pode fazer sentido, tirando-se maior partido da radiação solar e diminuindo, eventualmente, os gastos energéticos com o apoio eléctrico.

Relativamente aos resultados obtidos, o impacto das diferentes possibilidades para a localização do apoio eléctrico pode ser traduzido através do valor da energia poupada com o apoio localizado num determinado local em relação a outro, para cada caso. Assim, variando apenas a localização do apoio, conseguem-se reduções máximas nos gastos de energia entre 11% (temporização do tipo B, banhos repartidos e TAR mensal) e 45% (ausência de temporização, banhos à noite e TAR mensal).

Do ponto de vista exclusivamente energético, a localização do apoio eléctrico num DC300 é praticamente sempre desvantajosa quando comparada com a localização do mesmo apoio num DC150. Este facto, associado ao preço muito elevado do DC300 em relação ao DC150 torna a hipótese da localização do sistema de apoio no DC300 inválida para as considerações feitas neste trabalho.

Se a temporização utilizada para a resistência de apoio for do tipo B é vantajoso, tanto do ponto de vista energético como do económico, utilizar o apoio no próprio TS300. Com excepção deste caso, é praticamente sempre mais favorável energeticamente usar o apoio no DC150.

A situação correspondente à localização do apoio num depósito complementar sobre a qual foi elaborado este modelo dinâmico pode, no entanto, não ser a mais favorável do ponto de vista energético. Por exemplo num dia de sol, nas alturas em que não há consumo é possível ocorrer a situação em que a temperatura no depósito complementar seja inferior à TAR, ligando a resistência se a sua temporização o permitir, mesmo que a temperatura no acumulador do termossifão seja superior à TAR. Assim, uma possível forma de aumentar a eficiência deste sistema (não abordada neste trabalho) passaria por promover a circulação de água entre o depósito do termossifão e o termoacumulador complementar sempre que estas situações se verificassem, evitando gastos de energia desnecessários com o apoio eléctrico.

## 5.5. Análise económica

### 5.5.1. Análise económica do depósito auxiliar

Na análise dos resultados obtidos do ponto de vista da localização do sistema de apoio é essencial entrar em conta com os gastos que advêm da aquisição de um depósito complementar. Consideram-se aqui apenas os gastos relativos ao preço do termoacumulador, desprezando-se os gastos associados, nomeadamente, ao aumento do circuito. Na tabela seguinte estão representados os preços médios dos dois termoacumuladores utilizados como referência neste trabalho.

Modelo do termoacumulador	Volume (litros)	Preço médio (euros)
FAGOR CB-150N	150	280
FAGOR M-300SS	300	515

Tabela 8 – Preço médio dos dois depósitos complementares testados. [12]

Para tirar conclusões acerca de qual a localização do sistema de apoio mais favorável do ponto de vista do utilizador, que é sobretudo económico, é preciso fazer uma análise que tenha em conta o custo da energia eléctrica. Torna-se assim fundamental comparar o valor poupado anualmente em electricidade recorrendo à opção do DC150 com o custo adicional da instalação deste sistema.

O custo do kWh de electricidade varia em função do mercado (regulado ou liberalizado), do nível de tensão (baixa tensão, média tensão, etc.) e em alguns casos do período do dia em que é efectuado. Considerando a tarifa regulada pela *ERSE (Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos)* - tarifário em vigor desde Janeiro 2012, *Directiva ERSE n.º 07/2011* - para tarifas de baixa tensão normal (BTN) com potência contratada superior a 2,3 kVA e horário simples, o preço do kWh de electricidade corresponde a 0,14 euros. [10]

Uma forma de analisar a viabilidade da instalação de um depósito complementar ao sistema de termossifão passa por, considerando a possibilidade de qualquer tipo de temporização do apoio eléctrico, comparar o menor valor ao nível dos gastos

energéticos obtidos para a situação da localização do apoio no TS300 com o mesmo valor no caso de o apoio estar no DC150. Da tabela 9, retiram-se os valores mínimos da energia eléctrica gasta anualmente nos dois casos considerados.

Localização do apoio eléctrico	Energia mínima gasta por ano [kWh]
TS300	730
DC150	550

Tabela 9 – Comparação entre os valores mínimos de energia eléctrica gasta anualmente num sistema com o apoio eléctrico localizado no TS300 e num sistema com apoio no DC150.

Tirando partido da situação mais favorável para cada sistema, pode-se afirmar que o sistema com a resistência de apoio colocada no TS300 gasta mais 180 kWh de energia eléctrica por ano que o sistema com o apoio no DC150. Considerando, como foi referido, que o preço da electricidade actualmente corresponde a 0,14 €/kWh e que é previsto um aumento desse valor na ordem dos 5% ao ano, pode-se calcular o número de anos  $n$  necessários para amortizar o valor do investimento num DC150, cujo preço é da ordem dos 280 euros.

$$\sum_{i=1}^n 0,14(1 + 0,05)^{i-1} \cdot 180 \cong 280$$

(Eq. 69)

Da equação anterior obtém-se os seguintes resultados:

Ano ( $i$ )	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Custo do kWh (€)	0,140	0,147	0,154	0,162	0,170	0,179	0,188	0,197	0,207
Valor amortizado (€)	25	52	79	109	139	171	205	241	278

Tabela 10 – Resultados: tempo necessário para amortizar o valor investido na instalação de um sistema com DC150 face à instalação de um sistema solar térmico simples.

Com base nestes resultados, conclui-se que o tempo necessário para amortizar o valor investido na instalação de um DC150 face à instalação de um sistema térmico simples será da ordem dos 9 anos.

### 5.5.2. Análise económica do sistema solar térmico

Este resultado não pode, contudo, ser analisado de forma isolada. É fundamental comparar este valor com o tempo que demorará a recuperar o investimento num sistema simples do tipo termossifão (com o apoio localizado no TS300) face à instalação de um sistema de aquecimento de água totalmente eléctrico.

Na tabela 6 são apresentados os valores da energia gasta anualmente num sistema totalmente eléctrico para aquecimento de água. Verifica-se que, para este caso, o sistema mais eficiente a nível energético dos sistemas testados passa pela utilização de um termoacumulador de 150 litros. Sendo esta também a solução mais barata, fica desde já descartada a hipótese da utilização de um termoacumulador de 300 litros neste sistema. Na tabela seguinte pode comparar-se a energia mínima gasta anualmente num sistema totalmente eléctrico com a mesma energia gasta num sistema solar térmico com apoio eléctrico no TS300.

Tipo de sistema	Energia mínima gasta por ano [kWh]
Eléctrico (termoacumulador de 150l)	2435
Solar térmico (apoio eléctrico no TS300)	730

Tabela 11 – Comparação entre os valores mínimos de energia eléctrica gasta anualmente num sistema solar térmico com o apoio localizado no TS300 e num sistema totalmente eléctrico.

O preço de um kit termossifão de 300 litros, para instalação em telhado inclinado, com todas os componentes necessários é aproximadamente 3200 euros [11], enquanto, como já foi referido, o preço de um termoacumulador de 150 litros ronda os 280 euros. De acordo com a tabela 11, com o sistema solar térmico considerado consegue-se poupar cerca de 1705 kWh de energia por ano em relação ao sistema eléctrico. Fazendo as considerações relativas ao preço da electricidade enunciadas anteriormente e sabendo que o sistema solar térmico considerado é cerca de 2920 € mais caro que o sistema eléctrico pode-se escrever:

$$\sum_{i=1}^n 0,14(1 + 0,05)^{i-1} \cdot 1705 \cong 2920$$

(Eq. 70)

Desta equação obtém-se os seguintes resultados:

Ano ( <i>i</i> )	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Custo do kWh (€)	0,140	0,147	0,154	0,162	0,170	0,179	0,188	0,197	0,207	0,217
Valor amortizado (€)	239	489	753	1029	1319	1624	1943	2279	2632	<b>3002</b>

Tabela 12 – Resultados: tempo necessário para amortizar o valor investido na instalação de um sistema solar térmico simples (apoio no TS300) face à instalação de um sistema totalmente eléctrico.

De acordo com os resultados apresentados na tabela 12, o tempo necessário para recuperar o investimentos no sistema solar considerado face ao sistema eléctrico é de aproximadamente 10 anos. Foi visto que eram precisos apenas cerca de 9 anos para amortizar o investimento num sistema solar térmico com apoio eléctrico no DC150 face ao recurso ao mesmo sistema mas com o apoio no próprio TS300. Estes resultados permitem concluir que o investimento num sistema solar térmico com o apoio no DC150 se recupera praticamente no mesmo período que o investimento feito no sistema simples com o apoio no próprio TS300. Ou seja, a opção pelo sistema com o apoio no DC150 é, não só do ponto de vista energético, mas também do ponto de vista financeiro mais vantajosa.



## 6. Conclusões

Ao longo da análise dos resultados apresentada no capítulo 5, foram-se comparando os indicadores da eficiência energética dos diferentes padrões de uso de sistemas solares térmicos analisados neste trabalho. Este capítulo apresenta, de forma resumida, as principais conclusões resultantes dos estudos efectuados.

De todos os cenários analisados, e comparando o valor da energia eléctrica de apoio gasta anualmente, a opção mais eficiente (550 kWh de energia de apoio necessária por ano) corresponde à situação em que o apoio está localizado num depósito de acumulação auxiliar de 150 litros (DC150), com temporização nocturna (tipo A), valor do set-point do apoio (TAR) ajustado mensalmente e perfil de consumo correspondente à preferência pelos banhos à noite. Em oposição, a opção menos eficiente (1250kWh de energia de apoio necessária por ano) corresponde à situação em que o apoio está localizado no próprio depósito do termossifão (TS300), sem temporização, set-point do apoio constante ao longo do ano e perfil de consumo correspondente à realização de banhos de manhã.

Relativamente aos padrões temporais de consumo, da análise efectuada neste trabalho, conclui-se que, sempre que possível deve-se optar por um consumo de água quente de forma repartida, e sobretudo evitando, em geral, a realização de banhos de manhã.

A existência de temporização do apoio revelou-se vantajosa, sobretudo no caso em que o apoio está localizado no próprio depósito do termossifão. Neste caso uma temporização do tipo B (17:00h – 20:00h) revela-se mais eficiente, contrariamente aos casos com apoio num depósito auxiliar, em que uma temporização do tipo A (18:30h – 8:30h) conduz a melhores resultados.

Em relação à modelação da TAR (temperatura de set-point do apoio), o seu ajuste de forma mensal pode levar a reduções significativas na energia eléctrica consumida. Destaca-se o caso da localização do apoio no depósito complementar de 150 litros em que essas reduções podem atingir os 25%.



## 7. Referências

- [1] Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos edifícios (RCCTE), Capítulo III, Artigo 7º
- [2] Oliveira, A., Textos de apoio às aulas da disciplina de Energias Renováveis, parte solar, 2007/08
- [3] Energia solar; <http://www.dgge.pt/>; acedido em Abril de 2012
- [4] Energia solar;  
<http://lge.deec.uc.pt/projectos/licenciatura/1998-99/mafo/mafo5.html>; acedido em Abril de 2012
- [5] Colectores solares térmicos planos;  
[http://www.energiasrenovaveis.com/images/upload/flash/anima\\_como\\_funciona/solartermico10.swf](http://www.energiasrenovaveis.com/images/upload/flash/anima_como_funciona/solartermico10.swf); acedido em Maio de 2012
- [6] Colectores solares térmicos planos;  
[http://www.energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID\\_conteudo=41&ID\\_area=8&ID\\_sub\\_area=26](http://www.energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID_conteudo=41&ID_area=8&ID_sub_area=26); acedido em Maio de 2012
- [7] John A. Duffie e William A. Beckman - Solar energy of thermal processes – 1991 – 2ª Edição - John Wiley & Sons, Inc
- [8] Orientação dos colectores;  
[http://www.aguaquentesolar.com/publicacoes/27/14\\_Guia%20pr%20Instaladores.pdf](http://www.aguaquentesolar.com/publicacoes/27/14_Guia%20pr%20Instaladores.pdf); acedido em Maio de 2012
- [9] Sistemas solares térmicos; <http://www.aguaquentesolar.com/FAQ/questao.asp?id=7>; acedido em Maio de 2012

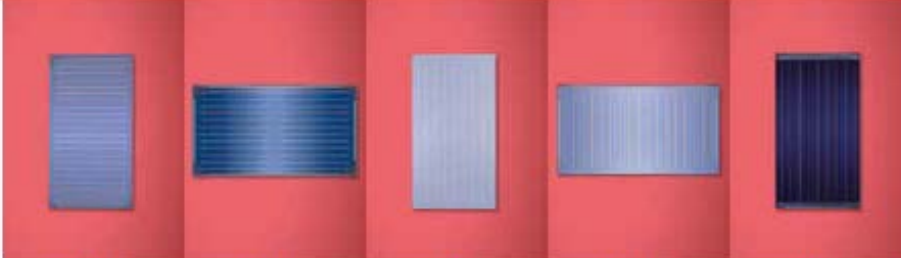
[10] Preços da electricidade; <http://www.edpsu.pt/pt/Pages/homepage.aspx>; acedido em Junho de 2012

[11] Preços do kit termossifão;  
[http://www.saniluz.pt/uploads/tabela\\_vulcano\\_solar\\_2010.pdf](http://www.saniluz.pt/uploads/tabela_vulcano_solar_2010.pdf); acedido em Junho de 2012

[12] Preços dos termoacumuladores; <http://www.kuantokusta.pt/>; acedido em Junho de 2012

## 8. Anexos

### 8.1. Anexo A – Dados técnicos do colector

CARACTERÍSTICAS	PREMIUMSUN	PREMIUMSUN	WARMESUN	WARMESUN	LIGHTSUN
MODELO	FKT-1S	FKT-1W	FKC-1S	FKC-1W	FKB-1S
					
Montagem	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
Dimensões L x A x P (mm)	1145 x 2070 x 90	2070 x 1145 x 90	1145 x 2070 x 90	2070 x 1145 x 90	1145 x 2070 x 90
Área total (m <sup>2</sup> )	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37
Área útil abertura (m <sup>2</sup> )	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26
Área do absorvedor (m <sup>2</sup> )	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23
Volume do painel (l)	1.43	1.76	0.86	1.25	0.86
Peso em vazio (kg)	44	45	41	42	41
Pressão máxima trabalho (bar)	6	6	6	6	6
Caudal nominal (l/h)	50	50	50	50	50
Material da caixa	Fibra de vidro, com esquinhas de ABS e chapa de aço tratada com alumínio e zinco				
Isolamento	Lã mineral, de 55 mm de espessura				
Painel	Selectivo				Semi-selectivo
Tratamento painel	PVD		Cromio negro		Laca solar preta
Circuito hidráulico	Dupla Serpentina		Grelha de tubos		

CURVA DE RENDIMENTO INSTANTÂNEO SEGUNDO EN 12975-2 (baseada na área de abertura)				
MODELO	PREMIUMSUN FKT	WARMESUN FKC	LIGHTSUN FKB	
Rendimento óptico - Factor de eficiência		0.803	0.770	0.648
Coef. perda linear	W/m <sup>2</sup> K	3.560	3.681	4.76
Coef. perda secundário	W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup>	0.0140	0.0173	0.013

Tabela A1 – Dados técnicos do colector solar térmico que serve de referência neste trabalho (Lightsun FKB).

## 8.2. Anexo B – Dados técnicos do sistema termossifão

GAMA TERMOSSIFÃO		150L	200 L	300 L
Tipo de sistema		Circuito Indirecto		
Tipo de permutador		Dupla envolvente		
Peso(vazio)	kg	71	78	95
Volume circuito primário	litros	13	13	20
Volume circuito secundário	litros	150	195	280
Pressão máx. de trabalho circuito primário	kg/cm2(bar)	2.5		
Pressão máx. de trabalho circuito secundário	kg/cm2(bar)	10		
Diâmetro	mm	580		
Largura	mm	1120	1320	1850
Material de revestimento exterior		Aço lacado		
Material de revestimento interior		Vitrificado		
Tipo de isolamento		Poliuretano, livre de CFC		
Espessura de isolamento	mm	50		
Disposição do vaso de expansão		Interior		
Volume do vaso de expansão	litros	3		
Protecção catódica		Ânodo de protecção em magnésio		
<b>Estrutura de Suporte</b>				
Material		Alumínio		
Tipo de Perfil		Angular		
<b>Circuito Hidráulico e Acessórios</b>				
Material das tubagens		Borracha EPDM reforçada com nylon		
Tipo de acessório de ligação entre painéis		Borracha EPDM reforçada com nylon		
Protecção contra pressão		Válvula de segurança		
Pressão válvula segurança primário	bar	2.5		
Pressão válvula segurança secundário	bar	10		
<b>Outras Características</b>				
Peso aprox. em funcionamento	kg	300	350	530
Distância entre apoios: L*A	mm	920	920	920+920
Medidas do equipamento montado: A*L*P	mm	2365*1150*1705	2365*1320*1705	2365*2320*1705
Protecção anti-gelo		Anticongelante (não fornecido no kit)		
Capacidade de anticongelante	litros	20	20	20

Tabela A2 – Dados técnicos do sistema termossifão que serve de referência neste trabalho (300 litros).

## 8.3. Anexo C – Dados técnicos dos termoacumuladores

### 8.3.1. FAGOR CB-150N (150 litros)

#### DATOS DEL TERMO

FORMA EXTERIOR	Cuadrangular
TIPO DE CUBA	Acero con esmalte al titanio vitrificado a 850°C
TIPO DE TERMÓSTATO	Regulable con mando frontal
TIPO DE ANODO	Magnesio
TIPO DE ISOLAMENTO	Superaislamiento expando sin CFC
EXTERIOR C/COBERTURA PINTURA EPOXI	●
<b>PRESTACIONES</b>	
LIGAR/LIGAR AUTOMÉTICO	●
INTERRUPTOR BIPOTENCIA	●
MANGUEIRA ISOLANTE	●
PILOTO AQUECIEMNTO	●
TERMÓSTATO DE SEGURANÇA	●
VÁLVULA DE SEGURANÇA COM DISPOSITIVI DE VAPOR	●
<b>CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS</b>	
CAPACIDADE (L)	150
INSTALAÇÃO	Vertical/Horizontal
SITUAÇÃO DO COMANDO DO TERMÓSTATO	Frontal
REGULAÇÃO DE TEMPERATURA °C	70
PILOTO DE AQUECIMENTO EM PAINEL	●
ALIMENTAÇÃO ELÉCTRICA (V/F/HZ)	●
TIPO DE RESISITÊNCIA	Envainada independiente
Nº RESISTENCIAS E POTENCIAS (W)	2X1.200
POTÊNCIA (W)	2400
INTENSIDADE A 230 V. (A)	10,43
TEMPO DE AQUECIMENTO A 65°C (+50°C)	3 h 40 min
PERDAS ESTÁTICAS A 65°C (KW/H EM 24H)	1,51
ESPESSURA MÉDIA DE ISOLAMENTO (MM)	41,5
LIGAÇÃO DE ÁGUA (BSP)	3/4"
PRESSÃO MÁXIMA TRABALHO (BAR)	10
LIGAÇÃO ELÉCTRICA (CABO LIGAÇÃO)	●
PROTECÇÃO CAIDA DE ÁGUA VERTICAL	●
PROTECÇÃO PROJECÇÃO DE ÁGUA	●
TERMÓSTATO	Termostato de bulbo + limitador
ENTRADAS	Inferiores
ÍNDICE DE PROTECÇÃO	IP-24
PESO NETO (KG)	43

Tabela A3 – Dados técnicos do termoacumulador FAGOR CB-150N (150 litros).

### 8.3.2. FAGOR M-300SS (300 litros)

#### DATOS DEL TERMO

FORMA EXTERIOR	●
TIPO DE CUBA	Acero con esmalte al titanio vitrificado a 850°C
TIPO DE ANODO	Magnesio
TIPO DE ISOLAMENTO	●
<b>PRESTACIONES</b>	
MANGUEIRA ISOLANTE	●
TERMÓSTATO DE SEGURANÇA	●
<b>CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS</b>	
CAPACIDADE (L)	300
INSTALAÇÃO	Vertical suelo
SITUAÇÃO DO COMANDO DO TERMÓSTATO	Interior
REGULAÇÃO DE TEMPERATURA °C	82 +- 3
TIPO DE RESISTÊNCIA	Envainada
Nº RESISTENCIAS E POTENCIAS (W)	3X1.000
POTÊNCIA (W)	3.000
INTENSIDADE A 230 V. (A)	13,04
TEMPO DE AQUECIMENTO A 65°C (+50°C)	●
PERDAS ESTÁTICAS A 65°C (KW/H EM 24H)	2,6
ESPESSURA MÉDIA DE ISOLAMENTO (MM)	34,5
LIGAÇÃO DE ÁGUA (BSP)	3/4"
ÍNDICE DE PROTECÇÃO	IP-25
PESO NETO (KG)	71

Tabela A4 – Dados técnicos do termoacumulador FAGOR M-300SS (300 litros).