

MODELAÇÃO DE SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS DE PEQUENA DIMENSÃO (SISTEMAS TIPO KIT) E IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS PARA DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO A LONGO PRAZO

A. Neves, M. J. Carvalho

INETI – Departamento de Energias Renováveis, Estrada Paço do Lumiar 22, 1649 – 038
Lisboa, Portugal, Tel: +351 21 712 7216, Fax: +351 712 7195, ana.neves@ineti.pt

Resumo

Os Sistemas Solares Térmicos de pequena dimensão (sistemas do tipo kit) são ensaiados de acordo com as normas de ensaio EN 12976-2 e ISO 9459-5 para determinação do comportamento térmico, considerando uma metodologia de ensaio dinâmico. Neste artigo é apresentado um modelo físico que descreve o balanço térmico para um sistema solar. O modelo descrito assenta num depósito unidimensional e tem como variável de entrada a energia fornecida pelo colector e como variável de saída a energia fornecida para consumo. Considera-se que existe estratificação no interior do depósito, recorrendo a um modelo de segmentos isotérmicos de dimensão variável. Com o modelo desenvolvido e com os dados de ensaio é possível identificar os parâmetros característicos do sistema. A identificação dos parâmetros é conseguida por um processo iterativo de optimização utilizando o método de Levenberg-Marquardt. O cálculo do Comportamento térmico a longo prazo (LTTP - Long Term Performance Prediction), do sistema, é efectuado considerando o modelo estabelecido para o balanço térmico e os parâmetros identificados.

1. Introdução

A caracterização do comportamento térmico de Sistemas Solares Térmicos de pequena dimensão (sistemas tipo kit) é efectuada em laboratório através da realização do Ensaio Dinâmico (DST) de acordo com as normas EN 12976-2 e ISO 9459-5. Neste trabalho é apresentado um modelo para o balanço térmico deste tipo de sistemas, bem como um método de identificação de parâmetros característicos do sistema, segundo o procedimento descrito no documento normativo ISO 9459-5. O modelo considera um depósito unidimensional tendo como variável de entrada a potência fornecida pelos colectores solares térmicos e como variável de saída a potência fornecida para consumo. Considera-se que no interior do depósito existe estratificação representada por camadas isotérmicas de dimensão variável (S.A. Klein *et al.*, 1998). Com o modelo considerado e com os dados de ensaio obtidos de acordo com a ISO 9459-5, foi possível identificar os parâmetros característicos do sistema. A identificação dos parâmetros foi conseguida recorrendo-se a um processo

iterativo de otimização, utilizando o método de Levenberg-Marquardt (Teukolsky, 1992), que permite a identificação de parâmetros para modelos não-lineares. O cálculo do comportamento térmico a longo prazo (*LTPP - Long Term Performance Prediction*) do sistema foi efectuado considerando o modelo estabelecido para o balanço térmico e os parâmetros característicos do sistema. O modelo desenvolvido foi aplicado a três sistemas do tipo termossifão e de circulação forçada.

2. Procedimento do Ensaio Dinâmico

O método de ensaio dinâmico compreende três sequências de ensaio: Ssol_A, Ssol_B e Sstore como descrito no documento normativo ISO 9459-5. As sequências Tipo Ssol_A e Ssol_B são realizadas afim de determinar o comportamento térmico do colector para diferentes temperaturas de funcionamento (diferentes temperaturas do depósito), enquanto que a sequência do Tipo Sstore é realizada para determinar o coeficiente de perdas global do depósito.

As variáveis de entrada para o método de ensaio DST, representadas na figura 1, correspondem apenas a medidas externas (método de ensaio não intrusivo). As medidas realizadas durante os diferentes tipos de sequências são: G_t^* - radiação solar no plano do colector [Wm^{-2}], T_{CA} - temperatura ambiente junto do colector [$^{\circ}C$], T_{SA} - temperatura ambiente junto do depósito, \dot{m}_L - caudal de extracção [$kg\ s^{-1}$] e T_{CW} - temperatura da água da rede [$^{\circ}C$].

A potência fornecida para consumo:

$$P_L = \dot{m}_L c_{pa} (T - T_r) \quad [W] \quad (1)$$

é a variável de saída do método de Ensaio Dinâmico. Este método consiste em ajustar $P_{L,exp}$, determinado durante as sequências de ensaio, a $P_{L,modelo}$, potência fornecida para consumo determinada segundo o modelo de balanço térmico.

Na equação (1) T é a temperatura da água fornecida para consume e c_{pw} é o calor específico da água [$J/kg^{\circ}C$].

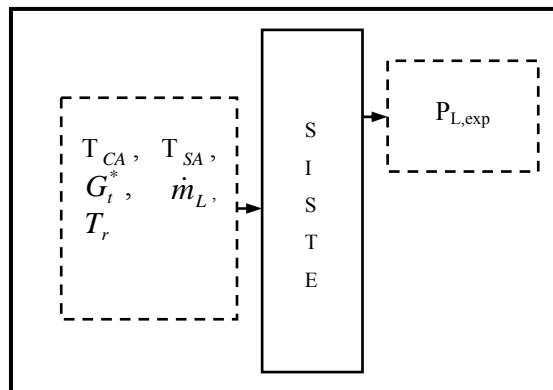


Figura 1 - Variáveis de entrada e de saída para o método de ensaio DST.

3. Modelação de Sistemas Solares Térmicos

3.1. Pressupostos

O modelo considerado baseia-se em alguns pressupostos. A estratificação do depósito é obtida considerando camadas isotérmicas com dimensão variável (S.A. Klein *et al.*, 1998).

A energia fornecida pelos colectores, q_c [W], é calculada de acordo com:

$$q_{in} = A_c [G_t^* - u_c^* (T - T_{CA})]^+ \quad (2)$$

em que T representa a temperatura de entrada no colector, A_c [m^2] é a área efectiva de colector e u_c^* [$W \text{ } ^\circ C^{-1} m^{-2}$] é o coeficiente de perdas efectivo do colector, dois dos parâmetros que caracterizam o sistema. Esta energia é fornecida à base do depósito, sendo distribuída às camadas acima por forma a ter-se o correcto posicionamento de temperaturas das camadas (i.e. camadas com temperaturas inferiores na base do depósito). Este processo é repetido até que q_{in} seja completamente absorvida no depósito (Franzke, U. *et al.*, 2005). O ganho do colector é apenas considerado se $q_{in} > 0$ (Spirkl, W e J. Muschaweck, 1992).

A extracção de energia do depósito é modelada considerando o modelo de "Plug flow" (S.A. Klein *et al.*, 1998) (ver figura 2):

- a água fria é injectada à altura $h = 0$ (base do depósito) sendo a água para consumo extraída à altura $h = 1$ (topo do depósito);
- sempre que há uma extracção, é criada uma nova camada no depósito com um volume igual ao volume extraído, sendo todas as camadas existentes no depósito movidas para cima.

Durante a extracção e consequentemente entrada de água fria, irá ocorrer mistura se a altura da camada for inferior a h_{mix} (Achim Brunotte, 1995), sendo este um parâmetro característico do modelo do sistema. A condutividade térmica entre camadas é também considerada. O coeficiente de perdas do depósito, U_s [$W \text{ } ^\circ C^{-1}$], e a capacidade térmica do depósito, C_s [MJK^{-1}], são considerados igualmente distribuídas ao longo da altura do depósito, de acordo com [4], i.e.,

$$\frac{\partial U_s}{\partial h} = 0 \text{ e } \frac{\partial C_s}{\partial h} = 0.$$

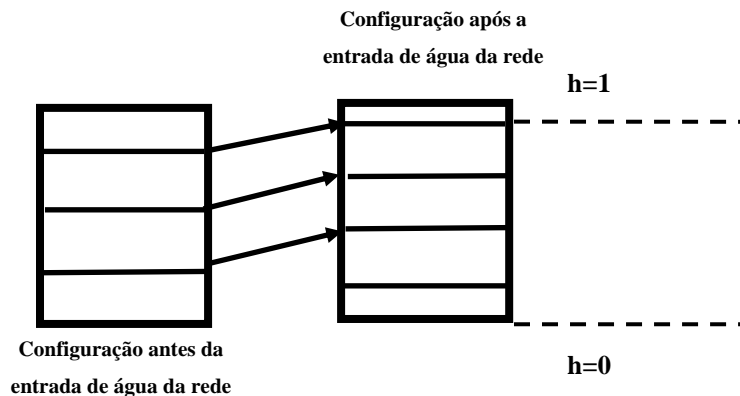


Figura 2 - Representação esquemática do modelo plug flow.

Com os pressupostos acima, os parâmetros característicos do sistema são A_c^* , u_c^* , U_s e h_{mix} . C_s não foi considerado como parâmetro do sistema mas sim como um valor fixo:

$$C_s = V \times c_{pw} \times \rho_w \quad (3)$$

em que V - volume do depósito [l] e ρ_w - massa específica da água [kg/l]

3.2. Equação do balanço térmico

Considerando os pressupostos descritos para o modelo do sistema, o balanço térmico pode ser representado pela equação:

$$C_s \frac{\partial T(t, h)}{\partial t} = -U_s (T - T_{SA}) + \dot{c}_s \delta(h=0) (T_{cw} - T) - \frac{\dot{c}_s}{h_{mix}} (T - T_{cw}) + (KA)_{j-1} \frac{(T_{j-1} - T_j)}{\Delta h_{j-1}} - (KA)_j \frac{(T_j - T_{j+1})}{\Delta h_j} \quad (4)$$

Esta equação descreve a energia contida no depósito para a camada j no instante i , caracterizada por uma distribuição unidimensional $T(t, h)$ da temperatura do depósito, com a altura normalizada h (Spirkl, W. e J. Muschaweck, 1992), tal que os gradientes de temperatura são desprezáveis. O significado dos termos do lado direito da equação são, respectivamente: ganho do colectador, perdas do depósito, consumo, mistura com água fria durante a extracção e condutividade térmica. Com os pressupostos assumidos, os parâmetros característicos do sistema são: A_c^* , u_c^* , U_s e h_{mix} , que serão identificados pelo ajuste entre os valores de $P_{L,exp}$ e $P_{L,modelo}$.

Na equação (4), K é a condutividade térmica da água ($K = 0,569 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), A é a área da camada e $\dot{C}_s = \dot{m}_L c_{pw}$.

Através da função $\delta(h=0)$, associada ao termo de consumo, é assegurado que a água fria entra no depósito na camada da base como esquematicamente representado na Figura 2.

A potência fornecida pelo colectador (como descrito anteriormente) e a entrada de água no depósito, aquando de uma extracção (utilizando o modelo plug flow), são consideradas depois da determinação do balanço térmico para cada camada do depósito. Finalmente as temperaturas das diferentes camadas no depósito são comparadas, tal que se a diferença de temperaturas entre duas camadas consecutivas for inferior a um ΔT estabelecido, as camadas são termicamente misturadas. Para os resultados apresentados, considerou-se um ΔT de $0,5^\circ\text{C}$.

4. Implementação numérica. Identificação de parâmetros característicos

O modelo de balanço térmico apresentado é descrito por uma equação diferencial, pelo que se adoptou o método de Euler para a resolução numérica da mesma.

Os parâmetros característicos são identificados por um processo de optimização utilizando o Método de Levenberg-Marquardt (Teukolsky *et al.*, 1992), minimizando a função χ^2 por comparações sucessivas de valores de χ^2 obtidos nas simulações realizadas. χ^2 é dado pela expressão:

$$\chi^2(a_k) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{P_{Load,exp}(i) - P_{Load,model}(i, a_k)}{\sigma_i} \right]^2 \quad (5)$$

Para os N pontos da simulação.

a_k são os parâmetros a ser optimizados, i.e., A_c^* , u_c^* , U_s e h_{mix} . Os parâmetros nas sucessivas simulações são determinados de acordo com a expressão (Spirkl, W., 1995):

$$a_k + \Delta a_k = \pm 0.02 \min(\max(|a_k|, 1), a_k^{max} - a_k^{min}) \quad (6)$$

O processo de optimização é repetido dez vezes. Por forma a evitar a ocorrência de mínimos locais, os valores iniciais dos parâmetros são determinados de uma forma aleatória considerando a distribuição normal de Gauss com $\sigma = 5 \times \sigma_{a_k}$, em que σ_{a_i} corresponde ao desvio padrão associado ao parâmetro a_i .

5. Cálculo do Comportamento Térmico a Longo Prazo (LTPP)

O cálculo do comportamento térmico a longo prazo é efectuado considerando o modelo de balanço térmico estabelecido, os parâmetros característicos e dados climáticos anuais (G_t^* e T_{CA}). O perfil de extracção considerado corresponde a uma extracção diária, às 18 h (Hora Solar). Para este cálculo é assumida uma temperatura de consumo de 45°C, tal que se a temperatura no depósito fôr superior a 45°C, considerada-se mistura com água da rede sendo apenas extraída a energia necessária para consumo. A energia restante é acumulada para o dia seguinte.

6. Resultados

6.1 Parâmetros característicos

O método acima descrito para caracterização de Sistemas Solares Térmicos, foi aplicado a três sistemas diferentes de acordo com ISO 9549-2. As configurações dos sistemas são dadas no Quadro 1. Os parâmetros característicos encontram-se no Quadro 2.

No gráfico da figura 3 encontram-se representados os valores medidos de $P_{L,exp}$ e os valores calculados através do modelo descrito, $P_{L,model}$.

Quadro 1 – Características dos sistemas

	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
Tipo de sistema	Termossifão	Circulação forçada	Circulação forçada
Tipo de colector	CPC	Plano	Plano
Área de abertura do colector (m ²)	3,96	3,94	1,97
Volume do depósito (l)	350	300	150

Quadro 2 – Parâmetros característicos para os sistemas 1, 2 and 3.

Parâmetro	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
A_c^*	2,834	3,733	1,499
u_c^*	1,790	13,17	11,13
U_s	5,366	1,594	2,460
h_{mix}	0,056	0,018	0,014

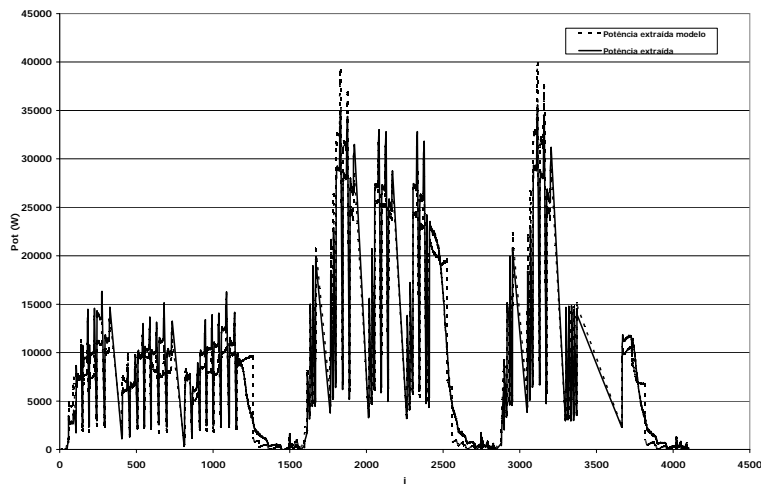


Figura 3 – PLoad,exp e PLoad,model vs instante t(tempo).

Tal como noutros programas de cálculo (Spirkl, W., 1995), os parâmetros obtidos não estão completamente explicados, atendendo às características térmicas conhecidas previamente para cada componente. Os resultados obtidos mostram que existe uma forte correlação entre o coeficiente efectivo de perdas do colector, u_c^* , e o coeficiente global de perdas do depósito, U_s , especialmente para os sistemas 2 e 3. Os valores obtidos para os parâmetros, A_c^* , u_c^* e U_s estão de acordo com os resultados obtidos com a identificação de parâmetros do programa de W. Spirkl (1995).

Comparando os valores obtidos para h_{mix} nos sistemas 1 e 2 (com A_a e V semelhantes) é possível concluir que depósitos com uma configuração vertical (sistema 2) correspondem a sistemas com melhor estratificação.

6.2 LTPP

No quadro seguinte são apresentados os resultados do LTPP para Lisboa, Porto e Faro, em Portugal. Como já referido, assumiu-se um perfil de extracção que corresponde a realizar apenas uma extracção, 100%V às 18 horas.

Os valores de LTPP obtidos, quando comparados com os do programa de referência (W. Spirkl, 1995), mostram uma sobre determinação dos resultados. No futuro pretende-se implementar melhorias no modelo apresentado, com o objectivo de o mesmo poder ser aplicado ao "Benchmark" de acordo com o indicado na ISO 9459-5 e deste modo poder avaliar-se se este modelo é adequado à caracterização do comportamento térmico para sistemas tipo kit.

Quadro 3 – Resultados de LTPP para os sistemas 1, 2 e 3.

Localização	LTPP [MJ/year]		
	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
Lisboa	11939	10161	5288
Porto	11717	9876	4783
Faro	12752	10716	5561

7. Conclusões

Um modelo para simulação de sistemas solares térmicos do tipo kit foi desenvolvido, tendo-se tentado a sua utilização como possível ferramenta para identificação de parâmetros característicos de um sistema solar térmico e para o cálculo do comportamento térmico a longo prazo, recorrendo-se aos resultados do método de Ensaio Dinâmico (DST) de acordo com as normas EN 12976-2 e ISO 9459-5.

Este modelo foi utilizado para a identificação de parâmetros de três sistemas ensaiados de acordo com o referido método de ensaio. Para a determinação de parâmetros característicos recorreu-se ao método de Levenberg-Marquard.

Os parâmetros característicos são A_c^* , u_c^* , U_s e h_{mix} , sendo os primeiros três idênticos aos determinados pela referência (Spirkl, W. e J. MUschaweck, 1992; Spirkl, W., 1995). O parâmetro associado à mistura com a água da rede no depósito é representado por h_{mix} , introduzido na referência (Achim Brunotte, 1995), correspondendo a uma simples implementação no modelo. Os valores obtidos para os três primeiros parâmetros estão de acordo com os resultados obtidos com o programa de W. Spirkl (1995).

Os valores de LTPP encontrados, quando comparados com os determinados pelo programa de W. Spirkl (1995), mostram uma sobredeterminação dos resultados. No futuro pretende-se implementar melhorias no modelo apresentado, com o objectivo de o mesmo poder ser aplicado ao "Benchmark" de acordo com o indicado na ISO 9459-5 e deste modo poder avaliar-se se este modelo é adequado à caracterização do comportamento térmico para sistemas tipo kit.

Referências

EN 12976-2 – Thermal solar systems and components – Factory made systems – Part 2: Test methods, European Standard, 2000

ISO/DIS 9459-5 – Solar heating – Domestic water heating systems – Part 5: Systems performance characterization by means of whole-system tests and computer simulation, International Standard, 1997.

S.A. Klein, W. A. Beckman and P. I. Cooper, 1998, TRNSYS: A Transient System Simulation Program (Version 15), Solar Energy Laboratory, Madison Wisconsin

Spirkl, W., Muschaweck, J., Solar Energy Materials and Solar Cells - General model for testing solar domestic hot water systems, 1992

Achim Brunotte, IEA Advanced Solar Energy Systems, Dynamic Testing of Active Solar Heating Systems, Final Report of the Task 14, Dynamic Component and System Testing Subtask, Volume A, Solar Heating & Cooling Programme, Report no. T.14.DCST.1A - A model for component testing of hot water storage tanks, 1995

EN 12975-2 – Thermal solar systems and components – Solar Collectors - Part 2: Test methods, European Standard – 2000

Uwe Franzke, Christian Seifert, 2005, Solar Assisted Air Conditioning of Buildings, Documentation for the SolAC Programme version 1.5, section 7.2 – Solar System, IEA Task 25, ILK Dresden

Teukolsky, Saul A., Vetterling, William T., Flannery, Brian P., Numerical Recipes in Fortran, The Art of Scientific Computing, Second Edition, William H. Press, Cambridge University Press, 1992

Spirkl, W., Dynamic System Testing, Program Manual, Version 2.5, In Situ Scientific Software, 1995