MODELO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO ENERGIA SOLAR

Silva A. C. G. C. – castroanasilva@gmail.com
Dutra J. C. C. – charamba@ufpe.br
Henriquez J.R. – rjorge@ufpe.br
Michalewicz J.S. – Jacek@hotlink.com.br
Soares, R. R. – rres@bol.com.br
Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências - Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. *Os sistemas de aquecimento solar de água têm sido amplamente utilizados para uso doméstico em residências, visto que, o uso da energia solar reduz o custo de aquecimento de água e ainda é uma fonte renovável de energia. Todo coletor solar precisa ser caracterizado através de uma equação de desempenho. Para tal deve ser ensaiado, numérica ou experimentalmente para que seja obtida sua curva característica de eficiência em função da temperatura de entrada e radiação solar incidente no coletor. Neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta para simulação numérica de sistemas de aquecimento de água utilizando energia solar, baseado nos modelos apresentados na literatura. O modelo de simulação apresentado neste trabalho permite calcular a radiação solar total incidente no coletor, levando em consideração as características da cobertura, a simulação do desempenho do coletor, e prediz o perfil de temperatura do tanque de acumulação de água quente, considerando perfil de carga térmica a ser suprida, e a temperatura estratificada. O modelo do coletor é composto das equações de balanço de energia para o coletor e equações complementares, como a equação da lei de resfriamento de Newton, as correlações para os coeficientes de convecção, e uma equação para o cálculo da vazão baseado na circulação natural devido ao efeito sifão. A solução do sistema de equações foi obtida através do método de Newton Raphson para funções de várias variáveis. O modelo completo foi validado com dados da literatura. Pelos resultados obtidos, pode-se observar que este se constitui numa ferramenta muito interessante na simulação de sistemas de aquecimento solar.*

Palavras-chave: *Energia Solar, Coletor Solar, Simulação Numérica, Eficiência.*

1 INTRODUÇÃO

As instalações de aquecimento de água por energia solar são uma excelente opção de energia alternativa e desenvolvimento sustentável em tempos em que a energia elétrica convencional está cada vez mais cara e escassa, além de ser totalmente adequada ao clima tropical do nosso país no qual a média anual de energia incidente na maior parte varia entre 4kWh/m2.dia e 5kWh/m2.dia (Tiba (2000)).

No estudo de coletores solares térmicos, o levantamento da curva de eficiência térmica instantânea e dos parâmetros FR($\tau\alpha$) que indica como a energia radiante é absorvida e F_RU_L, que mostra como o coletor perde energia para o meio são de extrema importância para análise de seu desempenho.

Vários trabalhos já foram publicados sobre o estudo do desempenho de coletores solares térmicos. Muitos autores como Saglietti et al., (1998), Costa, (2002), Alvarez, (2004), Soares, et al., (2005), estudaram o desempenho térmico de coletores solares construídos de materiais de baixo custo. Oliveira, et al., (2007), fizeram uma análise matemática de um coletor solar tipo placa plana, baseada na primeira e segunda lei da termodinâmica considerando o conceito de diminuição da geração de entropia, com o objetivo de verificar o seu desempenho termodinâmico. Hassan, et al., (2008), avaliaram o desempenho térmico de um sistema de aquecimento de água formado por um plano integrado de coletores solares do tipo placa plana e um tanque de armazenamento com PCM utilizando simulação numérica empregando o método dos elementos finitos e comparando com resultados de projetos de coletores planos tradicionais. O modelo é capaz de analisar a distribuição da temperatura no fluido e no coletor, as temperaturas no reservatório térmico, bem como, o desempenho do coletor solar sob condições inverno e verão.

Neste trabalho, foi desenvolvida uma ferramenta de simulação numérica que tem por objetivo auxiliar na concepção de projetos de sistemas de aquecimento de água utilizando energia solar. A ferramenta é composta por dois modelos distintos: um modelo para o cálculo da radiação solar, usando a formulação isotrópica, que permite calcular a radiação solar incidente sobre a superfície do coletor em diversos ângulos e em qualquer latitude, ao longo de um ano. O outro modelo é o da simulação do coletor, composto da equação da primeira lei para sistemas com escoamento, em regime permanente, equações de balanço de energia, da equação da condução de calor, e de correlações empíricas para os coeficientes de convecção. A solução do sistema foi resolvida pelo método de Newton Raphson para várias varáveis, acoplado ao método de Gauss. Foram usados dados da literatura para validação dos modelos. Esta ferramenta consegue simular o comportamento do funcionamento de vários parâmetros do coletor, tais como; temperaturas de saída da água, temperatura da placa, vazão devido ao efeito sifão, calor útil, bem como o rendimento do coletor. Esta sendo adicionado, para ser incorporado ao programa computacional em desenvolvimento, mais um modelo, que é de todo o sistema de aquecimento, incluindo o tanque de armazenamento de água quente, com estratificação.

1 MODELO PARA ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR

Vários modelos foram desenvolvidos para calcular a radiação total incidente na superfície de um coletor. Segundo (Duffie e Beckman, 1991), a maior complexidade na obtenção de modelos mais precisos reside na dificuldade de calcular as parcelas de radiação difusa, em especial a radiação difusa circumsolar e a radiação difusa do brilho do horizonte. Entretanto, os mesmos autores afirmam que a utilização do modelo de céu isotrópico, para calcular a radiação solar global em um plano inclinado, voltado para o Norte Geográfico, partindo da radiação solar global no plano horizontal, desenvolvido por Liu & Jordan (1963), pode ser utilizado sem erros consideráveis com relação a modelos mais complexos. Aperfeiçoado por Klein, em 1977 o modelo passou a permitir que se calculasse a radiação solar global em um plano inclinado voltado para qualquer direção.

Neste trabalho é considerado este modelo, onde a radiação solar global é admitida como isotrópica e, em uma superfície inclinada, é composta por três componentes: radiação direta, radiação difusa e a radiação refletida pelo solo (albedo).

Antes de se apresentar o modelo faz-se necessário as seguintes definições:

1.1 Fator geométrico (Rb)

É a razão entre a radiação solar direta sobre uma superfície inclinada e a radiação solar direta sobre um plano horizontal. Segundo (Duffie & Beckman 1991, citando Liu e Jordan 1963), para superfícies no hemisfério sul, inclinadas para o norte e com o ângulo azimutal $\gamma = 180°$, deve ser aplicado a seguinte equação:

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi+\beta)\cos\delta\sin\omega'_s + (\pi/180)\,\omega'_s \sin(\phi+\beta)\sin\delta}{\cos\phi\cos\delta\sin\omega_s + (\pi/180)\,\omega_s \sin\phi\sin\delta} \qquad 1$$

Onde,

Ø – é a latitude local; β – é o ângulo de inclinação da superfície; δ – é o ângulo de declinação; ω's – é o ângulo horário do pôr-do-sol para a superfície inclinada, dado por:

$$\omega'_s = \min\begin{bmatrix} \cos^{-1}(-\tan\phi.\tan\delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\phi+\beta)\tan\delta) \end{bmatrix} \qquad 2$$

Sendo que "min" significa o mínimo valor calculado pelas duas equações acima e os ângulos são medidos em graus.

1.2 Índice de limpidez atmosférica (Kt)

É definido como sendo a relação entre a radiação solar incidente na superfície terrestre e a radiação solar no topo da atmosfera, de acordo com (Duffie e Beckman, 1991), é dado por:

$$K_t = \frac{H}{H_0} \qquad 3$$

1.3 Radiação extraterrestre (H_0)

É a radiação obtida no topo da atmosfera, isto é, incidente numa superfície horizontal fora da presença da atmosfera. De acordo com (Duffie e Beckman, 1991), seu valor diário é calculado, em MJ.m-2, pela seguinte expressão:

$$H_0 = \frac{24*3600*G_{SC}}{\pi}\left(1+0,033\cos\frac{360*n}{365}\right)*\left(\cos j\cos\delta\sin\omega_s + \frac{\pi\omega_s}{180}\sin j\sin\delta\right) \qquad 4$$

Com essas definições pode-se descrever o modelo de Liu e Jordan 1963 citado por Duffie & Beckman, 1991, para estimar a radiação global em uma superfície inclinada como resultante da seguinte equação:

$$\bar{H}_T = \bar{H}\left(1-\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right)\bar{R}_b + \bar{H}_d\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + \bar{H}\rho_g\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \qquad 5$$

A primeira parcela da Eq. (5) representa a radiação direta incidente sobre a superfície, a segunda parcela representa a radiação difusa considerada apenas a isotrópica e a terceira parcela representa a radiação refletida pelo solo.

O termo $\bar{H}_d / \bar{H}$ é função de K_T, calculado pelas relações de Collares-Perreira & Rabl (1979), citados por Duffie & Beckman, 1991, obtidas a partir de uma série de dados experimentais:

Para $\omega_s \leq 81.4^\circ$ e $0.3 \leq \bar{K}_T \leq 0.8$:

$$\frac{\bar{H}_d}{H} = 1.391 - 3.560\bar{K}_T + 4.189\bar{K}_T^2 - 2.137\bar{K}_T^3 \qquad 6$$

Para $\omega_s > 81.4^\circ$ e $0.3 \leq \bar{K}_T \leq 0.8$:

$$\frac{\bar{H}_d}{H} = 1.311 - 3.022\bar{K}_T + 3.427\bar{K}_T^2 - 1.821\bar{K}_T^3 \qquad 7$$

O termo (1+cosβ)/2 é o fator de forma entre o céu e a superfície; o termo (1-cosβ)/2 é o fator de forma entre o solo e a superfície e ρg é a refletividade do solo;

A Figura 1 representa uma curva de intensidade de radiação solar horária incidente sobre uma superfície inclinada para várias declividades, calculada com o modelo aqui apresentado. A simulação foi feita com os dados meteorológicos da cidade de Recife. Esta ferramenta possibilita escolher o ângulo de inclinação ótimo do coletor para uma determinada localidade em um determinado período do ano, em função da radiação média incidente sobre o mesmo.

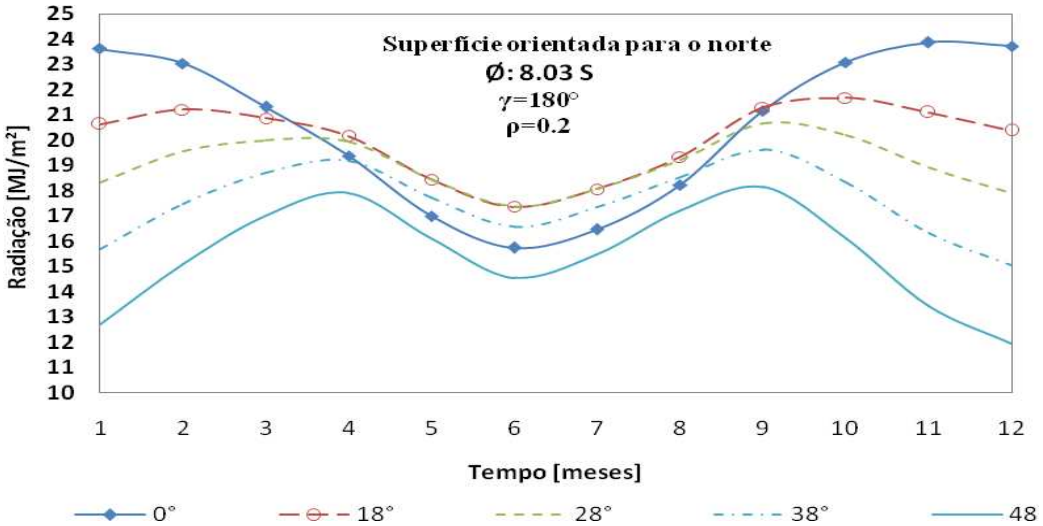

Figura 1 - Radiação solar horária incidente sobre uma superfície inclinada para várias declividades durante o ano, calculada com o modelo aqui apresentado.

Alguns fabricantes determinam que a inclinação ótima do coletor seja igual a latidute + 10°, dessa forma, de acordo com essa equação, para Recife temos: 8.03 + 10 = 18.03°, pela Figura 1 constata-se que 18° é o melhor ângulo de inclinação, pois fornece a maior área sob a curva e consequentemente a maior radiação incidente.

1.4 Estimativa da radiação horária a partir de dados de radiação diária

Outra ferramenta importante incorporada ao modelo consiste nas equações para a estimativa da radiação horária a partir da diária, pois, obter dados de radiação horária incidente sobre a superfície do coletor é muito importante para a análise de seu desempenho. Uma forma de se obter a radiação solar para uma determinada hora do dia a partir de dados de radiação diária média mensal é a partir das relações dadas pela Eq. (8) e Eq. (9), Duffie & Beckman, 1991:

$$r_t = \frac{I}{H} \qquad 8$$

$$r_d = \frac{I_d}{H_d} \qquad 9$$

rt é a razão da radiação total horária com a radiação total diária, chamados diagramas rt, representados pelas expressões de Collares-Pereira e Rabl, citados por Duffie & Beckman, 1991, dado por:

$$r_t = \frac{\pi}{24}(a+b\cos w)\frac{\cos w - \cos w_s}{\sin w_s - \left(\frac{2\pi w_s}{360}\right)\cos w_s} \qquad 10$$

Onde:
a = 0.409 + 0.5016 sin (w_s – 60)
b = 0.6609 – 0.4767 sin (w_s – 60)
Ws é ângulo do por so sol dado por:

$$\omega_s = \cos^{-1}\left(-\tan\phi.\tan\delta\right) \qquad 11$$

rd é razão da radiação difusa horária com a radiação difusa diária, representado pela expressão de Liu e Jordan, citados por Duffie & Beckman, 1991, dado por:

$$r_d = \frac{\pi}{24}\frac{\cos w - \cos w_s}{\sin w_s - \left(\frac{2\pi w_s}{360}\right)\cos w_s} \qquad 12$$

Inserindo os fatores rt e rd pode-se escrever a Eq. (5) para o cálculo da radiação horária:

$$I_T = \left(\left(\bar{H}.r_t\right)-\left(\bar{H}_d.r_d\right)\right).\bar{R}_b + \bar{H}_d.r_d.\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + \bar{H}\rho_g.r_t\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \qquad 13$$

Para simular o desempenho do coletor solar é necessário obter informações sobre a radiação solar absorvida pela placa do coletor. A média da radiação mensal absorvida pela placa é dada pela Eq. (14).

$$\bar{S} = \bar{H}_b.\bar{R}_b.\overline{(\tau\alpha)}_b + \bar{H}_d.\overline{(\tau\alpha)}_d.\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + \bar{H}\rho_g.\overline{(\tau\alpha)}_g\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \qquad 14$$

Onde: H é a radiação média mensal incidente numa superfície horizontal, R_b é a razão entre a radiação direta na superfície inclinada e a radiação direta na superfície horizontal, (τα) é o produto da transmitância da cobertura do coletor e a absortância da placa absorvedora e ρ_d é a refletância difusa da cobertura. Os sub-índices *b*, *d* e *g* representam as componentes da radiação direta, difusa e refletida do solo, respectivamente.

Os termos $(\tau\alpha)_b$, $(\tau\alpha)_d$ e $(\tau\alpha)_g$ são determinados pelas Eqs. (15) e (16).

$$\overline{(\tau\alpha)}_b = \overline{(\tau\alpha)_b}/(\tau\alpha)_n * (\tau\alpha)_n \qquad 15$$

$$\overline{(\tau\alpha)}_d \cong \overline{(\tau\alpha)}_g = \overline{(\tau\alpha)}/(\tau\alpha)_n * (\tau\alpha)_n \qquad 16$$

A Tabela 1 apresenta dados da radiação solar absorvida $\bar{S}$ pela placa de um coletor solar com dupla cobertura de vidro instalado em uma localidade onde a latitude é de 40°N e com 90° de inclinação, gerado com o modelo aqui apresentado.

Tabela 1. Dados de Radiação Média Mensal para um coletor solar com dupla cobertura de vidro instalado a uma latitude de 40°N e 90° de inclinação, gerados com o modelo.

					Radiação Absorvida (MJ/m^2)				
Mês	H_m	KT_m	HT_m	$(\tau\alpha)_{bm}$	Beam	Diffuse	Gr. Refl.	S_m	$(\tau\alpha)_m$
Jan	6,63	0,44	10,84	0,72	6,01	0,93	0,61	**7,56**	0,70
Fev	9,77	0,48	12,59	0,69	6,36	1,25	0,90	**8,51**	0,68
Mar	12,97	0,47	11,65	0,63	4,22	1,82	1,20	**7,23**	0,62
Abr	17,20	0,50	11,03	0,51	2,40	2,29	1,59	**6,28**	0,57
Mai	21,17	0,53	10,59	0,38	1,21	2,59	1,95	**5,76**	0,54
Jun	23,80	0,57	10,52	0,26	0,68	2,67	2,20	**5,55**	0,53
Jul	23,36	0,57	10,79	0,27	0,85	2,59	2,16	**5,59**	0,52
Ago	20,50	0,56	11,69	0,44	2,10	2,35	1,89	**6,34**	0,54
Set	16,50	0,55	13,18	0,59	4,44	1,94	1,52	**7,90**	0,60
Out	12,13	0,54	14,23	0,67	6,75	1,47	1,12	**9,33**	0,66
Nov	7,68	0,47	12,09	0,72	6,67	1,00	0,71	**8,38**	0,69
Dez	5,57	0,40	9,46	0,72	5,23	0,85	0,51	**6,59**	0,70

Os dados da Tabela 1 foram comparados com os dados gerados por Duffie & Beckman, (1991) apresentados na Figura 2 para as mesmas condições. Alguns valores como as parcelas da radiação direta, difusa, refletida do solo, da radiação solar absorvida e do produto transmitância/absortância média apresentaram diferenças entre os resultados gerados com o modelo e os apresentados por Duffie & Beckman, (1991). Isto pode ser justificado devido a valores arredondados durante a simulação.

					Absorbed Radiation, MJ/m^2				
Month	$\bar{H}$	$\bar{K}_T$	$\bar{H}_T$	$(\overline{\tau\alpha})_b$	Beam	Diffuse	Gr. Refl.	$\bar{S}$	$(\overline{\tau\alpha})$
Jan.	6.63	0.44	10.84	0.72	6.03	0.95	0.62	7.60	0.70
Feb.	9.77	0.48	12.59	0.69	6.28	1.27	0.92	8.47	0.67
Mar.	12.97	0.47	11.65	0.63	4.25	1.85	1.22	7.32	0.63
Apr.	17.20	0.50	11.03	0.51	2.41	2.33	1.62	6.36	0.58
May	21.17	0.53	10.59	0.38	1.22	2.64	1.99	5.84	0.55
June	23.80	0.57	10.52	0.26	0.68	2.72	2.23	5.63	0.54
July	23.36	0.57	10.79	0.27	0.83	2.64	2.19	5.66	0.53
Aug.	20.50	0.56	11.69	0.44	2.11	2.39	1.92	6.42	0.55
Sep.	16.50	0.55	13.18	0.59	4.45	1.98	1.55	7.98	0.61
Oct.	12.13	0.54	14.23	0.67	6.72	1.49	1.14	9.35	0.66
Nov.	7.68	0.47	12.09	0.72	6.70	1.02	0.72	8.44	0.70
Dec.	5.57	0.40	9.46	0.72	5.22	0.86	0.52	6.61	0.70

Figura 2 – Tabela de dados de Radiação Média Mensal para um coletor solar com dupla cobertura de vidro instalado a uma latitude de 40°N e 90° de inclinação, Duffie & Beckman, (1991).

Comparando os dados da Tabela 1 com os da Figura 2, pode-se observar que o programa desenvolvido com as equações da literatura reproduz os mesmos dados gerados por outras ferramentas computacionais. Falta agora a comparação deste modelo com outras ferramentas computacionais, como o método *f-chart* , por exemplo, apresentados na literatura

2 MODELO DE SIMULAÇÃO DO COLETOR

O modelo foi desenvolvido fazendo balanços de energia no coletor. A Figura 3 mostra o volume de controle aplicado à placa coletora usado num dos balanços de energia apresentado nas Eqs. (17), (18) e (19).

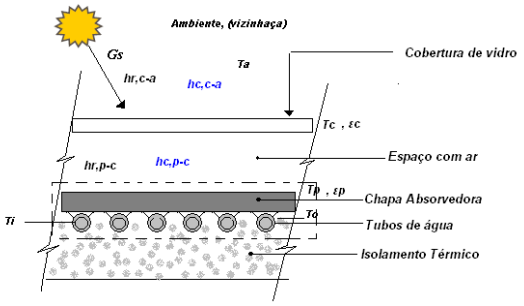

Figura 3 - Desenho esquemático do balanço de energia da superfície absorvedora.

2.1 Balanço de Energia na Placa Coletora

$$q_u = G_{ab} - q_{conv} - q_{rad} \quad 17$$

$$q_u = (\alpha\tau) G_T.A - h_{c,pc}.A.\left(T_p - T_c\right) - h_{r,pc}.A.(T_p - T_c) \quad 18$$

$$\frac{q_u}{A} = (\alpha\tau) G_T - \left(h_{c,pc} + h_{r,pc}\right).\left(T_p - T_c\right) \quad 19$$

Onde:
q_u é calor útil do coletor; G_{ab} é a radiação solar que chega a superfície do coletor; q_{conv} é o calor de convecção, q_{rad} é o calor de radiação, $\tau\alpha$ é o produto da transmitância e absortância, G_T é a radiação solar instantânea incidente sobre a placa, A é área bruta do coletor, T_p é a temperatura da placa absorvedora, T_c é a temperatura da cobertura, h é usado para os coeficientes de transferência de calor, e os sub-índices *c,pc e r,pc,* significam convecção da placa para a cobertura e radiação da placa para a cobertura respectivamente.

Os coeficientes de convecção e radiação entre a placa absorvedora e a cobertura foram obtidos com as seguintes correlações:

$$h_{c,pc} = ((Nuc * k) / L_e) \quad 20$$

Onde:
k é a condutividade térmica do ar e Le é distância entre a placa e cobertura.

O numero de Nusselt para a convecção entre a placa coletora e a cobertura de vidro foi calculado a partir da seguinte equação, Duffie & Beckman, (1991):

$$Nuc = 1 + 1,44.\left[1 - \frac{1708 * (\sin 1,8\beta)^{1.6}}{Ra * \cos\beta}\right].\left[1 - \frac{1708}{Ra * \cos\beta}\right]^{+} + \left[\left(\frac{Ra * \cos\beta}{5830}\right)^{1/3} - 1\right]^{+} \quad 21$$

Onde, Ra é o número de Rayleigh.

$$h_{r,pc} = (\sigma * ((T_p^2) + (T_C^2)) * (T_C + T_P) / ((1/\varepsilon_p) + (1/\varepsilon_c) - 1)) \quad 22$$

Onde hr,p-c é uma linearização do termo de radiação das Eq. (18 e 19), σ é a Constante de Stefan-Bolztman, ε_p e ε_c são a emissividade da placa absorvedora e do vidro respectivamente.

2.2 Balanço de Energia no coletor

O balanço feito em todo o coletor proporciona a obtenção da Eq. (25)

$$q_u = G_{ab}A - q_{conv} - q_{rad} \quad 23$$

$$q_u = (\alpha\tau).G_T.A - h_\infty.A.\left(T_c - T_\infty\right) - h_{r,ca}.A.(T_c - T_{viz}) \quad 24$$

$$\frac{q_u}{A} = (\alpha\tau).G_T - h_\infty.\left(T_c - T_\infty\right) - h_{r,ca}.\left(T_c - T_{viz}\right) \quad 25$$

Onde:
Os sub-índices ∞ significa infinito, *c* cobertura, *r,ca* radiação da placa para cobertura e *viz* vizinhança.

Os coeficientes de convecção e radiação entre a cobertura e o ar foram obtidos conforme as equações a seguir:

$$h_\infty = \frac{8.6 * V^{0.6}}{L^{0.4}} \quad 26$$

$$h_{r,ca} = (0.881 * \sigma * ((T_C^2) + (T_\infty^2)) * (T_C + T_\infty)) \quad 27$$

Onde, V é a é a velocidade de vento em m/s e e L é o comprimento característico em m que é a raiz cúbica do volume sob o coletor.

2.3 Calor recebido pelo fluido

$$q_u = \dot{m}.C_p.\left(T_o - T_i\right) \quad 28$$

Onde, os sub-índices *o* e *i* representan a saída e entrada respectivamente.

2.4 Transferência pelo coletor para a água

$$q_u = U.A.\Delta T \quad 29$$

$$q_u = U.A.\left(T_p - \left(T_o + T_i\right)/2\right) \quad 30$$

onde:

$$U = \left(1/\left(1/h_{fi}\right)\right) \quad 31$$

No cálculo de U foi desprezada a resistência de condução da parede do tubo.

O coeficiente convecção natural para o fluido no interior dos tubos do coletor é dado por:

$$h_{fi} = Nu * K / di \quad 32$$

Onde, K é a condutividade térmica da água, di é o diâmetro interno do tubo e Nu é o número de Nusselt dado pela seguinte equação, Duffie & Beckman, (1991):

$$Nu = Nu\infty + \frac{a\left(Re.Pr.D_h/L\right)^m}{1+b\left(Re.Pr.D_h/L\right)^n} \quad 33$$

Onde, Re é o número de Reynolds, Pr é o número de Prandlt, Dh é o diâmetro hidráulico e L é o comprimento dos tubos.

As constantes a, b, m e n são dadas pela Tabela 2:

Tabela 2. Constantes para a Eq. (33). Duffie & Beckman, (1991):

Número de Prandtl	a	b	m	n
0.7	0.00398	0.0114	1.66	1.12
10	0.00236	0.00857	1.66	1.13
∞	0.00172	0.00281	1.66	1.29
	Nu_∞=4.4			

Após o balanço de energia foi montado o sistema de equações não lineares, conforme a seguir:

$$q_u - \dot{m}.C_p.\left(T_o - T_i\right) = 0 \quad 34$$

$$q_u - A.\left((\alpha\tau).G_T - \left(h_{c,pc} + h_{r,pc}\right).\left(T_p - T_c\right)\right) = 0 \quad 35$$

$$q_u - A.\left((\alpha\tau).G_T - h_\infty.\left(T_c - T_\infty\right) - h_{r,ca}.\left(T_c - T_{viz}\right)\right) = 0 \quad 36$$

$$q_u - U.A.\left(T_p - \left(T_o + T_i\right)/2\right) = 0 \quad 37$$

A Eq. (38) para cálculo da vazão foi apresentado por Zerrouki (2002), completa o modelo. Esta foi obtida através de um balanço de forças para um elemento de fluido escoando na tubulação do coletor, devido ao efeito sifão. Esse efeito aparece quando a força de empucho, que aparece devido à variação de densidade causada pela diferença de temperatura da água na entrada e saída do coletor, é maior que o atrito de toda a tubulação e o peso da água entre a entrada do coletor e a entrada no tanque de acumulação de água quente.

devido ao efeito sifão, citada por Zerrouki (2002), completa o modelo.

$$\dot{m} = \frac{((\rho.g.\beta_1).(T_o - T_i)).((L_c.\sin(\beta))/2 + H)}{(128.\nu.L_c.(1+\varphi))/(\pi.N_t.d_c^4)} \qquad 38$$

Onde,

ρ é a densidade da água, g é aceleração da gravidade, L_c é o comprimento do coletor [m], β é o angulo de inclinação do coletor, β1 é o coeficiente de expansão volumétrica, H é a altura do tanque, Nt é números de tubos , dc é o diámetro dos tubos, e φ é dado pela relação abaixo:

$$\varphi = (Nt*(Lc/Lct))*((dc/dct)^4) \qquad 39$$

A versão final do modelo de simulação de sistemas de aquecimento solar, poderá simular o coletor com escoamento natural ou forçado, através do uso de bombas. Será feito um estudo comparativo entre o uso de ambas as possibilidades.

A solução do conjunto de equações do modelo foi obtida através do método de Newton Raphson para várias variáveis, associado a um método de substituição de Gauss para a solução do sistema algébrico. Vale salientar, que a temperatura calculada da placa coletora com esse modelo simplificado é um valor médio aproximado. Na versão final desse trabalho será colocado o modelo mais completo.

3 VALIDAÇÃO DO MODELO DO COLETOR

3.1 Através do Gráfico do Fator de Fluxo

O fator de fluxo e outros parâmetros, importantes na caracterização experimental de um coletor solar são definidos em função de balanços de energia em relação à placa coletora e aos tubos. Ao se analisar a distribuição de calor por condução na placa coletora, percebe-se que a temperatura na placa coletora não é constante. Ela varia entre os tubos e na direção axial dos tubos. Entre dois tubos é possível entender que a temperatura é máxima no meio deles, e máxima na parede dos tubos. Baseado nesse fato a placa entre os tubos foi tratada como uma aleta. Foi feito um balanço de energia num volume de controle colocado numa parte dessa região entre os tubos, e a na solução analítica foi calculado o calor útil que chegava a um tubo localmente. Na equação do calor útil local apareceu a eficiência da aleta multiplicando o balanço de calor.

$$F = \frac{\tanh\left[m(W-D)/2\right]}{m(W-D)/2} \qquad 40$$

Onde, F é a eficiência padrão da aleta para aletas retas com perfil retangular.

Do cálculo do calor útil por unidade de comprimento obtido pela pelas parcelas de calor que chega por condução e por radiação num tubo e igualando ao calor recebido pela água em função das resistências de condução do tubo e da resistência de convecção, aparece o fator o F'. F' é definido por (Duffie e Beckman, 1991), como sendo o fator da eficiência do coletor que representa a relação do ganho real da energia útil ao ganho útil que resultaria se a superfície absorvente do coletor estivesse na temperatura fluida local, dada por:

$$F' = \frac{1/U_L}{W\left[\frac{1}{U_L\left[D+(W-D)F\right]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}}\right]} \qquad 41$$

Onde UL é o coeficiente global das resistências térmicas entre a placa coletora e o ar

Outro parâmetro importante na caracterização do coletor, aparece da relação entre o calor útil calculado pela equação de projeto do coletor, baseado na temperatura de entrada do fluido e do ambiente, e do calor útil calculado pela Eq. (42) , é o fator de remoção FR.

F_R é o fator da remoção do calor do coletor, e é entendido como sendo o fator da eficiência do coletor que representa a relação do ganho real da energia útil ao ganho útil que resultaria se a superfície absorvente do coletor estivesse na temperatura fluida local, (Duffie e Beckman, 1991):

$$F_R = \frac{\dot{m}.C_p\left(T_0 - T_i\right)}{A_c.\left[S - U_L.\left(T_i - T_a\right)\right]} \qquad 42$$

Da equação diferencial do balanço de energia num tubo, que permite uma equação para cálculo da temperatura de saída em função do coeficiente global , do fator de eficiência e da vazão, obtém-se o fator de remoção na forma da equação abaixo:

$$F_R = \frac{\dot{m}.C_p}{A_c.U_L}.\left[1 - \exp\left(\frac{A_c.U_L.F'}{\dot{m}.C_p}\right)\right] \qquad 43$$

O fator de remoção é um fator importante na caracterização dos coletores, e permite inferir o que acontece com a temperatura de saída da água através da variação da vazão. Por este motivo que os dados gerados pelo modelo, deste trabalho, serão também comparados através dos parâmetros F', FR e F".

Na Figura 4, vê-se qual deve ser o comportamento desses fatores em função da variação da vazão, e que com os dados gerados pelo modelo, obteve-se valores para F', FR e F", que plotados no gráficos do Fator de Fluxo do Coletor F" x m.Cp/Ac.UL.F' apresentado por Duffie & Beckman (1991) mostram a mesma tendência.

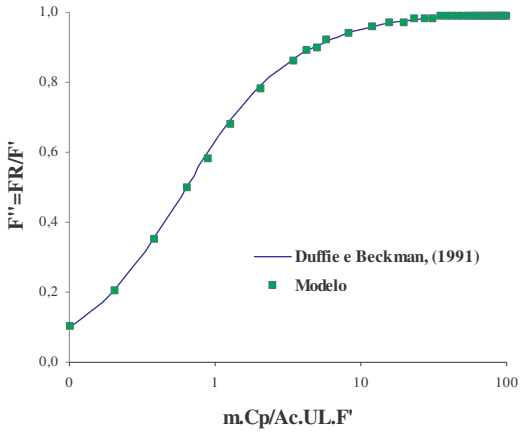

Figura 4 - Gráfico Fator de Fluxo do Coletor

3.2 Através do Gráfico da Eficiência.

O modelo foi validado com dados da literatura, fazendo-se uma simulação computacional com os dados obtidos experimentalmente de um coletor solar, publicado no Solar Collector Test Report, Report No. 06-08-9133-1o da ENERWORKS Inc. (2006).

Comparando os resultados publicados pela EnerWorks com os dados simulados foi possível avaliar o modelo matemático proposto e também o programa computacional elaborado. A forma de comparação entre o modelo e os dados experimentais da fonte supracitada foi através do gráfico da eficiência instantânea, na forma apresentada em Duffie e Beckman, (1991).

Por definição a eficiência instantânea é dada pela Eq. (44), que representa a relação entre o calor útil e a radiação que chega ao coletor.

$$\eta = \frac{q_u}{A_c.G_T} = \frac{\dot{m}.C_p.\left(T_o - T_i\right)}{A_c.G_T} \qquad 44$$

A eficiência instantânea na forma apresentada por Duffie e Beckman (1991), o calor útil é explicitado como o valor líquido entre a radiação absorvida pela placa do coletor subtraída da perda de calor por convecção e radiação para o exterior:

$$q_u = A.F_R \left(G_T(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)\right) = 0 \qquad 45$$

Onde G_T é a radiação total instantânea incidente, FR é o fator de remoção de calor do coletor, $(\tau\alpha)$ é o produto da transmitância do vidro, pela absortância da placa coletora, UL é o coeficiente global que inclui as resistências de radiação, convecção e condução, Ti é a temperatura de entrada da água, e Ta é a temperatura ambiente.

O efeito do multiplicador FR é reduzir o ganho de energia útil que teria tido pela placa absorvedora inteira do coletor estando na temperatura do fluido de entrada, ao que ocorre realmente, Duffe e Duffie e Beckman (1991).

Observando-se o gráfico da Figura 5 pode-se constatar que a curva da eficiência simulada pelo programa tem comportamento similar a curva apresentada no relatório da EnerWorks, os coeficientes $FR(\tau\alpha)$ e FRUL foram obtidos da equação da curva plotada com os dados gerados pelo modelo, através de uma regressão linear. Comparativamente, valores de $FR(\tau\alpha)$ e F_RUL foram praticamente iguais. Isto significa que o modelo, ainda bastante simplificado, foi capaz de prever tanto o rendimento máximo do coletor testado, quanto sua temperatura de estagnação.

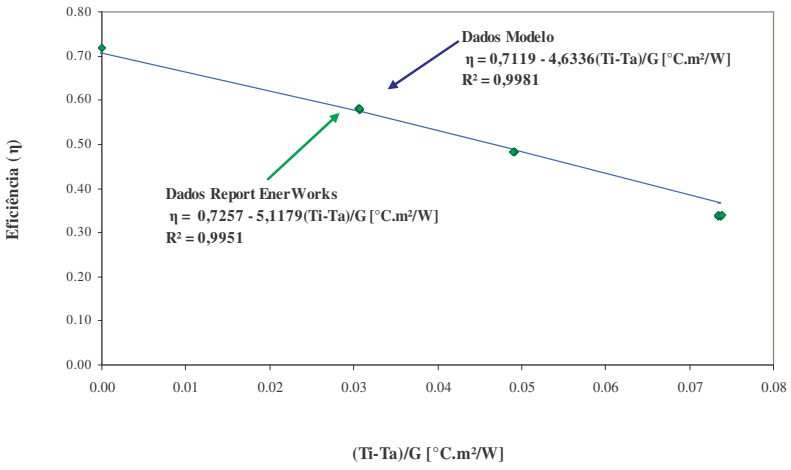

Figura 5 - Gráfico comparativo da Eficiência do Report Enerworks x Simulação.

3.3 Através das Temperaturas de Entrada e Saída da Água.

Na Figura 6, foi feita uma comparação das temperaturas de entrada versus as temperaturas de saída da água com os dados apresentados pela Enerworks e os dados gerados pelo programa, comprovando que o modelo é capaz de simular corretamente as temperaturas de saída da água.

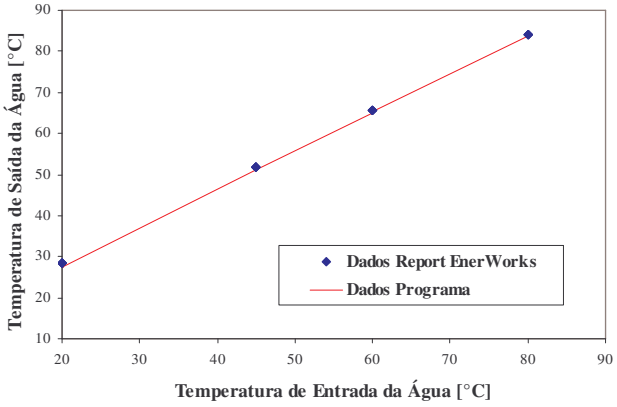

Figura 6 - Gráfico comparativo Temperatura de Entrada da Água x Temperatura de Saída da Água.

3.4 Resultados e Discussões

O modelo matemático do coletor representa uma ferramenta de simulação numérica com a qual é possível calcular as temperaturas da placa absorvedora e da cobertura de vidro, o coeficiente global de perda de calor, o fator de eficiência, o fator de fluxo, o fator de remoção de calor, bem como, o rendimento do coletor.

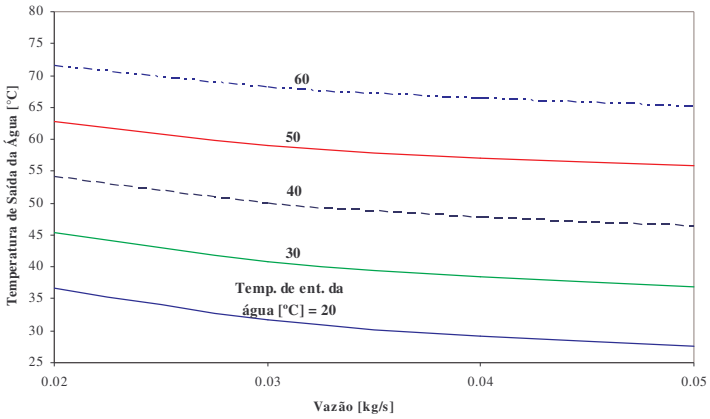

Figura 7 - Gráfico das temperaturas de saída da água em função das vazões, gerado pelo modelo.

Na Figura 7, são apresentados valores simulados para as temperaturas de saída da água em função das vazões para várias temperaturas de entrada.

Com este modelo, pode-se simular também o efeito da variação de vazão no rendimento térmico do coletor para diversas temperaturas de entrada de água, Figura 8.

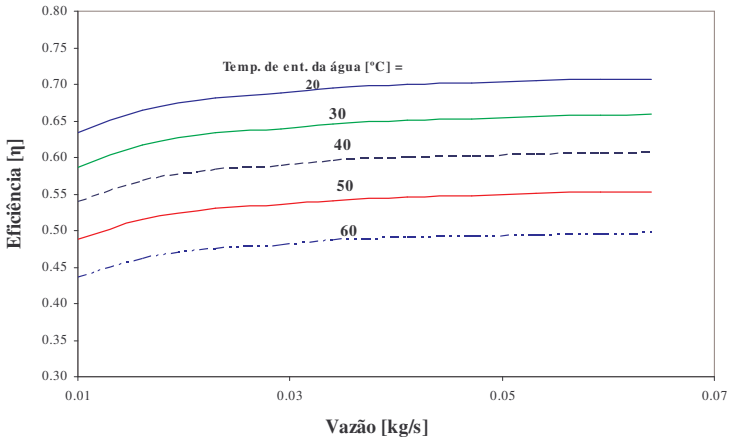

Figura 8- Gráfico eficiência x vazão gerado pelo modelo

Um fator importante na análise da eficiência térmica de coletores solares é a absorvidade (α) do material da placa coletora, com o modelo podemos analisar como se comporta a eficiência em função de α para várias temperaturas de entrada de água conforme Figura 9. Para a geração destes dados foi considerada a transmitância igual a um.

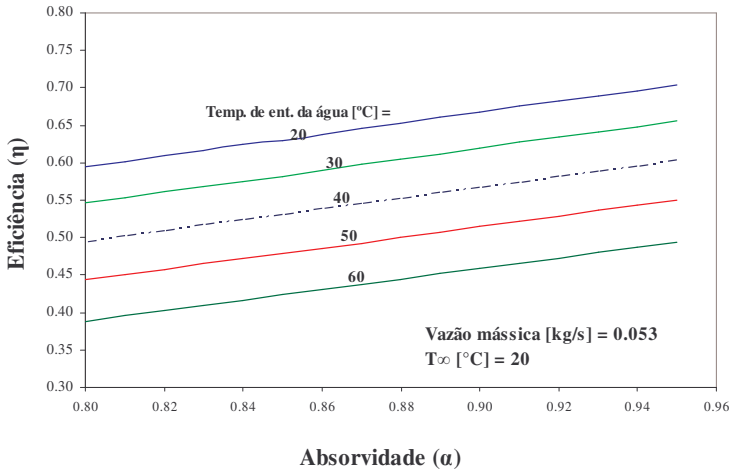

Figura 9 - Gráfico eficiência x absorvidade gerado pelo modelo

4 CONCLUSÕES DO TRABALHO

O modelo desenvolvido neste trabalho caracteriza-se como uma ferramenta de simulação numérica capaz de auxiliar na concepção de projetos de sistemas de aquecimento de água utilizando energia solar. Com ele é possível estudar a radiação solar incidente, o desempenho térmico de sistemas de aquecimento solar de água utilizando coletores de placa plana, variando-se parâmetros construtivos, materiais da cobertura com diferentes propriedades óticas, e até mesmo mais de uma cobertura. O modelo mostrou-se como um instrumento muito bom para simulação de coletores, incluindo a variação da circulação natural em função da perda de carga, e da altura do reservatório. Com o modelo é possível calcular as temperaturas da placa absorvedora e da cobertura de vidro, e obter parâmetros consagrados no cálculo da eficiência, como: o fator de eficiência, o fator de fluxo e o fator de remoção de calor de coletores solares de placa plana. A inclusão do modelo de estimativa da radiação solar incidente, dada sua posição geográfica, mostrou-se importante na busca da inclinação ótima do coletor. Para a ferramenta de simulação ficar completa está sendo adicionando ao trabalho mais um modelo para a simulação do tanque de armazenamento com estratificação.

5 REFERÊNCIAS

Alvarez G.; Arce J.; Lira L.; Heras M.R., 2004, Thermal performance of an air solar collector with an absorber plate made of recyclable aluminum cans, Solar Energy 77 (2004) 107–113.

Costa, E. R., 2002, Limitações no uso de coletores solares sem cobertura para sistemas domésticos de aquecimento de água. Dissertação de mestrado. PROMEC/UFRGS. Porto Alegre.

Duffie, J.A.; Beckman, W.A., 1991, Solar engineering of thermal processes. 2 Ed. New York: John Wiley & Sons.

EnerWorks Inc., 2006, Solar Collector Test Report, Report No. 06-08-9133-1, disponível em: www.enerworks.com/Pdf/Residential_Product_PDF/SRCC%20Residential%20July%202006%2006-08-9133-1.pdf. Acesssado em 10/12/2007.

Hassan M. M., Beliveau Y., 2008. Modeling of an integrated solar system. Building and Environment, v. 43, p. 804–810.

Holman, Jack Philip. Transferência de calor. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1983.

Oliveira, S. D. R.; Oliveira, S. D. R.; Marchi Neto, I.; Padilha, A.; Scalon, V. L., 2007, Análise matemática de coletor solar tipo placa plana utilizando a segunda lei da termodinâmica, 8º Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica, Cusco.

Saglietti, J. R. C; Escobedo, J. F.; Silva, L. A., 1998, Coletor Solar de Polietileno - uma alternativa de baixo custo, Eng. Agríc., Jaboticabal, v.17, n.1, p.32-43.

Soares, G.; Pimenta, J., 2005, Projeto e Simulação de um Coletor Solar Plano Inflável, VIII Congresso Iberoamericano de Aire Acondicionado, Calefacción y Refrigeración, 2005, Montevideu,.

Tiba, C., 2000, Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres. Recife: Editora Universitária da UFPE.

Zerrouki A., Boume´dien A., Bouhadef K., 2002.The natural circulation solar water heater model with linear temperature distribution. Renewable Energy v. 26, p. 549–559,

SIMULATION NUMÉRICA MODEL FOR HEATING SYSTEMS OF WATER USING SOLAR ENERGY

Abstract. *The solar systems of water heating would be widely used in Brazil for domestic use, since the use of sola energy reduces the cost of water heating and it is natural source energy. All solar Collectors must to be characterized through a performance equation. This equation can be finding by the numerical or experimental approach. It can predict the collector's performance as a function of the entering water temperature and total solar radiation received by the collector. In this work, is presented a computational tool to simulate solar water heating system, based in the models presented in literature. This model allows calculating total incident sunlight entering the aperture of the collector, taking in consideration the local latitude, the collector slope and the characteristics of glass covers. It can predict the collector temperature distribution for the hot water storage tank, considering the estimated thermal load to be supplied. The model of the collector is composed for a system of equations, like the energy balance equations, the Newton's cooling law equation, the correlations for the convection coefficients, and an equation for the calculation of water outflow based on the natural circulation with thermo siphon effect. The mathematical model of the collector was solved by the multidimensional version of the Newton Raphson method, coupled to Gauss method* to linear algebraic systems. *The complete model was validated with data of literature.*

Key words*: Solar Energy, Solar collector, numerical simulation, performance*