

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM COLETOR SOLAR DE PLACA PLANA

João Vitor de Navarro Moreira – joaovitornavarro@gmail.com

Matheus Pereira Porto – matheusporto@ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Cristiana Brasil Maia – cristiana@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. Este trabalho apresenta uma análise teórica de um coletor solar de placa plana. O objetivo é investigar a influência do ângulo de inclinação no desempenho térmico do equipamento. O software EES (Equation Engineering Solver) foi utilizado para simular um ano de operação para uma dada localidade. O modelo matemático desenvolvido foi referenciado em Duffie e Beckman (2013). Os resultados mostraram que o ângulo ótimo de inclinação, isto é, o ângulo que produz a maior eficiência média anual é aproximadamente igual a latitude do local. Este resultado corrobora com a literatura, na qual é indicado o ângulo de inclinação que produz a maior radiação incidente anual. No entanto, os resultados da simulação para os meses de inverno obtiveram valores diferentes de ângulos ótimos de inclinação em termos de eficiência e de radiação incidente, sugerindo que outras variáveis sazonais têm influência direta no desempenho térmico de um coletor solar de placa plana.

Palavras-chave: coletor solar de placa plana, eficiência, sazonalidade.

1. INTRODUÇÃO

O coletor solar é um tipo especial de trocador de calor que converte radiação solar em calor. O coletor solar de placa plana é o tipo de coletor solar mais amplamente utilizado. É um equipamento desenvolvido para aplicações que requerem um aumento moderado de temperatura de até 100 °C além da temperatura ambiente. Este equipamento é utilizado para aquecimento de água, aquecimento de ambientes, condicionamento de ar e em processos industriais que demandam calor. A Fig. 1 mostra um coletor solar de placa plana, indicando os principais componentes.

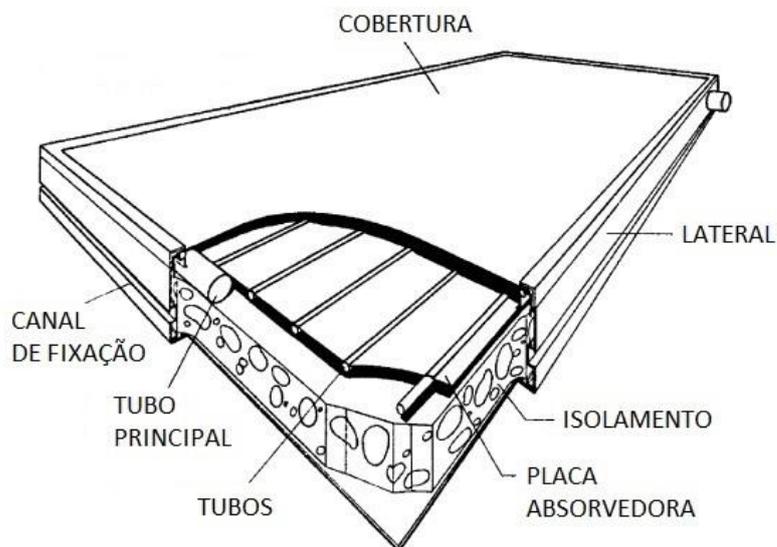


Figura 1 – Os principais componentes de um coletor solar de placa plana. Extraído de Kalogirou (2004) e adaptado.

Os coletores solares de placa plana são usualmente instalados em uma dada posição fixa. Obviamente, o equipamento é posicionado orientado na direção da linha latitudinal do Equador para obter um maior aproveitamento da energia do sol ao longo do ano. E, para maximizar o desempenho do sistema, o ângulo de inclinação do equipamento é ajustado para um valor ótimo que produzirá a maior radiação incidente anual ou sazonal, de modo a favorecer o inverno, quando é demandado uma maior quantidade de calor para aquecimento da água ao passo que a radiação solar média diária é menor.

Vários trabalhos foram realizados com objetivo de calcular o ângulo ótimo de inclinação do coletor solar baseados na posição do sol e no seu movimento ao longo do ano. Yakup and Malik (2001), Gunerham and Hepbasli (2007) e Skeiker (2009) calculam, para diferentes localidades, o ângulo ótimo de inclinação para cada mês do ano de modo a maximizar a radiação incidente. Duffie e Beckman (2013) mostra, para uma localidade de 45° N, que a máxima radiação incidente no plano do coletor é obtida com um ângulo de inclinação igual a latitude do local. Duffie e Beckman (2013) também mostra que o ângulo acrescido de 15 graus produz a máxima radiação incidente nos meses de inverno. Kalogirou (2004) mostra que o ângulo ótimo de inclinação do equipamento para tal estação do ano é igual a latitude local acrescida de 10 a 15 graus.

Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo matemático referenciado em Duffie e Beckman (2013), aplicado para cidade de Belo Horizonte (20°S), com objetivo de determinar o ângulo de inclinação do coletor solar que produzirá a máxima eficiência média, não limitado ao ângulo de inclinação do equipamento que produzirá a máxima radiação incidente.

2. MODELO MATEMÁTICO

A eficiência (η) é razão entre calor útil (Q_u) e radiação incidente total ($I_t A_c$), dado pela Eq. (1).

$$\eta = \frac{Q_u}{I_t A_c} \quad (1)$$

O modelo matemático para calcular a eficiência do coletor solar de placa plana é baseado em um balanço de energia que iguala radiação incidente, calor útil, perdas térmicas e perdas óticas. O calor útil é igual a radiação absorvida menos as perdas térmicas. As perdas térmicas são calculadas por modelos de transferência de calor por convecção e radiação pelo topo e por condução pela base e pelas laterais (seção 2.1). A radiação absorvida é igual a radiação incidente menos as perdas óticas, calculadas baseadas nas propriedades óticas de absorvância, transmitância e refletância (seção 2.3). Por fim, a radiação incidente é estimada para a localidade baseado em modelos e correlações referenciados na literatura (seção 2.3). A Fig. 2 ilustra o balanço de energia descrito anteriormente.

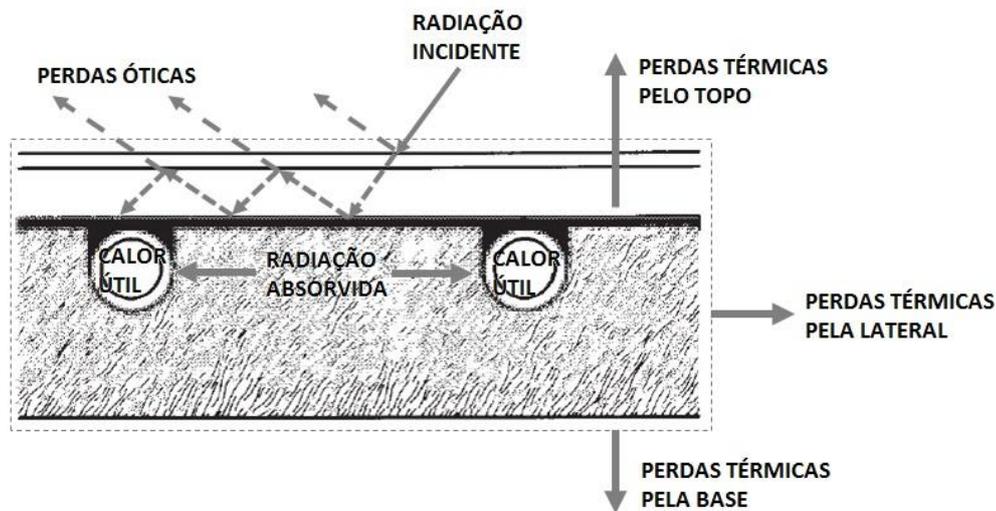


Figura 2 – Balanço de energia de um coletor solar de placa plana. Extraído de Duffie and Beckman (2013) e adaptado.

2.1 Cálculo do calor útil usando fator de remoção

O calor útil (Q_u) é calculado pela radiação absorvida (S) usando o fator de remoção (F_R), como mostrado na Eq. (2). F_R relaciona o real ganho de energia com o ganho de energia se toda a superfície do coletor estivesse na temperatura de entrada do fluido de trabalho. Esse método é aplicado para calcular o calor útil em função da temperatura de entrada (T_i), uma variável mensurável, ao invés da temperatura da placa (T_p), uma variável não mensurável. T_o é temperatura ambiente, U_L é o coeficiente global de perda de calor e A_c é a área do coletor solar.

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_p - T_o)] = A_c F_R [S - U_L (T_i - T_o)] \quad (2)$$

O fator de remoção é dado pela Eq. (3). F' é fator de eficiência, dado pela Eq. (4). F é eficiência média de aletas retas, dado pela Eq. (5).

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m} C_p}\right) \right] \quad (3)$$

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left(\frac{1}{U_L [D_o + (W - D_o) F]} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right)} \quad (4)$$

$$F = \frac{\tanh[m(W - D_o)/2]}{m(W - D_o)/2} \text{ onde } m = \sqrt{\frac{U_L}{k_p d}} \quad (5)$$

\dot{m} é a vazão mássica, igual 0,01 kg/s e C_p é o calor específico da água, igual 4,180 kJ/kg-K. h_{fi} é o coeficiente convectivo de transferência de calor dentro dos tubos, igual 200 W/m²-K para um tubo de cobre de seção transversal circular. D_o e D_i são os diâmetros externo e interno, W é a distância entre os tubos e d é a espessura da placa. k_p é a condutividade térmica da placa absorvedora, igual 385 W/m-K para o cobre.

O coeficiente global de perda de calor (U_L) é igual à soma dos coeficientes de perda de calor pelo topo (U_t), pela base (U_b) e pelas laterais (U_e). U_t é devido transferência de calor por convecção e radiação entre placa e cobertura e entre cobertura e ambiente, dado pelas Eq. (6), Eq. (7), Eq. (8) e Eq. (9). U_b e U_e são devidos transferência de calor por condução através da base e das laterais, dado pelas Eq. (10) e Eq. (11).

$$U_t = \left[\frac{N}{\frac{C}{T_p} \left(\frac{T_p - T_o}{N + f} \right)^e + \frac{1}{h_w}} \right]^{-1} + \frac{\sigma(T_p + T_o)(T_p^2 + T_o^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p + 0,00591N h_w} + \frac{2N + f - 1 + 0,133\varepsilon_p}{\varepsilon_c} - N} \quad (6)$$

$$e = 0,430 \left(1 - \frac{100}{T_p} \right) \quad (7)$$

$$f = (1 + 0,089h_w - 0,1166h_w \varepsilon_p)(1 + 0,07866N) \quad (8)$$

$$C = \begin{cases} 520(1 - 0,000051\beta^2) & \text{se } 0^\circ < \beta \leq 70^\circ \\ 390 & \text{se } 70^\circ < \beta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (9)$$

$$U_b = \frac{k}{L_{back}} \quad (10)$$

$$U_b = \frac{k}{L_{isolamento}} \frac{2(L_{largura} + L_{comprimento})L_{espessura}}{A_c} \quad (11)$$

β é o ângulo de inclinação. T_p é a temperatura média da placa e T_o é a temperatura ambiente. σ é a constante de Stefan-Boltzmann. N é o número de coberturas. ε_c é a emitância da cobertura, igual 0,88. ε_p é a emitância da placa, igual 0,95. h_w é o coeficiente convectivo de troca de calor com o vento, calculado em função da velocidade do vento, de acordo com equações empíricas (Sparrow et al., 1979) e limitado ao valor mínimo de 5,0 W/m²-K (Duffie and Beckman, 2013). k é a condutividade térmica do material isolante, igual 0,085 W/m-K para a fibra de vidro.

2.2 Cálculo da radiação absorvida usando o produto transmitância-absorbância

A radiação absorvida (S) é calculada a partir da radiação incidente (I), dada pela Eq. (12). Os subscritos “b”, “d” e “g” referem-se as componentes direta, difusa e refletida pelo solo.

$$S = I_b R_b (\tau\alpha)_b + I_d (\tau\alpha)_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + \rho_g I (\tau\alpha)_g \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad (12)$$

$\tau\alpha$ é um cálculo indireto das perdas óticas, chamado produto transmitância-absorbância, dado pela Eq. (13). ρ é a refletância do solo, τ é a transmitância da cobertura e α é a absorbância da placa absorvedora.

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho} \quad (13)$$

A absorvância é dada pela Eq. (14), referenciado em Beckman et al. (1977), onde α_n é igual 0,90 para as superfícies de alta absorvância tais como as pinturas seletivas aplicadas.

$$\frac{\alpha}{\alpha_n} = 1 - 1,588E^{-3}\theta + 2,731E^{-4}\theta^2 - 2,303E^{-5}\theta^3 + 9,024E^{-7}\theta^4 - 1,800E^{-8}\theta^5 + 1,773E^{-10}\theta^6 - 6,994E^{-13}\theta^7 \quad (14)$$

A transmitância é calculada a partir das propriedades óticas do vidro em função de τ_a e τ_r , dadas pelas Eq. (15) e Eq. (16). τ_r é função das refletâncias paralela (r_{II}) e perpendicular (r_I), calculadas pelas Eq. (17) e Eq. (18).

$$\tau_a = \exp\left(-\frac{KL}{\cos\theta_2}\right) \quad (15)$$

$$\tau_r = \frac{1}{2}\left(\frac{1-r_{II}}{1+r_{II}} + \frac{1-r_I}{1+r_I}\right) \quad (16)$$

$$r_{II} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (17)$$

$$r_I = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (18)$$

L é a espessura da cobertura. K é a constante de proporcionalidade do coeficiente de extinção que varia entre 4 m^{-1} e 32 m^{-1} dependendo do tipo de vidro. É assumido um coeficiente de extinção de 24 m^{-1} . θ_1 e θ_2 são os ângulos de incidência e de refração, respectivamente. Estes ângulos são relacionados pela Lei de Snell, dado pela Eq. (19), onde n_1 e n_2 são os índices de refração do ar e do vidro, igual 1,0 e 1,526, respectivamente.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (19)$$

O ângulo de incidência da componente direta é calculado usando relação entre ângulos, dado pela Eq. (20). Os ângulos de incidência das componentes difusa e refletida pelo solo são correlacionados ao ângulo de inclinação pelas Eq. (21) e Eq. (22), referenciado em Brandemuehl and Beckman (1980).

$$\theta_{1b} = \cos^{-1}[\cos(\phi + \beta) \cos\delta \cos\omega + \sin(\phi + \beta) \sin\delta] \quad (20)$$

$$\theta_{1d} = 59,7 - 0,1388\beta + 0,001497\beta^2 \quad (21)$$

$$\theta_{1g} = 90 - 0,5788\beta + 0,002693\beta^2 \quad (22)$$

β é o ângulo de inclinação e ϕ é a latitude local. ω é o ângulo indicativo da hora do dia, igual zero ao meio dia solar. δ é o ângulo indicativo do dia do ano, chamado de declinação solar, calculado pela Eq. (23), referenciado em Copper (1969).

$$\delta = 23,45 \sin\left[\frac{360}{365}(284 + n_{day})\right] \quad (23)$$

2.3 Cálculo da radiação incidente total usando o índice de transparência atmosférica e aplicando o modelo de céu claro isotrópico

A radiação horária total (I_t) é calculado usando o modelo de céu claro isotrópico, dado pela Eq. (24). Os subscritos “b”, “d” e “g” referem-se as componentes direta, difusa e refletida pelo solo.

$$I_t = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + \rho_g I \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad (24)$$

R_b é o fator geométrico, igual a razão da componente direta da radiação incidente nos planos horizontal e inclinado. R_b é calculado a partir de relações de ângulos pela Eq. (25) para $\omega \leq 81,5^\circ$ e pelas Eq. (26), Eq. (27) e Eq. (28) para $\omega \geq 81,5^\circ$.

$$R_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos\delta \cos\omega + \sin(\phi + \beta) \sin\delta}{\cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta} \quad (25)$$

$$R_b = \frac{a}{b} \quad (26)$$

$$a = \frac{(\sin\delta\sin\phi\cos\beta - \sin\delta\cos\phi\sin\beta\cos\gamma)}{180}(\omega_2 - \omega_1)\pi \quad (27)$$

$$+ (\cos\delta\cos\phi\cos\beta + \cos\delta\sin\phi\sin\beta\cos\gamma)(\sin\omega_2 - \sin\omega_1) - (\cos\delta\sin\beta\sin\gamma)(\cos\omega_2 - \cos\omega_1) \quad (28)$$

$$b = (\cos\phi\cos\delta)(\sin\omega_2 - \sin\omega_1) + (\sin\phi\sin\delta)\frac{1}{180}(\omega_2 - \omega_1)\pi$$

A radiação horária (I) é estimada a partir da radiação diária (H) pelas Eq. (29), Eq. (30), Eq. (31) e Eq. (32) para componente direta e pelas Eq. (33) e Eq. (34) para componente difusa, por meio de relações empíricas (Pereira and Rabl, 1979).

$$\frac{I_b}{H_b} = r_t \quad (29)$$

$$r_t = \frac{\pi}{24}(a + b \cos\omega) \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \frac{\pi\omega_s}{180}\cos\omega_s} \quad (30)$$

$$a = 0,4090 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (31)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (32)$$

$$\frac{I_d}{H_d} = r_d \quad (33)$$

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \frac{\pi\omega_s}{180}\cos\omega_s} \quad (34)$$

A radiação diária (H) é calculada a partir da radiação extraterrestre (H_o), utilizando o índice de transparência atmosférica (K_T), dado pelas Eq. (35), Eq. (36) e Eq. (37), referenciado em Erbs et al. (1982).

$$\frac{H_b}{H_o} = K_T \quad (35)$$

$$\frac{H_d}{H_o} = \begin{cases} 1 - 0,2727K_T + 2,4495K_T^2 - 11,9514K_T^3 + 9,3879K_T^4 & (K_T < 0,715) \\ 0,143 & (K_T \geq 0,715) \end{cases} \text{ para } \omega_s \leq 81,4^\circ \quad (36)$$

$$\frac{H_d}{H_o} = \begin{cases} 1 + 0,2832K_T - 2,5557K_T^2 + 0,8448K_T^3 & (K_T < 0,722) \\ 0,175 & (K_T \geq 0,722) \end{cases} \text{ para } \omega_s > 81,4^\circ \quad (37)$$

A radiação extraterrestre (H_o) é calculada integrando a irradiação (G_o), resultando na Eq. (38). A irradiação é calculada a partir da irradiação extraterrestre (G), usando relações entre ângulos, dado pela Eq. (39). Por sua vez, a irradiação extraterrestre é calculada a partir da constante solar (G_{SC}), em função do dia do ano, dado pela Eq. (40). A constante solar é igual 1367 W/m² (WRC, 2015).

$$H_o = \frac{24 \ 3600 \ G_{SC}}{\pi} \left[1 + 0,033 \left(\frac{360}{365} n_{day} \right) \right] \left(\cos\phi \cos\delta \cos\omega_s + \frac{\pi\omega_s}{180} \sin\phi \sin\delta \right) \quad (38)$$

$$G_o = G(\cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta) \quad (39)$$

$$G = G_{SC} \left[1 + 0,033 \left(\frac{360}{365} n_{day} \right) \right] \quad (40)$$

O índice de transparência atmosférica utilizado no cálculo da radiação diária é uma medida indireta da nebulosidade e pode ser estimado usando uma base histórica de dados. Os valores adotados são iguais médias mensais do ano típico padrão da cidade de Belo Horizonte. O ano típico padrão é baseado em dados de uma série histórica de 30 anos de 1973 até 2002, disponibilizado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 2015). Os valores médios mensais do índice de transparência atmosférica estão sumarizados na Tab. 1.

Tabela 1 – Valores médios mensais do índice de transparência atmosférica para a cidade de Belo Horizonte de acordo com o ano típico padrão (1973 a 2002).

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0,49	0,53	0,54	0,59	0,59	0,62	0,63	0,64	0,61	0,55	0,49	0,45

3. RESULTADOS

A simulação foi realizada no software comercial EES¹. A eficiência foi calculada na base horária, variando o ângulo de inclinação de 0° até 80°, com incrementos de 5°. A Tab. 2 apresenta os valores médios mensais e anual. Observa-se que cada mês possui um ângulo de inclinação que produz a máxima eficiência. O ângulo de inclinação que produz a máxima eficiência média anual é igual 20°, indicando que o desempenho térmico em termos anuais é otimizado para um ângulo de inclinação aproximadamente igual a latitude do local.

Tabela 2 – Valores médios mensais e anual em função do ângulo de inclinação do coletor solar. Os maiores valores de eficiência de cada mês e do ano estão destacados.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
0°	43,39	43,32	41,61	36,92	31,21	29,10	30,30	33,44	38,32	41,44	41,16	42,35	37,71
5°	43,04	43,24	41,84	37,71	32,32	30,83	31,79	34,34	38,76	41,44	40,91	42,05	38,19
10°	42,58	43,01	41,96	38,35	33,17	32,13	32,93	35,04	39,06	41,27	40,51	41,57	38,47
15°	41,99	42,66	41,98	38,88	33,86	33,14	33,86	35,65	39,24	41,00	40,00	40,93	38,60
20°	41,29	42,21	41,92	39,30	34,46	34,00	34,71	36,20	39,35	40,63	39,36	40,13	38,63
25°	40,46	41,66	41,78	39,66	35,06	34,77	35,52	36,72	39,37	40,18	38,59	39,23	38,58
30°	39,45	41,00	41,56	39,94	35,60	35,55	36,25	37,17	39,33	39,64	37,67	38,11	38,44
35°	38,19	40,21	41,28	40,16	36,11	36,29	36,92	37,56	39,22	39,00	36,58	36,71	38,19
40°	36,64	39,29	40,91	40,31	36,59	37,02	37,49	37,89	39,04	38,27	35,28	35,05	37,81
45°	34,95	38,18	40,45	40,38	37,02	37,71	38,02	38,15	38,77	37,42	33,84	33,22	37,34
50°	33,09	36,92	39,88	40,36	37,36	38,32	38,50	38,33	38,42	36,43	32,33	31,58	36,79
55°	31,24	35,31	39,17	40,27	37,62	38,85	38,91	38,41	37,96	35,26	30,67	29,61	36,11
60°	28,96	33,62	38,27	40,07	37,79	39,26	39,22	38,39	37,37	33,91	28,63	26,88	35,20
65°	25,71	31,63	37,15	39,76	37,87	39,56	39,42	38,26	36,62	32,26	25,87	23,01	33,93
70°	21,63	29,14	35,59	39,28	37,85	39,73	39,51	37,99	35,65	30,27	22,23	19,13	32,33
75°	17,22	25,82	33,76	38,41	37,47	39,54	39,25	37,32	34,24	27,47	18,15	14,08	30,23
80°	11,28	21,63	31,58	37,28	36,90	39,18	38,80	36,40	32,48	23,86	12,92	07,81	27,51

A Tab. 2 mostra que cada mês tem um valor ótimo de ângulo de inclinação que produz a máxima eficiência média. A operação do coletor solar usando uma inclinação variável com ângulos ajustados mensalmente para os valores ótimos mensais produzirá uma eficiência média anual 2,2 pontos percentuais maior do que uma inclinação fixa igual ao ângulo ótimo anual de 20°.

A Fig. 3 apresenta a curva de eficiência ao longo do ano. A máxima eficiência média anual é obtida com um ângulo de inclinação de 20°, como já mencionado anteriormente. Observa-se uma acentuação da queda de eficiência média anual para ângulos de inclinação acima de 45°.

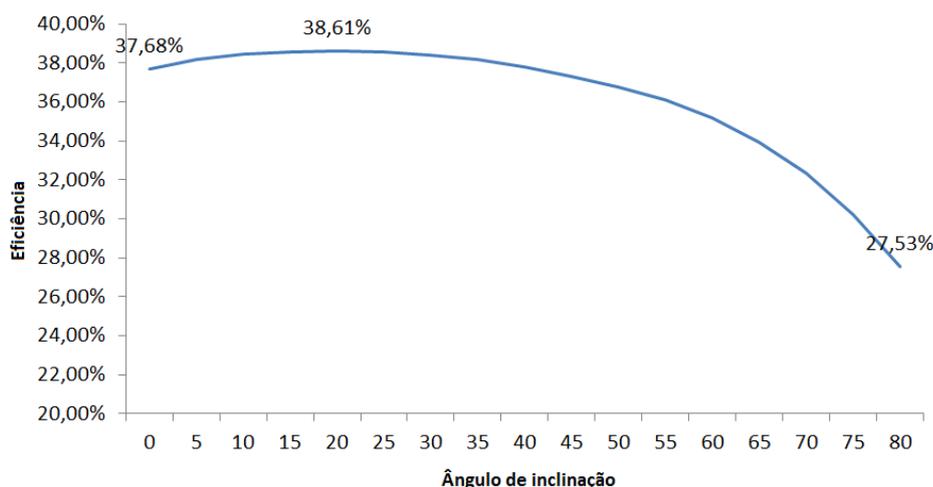


Figura 3 – Eficiência média anual em função do ângulo de inclinação do coletor solar.

A Fig. 4 apresenta a curva de eficiência para as estações do ano, utilizando valores médios de cada período. Os valores ótimos de ângulos de inclinação para os períodos de primavera e de verão são iguais 0° e para o período de outono e de inverno são iguais 60°. Observa-se que os comportamentos das curvas são semelhantes entre primavera e verão e entre outono e inverno.

¹Informações sobre o software EES estão disponíveis em www.fchart.com.

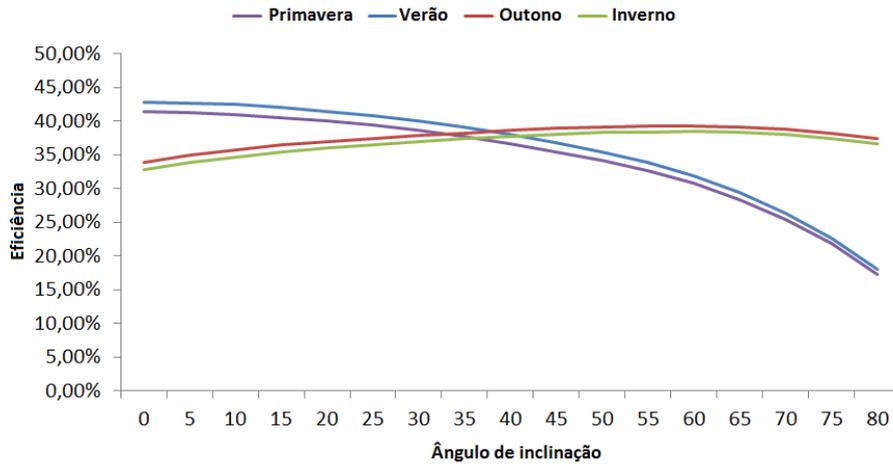


Figura 4 – Eficiência média sazonal em função do ângulo de inclinação do coletor solar.

A Fig. 5 apresenta a eficiência média diária ao longo do ano para os ângulos de inclinação de 0°, 20°, 40°, 60° e 80°, utilizando dados horários de temperatura ambiente e de velocidade do vento. Observa-se que a eficiência é mais sensível a variação do ângulo de inclinação no verão, onde as curvas estão mais espaçadas uma das outras.

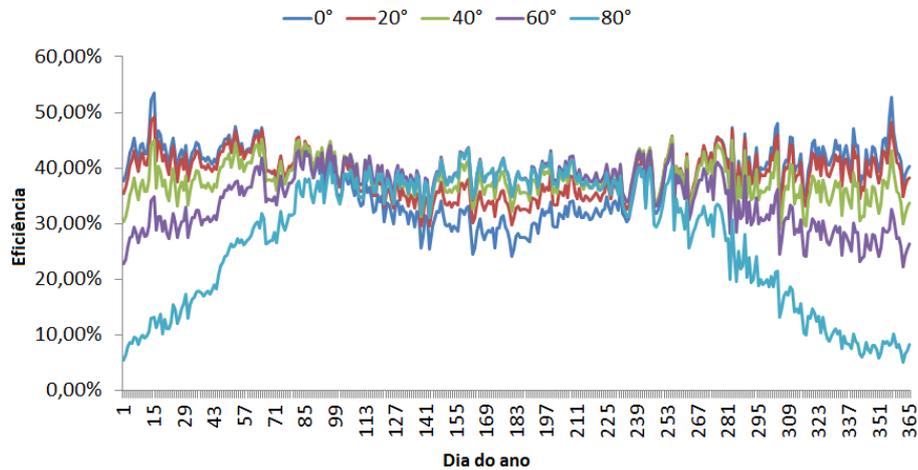


Figura 5 – Eficiência média diária para os ângulos de inclinação de 0°, 20°, 40°, 60° e 80°.

A Fig. 6 apresenta o comportamento da eficiência média diária ao longo do ano para o ângulo de inclinação de 20°, utilizando dados horários e médios anuais de temperatura ambiente e de velocidade do vento. Observa-se que a variação da temperatura ambiente tem impacto na amplitude da curva e que a variação da velocidade do vento, que determina o coeficiente convectivo de transferência de calor, tem impacto na oscilação da curva.

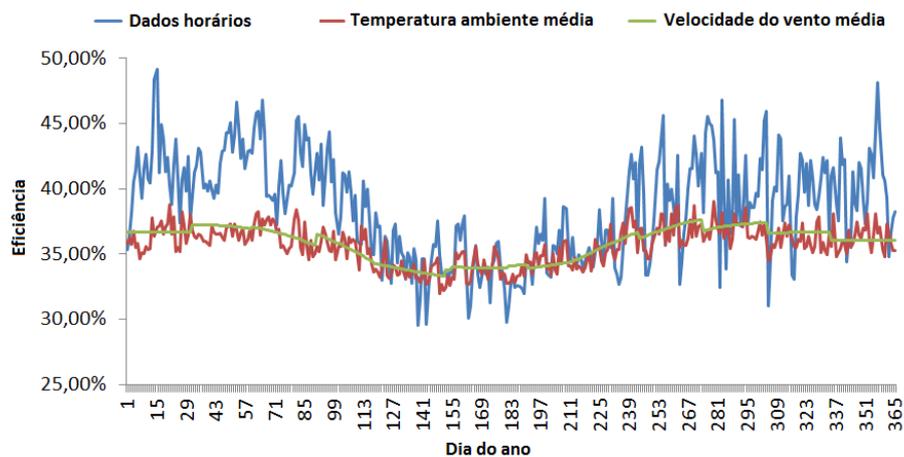


Figura 6 – Comportamento da eficiência média diária em função das variáveis climáticas.

4. DISCUSSÃO

Este trabalho apresentou uma análise teórica de um coletor solar de placa plana, avaliando a influência do ângulo de inclinação no desempenho térmico do equipamento. O ângulo de inclinação que produz as máximas eficiências médias diária, mensal, sazonal e anual foram calculadas com base em um modelo matemático referenciado em Duffie and Beckman (2013).

Os resultados da simulação indicaram que o valor ótimo de ângulo de inclinação em termos anuais, isto é, o ângulo de inclinação que produz a máxima eficiência média anual, é aproximadamente igual a latitude do local. Este resultado corrobora com a literatura que indica o ângulo de inclinação que produz a máxima radiação incidente. Entretanto, os resultados da simulação em termos sazonais mostraram valores ótimos diferentes. A máxima eficiência média para os meses de inverno não é obtida com o ângulo de inclinação que produzirá a máxima radiação incidente. O ângulo ótimo de inclinação em termos de eficiência média é maior.

Os resultados indicam que outras variáveis, além da radiação incidente, têm influência direta no desempenho térmico de um coletor solar de placa plana e, portanto, deveriam ser consideradas no ajuste do ângulo ótimo da inclinação do equipamento. Os autores suspeitam que filtrando a influência das variáveis climáticas, especialmente da temperatura ambiente, os resultados poderiam indicar, em bases sazonais, valores ótimos de ângulos de inclinação em termos de eficiência média mais próximos dos valores indicados em termos de radiação incidente. No caso dos novos resultados não confirmarem tal hipótese, é sugerido analisar o comportamento das perdas térmicas e óticas em função do ângulo de inclinação.

REFERÊNCIAS

- Beckman, W, Klein, S., and Duffie, J. (1977). Solar Heating Design by the f-Chart Method. Wiley Interscience, New York.
- BP (2015). Energy outlook 2035. [bp.com=energyoutlook](http://bp.com/energyoutlook).
- Brandemuehl, M. and Beckman, W. (1980). Transmission of diffuse radiation through cpc and flat plate collector glazings. Solar Energy, 24:511–513.
- Collares-Pereira, M. and Rabl, A. (1979). The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. Solar Energy, 22:155–164.
- Copper, P. (1969). The absorption of radiation in solar stills. Solar Energy, 12:333–346.
- DOE (2015). Department of energy. [http : ==apps1.eere.energy.gov](http://apps1.eere.energy.gov).
- Duffie, J. and Beckman, W. (2013). Solar Engineering and Thermal Processes. John Wiley & Sons, New Jersey, 4th edition.
- EIA (2015). International energy statistics. [http : ==www.eia.gov](http://www.eia.gov).
- Erbs, D., Klein, S., and Duffie, J. (1982). Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. Solar Energy, 28:293–302.
- Gunerham, H. and Hepbasli, A. (2007). Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications. Building and Environment, 42:779–783.
- Kalogirou, S. (2004). Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science, 30:231–295.
- Skeiker, K. (2009). Optimum tilt angle and orientation for solar collectors in syria. Energy Conversion and Management, 50:2439–2448.
- Sparrow, E., Ramsey, J., and Mass, E. (1979). Effect of finite width on heat transfer and fluid flow about an inclined rectangular plate. Heat Transfer, 101:199–204.
- WRC (2015). Solar constant. [http : ==www.pmodwrc.ch](http://www.pmodwrc.ch).
- Yakup, M. and Malik, A. (2001). Optimum tilt angle and orientation for solar collector in brunei darussalam. Renewable Energy, 24:223–234.

EVALUATION OF INFLUENCE OF THE SLOPE ON THE THERMAL PERFORMANCE OF A FLAT-PLATE SOLAR COLLECTOR

Abstract. *This work presents a theoretical analysis of a flat-plate solar collector. The objective is to investigate the influence of the equipment slope on its thermal performance. The software EES (Equation Engineering Solver) was used to simulate one year of the device operation for a given location. The model was developed according to Duffie and Beckman (2013). The results showed that the optimum collector slope, i.e. the slope that produces the highest annual average efficiency is approximately equal to the local's latitude. This result corroborates to the literature for the maximum annual radiation. However, results of the simulation for winter showed different values of optimum slope in terms of efficiency and incident radiation, which indicates that other seasonal variables have direct influence on the thermal performance of a flat-plate solar collector.*

Key words: *flat-plate solar collector, efficiency, seasonality.*