

AVALIAÇÃO DA IRRADIÂNCIA CIRCUNFERENCIAL EM UM COLETOR DE TUBOS EVACUADOS

Tiago Francisco Manea– tiagomanea@gmail.com

Arno Krenzinger– arno.krenzinger@ufrgs.br

LabSol/PROMEC, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Rejane de César Oliveski– decesaroo@gmail.com

Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

Resumo. Os coletores solares de tubos evacuados são os mais utilizados no mundo para conversão de energia solar em energia térmica. A avaliação da disponibilidade de radiação na superfície deste coletor é fundamental para descrever o seu comportamento térmico. Com isso, este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo analítico para determinar a distribuição da irradiância ao redor de um tubo intermediário entre outros dois tubos. Neste modelo foram consideradas a radiação direta, difusa superior e difusa posterior incidentes sobre o coletor. Um perfil de distribuição da irradiância foi determinado com este modelo e comparado com outros encontrados na literatura. Por fim o modelo foi utilizado para determinar perfis de irradiância para situações comuns de operação do coletor.

Palavras-chave: Energia Solar Térmica, Tubo Evacuado, Irradiância circunferencial.

1. INTRODUÇÃO

Coletores solares planos são amplamente utilizados e já possuem uma tecnologia consolidada. No entanto, o coletor solar de tubos evacuados está participando de forma significativa no cenário mundial da conversão térmica de energia solar. Como pode ser visto na Fig. 1 (a), em 2010 a utilização destes coletores já compreendia mais da metade da capacidade mundial instalada de coletores solares utilizados para aquecimento a média temperatura, segundo a *International Energy Agency* - (IEA, 2012 e 2015). Segundo a mesma fonte, a utilização deste tipo de coletor teve um aumento expressivo nos anos subsequentes, chegando a mais 70 % da capacidade instalada em 2013, como mostra a Fig. 1 (b).

Apesar de grande parte dos coletores de tubos evacuados estarem instalados na China, há uma significativa penetração destes coletores no mercado latino-americano, justificando a realização de estudos que analisem seus aspectos técnicos.

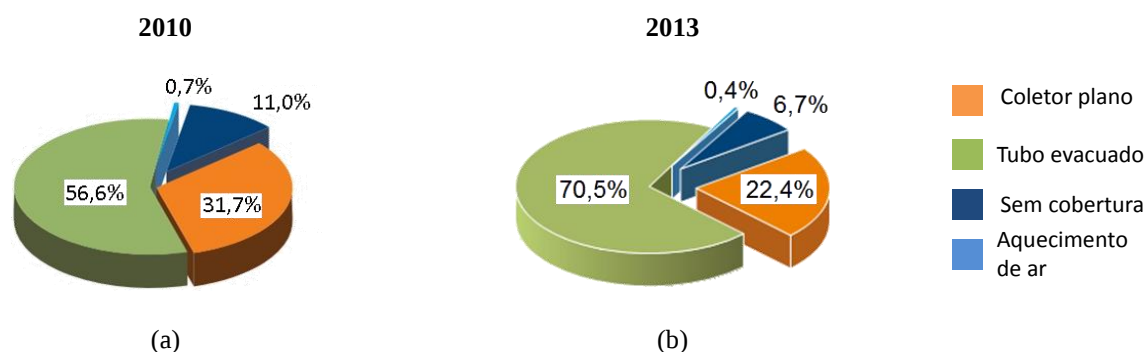


Figura 1 - Distribuição da capacidade total instalada em operação por tipo de coletor em 2010, para aquecimento a média temperatura. Fonte: Adaptado de IEA, 2012 e 2015.

Coletores solares que utilizam o tubo evacuado minimizam a perda de calor por convecção colocando a superfície absorvedora em um ambiente quase totalmente evacuado de matéria. A perda de calor por radiação também é minimizada devido à superfície absorvedora ter baixa emissividade. Estas características põem este tipo de coletor em vantagem aos coletores planos quanto à operação em ambientes de climas mais frios, como a região sul do Brasil.

Modelos teóricos para prever a eficiência destes coletores passam pela avaliação da irradiância disponível em sua superfície. Porém, a geometria cilíndrica da área de abertura dificulta tal avaliação, já que os equipamentos medidores de radiação, em geral, medem a irradiância apenas em um plano. Desta forma, este trabalho traz um modelo analítico que avalia a distribuição da irradiância solar ao redor de um único tubo evacuado centralizado entre outros dois. Tal modelo toma como condição inicial o conhecimento da radiação solar direta, da radiação solar difusa no plano

superior do coletor, e da radiação difusa no plano posterior do coletor. A partir destas condições iniciais o modelo determina a distribuição da irradiância transmitida pelo tubo, considerando o sombreamento dos tubos adjacentes, e a transmitância direcional do vidro. Com a integração deste perfil ao longo da circunferência do tubo é possível determinar a quantidade de irradiação transmitida pelo tubo evacuado.

2. COLETOR SOLAR DE TUBOS EVACUADOS

O primeiro coletor solar utilizando tubo evacuado foi proposto por Speyer em 1965, segundo Duffie e Beckman, 1991. Neste modelo o absorvedor é plano e está envolto por um único tubo de vidro evacuado. Outro modelo de tubo evacuado, construído segundo o princípio frasco de Dewar, está mostrado na Fig. 2 (a). Neste modelo dois tubos concêntricos são unidos nas extremidades e o espaço entre eles é evacuado de matéria. As numerações descritas na figura correspondem a: (1) tubo de vidro interno, (2) superfície seletiva, (3) espaço evacuado, (4) tubo de vidro externo, (5) grampo, (6) captador e (7) camada captadora.

Segundo Zhiqiang, 2005, as superfícies seletivas são depositadas no tubo interno utilizando a técnica “*single cathode cylindrical magnetron sputtering*”, na qual envolve um tratamento térmico em vácuo por uma hora a uma temperatura superior a 400°C durante a evacuação dos tubos. O autor refere-se a esta técnica como o grande passo para a produção em massa destes tubos.

Há diversas formas de transferir a energia térmica absorvida pelo tubo evacuado para a água. Segundo Morrison, et al., 2004, a configuração de transferência direta (*water-in-glass*), mostrada na Fig. 2 (b), é a mais utilizada devido a sua simplicidade e seu baixo custo de fabricação. Nesta configuração, a transferência de calor do tubo evacuado é feita diretamente para o fluido em contato com o tubo interno. Ao ser aquecida, a água ascende ao reservatório pela parte superior do tubo, enquanto acontece a reposição desta massa pela parte inferior do tubo, como ilustra a Fig. 2 (c).

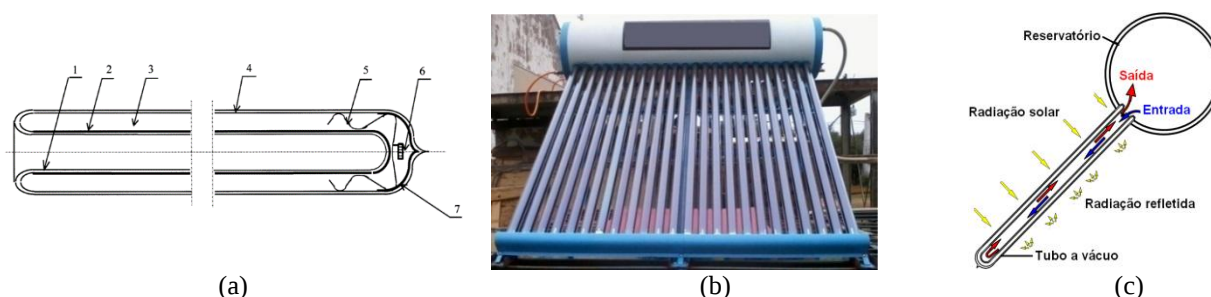


Figura 2—Coletor de tubos evacuados: (a) tubo evacuado. Fonte: Zhiqiang (2005); (b) direta: (b) foto de um coletor de tubos evacuados; (c) troca de massa entre tubo e reservatório. Fonte: modificado de Morrison et al. (2004).

3. METODOLOGIA

A distribuição de irradiância solar sobre um cilindro intermediário posicionado acima de uma superfície difusa pode ser dividida em três componentes: irradiação solar direta, irradiação solar difusa na face superior e irradiação difusa na face posterior, como mostra a Fig. 3. A irradiância solar transmitida em um plano diferencial qualquer do tubo externo é a soma destas componentes naquele ponto, conforme Eq. (1).

$$G(\theta_t) = G_b(\theta_t) + G_{ds}(\theta_t) + G_{dp}(\theta_t) \quad (1)$$

onde G é a irradiação total, G_b é irradiação direta, G_{ds} a irradiação difusa superior, G_{dp} a irradiação difusa posterior e θ_t o ângulo formado entre um plano diferencial (dA) no tubo externo e um eixo no centro do tubo, conforme Fig. 3.

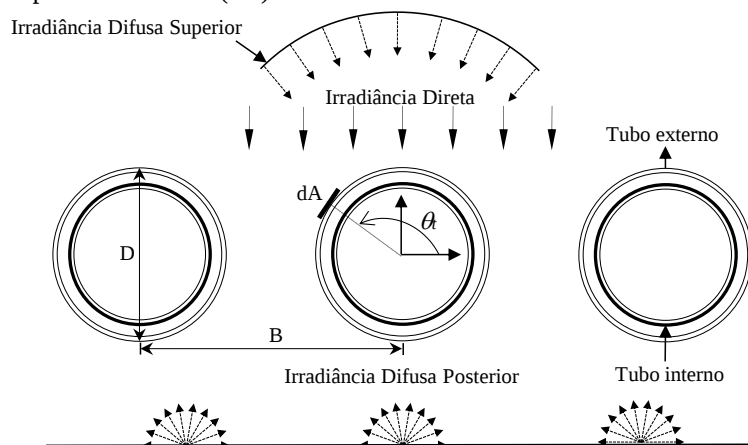


Figura 3 - Componentes da radiação incidente em um tubo evacuado intermediário.

3.1 Irradiação Direta

Para determinar a irradiância direta no plano do coletor solar, inclinado sob um ângulo β , será utilizado o sistema de coordenadas apresentado na Fig. 4. Neste sistema de coordenadas a componente (x) é a direção perpendicular ao plano horizontal, a (y) aponta para o leste e a (z) para o norte geográfico. Já as componentes (x', y', z') são as coordenadas referentes ao plano inclinado com um desvio de φ em relação ao norte. A componente x' é perpendicular ao plano do coletor. Este sistema de coordenadas foi proposto inicialmente por Rabl, *et al*, (1981), e utilizado por Tang, *et al*, (2009) para determinar ângulos ótimos de inclinação do coletor de tubos evacuados para diversas cidades chinesas.

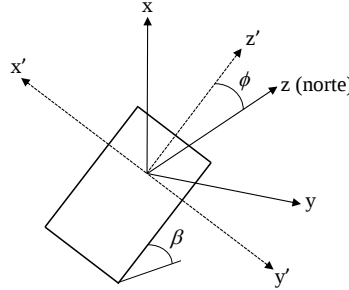


Figura 4 - Sistema de coordenadas utilizado para determinar a direção da radiação direta.

O vetor (n) dado pela Eq. (2), representa o vetor unitário entre a posição do Sol e um ponto na Terra. Suas componentes i , j e k , representam a projeção do vetor nas coordenadas x , y e z , respectivamente. Estas componentes definidas nas Eq. (3) - (5), dependem fundamentalmente da posição do ponto na Terra e do momento analisado. Este vetor será utilizado para determinar a direção da radiação direta sobre o coletor.

$$n = (i, j, k) \quad (2)$$

$$i = \cos \delta \cos \lambda \cos \omega + \sin \delta \sin \lambda \quad (3)$$

$$j = -\cos \delta \sin \omega \quad (4)$$

$$k = -\cos \delta \sin \lambda \cos \omega + \sin \delta \cos \lambda \quad (5)$$

onde λ é a latitude do local, ω é o ângulo horário e δ é a declinação solar.

A declinação solar, estimada em graus com a Eq. (6), é o ângulo formado entre o plano equatorial e a linha que une os centros da Terra e do Sol.

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (d_n + 284) \right] \quad (6)$$

onde d_n é o número do dia do ano no calendário Juliano, variando de 1 (1º de Janeiro) até 365 (31 de Dezembro).

O ângulo horário é aquele entre o meridiano do ponto de referência e o meridiano correspondente a posição do Sol. Tem valor zero ao meio-dia solar e varia 15º a cada hora. Este ângulo é estimado, em graus, utilizando-se a Eq. (7).

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (7)$$

onde TSV é a hora solar verdadeira (de 0 a 24), pode ser calculada com a Eq. (8).

$$TSV = TO + \frac{4(L_{st} - L_{loc})}{60} \quad (8)$$

onde TO é a hora correspondente ao meridiano de longitude L_{st} , e L_{loc} é a longitude do ponto de referência.

As componentes do vetor Terra-Sol nas coordenadas do plano inclinado (n') é dado pela Eq. (9). Ele pode ser obtido através de uma translação de coordenadas, como segue nas Eq. (10) - (12).

$$n' = (i', j', k') \quad (9)$$

$$i' = i \cos \beta - (j \sin \varphi + k \cos \varphi) \sin \beta \quad (10)$$

$$j' = j \cos \varphi - k \sin \varphi \quad (11)$$

$$k' = i \sin \beta + (j \sin \varphi + k \cos \varphi) \cos \beta \quad (12)$$

onde i' , j' , k' são as componentes do vetor n' .

Após determinar a direção da radiação direta no plano do coletor, ela será analisada ao longo da circunferência do tubo externo. Para isso, considera-se o sistema de coordenadas polares definido na Fig. 5, onde (θ_t) é o ângulo formado entre o eixo horizontal e um plano tangente ao tubo externo, como mostra a figura. O ângulo (γ) é aquele formado entre o vetor normal do plano e vetor da radiação direta, dado pela Eq. (13).

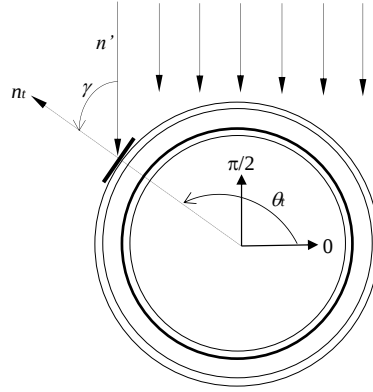


Figura 5 – Radiação direta em um plano tangente ao tubo externo.

$$\gamma(\theta_t) = \pi - \cos^{-1}(n'_t n_t) = \pi - \cos^{-1}(i' \sin \theta_t + j' \cos \theta_t) \quad (13)$$

A radiação solar direta transmitida pelo tubo externo, $G_b(\theta_t)$, pode ser descrita em função da posição no plano tangente ao tubo pela Eq. (14).

$$G_b(\theta_t) = G_b \tau(\gamma) \cos \gamma \quad (14)$$

onde G_b é a radiação direta instantânea em um plano perpendicular a incidência, $\tau(\gamma)$ é a transmitância do vidro para cada plano de incidência no tubo externo.

Transmitância do vidro para radiação direta. A metodologia utilizada para determinar a transmitância do vidro é aquela descrita por Duffie e Backman, 1991. Nesta metodologia, os autores separam a transmitância devido à reflexão e a absorção. Para tanto, a irradiância incidente é considerada não polarizada e as propriedades radiantes independentes da condição espectral.

A Fig. 6 mostra a irradiância I_i incidindo com um ângulo θ_1 sobre uma superfície plana. Ela separa um meio com índice de refração n_1 e outro com n_2 . O ângulo de refração (θ_2) é dado pela lei de Snell, descrita na Eq.(15).

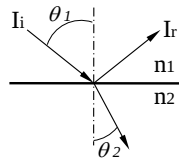


Figura 6 – Ângulos de incidência e de refração em meios de diferentes índices de refração.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} \quad (15)$$

A radiação refletida é dividida em duas componentes: perpendicular ($r_{\perp}$) e paralela ($r_{\parallel}$) ao plano da radiação incidente. Estas componentes são estimadas com as Eq.(16) e (17), respectivamente. A refletividade (r) de uma superfície, definida como a fração da radiação refletida sobre a incidente, é uma média entre as duas componentes, como mostra a Eq. (18).

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (16)$$

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

$$r = \frac{I_r}{I_i} = \frac{r_{\perp} + r_{\parallel}}{2} \quad (18)$$

A análise da refletividade pode ser estendida para um material bifacial não absorutivo, como mostra a Fig. 7.

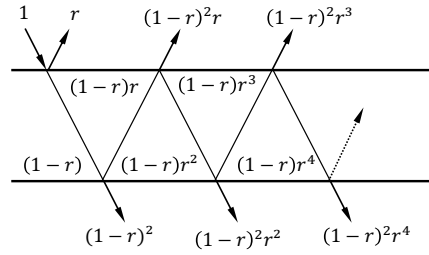


Figura 7 – Radiação transmitida por um material bi facial não absorutivo.

Assim como a refletividade, a transmitância pode ser dividida entre a componente transmitida perpendicular ($\tau_{\perp}$) e a paralela ($\tau_{\parallel}$). Considerando as múltiplas reflexões no interior do material, pode-se determinar cada uma delas com as Eq.(19) e (20), respectivamente. Logo, a transmitância para um material não absorutivo (τ_r), ou seja, considerando apenas a radiação refletida, é dada pela média das duas componentes, como indica a Eq.(21).

$$\tau_{\perp} = (1 - r_{\perp})^2 \sum_{n=0}^{\infty} r_{\perp}^{2n} = \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \quad (19)$$

$$\tau_{\parallel} = (1 - r_{\parallel})^2 \sum_{n=0}^{\infty} r_{\parallel}^{2n} = \frac{1 - r_{\parallel}}{1 + r_{\parallel}} \quad (20)$$

$$\tau_r = \frac{\tau_{\perp} + \tau_{\parallel}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} + \frac{1 - r_{\parallel}}{1 + r_{\parallel}} \right) \quad (21)$$

Neste momento, a transmitância será analisada considerando a absorção parcial da radiação pelo meio material.

A intensidade radiação (I) no interior de um meio parcialmente transparente é descrita pela lei de Bourguer, a qual assume que esta decresce exponencialmente com a distância (x) que a radiação percorre através do meio, conforme a Eq.(22).

$$I = e^{-Kx} \quad (22)$$

onde K é o coeficiente de extinção do material.

Considerando o caminho percorrido pela radiação no meio material, de espessura L , igual a $(L/\cos \theta_2)$, a intensidade de radiação transmitida I_t é dada pela Eq. (23).

$$I_t = e^{-\frac{KL}{\cos \theta_2}} \quad (23)$$

Então, a transmitância considerando a absorção (τ_{α}), é igual à razão entre a radiação transmitida e a incidente, dada pela Eq. (24).

$$\tau_{\alpha} = \frac{I_t}{I_i} = e^{-\frac{KL}{\cos \theta_2}} \quad (24)$$

Por fim a transmitância do material τ é igual ao produto entre a transmitância referente à absorção e a transmitância referente à reflexão, conforme Eq. (25).

$$\tau = \tau_r \tau_{\alpha} \quad (25)$$

Para cada plano perpendicular a superfície do tubo externo será considerado um ângulo de incidência diferente para radiação direta, tendo assim, $\theta_1 = \gamma$ para cada plano.

3.2 Irradiação difusa superior

A Fig. 8 mostra a distribuição da radiação difusa que incide na parte superior de um tubo evacuado intermediário. O ângulo em que ocorre o sombreamento da radiação difusa é indicado como θ_{CS} , dado pela Eq.(31) e considerado

simétrico. Para cada plano diferencial tangente ao tubo externo, como indicado na figura, estabeleceu-se um ângulo com o céu (considerado como um plano infinito (ψ_s)). Este ângulo é função apenas de (θ_t).

$$\theta_{CS} = \pi + \cos^{-1} \frac{D}{B} \quad (26)$$

onde D é o diâmetro do tubo externo e B a distância entre os centros dos tubos, conforme indicado na Fig. 1.

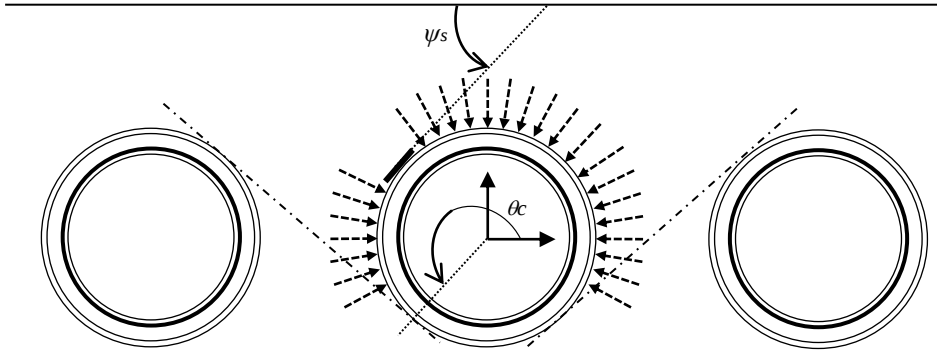


Figura 8 – Irradiação difusa superior.

Na avaliação da distribuição da radiação difusa vinda do céu considerou-se uma distribuição não uniforme ao redor do tubo, mas sim, com uma dependência do fator de forma ($F_{dA-céu}$) de cada plano tangente ao tubo externo com o céu. Para cada plano perpendicular ao tubo externo há um fator de forma estabelecido pela Eq.(27).

$$F_{dA-céu} = 0,5[1 + \cos(\psi_s)] \quad (27)$$

Com isso, a radiação difusa para cada ponto do tubo externo (G_{ds}) é dada pela Eq. (28).

$$G_{ds}(\theta_t) = G_{ds}\tau_d F_{dA-céu} \quad (28)$$

onde G_{ds} é a radiação difusa no plano do coletor e τ_d é a transmitância do vidro para a radiação difusa.

Transmitância do vidro para radiação difusa. Brandemuehl e Beckman, apud Duffie e Beckman (1991), definem a transmitância para radiação difusa isotrópica vinda do céu como sendo equivalente a transmitância da radiação direta para um determinado ângulo. Segundo os autores, este ângulo equivalente pode ser considerado como 60°.

3.3 Irradiação difusa posterior

A irradiação difusa incidente na parte posterior do coletor está demonstrada esquematicamente na Fig. 9. O método utilizado para estabelecer a distribuição da radiação difusa incidente pela parte posterior é semelhante aquele aplicado para difusa superior, porém, o ângulo crítico de sombreamento (θ_{CP}) é dado pela Eq. (29), e considerado simétrico. O ângulo utilizado para determinar o fator de forma entre o plano tangente ao tubo e o plano inferior de onde parte a radiação é ψ_p .

$$\theta_{CP} = \pi - \cos^{-1} \frac{D}{B} \quad (29)$$

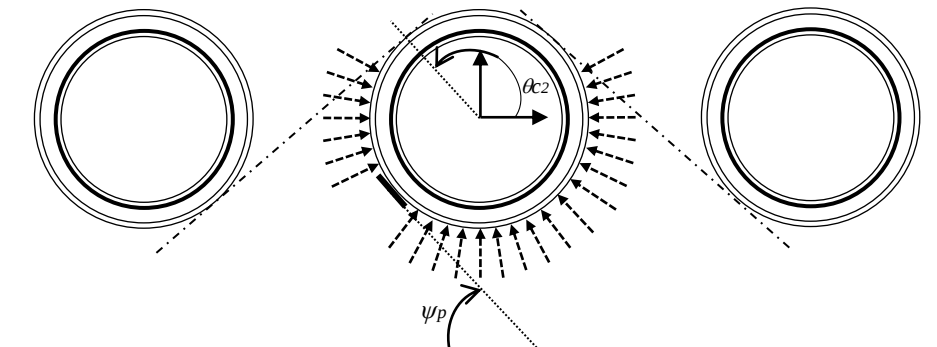


Figura 9 – Irradiação difusa posterior.

$$G_{dP}(\theta_t) = G_{dP} \tau_d F_{dA-P} \quad (30)$$

onde G_{dP} é a radiação difusa no plano posterior do coletor e F_{dA-P} é o fator de forma de cada plano tangente ao tubo externo com o plano P . Para cada plano perpendicular ao tubo externo há um fator de forma estabelecido pela Eq. (27).

$$F_{dA-P} = 0,5[1 + \cos(\psi_P)] \quad (31)$$

3.4 Irradiação média transmitida

A irradiância transmitida em cada ponto do tubo externo é dado pela Eq.(1). A irradiância média transmitida pelo tubo externo (G) é com a integral desta equação ao longo da circunferência, conforme Eq. (32).

$$G = \frac{\int_0^{2\pi} G(\theta_t) d\theta_t}{2\pi} = \frac{\int_0^{2\pi} G_b(\theta_t) d\theta_t + \int_0^{2\pi} G_{dS}(\theta_t) d\theta_t + \int_0^{2\pi} G_{dP}(\theta_t) d\theta_t}{2\pi} \quad (32)$$

4. RESULTADOS

4.1 Comparação com a literatura

Cabanillas *et al*, 1995, mediu a irradiância ao longo da circunferência de um tubo sobreposto a uma placa refletora de alumínio. Window, 1983, determinou o perfil de irradiância sobre um tubo posicionado sobre uma placa refletora branca através do método "Raytracing". Estes perfis estão traçados no gráfico da Fig. 10, onde também está exposto um perfil elaborado utilizando-se a teoria desenvolvida neste trabalho. A irradiância média para os três perfis é de 510 W/m², não há sombreamento de tubos adjacentes e a incidência da radiação direta é normal ao plano do coletor.

Comparando os perfis percebe-se um comportamento geral próximo entre eles. A diferença entre o perfil de Cabanillas e o desenvolvido neste trabalho acontece principalmente na região onde a irradiação difusa posterior interfere na parte superior do tubo. Esta diferença ocorre principalmente pelo fato da superfície refletora utilizada por Cabanillas não ser isotrópica nem um plano infinito, como considerado no modelo deste trabalho.

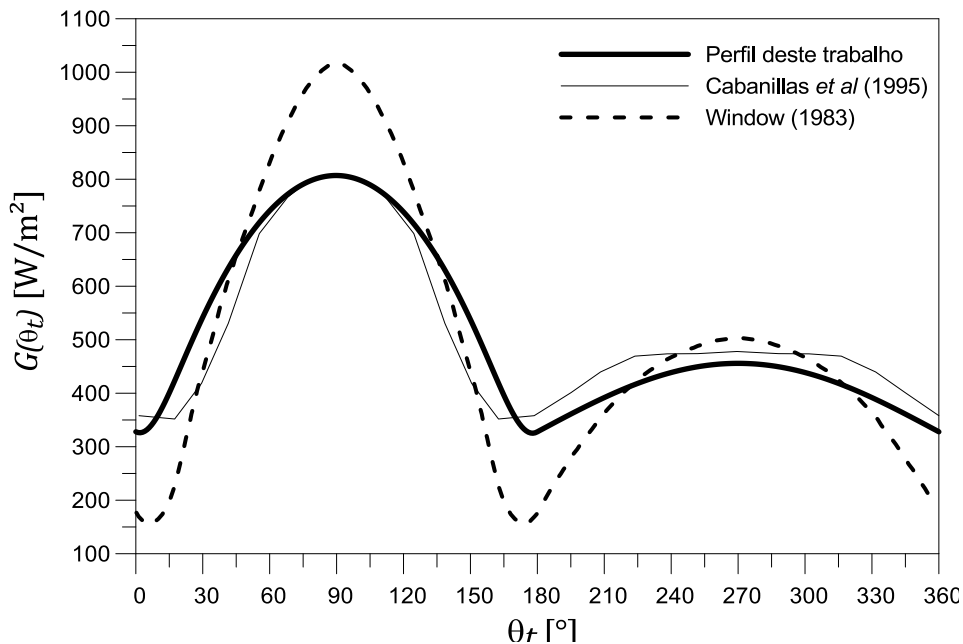


Figura 10 – Irradiação circunferencial sobre um tubo não sombreado.

4.2 Perfis de irradiância

A Fig. 11 mostra perfis de irradiância ao redor do tubo para quatro horas solares: (a) 9h, (b) 10h, (c) 11h e (d) 12h. Estes perfis foram traçados utilizando o modelo descrito neste trabalho e utilizando dados de irradiância fornecidos pelo programa RADIASOL. Os dados são referentes a um dia com poucas nuvens que ocorre em 1° de janeiro, para uma inclinação de 40° na cidade de Porto Alegre.

É possível observar nestas figuras que o ponto máximo de irradiância acompanha o ângulo de irradiância direta máxima, assim como os perfis observados por Cabanillas, *et al*, 1995.

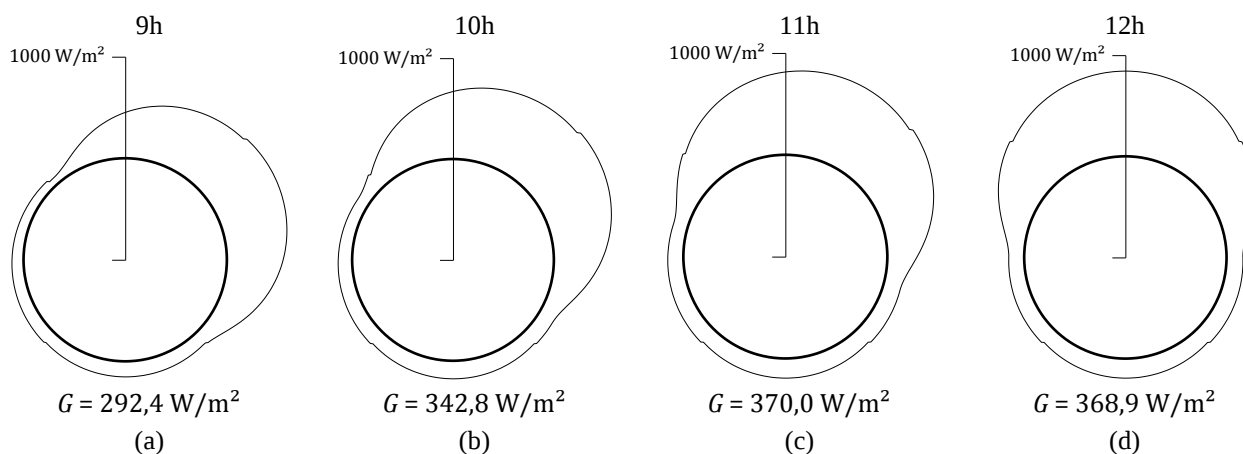


Figura 11 – Irradiação circunferencial transmitida para: (a) 9h, (b) 10h, (c) 11h e (d) 12h.

5. CONCLUSÕES

Coletores solares de tubos evacuados são os mais utilizados no mundo para conversão térmica da energia solar. Para descrever o comportamento térmico deste coletor é importante ter como informação a quantidade de energia solar disponível em sua superfície. Portanto, este trabalho propõe um modelo analítico para determinar a distribuição circunferencial da irradiância transmitida por um tubo intermediário de um coletor solar de tubos evacuados. O modelo tem como requisitos conhecer os valores de irradiância direta no plano do coletor, e irradiância difusa nos planos superior e inferior do coletor. O perfil obtido com este modelo foi comparado a outros dois obtidos na literatura, e apresentou uma concordância satisfatória. Por fim alguns perfis de irradiância foram traçados para diferentes situações de operação do coletor.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro. O Labsol é um laboratório associado ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia.

REFERÊNCIAS

- Cabanillas, R. E.; Estrada, C. A.; Avila, F., 1995. A Device for Measuring the Angular Distribution of Incident Radiation on Tubular Solar Collectors, *Renewable Energy*, vol. 6, pp. 843-847.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons.
- IEA. International Energy Agency, 2012 e 2015. *Solar Heat Worldwide - Markets and Contribution to the Energy Supply*, Gleisdorf.
- Morrison, G. L., Budihardjo, I., Behnia, M., 2004. Water-in-glass Evacuated Tube Solar Water Heaters. *Solar Energy*, vol. 76, pp. 135-140.
- Rabl A., 1981. *Active solar collectors and their applications*. Oxford: Oxford University Press.
- Tang, R., Gao, W., Yu, Y., Chen, H., 2009. Optimal tilt-angles of all-glass evacuated tube solar collectors, *Energy*, vol. 34, pp. 1387-1395.
- Window, B., 1983. Heat extraction from single ended glass absorber tubes. *Solar Energy*, vol. 31, pp. 159-166.
- Zhiqiang, Y., 2005. Development of solar thermal systems in China. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 86, pp. 427-442.

CIRCUMFERENTIAL IRRADIANCE EVALUATION ON EVACUATED TUBE SOLAR COLLECTOR

Abstract. Solar collectors evacuated tubes are the most used in the world for solar energy conversion into thermal energy. The assessment of the availability of radiation on the surface of this collector is fundamental to describe their thermal behavior. Thus, this work aims to develop an analytical model to determine the distribution of the irradiance around a middle tube between two tubes. This model considered the direct radiation, sky diffuse and back albedo diffuse incident over the collector. A irradiance distribution profile was determined with this model and compared with others in the literature. Finally the model was used to determine irradiance profiles for various operating situations collector.

Key words: Thermal solar energy, Evacuated Tube, Circumferential Irradiation.