

OTIMIZAÇÃO DE COLETOR SOLAR PLANO ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE UM ANTEPARO ÓTICO

José Espínola Júnior

CEFET-SE/Uned/Coind

Av. Gentil Tavares, 1166, Getúlio Vargas, CEP: 49055-260 Aracaju-SE, Brasil.

joseespinolajr@uol.com.br

Gustavo José Cardoso Braz

CEFET-SE/Coind

gjcb@sergipenet.com.br

Francisco Pontes de Carvalho

UFPB/CT/DTM

José Antônio Riul

UFPB/CT/DTM

riul@ct.ufpb.br

José Maurício Gurgel

UFPB/CT/DTM/LES

Universidade Federal da Paraíba, Laboratório de Energia Solar, Cidade Universitária, Caixa Postal 5115, CEP: 58051-970, João Pessoa-PB, Brasil.

gurgel@les.ufpb.br

Resumo. *O presente trabalho tem como objetivo principal oferecer uma alternativa na viabilização de sistemas de refrigeração adsorptivos solares, através da utilização de um anteparo óptico plano acoplado a um coletor solar tubular plano. Para tanto, tornou-se necessário à elaboração de um modelo matemático com a finalidade de descrever fielmente os processos de incidência, reflexão e absorção dos raios solares no conjunto coletor solar-anteparo ótico. Diante disto, foram realizadas simulações numéricas para a determinação das configurações ideais do sistema.*

Palavras-chave: *Coletor solar, anteparo ótico, radiação solar, incidência, reflexão.*

1. INTRODUÇÃO

No início da década de 70, criou-se um grande alarde global propagado por estudos que vislumbravam um colapso energético imediato, como consequência de uma provável exaustão dos combustíveis fósseis, o que fez surgir vários problemas para os países consumidores, dentre eles o racionamento de combustíveis. Com isso, foram intensificados os trabalhos de exploração de novos campos petrolíferos e, também, o desenvolvimento de programas alternativos para a geração de energia, ou seja, a utilização de outras matérias-primas, produtoras de energia.

No Brasil, vários programas nesse sentido foram desenvolvidos. Cumpre citar a ampliação na exploração do potencial hídrico e pesquisas de vertentes energéticas pouco utilizadas, até a referida década, tais como: a mineral, a biomassa, a eólica e a solar. Entretanto, a energia gerada por hidroelétricas alcançou um grande percentual no consumo, chegando hoje a 92% de toda a energia produzida no país (Aneel apud Espínola, 2002). Porém, as mudanças climáticas ocorridas no planeta, nos últimos anos, ocasionaram a diminuição nos índices pluviométricos em grande parte das regiões, nas quais se encontra dividido o nosso país. Tais mudanças provocaram a queda no nível de água nas bacias hidrográficas e geraram um colapso no nosso sistema energético. Contribui ainda para o esgotamento dos recursos hídricos o crescente uso da água na agricultura intensiva, na

indústria e mesmo em termoeletricas, além da emissão crescente de poluentes que afetam a camada de ozônio e provocam o efeito estufa. Com o intuito de contornar mais esta crise de energia, verifica-se um retorno dos incentivos à busca de fontes renováveis de energia. Novamente, a energia solar aparece como uma opção bastante viável, por se tratar de uma energia limpa, renovável e abundante. Consequentemente, os sistemas de refrigeração que utilizam energia solar ressurgem com grandes perspectivas, haja vista apresentarem custo operacional praticamente nulo, boa autonomia, baixos custos de fabricação e manutenção, simplicidade de manejo, segurança e longa vida útil. Diante disso, vários outros estudos teóricos e experimentais continuam sendo realizados com o objetivo de aperfeiçoar sistemas de refrigeração por adsorção, que além de serem atraentes pelo uso da energia solar, destacam-se também pela não utilização de CFCs, como fluido de trabalho, se enquadrando nas novas regulamentações relativas aos novos fluidos frigorigênicos (protocolo de Montreal e de Kyoto). Porém, alguns problemas tecnológicos persistem, o que se constitui num entrave ao processo de comercialização de um protótipo solar. Uma possibilidade bastante promissora, a fim de contornar obstáculos técnicos, seria a otimização construtiva dos trocadores de calor (coletor solar, condensador e evaporador) que compõem esses sistemas. Com isso, a introdução de alternativas no projeto de coletores solares, a partir de geometrias já conhecidas, pode contribuir decisivamente no aprimoramento do funcionamento geral do sistema de refrigeração adsorativo, através do aumento do fluxo de energia radiante. Nesse sentido, alguns trabalhos foram desenvolvidos (Hollands, Buchberg e Edwards, Svendsen, Rommelm e Vagner apud Araújo (2000)) a fim de otimizar as trocas térmicas no interior do coletor solar, através da aplicação de uma cobertura TIM, o que foi aplicado a sistemas de refrigeração por Araújo op. cit.. Santos et al (2000) utilizou a tecnologia dos CPC's a sistemas de refrigeração. Porém, alguns aspectos devem ser considerados quando se trata da aplicação de coletores solares a sistemas de refrigeração, dentre eles pode-se destacar a simplicidade construtiva do trocador e rapidez de resfriamento da superfície absorvedora. Com o intuito de vencer esta barreira imposta, a conjugação de um anteparo ótico ao sistema, descrito anteriormente, aumenta a oferta de radiação solar sobre o coletor solar tubular, através da reflexão dos raios solares incidentes no anteparo plano. Tabor, Souka and Safwat (apud Espínola Jr op. cit.) foram os pioneiros na ênfase da utilização de diferentes tipos de sistemas espelho-coletor solar. O que fomentou o desenvolvimento de outros trabalhos, tais como os relatados Seitel, Grassie and Sheridan (apud Espínola Jr op. cit.), Mcdaniels et al. (1975), Taha e Elidighidy (1980), Larson (1980a, 1980b), Chiam (1981, 1982) e Rao et al. (apud Espínola Jr op. cit.). A maior parte desses trabalhos foi voltada para o desenvolvimento e viabilização comercial de fogões solares. Esta tecnologia pode ser aplicada a sistemas de refrigeração adsorativos solares, pois além de propiciar o aumento da disponibilidade de energia ao coletor, sem o aumento de sua área, proporciona um maior período de resfriamento ao leito poroso, através do sombreamento do coletor pelo anteparo, o que é um dos maiores problemas desses sistemas.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

O modelo matemático aqui proposto vislumbra a comparação entre um coletor plano tubular com vitral duplo e um coletor solar tubular com vitral duplo e anteparo ótico com superfície especular.

2.1 Modelo para o Coletor Solar

A abordagem matemática aplicada na representação deste trocador de calor analisa a energia absorvida pela placa do coletor plano. Entretanto, o fluxo de energia radiante que incide sobre coletor pode ser dividido em duas vertentes como a análise do fluxo de radiação solar diretamente incidente sobre o coletor e a análise do fluxo de radiação refletida no anteparo e incidente no coletor. Como o reator é composto por uma estrutura tubular, no interior da qual o adsorvente se encontra compactado, considera-se como simplificação para modelagem, um esquema composto

por uma placa absorvedora de área igual a da estrutura tubular. No caso estudado, a aplicação das equações de conservação de energia e massa ao referido trocador de calor dá-se em apenas uma etapa, a qual é a análise do processo ocorrido na placa absorvedora. O aquecimento da placa absorvedora no interior do coletor dá-se pela ação de três parâmetros como o calor proveniente do leito poroso, cuja transferência é determinada pelo coeficiente de contato térmico na interface placa absorvedora/adsorvente, a radiação solar que penetra no interior do coletor solar e as perdas de calor no interior do coletor. Consequentemente, isto pode ser expresso por:

$$M_p * C_{pp} * \frac{\partial T_p}{\partial t} \Big|_{placa} = H_{cp} A_{cp} (T_L - T_p) + Rad_{solar} A_p + U_{Tcol} \quad (1)$$

onde M_p é a massa da placa absorvedora, C_{pp} é o calor específico à pressão constante relativo à placa absorvedora, T_p é a temperatura da placa absorvedora, H_{cp} condutância térmica da interface placa/adsorvente, A_{cp} é a área relativa à interface placa/adsorvente, T_L é a temperatura do leito adsorvente, Rad_{solar} é o fluxo de radiação solar que incide sobre a placa absorvedora, A_p é a área da placa absorvedora atingida pela radiação solar, T_{amb} é a temperatura ambiente, U_{Tcol} é o coeficiente global de perdas no coletor.

Para se determinar o desempenho de um coletor solar torna-se necessário o conhecimento de certas propriedades (transmissão, reflexão e absorção) inerentes ao projeto do mesmo, as quais são consequência direta do material utilizado. Deste modo, algumas características básicas determinam a performance de um coletor, tais como a quantidade de coberturas, propriedades do vidro, inclinação do coletor solar, eficiência do isolamento utilizado no interior do coletor, propriedades da placa absorvedora. Consequentemente, a energia total recebida pela placa absorvedora de um coletor solar dotado de um sistema de coberturas, considerando às três componentes da radiação solar (radiação direta, radiação difusa e radiação difusamente refletida do solo), pode ser mensurada através de (Espínola Jr. op. cit., Duffie and Beckman(1980)):

$$S = [I_{dir} R_{dir} (\tau\alpha)_{dir}] + \left[I_{difi} (\tau\alpha)_{difi} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \right] + \left[\rho_{ds} (I_{dir} + I_{difi}) (\tau\alpha)_{ds} \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \right] \quad (2)$$

onde S é a energia total absorvida pela placa, ρ_{ds} é a refletância difusa do solo, I_{dir} é a radiação solar direta instantânea incidente em uma superfície horizontal na terra (W/m^2), I_{difi} é a radiação solar difusa instantânea total incidente em uma superfície horizontal na terra (W/m^2), R_{difi} é o fator geométrico que exprime a quantidade da radiação solar difusa total atinge uma superfície inclinada, R_{dir} é o fator geométrico que exprime a quantidade da radiação solar direta atinge uma superfície inclinada, $\tau\alpha$ é o produto transmitância-absortância no sistema de cobertura, $(\tau\alpha)_{difi}$ é o produto transmitância-absortância radiação difusa devido ao espalhamento no céu, $(\tau\alpha)_{dir}$ é o produto transmitância-absortância devido a incidência da radiação direta, $(\tau\alpha)_{ds}$ é o produto transmitância-absortância devido a reflexão nas proximidades, β é a inclinação do coletor solar (graus), ρ_{ds} é a refletância da radiação difusa nas proximidades.

2.2 Modelagem do sistema anteparo-coletor solar

Na descrição do almejado sistema anteparo-coletor solar utiliza-se a figura 1, na qual procura-se representar com exatidão a problemática da incidência da radiação solar no anteparo e sua posterior reflexão. Desta forma, um anteparo ótico plano, com características especulares, é colocado no lado AB do coletor solar, o qual apresenta comprimento C_c e largura L_c . A altura do anteparo é adotada como A_r e o comprimento como C_r . O ângulo β_{rc} é medido do plano do coletor, na direção da abertura do anteparo. O ângulo β representa a inclinação do coletor solar com relação ao plano horizontal.

A análise aqui referida, somente contempla o período da manhã, pois no período posterior o efeito do anteparo sobre o coletor solar é o sombreamento, o qual será descrito posteriormente.

O algoritmo descrito nesta seção é baseado nos algoritmos desenvolvidos em Rao et al. (op. Cit.), Seitel op. Cit. e Taha e Elidighidy op. cit..

Para a determinação do fluxo radiativo refletido no anteparo e incidente sobre o coletor solar, torna-se necessário uma análise vetorial do sistema. Para tanto, adota-se um sistema de coordenadas (X_1, Y_1, Z_1), o qual é denotado como sistema de coordenadas de referência. Este sistema apresenta os eixos X_1 e Y_1 fixos no plano horizontal, os quais representam as linhas norte-sul e leste-oeste, respectivamente (figura 1). Para representar o sistema anteparo-coletor solar define-se um outro sistema de coordenadas (X, Y, Z). Este novo sistema de coordenadas é concebido de forma a exprimir a inclinação do sistema anteparo-coletor solar com relação ao plano horizontal. Desta forma, os eixos Y e Z sofrem uma rotação β com relação aos eixos Y_1 e Z_1 com X permanecendo fixo e coincidindo com X_1 . Na obtenção da direção dos raios solares refletidos escolhe-se o canto D do anteparo. Desta forma, define-se um novo sistema de coordenadas (x_1, y_1, z_1), conforme figura 1. Os eixos x_1, y_1, z_1 são paralelos aos eixos X_1, Y_1, Z_1 de modo que uma rotação β_c sobre o eixo y_1 resulta em outro sistema de coordenadas (x, y, z) com eixos paralelos aos respectivos eixos dos sistemas coordenadas (X, Y, Z). Os eixos x_2, y_2, z_2 são definidos de forma a descrever a variação do ângulo β_{rc} , a qual é utilizada a fim de caracterizar uma inclinação ótima do anteparo com relação ao coletor solar. A direção dos raios solares incidentes e refletidos pode ser obtida com o uso de vetores unitários. Sendo assim, considerando a figura 1, tem-se n_c e n_r representando os vetores unitários na direção das normais a o plano do coletor solar e ao plano do anteparo, respectivamente. Admitindo o raio solar incidente como um vetor \vec{I}_1 no sistema de coordenadas (X_1, Y_1, Z_1), tem-se o azimuth solar (γ_s) e a altitude do sol (α_s) (figura 2). Considerando as figuras 1 e 2, pode-se expressar o raio incidente \vec{I} como um vetor unitário incidente no canto D no sistema de coordenadas (x, y, z) em função dos sistemas de coordenadas (x_1, y_1, z_1) e (x_2, y_2, z_2). Logo, tem-se:

$$\vec{I}_{(x,y,z)} = \vec{A} * \vec{B} \quad (3)$$

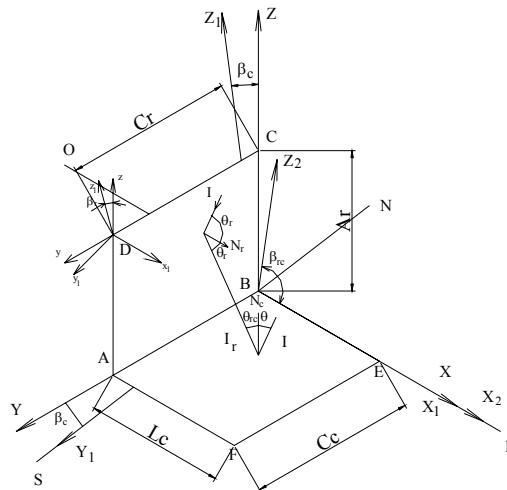


Figura 1 – Esquema representativo do sistema coletor solar/anteparo explicitando os sistemas de coordenadas.

onde \vec{A} é o vetor unitário que representa a transformação linear do sistema de coordenadas (x_1, y_1, z_1) para o sistema de coordenadas (x, y, z) e \vec{B} é o vetor unitário que representa o fator de transformação linear do sistema de coordenadas (x_2, y_2, z_2) para o sistema de coordenadas (x, y, z).

O raio refletido pode ser obtido pela aplicação das leis de reflexão planar, onde \vec{R} é um vetor unitário ao longo do raio refletido e \vec{N} é um vetor unitário normal ao plano do anteparo. Diante disto, admite-se que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão e que \vec{I} , \vec{R} , \vec{N} são vetores coplanares. Diante disto, pode-se utilizar uma transformação linear para obter o vetor unitário \vec{R} no sistema de coordenadas (x, y, z). Logo, tem-se:

$$\vec{R}_{(x,y,z)} = \begin{bmatrix} I_x \sin \beta_{rc} - I_z \cos \beta_{rc} \\ -I_y \\ -I_x \cos \beta_{rc} - I_z \sin \beta_{rc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

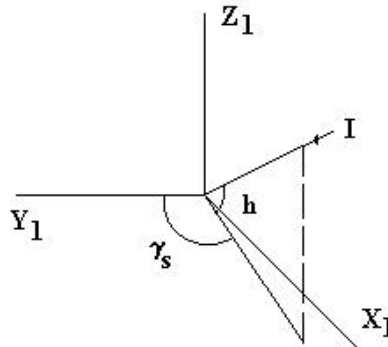


Figura 2 – Raio solar incidente no plano horizontal descrito pelo sistema de coordenadas (X₁, Y₁, Z₁).

Considerando P como um ponto sobre o plano do coletor (plano XY), no qual o raio refletido \vec{R}_1 toca o plano e \vec{BP} um vetor no plano do coletor (figura 3). Desta forma, pode-se determinar o tamanho do referido vetor, e por conseguinte, as coordenadas do ponto. Logo, pode-se mensurar a área iluminada, pela reflexão dos raios solares, no plano do coletor.

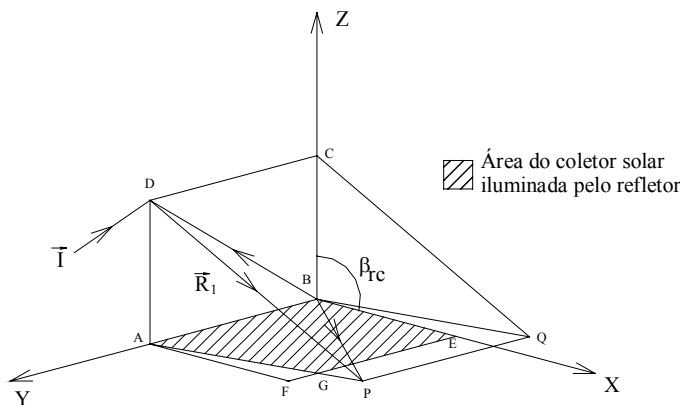


Figura 3 - Esquema representativo que ressalta a área iluminada pelo raio refletido no anteparo e incidente no plano do coletor solar.

Como a análise realizada aqui considera a variação do ângulo entre o anteparo e o coletor solar, torna-se necessário o cálculo da área sombreada, bem como da área iluminada no coletor pela

incidência direta da radiação solar, já que a partir deste ponto cessa a contribuição de energia radiante ofertada pelo anteparo.

Se a altitude do sol é favorável, o raio incidente no canto D do anteparo é refletido sobre o coletor solar e consequentemente não existe o efeito do sombreamento do anteparo no coletor. Entretanto, se o raio solar incide na parte posterior do anteparo, ele é refletido para o plano estendido do coletor, não atingindo assim a área útil do mesmo. Se isto acontece, ocorre a interrupção no fornecimento da radiação refletida no anteparo e incidente no coletor e iniciando-se o efeito do sombreamento. Logo, considerando um raio solar incidente (figura 4), o qual atravessa o plano estendido do anteparo sobre o ponto D e atinge o plano XY no ponto P_1 , determina-se a área sombreada do coletor solar.

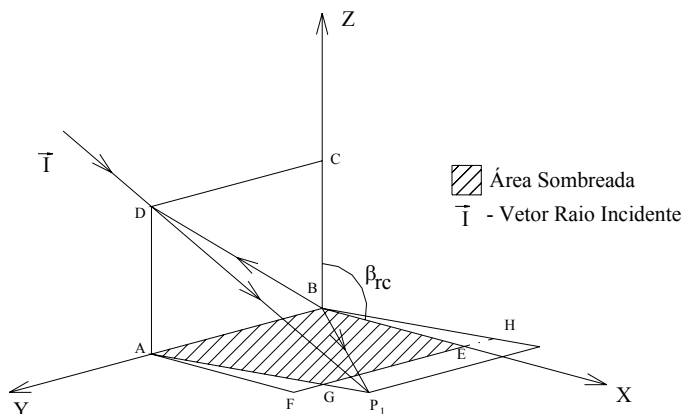


Figura 4 – Esquema representativo da área sombreada pelo anteparo no plano do coletor.

3. RESULTADOS

A variação do ângulo entre o coletor solar e o anteparo ótico tem influência preponderante na quantidade de energia que é coletada, pois este ângulo determina a variação da área iluminada pelo anteparo no plano do coletor, bem como a variação da área sombreada. Na análise realizada nesta seção, considera-se apenas a incidência da radiação solar direta sobre o anteparo, pois a radiação difusa incide em todas as direções e consequentemente é refletida em todas as direções, o que torna muito difícil mensurá-la nesta situação. Sendo assim, taxa de energia que atinge a placa absorvedora no interior do coletor solar é dividida em duas parcelas, as quais são a energia refletida no anteparo e incidente no coletor e a energia diretamente incidente no coletor, considerando o efeito do sombreamento do anteparo sobre o coletor. A soma destas duas parcelas nos fornece a energia total incidente sobre a placa absorvedora.

A área do anteparo ótico considerada é de 1 m^2 .

As inclinações do anteparo utilizadas na escolha de um ângulo de abertura ótimo, são as 60° , 80° , 90° .

Com o anteparo inclinado em 60° , em relação ao plano do coletor, verifica-se que a taxa de energia incremental devido ao anteparo não é relevante e o efeito do sombreamento reduz de forma indesejável a disponibilidade de energia, conforme as figuras 5.

Com o anteparo inclinado em 80° , em relação ao plano do coletor, a taxa de energia devido ao anteparo proporciona um pico maior na energia total que chega a placa absorvedora, quando comparada a energia total que chega ao coletor sem o anteparo (figura 6). Entretanto, o efeito do sombreamento ainda não é o desejável.

Com o anteparo inclinado em 90° , em relação ao plano do coletor, atinge-se uma proporção ótima entre a energia fornecida pelo anteparo ao coletor e o efeito do sombreamento, o que já havia sido preconizado por Tabor op. cit. e Seitel op. cit. e comprovado pelas figuras 7 e 8.

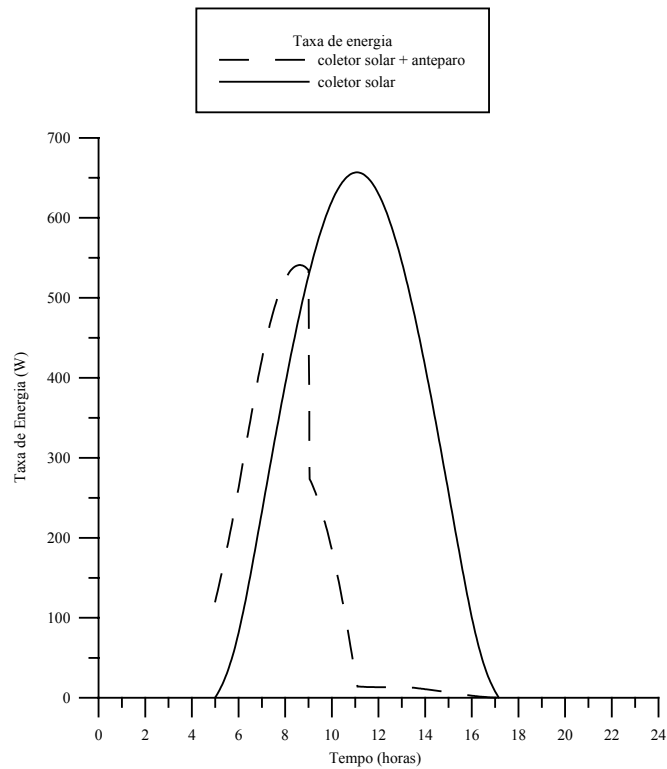


Figura 5 – Variação da taxa de energia incidente total sobre o coletor em função do tempo, com $\beta_{rc} = 60^\circ$.

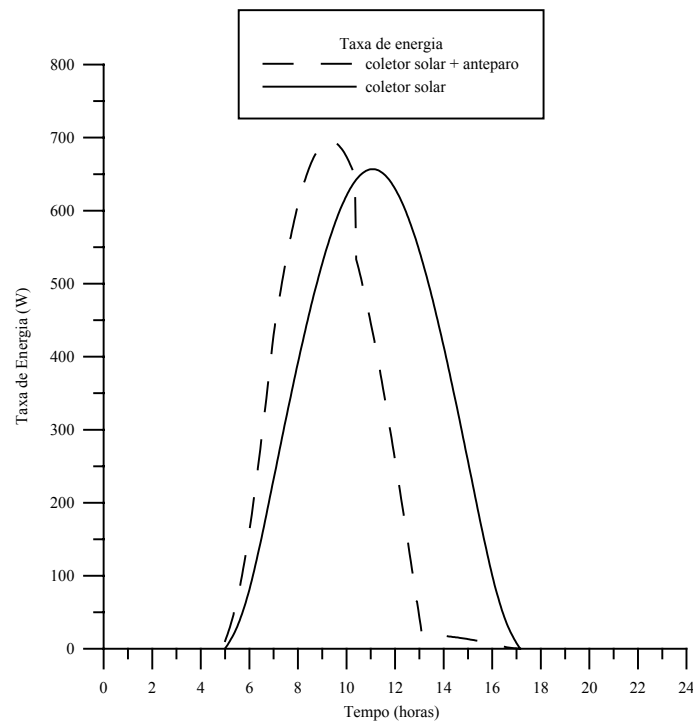


Figura 6 – Variação da taxa de energia incidente total sobre o coletor em função do tempo, com $\beta_{rc} = 80^\circ$.

A área iluminada pelo anteparo no plano do coletor determina a taxa de energia que pode ser disponibilizada ao sistema, através da reflexão da radiação no anteparo. Desta forma, pode deduzir-se que a variação da área iluminada tem relação direta com o movimento aparente do sol no céu, o qual pode ser determinado pelo ângulo de altura e o azimuth solar. Com isso, a sua variação pode ser expressa em função do tempo, conforme a figura 9.

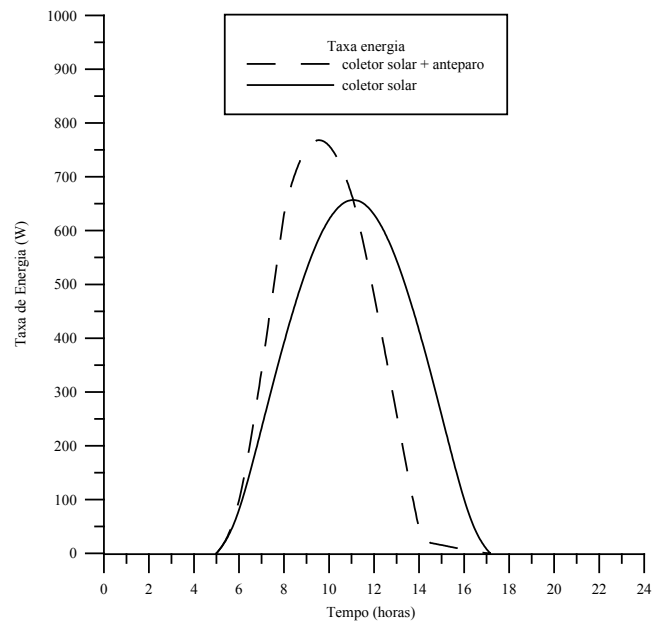


Figura 7 – Variação da taxa de energia incidente total sobre o coletor em função do tempo, com $\beta_{rc} = 90^\circ$.

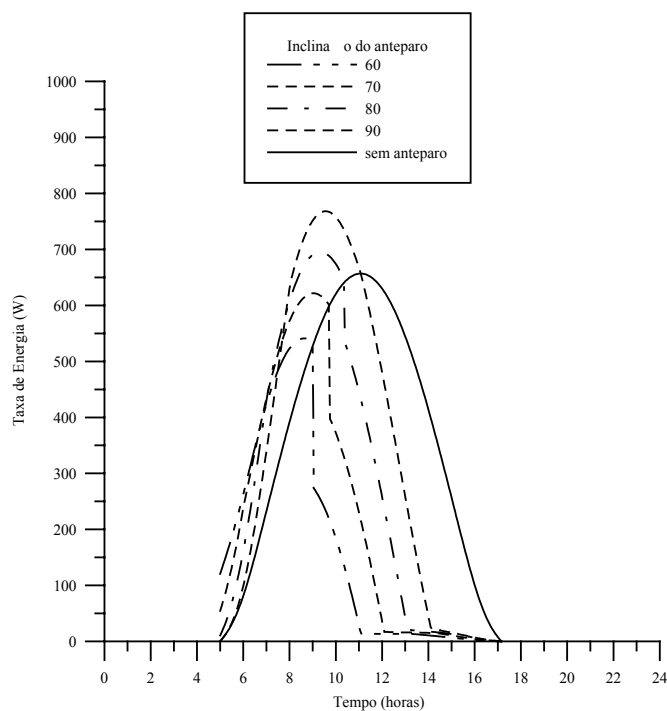


Figura 8 - Variação da taxa de energia incidente total sobre o coletor em função do tempo, com $\beta_{rc} = 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ e 90° .

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram estudados os efeitos da aplicação de um anteparo ótico, com características especulares, a um coletor solar plano com duplo vitral. Desta forma, verificou-se que

a disponibilidade de radiação solar sobre a placa absorvedora do coletor solar, com a instalação do anteparo, aumenta consideravelmente, o que é proporcionado por um pico de energia maior em um período menor de tempo. O sombreamento progressivo do coletor, proporcionado pelo anteparo, sana a necessidade clamada pelo sistema de refrigeração durante a etapa de resfriamento do leito adsorativo. Consequentemente, conclui-se que o anteparo ótico aplicado a um coletor solar, além de ser uma solução simples e barata é uma alternativa bastante viável para a aplicação em sistemas de refrigeração adsorativo solares.

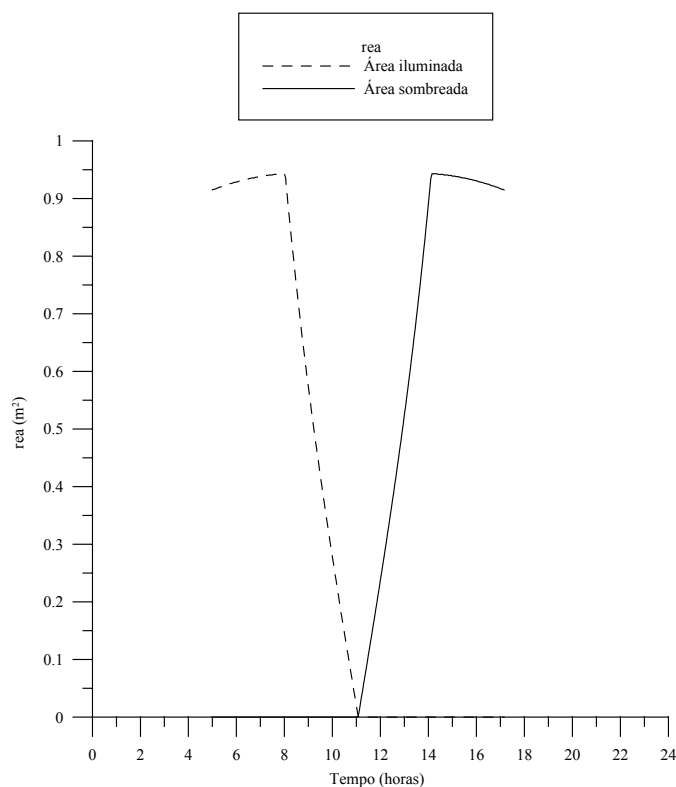


Figura 9 – Curvas representativas da variação das áreas iluminada e sombreada pelo anteparo no plano do coletor.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pelo apoio financeiro e por acreditar nos projetos de energia solar.

6. REFERÊNCIAS

- Araújo, A. L. S. “Simulação Global de um Refrigerador Solar Adsorativo empregando o Par Carvão Ativado – Metanol via Método dos Volumes Finitos”. Dissertação de Mestrado, Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2000.
- Chiam, H. F. “Planar concentrators for flat-plate solar collectors”. Solar Energy, vol. 26, pp. 503-509, 1981.
- Chiam, H. F. “Stationary reflector augmented flat-plate solar collectors”. Solar Energy, vol. 29, pp. 65-69, 1982.
- Duffie, J. and Beckmam, W. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley, 1980.

- Espínola Jr., J. “Simulação numérica de um refrigerador alternativo usando adsorção sólida”. Tese de Doutorado, Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2002.
- Larson, D. C. “Concentration ratios for flat-plate solar collectors with adjustable flat mirrors”. Journal Energy, vol. 4, pp. 170-175, 1980.
- McDaniels, D. K., Lowndes, D. H., Mathew, H., Reynolds, J. and Gray, R. “Enhanced solar energy collection using reflector solar thermal collector combinations”. Solar Energy, vol. 17, pp. 277-283, 1975.
- Taha, I. S. and Elidighidy, S. M. “Effect off-south orientation on optimum conditions for maximum solar energy absorbed by flat-plate collector augmented by plane reflector”. Solar Energy, vol. 25, pp. 373-379, 1980.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

Otimization of the Plane Solar Collector through the application of a Optic Screen

José Espínola Júnior

CEFET-SE/Uned/Coind

Av. Gentil Tavares, 1166, Getúlio Vargas, CEP: 49055-260 Aracaju-SE, Brasil.

joseespinolajr@uol.com.br

Gustavo José Cardoso Braz

CEFET-SE/Coind

gjcb@sergipenet.com.br

Francisco Pontes de Carvalho

UFPB/CT/DEM

José Antônio Riul

UFPB/CT/DEM

riul@ct.ufpb.br

José Maurício Gurgel

UFPB/CT/DEM/LES

Universidade Federal da Paraíba, Laboratório de Energia Solar, Cidade Universitária, Caixa Postal 5115, CEP: 58051-970, João Pessoa-PB, Brasil.

gurgel@les.ufpb.br

Abstract. *The current work have main objective give a alternative in viabilization of solar adsortive refrigeration systems, through utilization of optic plane booster couple tubular plane solar colector. For amount, turn necessary that production of the matematic model with purpose of faithfully relate the incidence process, reflexion and absorption of solar rays in kit solar colector – optic booster. For that reason, be fulfilled numerics simulations for resolution of the ideal configurations of the system.*

Keywords. *Solar colector, optic booster, solar radiation, incidence, reflection.*