

DESENVOLVIMENTO DE UM CONCENTRADOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO PARA AQUECIMENTO DE FLUIDOS

Manassés Almeida Gomes – manasses.fis@gmail.com

Germano Pinto Guedes – germano@uefs.br

Universidade Estadual de Feira de Santana, Departamento de Física

Resumo. Objetiva-se projetar, calcular numericamente e construir um concentrador solar cilindro-parabólico para aquecimento de fluidos, o qual consiste em uma chapa de inox conformada em uma estrutura parabólica tendo ao longo do foco um tubo de cobre funcionando como absorvedor e um mecanismo de acompanhamento que o faça estar sempre direcionado para o sol de forma que os raios solares incidam perpendicularmente à área do concentrador “vista pelo sol”. Neste trabalho, definiram-se inicialmente os parâmetros geométricos a partir de uma equação desenvolvida que relaciona esses parâmetros, de maneira a permitir uma melhor eficiência e concomitantemente visando não comprometer a mobilidade do conjunto no acompanhamento do movimento aparente do sol. Para modelar o sistema, foram desenvolvidas equações diferenciais que levam em conta os parâmetros físicos (absortividade do tubo receptor, refletividade do espelho, condutividade e capacidade térmica dos materiais envolvidos, transferência de calor por condução e radiação) e geométricos (concentração da energia incidente na região focal) do concentrador. Essas equações foram aplicadas em um programa computacional que calcula, a partir dos parâmetros de entrada, a temperatura no tubo em cada instante, utilizando as equações do modelo e nos fornece a evolução da temperatura. Para comprovar a validade do modelo teórico construímos o coletor solar segundo as dimensões utilizadas no cálculo teórico e compararam-se os resultados obtidos. Serão apresentados gráficos que mostram a evolução da temperatura, perdas energéticas, como também, possíveis formas de atenuação de perdas e por fim a eficiência térmica do concentrador solar cilíndrico parabólico construído.

Palavras - chave: energia, solar, concentrador, parabólico, instrumentação.

1. INTRODUÇÃO

Uma das formas de aproveitamento da energia solar são os coletores solares que segundo Kalogirou (2009) são distinguidos pelo seu movimento (estacionário, movimento de acompanhamento em um eixo, movimento de acompanhamento em dois eixos) e faixa de temperatura em que operam. Dentre estes, está o concentrador solar cilíndrico parabólico que movimenta-se em uma direção acompanhando o movimento aparente do sol de forma que sua superfície esteja sempre perpendicular aos raios solares, tendo como característica uma faixa de temperatura de 60 – 400°C a depender da acurácia na fabricação da superfície parabólica, refletividade do material utilizado, mecanismos de minimização das perdas, grau de perfeição no “acompanhamento do sol”. O concentrador solar cilíndrico parabólico é apontado por pesquisadores como um dos mais eficientes aquecedores, pois os sistemas óticos utilizados na obtenção de altas temperaturas consistem em estruturas parabólicas espelhadas que tem a propriedade de concentrar toda a radiação incidente numa zona situada no plano focal, permitindo que o conjunto atinja uma temperatura mais elevada se comparado a outros sistemas. (Fig. 1)

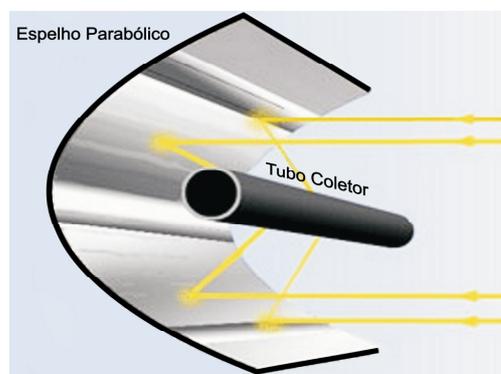


Figura 1- Figura ilustrativa da reflexão dos raios solares pela placa refletora direcionando-os ao foco.

Propõe-se uma melhor e maior utilização da energia solar, visto que é necessário um maior desenvolvimento tecnológico da área, visando o aumento da eficiência e conseqüente crescimento do seu uso principalmente na região

Nordeste do Brasil que possui um ótimo índice de insolação solar (média de 2600 horas de sol/ano) e mesmo assim se tem um ínfimo aproveitamento desta energia se comparado a alguns países cuja irradiação anual é muitas vezes menor, por exemplo, na Alemanha há aproximadamente 5,1 m² de coletores solares/1000 habitantes ao passo que no Brasil este valor é de apenas 0,012 m². Um investimento nessa área proporcionaria a inclusão social e o desenvolvimento de comunidades afastadas dos centros urbanos, com melhoras significativas na qualidade de vida de quem não tem acesso a outras formas de energia (Fantinelli, 2002), bem como atenuaria um dos grandes desafios deste século que é sem dúvida o abastecimento energético mundial.

Considerando as informações acima, objetiva-se projetar, simular e construir um concentrador solar cilindro-parabólico para aquecimento de fluidos. Neste trabalho, definiram-se inicialmente os parâmetros geométricos: área, abertura e distância focal, de maneira a permitir maior mobilidade do conjunto no acompanhamento do sol sem comprometer a sua eficiência.

1.1 Processos de transferência de calor

É possível quantificar a transferência de calor em termos das equações apropriadas que descrevem esses processos. Essas equações podem ser utilizadas para calcular a quantidade de calor transferida por unidade de tempo que é definida como potência.

Condução

É o modo pelo qual o calor é transferido através de um meio material, de uma molécula ou átomo para sua vizinha, ou seja, é o processo no qual a matéria mais quente em contato direto com um material mais frio troca calor até atingirem o equilíbrio térmico, cuja principal característica é a transferência de energia sem a simultânea transferência de matéria, ocorrendo, assim, predominantemente nos sólidos e também pode se vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as partículas de menor energia, em um meio, devido as interações entre elas.

No nosso caso específico o tubo é aquecido ao receber a incidência de raios solares por conta da agitação das moléculas de cobre.



Figura 2- Condução de calor através da parede do tubo.

Depende da propriedade física dos materiais que é descrita como a habilidade dos mesmos de conduzir calor; (unidade da condutividade térmica k (W/(mK))). Este termo diz respeito a energia absorvida pela superfície opaca do material que flui através da parede do tubo, de fora para dentro, e que finalmente é transferida para o fluido.

Radiação

A radiação emitida por um corpo devido à sua temperatura é conhecida como radiação térmica, que conhecidamente todo corpo a uma temperatura acima do zero kelvin emite esse tipo de radiação para o meio que o cerca, e dele absorve. Se um corpo está inicialmente mais quente do que o meio, ele irá se esfriar, porque sua taxa de emissão de energia excede à taxa de absorção.

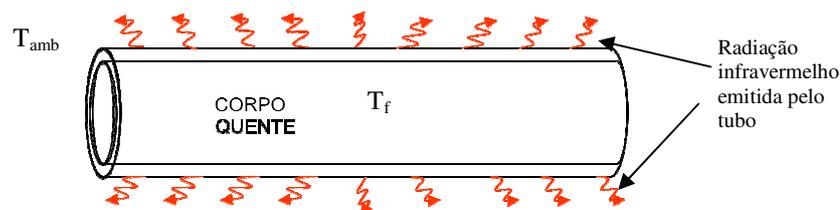


Figura 3- Emissão de radiação devido à temperatura do corpo.

Em suma essa é quantidade de energia perdida por unidade de tempo devido à diferença de temperatura entre o corpo e o ambiente até o sistema atingir o equilíbrio térmico e quando esse é atingido, as taxas de emissão e absorção

são iguais. Nesse processo de transmissão a energia não precisa de um meio material para se propagar, essa denomina-se energia radiante e é transmitida através de ondas eletromagnéticas.

Convecção

É a transferência de potência energética devido ao escoamento de fluido atuando como agente transportador da energia que é transferida da parede ou para a parede (Fig. 4) A convecção é um mecanismo de transferência de calor em que as características do escoamento (por exemplo, perfil de velocidade e turbulência, viscosidade do fluido) afetam, de modo significativo, a taxa de transferência de calor entre a parede e o escoamento.

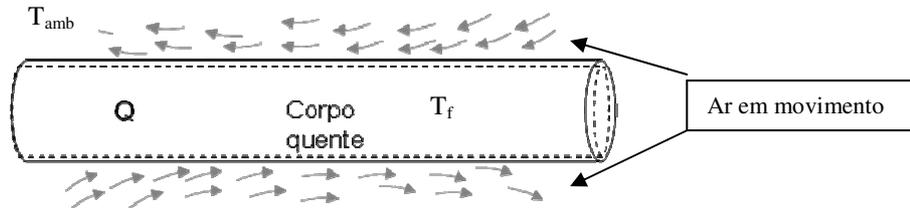


Figura 4- Convecção externa ao tubo devido à movimentação do ar.

Nesse termo percebe-se que o calor é perdido para o meio, por isso o sinal negativo, é transferido por meio do contato do corpo quente com a camada de fluido que está imediatamente sobre o corpo e esta o transfere para a camada logo acima e assim sucessivamente, dessa forma está claro que, microscopicamente, a convecção se reduz a uma condução. O coeficiente de transferência de calor “*h*” é um importante fator a ser considerado nos cálculos, pois tem enorme influência na quantidade de energia perdida por convecção, pois ele varia em função da geometria do tubo, velocidade do fluido e de suas propriedades (calor específico, densidade, viscosidade, etc). Pode-se escrever *h* em função do número de Nusselt (Eq. 1), esta que é uma grandeza bastante utilizada para a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção, pois, proporciona uma medida da transferência convectiva de calor na superfície.

$$h = Nu \cdot k / D \quad (1)$$

Onde,

Nu → número de Nusselt;

k → condutividade térmica do fluido (W/(m K))

D → diâmetro do tubo (m)

h → coeficiente de transferência de calor. (W/m²K)

O número de Nusselt (*Nu*) pode ser encontrado a partir de duas outras constantes, a saber, o número de Prandtl (*Pr*), que é adimensional e proporcional ao quociente entre a viscosidade e a difusão térmica, e o número de Reynolds (*Re*), que determina o regime de escoamento de determinado fluido sobre uma superfície (Kumar & Reddy 2008 et. al.), ou ainda como recomenda Duffie & Beckmam (Duffie & Beckmam 2006) para o fluxo de ar através de um único tubo em um ambiente ao ar livre.

$$Nu = \begin{cases} 0,40 + 0,54 Re^{0,52} & \text{para } 0,1 < Re < 1000 \\ 0,30 Re^{0,6} & \text{para } 1000 < Re < 50000 \end{cases}$$

A expressão para o número de Reynolds pode ser escrita da seguinte forma

$$Re = VD / \nu \quad (2)$$

Onde *V* é a velocidade do fluido, *D* o diâmetro do tubo e ν a viscosidade cinemática do ar.

Utilizando esses dados foi encontrado um número de Reynolds de 3740 e conseqüentemente um coeficiente de transferência de calor de 73,22W/m²K.

2. METODOLOGIA

O trabalho foi dividido em três etapas e na primeira delas fez-se um estudo para avaliar quais os parâmetros geométricos, (largura, comprimento, distância focal, mancha focal), de um concentrador solar já construído, pois esses seriam utilizados na construção de um modelo teórico e para isso, pesquisou-se de que forma são obtidos. Para concluir

o objetivo desta etapa buscou-se uma relação entre os parâmetros geométricos (Eq. 3), que descrevesse com precisão a relação entre as quantidades.

2.1 Cálculo da mancha focal

Levando em conta o ângulo de abertura em que os raios solares chegam à Terra, aproximadamente $0,53^\circ$, e pela lei de Snell é sabido que os raios são refletidos com ângulo igual ao incidente e no mesmo plano e são justamente as interseções destes raios refletidos por toda a placa coletora que forma a mancha focal (Fig.5). A (Eq. 3) teve importância crucial na determinação do diâmetro da mancha focal, que é formada, pois fornece uma relação entre abertura angular, distância focal e diâmetro da mancha focal, uma vez que, substituindo o valor de f (distância focal) e da abertura angular, consegue-se determinar a partir das equações desenvolvidas qual o tamanho da mancha focal na região receptora.

$$cd = \frac{4f * \operatorname{tg}\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\left(1 + \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)} \quad (3)$$

Na eq. acima cd representa o diâmetro da mancha focal, ε ângulo de abertura em que os raios solares chegam à Terra e α o ângulo de abertura do coletor.

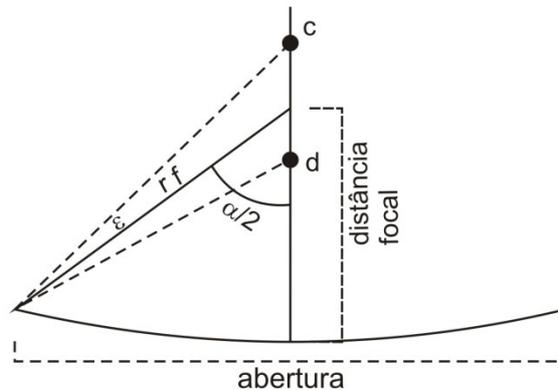


Figura 5- Ilustração das quantidades envolvidas na determinação do diâmetro da mancha focal. (fora de escala).

Na figura 5 é apresentada uma ilustração para contribuir com o conceito, mostrando que a abertura em que os raios solares atingem a reta imaginária que perpassa o vértice da parábola e o foco é o diâmetro da mancha. (representado pelas letras c e d). As dimensões do concentrador são as seguintes:

Distância focal - $4 \cdot 10^{-1}$ m
 Abertura - $5 \cdot 10^{-1}$ m
 Abertura angular - 70°
 Comprimento - 1,5 m
 Diâmetro da mancha focal - $5 \cdot 10^{-3}$ m
 Diâmetro interno do tubo - $14 \cdot 10^{-3}$ m
 Diâmetro externo do tubo e - $15 \cdot 10^{-3}$ m
 Espessura da parede do tubo - $5 \cdot 10^{-4}$ m

2.2 Eficiência

No manual (ASHRAE 2003) é apresentada uma forma de avaliar a eficiência térmica de um concentrador solar e (Arasu 2007) mostra que é possível escrever da seguinte forma.

$$\eta = n_o - \frac{h(T_t - T_{amb})}{IC} \quad (4)$$

Onde, n_o → eficiência ótica
 h → coeficiente de transferência de calor ($W/(m^2K)$)
 T_t → temperatura do tubo receptor (K)
 T_{amb} → temperatura ambiente (K)

$I \rightarrow$ radiação solar direta (W/m^2)

$C \rightarrow$ razão de concentração

Essa equação nos fornece qual a quantidade da energia disponível que de fato é utilizada no aquecimento do conjunto. Ainda segundo Kalogirou (2009) uma forma simples de escrever n_o é:

$$n_o = \rho \cdot K \cdot \tau \cdot \alpha_t \left[(1 - A_f \cdot \text{tg}(\theta)) \cos(\theta) \right] \quad (5)$$

Para;

$\rho \rightarrow$ refletividade da chapa de aço inox polida;

$K \rightarrow$ Fração da radiação refletida que chega ao absorvedor (calculada com base na seção 6.5)

$\alpha_t \rightarrow$ absorvidade do tubo absorvedor;

$\tau \rightarrow$ Transmitância da cobertura de vidro;

$\theta \rightarrow$ Ângulo de incidência;

$A_f \rightarrow$ Fator geométrico;

Como uma das características do concentrador proposto é que esteja sempre direcionado para o sol, então o ângulo $\theta=0$ e não sem cobertura de vidro, então a equação se reduz a,

$$n_o = \rho \cdot K \cdot \alpha_t \quad (6)$$

A (Eq. 6) descreve um termo que depende da acurácia da fabricação do protótipo, ou seja, da perfeição do perfil parabólico como também da quantidade de energia que o tubo consegue absorver e esse está intimamente ligado a razão de concentração que é definida como,

$$C = Au/Ai \quad (7)$$

Com;

$Au \rightarrow$ área útil do concentrador, que consiste na área total menos a área sombreada pelo tubo absorvedor; (m^2)

$Ai \rightarrow$ área iluminada pelos raios solares refletidos pela placa concentradora. (m^2)

A constante C é um fator apenas geométrico que determina o quanto da energia refletida pela placa que chega ao tubo. Depois desse estudo o próximo passo foi estudar as características físicas (condutividade do tubo, refletividade da placa), bem como a quantidade de cada material utilizado na construção do coletor, pois essas, tem grande influência no aquecimento.

O material utilizado como absorvedor foi um tubo de cobre e por isso estudou-se as características desse material que apresenta condutividade térmica relativamente alta $401\text{W}/(\text{m}^*\text{K})$ e é mais acessível. É um dos metais mais importantes industrialmente, de coloração avermelhada, dúctil, maleável e bom condutor de eletricidade. Apesar de ser um dos metais menos abundantes da crosta terrestre - 0,12% do mais abundante, o alumínio - é de fácil obtenção apesar de laboriosa, devido à pobreza do metal nos minerais. Porém, comparando sua condutividade térmica com a do alumínio, $237\text{W}/(\text{m}^*\text{K})$, ou ferro, $80,2\text{W}/(\text{m}^*\text{K})$, percebe-se uma enorme diferença na capacidade de transferir calor. Para o espelho refletor foi escolhido o aço inox polido, por ser um ótimo refletor e que dependendo do grau do polimento pode apresentar refletividade de aproximadamente um.

Determinadas as dimensões, foi iniciado o modelamento matemático (segunda etapa), que consistiu em determinar a equação diferencial que rege a variação da temperatura do tubo absorvedor, a partir de um balanço energético que considera a energia total que chega ao absorvedor (tubo que passa ao longo do foco) e suas perdas por radiação e convecção apresentadas adiante, como também, as dimensões da parábola encontradas anteriormente, massas e calores específicos (Ver seção 3) e a partir desta calcular através de programa computacional qual seria a temperatura atingida pelo conjunto.

3. MODELAMENTO MATEMÁTICO

Para fazer o modelamento matemático, admitiu-se temperatura ambiente, velocidade do vento, densidade, massa e volume do tubo constantes. O volume foi calculado com base nas dimensões, para enfim encontrar a massa que será utilizada na obtenção da capacidade térmica que tem um importante papel na inércia térmica do sistema.

Baseado no princípio da conservação de energia foi feito o balanço energético procurando levar em conta os detalhes e fazer as considerações necessárias a resolução proposta que de forma geral pode ser expressado como,

$$\text{Energia utilizada} = \text{Energia que chega} - \text{Energia perdida} \quad (8)$$

E a partir desta foi embasado todo o balanço energético.

3.1 Balanço energético

A radiação absorvida pelo tubo é a irradiância solar refletida pela área de seção reta do espelho A_p “vista pelo sol” e multiplicada pela capacidade que o espelho tem em concentrar os raios. Esta é dada por

A radiação absorvida por unidade de área de abertura

$$P = A_p \cdot I \cdot n_o \quad (9)$$

Onde P → potência absorvida pelo tubo;

A_p → área reta perpendicular aos raios solares

I → irradiância solar medida pelo pireliômetro Kipp&Zonen

n_o → eficiência ótica do sistema

A eficiência ótica (Eq. 9), tem uma enorme influência na quantidade de energia que chega ao tubo, dependendo dos coeficientes de refletividade do espelho parabólico e absorvidade do tubo.

O calor utilizado para o aquecimento do tubo é

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (10)$$

Que é a equação de calor sensível. Ela nos permite conhecer quanto calor é necessário para elevar a temperatura de uma certa massa m de material que tem calor específico c de uma temperatura T_o a T .

Fazendo uso das equações de transferência de calor e obedecendo ao modelo foi desenvolvida uma equação diferencial que fornece a evolução temporal da temperatura. Eq (12)

$$\Delta T / \Delta t = (A_p \cdot I \cdot n_o - \sigma \cdot A \cdot \Delta T^4 - h \cdot A \cdot \Delta T) / m \cdot c \quad (11)$$

$$dT/dt = (A_p \cdot I \cdot n_o - \sigma \cdot A \cdot T^4 - h \cdot A \cdot T) / (m \cdot c) \quad (12)$$

Como será visto no próximo tópico, essa equação foi implementada num programa computacional de forma a calcular e fornecer a evolução do aquecimento do tubo com o tempo. Essa é a equação diferencial que permite conhecer o comportamento da temperatura ao longo do tempo.

OBS: O termo de transferência de calor por condução foi desconsiderado no balanço energético, pois ainda não é levado em conta fluido interno em contato com o tubo e portanto que nenhuma fração da energia que chega ao tubo seria perdida por condução.

Como o maior interesse era conhecer o comportamento da função, foi implementado um modelo computacional para solucionar a equação diferencial obtida do balanço energético e, além disso, emitir como resultado um gráfico, Temperatura X Tempo, cuja interpretação permitirá conclusões sobre o modelo. O programa computacional teve como entrada os dados de irradiância solar coletados no Laboratório de Energia Solar da UEFS por um pireliômetro, (CMP3, Kipp&Zonen), que registra a cada 5 segundos a irradiância incidente. Ele calcula, a partir dos parâmetros de entrada, a temperatura no tubo em cada instante, utilizando as equações do modelo. Também foram consideradas, as variáveis físicas que influenciam diretamente no desempenho do sistema como a refletividade do espelho, sua emissividade no infravermelho e as capacidades térmicas do tubo de cobre.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Esta etapa do trabalho teve como objetivo a validação do modelo e para isso foi desenvolvido o projeto de construção do concentrador solar obedecendo às dimensões pré-determinadas, porque assim, seria possível comparar os resultados obtidos.

Foi utilizado um concentrador construído com as dimensões apresentadas e nele foi acoplado um pireliômetro (Kipp&Zonen), que é um aparelho que mede especificamente a tensão gerada por radiação solar direta, disposto paralelamente ao vértice da parábola para que mantivesse a mesma inclinação em relação ao sol. Apenas a radiação solar direta é concentrada pelo espelho parabólico e conseqüentemente útil no aquecimento do tubo.

Para medir a temperatura foi utilizado um termopar, este que consiste basicamente numa junção de metais diferentes que responde com uma circulação de corrente elétrica quando submetido a um diferencial entre suas junções segundo o efeito Seebeck, colocado em contato com o tubo, ambos (termopar e pireliômetro), conectados a multímetros digitais que possuem saída serial e assim faz interface com um computador que armazena os dados de temperatura e tensão.

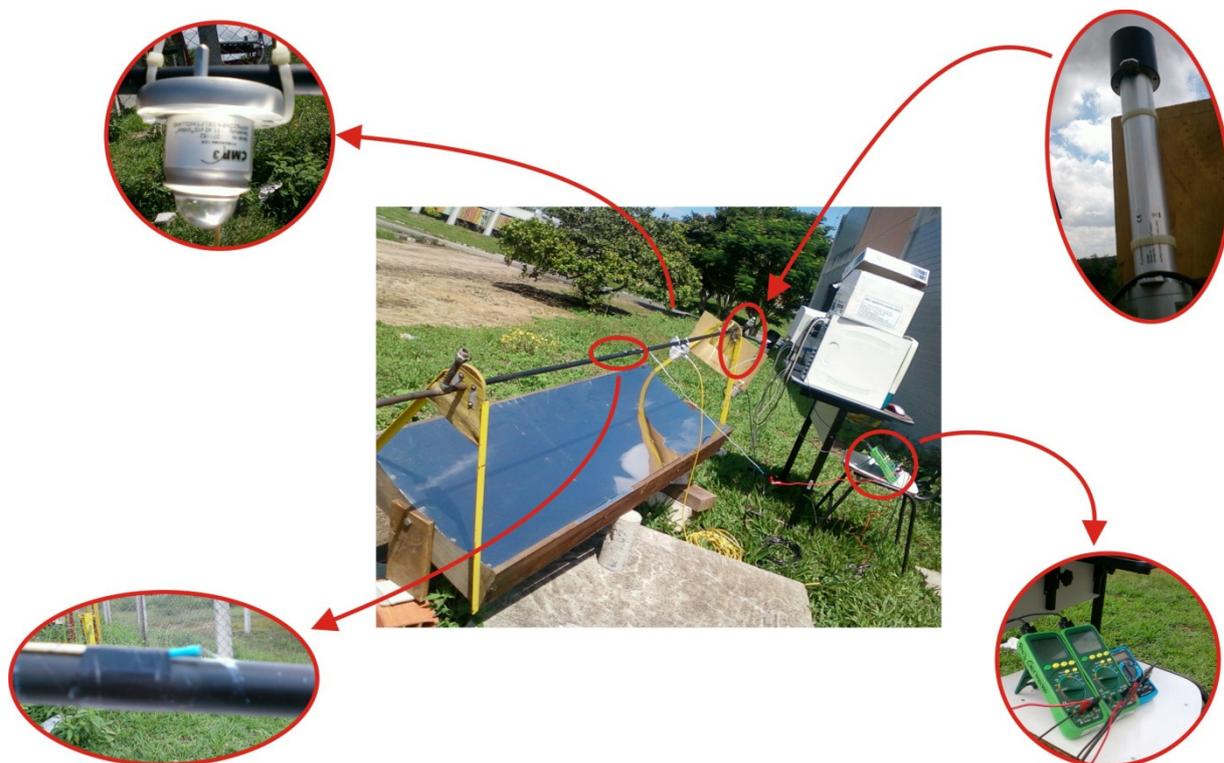


Figura 6- Aparato utilizado experimentalmente. (Em detalhe o radiômetro e pireliômetro 'superior esquerdo e direito respectivamente', termopar e conjunto de multímetros 'inferior esquerdo e direito respectivamente').

O tubo foi pintado de tinta preta, opaca, resistente a altas temperaturas (HOT 600) esse é um procedimento indispensável para obtenção de uma boa eficiência ótica, pois melhora a absorção e diminui a reflexão dos raios solares pelo tubo e conseqüentemente aumenta a eficiência térmica, visto que depende diretamente da capacidade que o tubo tem em absorver calor. Ainda com o intuito de majorar a eficiência a placa foi polida buscando uma melhor refletividade.

Os dados foram colhidos nos meses de fevereiro, março e abril, nos quais o acompanhamento da posição do sol pelo concentrador era manual, utilizando o mecanismo de direcionamento do pireliômetro como baliza, este consiste em mover o aparelho até que a mancha do primeiro orifício esteja exatamente sobre o segundo (Fig. 7).

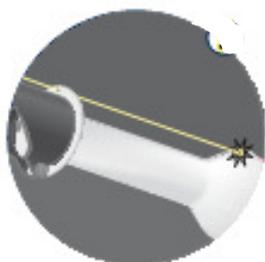


Figura 7- Ilustração do mecanismo de direcionamento do pireliômetro

Esses dados foram tratados de forma a fornecer a grandeza esperada (transformar a tensão medida em irradiância solar utilizando a sensibilidade do aparelho informada pelo fabricante).

Ainda como parte do experimento, julgou-se relevante conhecer qual a capacidade de concentração energética do concentrador, e para isso, foi medida a radiação solar na região focal e fora dela utilizando um piranômetro preso ao tubo e direcionado para o vértice da parábola e um pireliômetro direcionado para o sol respectivamente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresentar-se-á gráficos comparativos de algumas situações que para efeito de estudo foram confrontadas.

5.1 Gráficos de temperaturas atingidas teórico e experimentalmente

Foram coletados, dados de irradiância com o pireliômetro e simultaneamente a temperatura atingida pelo tubo. Utilizando os dados de radiação direta, aplicados no programa computacional, obtiveram-se os valores de temperaturas a partir do modelo, esses foram plotados juntos para uma melhor apreciação. Como se pôde observar, em quase todos os dias, teoricamente obtém-se aproximadamente 1,3 vezes da temperatura experimental. A figura abaixo mostra um dia (07/04/2010), com muitas nuvens, com máxima teórica de 106 °C e experimental de 81 °C.

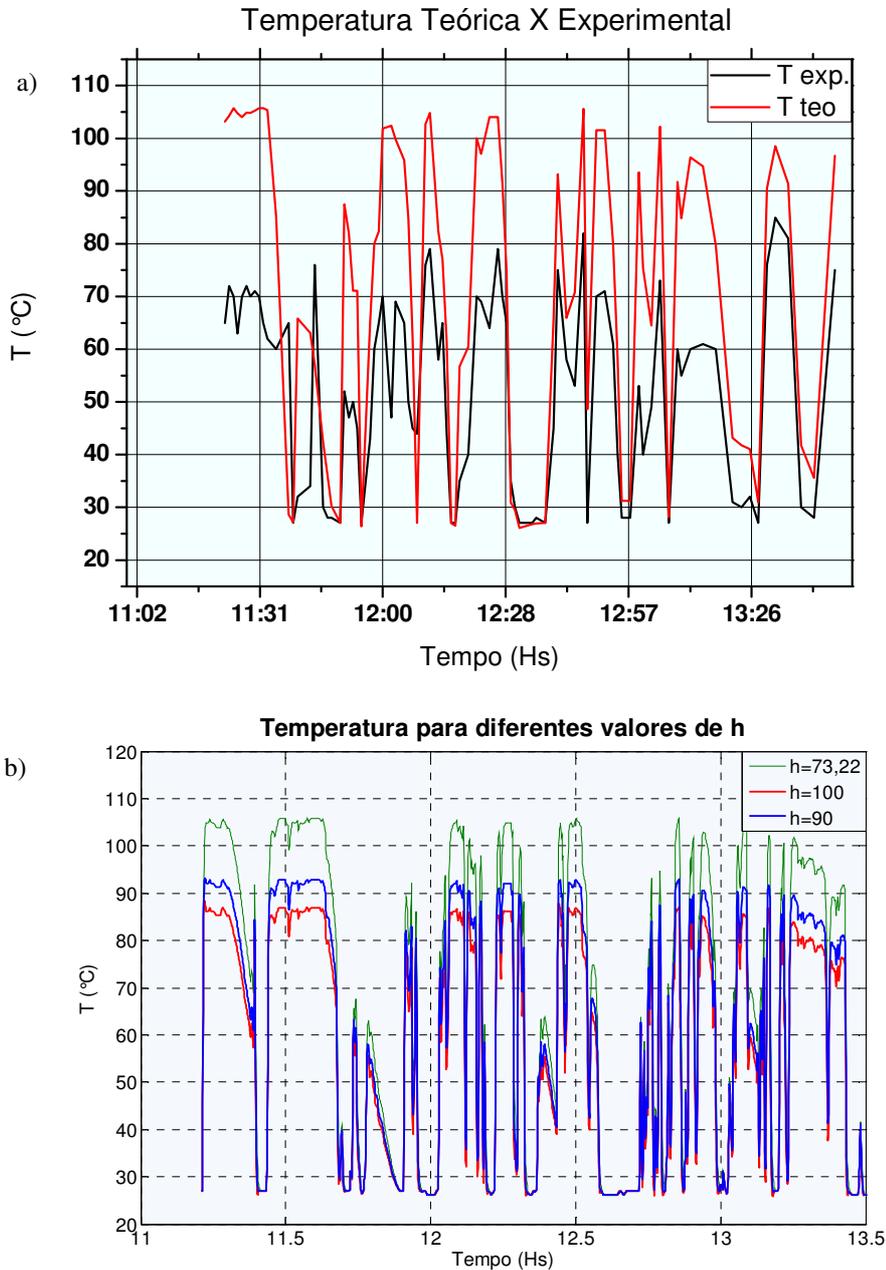


Figura 8– a) Comparação entre temperaturas atingidas teórico e experimentalmente para valor de “h” calculado via parâmetros físicos; b) comparação entre as temperaturas atingidas para valores arbitrários de “h”. (Dia 30/03 de 2010).

Observando que a discrepância de temperaturas entre valores medidos e calculados é muito grande, foi investigado qual valor do coeficiente de transferência de calor forneceria valores próximos aos obtidos experimentalmente, e percebeu-se que isso acontece para valores de “h” maiores que 100 W/m²K.

5.2 Gráficos de perdas energéticas

Utilizando o modelo foram investigados também quais os fatores de perdas são mais influentes na variação da temperatura, para assim direcionar os esforços no sentido de atenuá-las, como também, a partir do conhecimento da contribuição de cada termo determinar qual a porção da energia incidente que de fato está sendo absorvida pelo sistema e fazendo variar a temperatura. Nesse intuito, as perdas energéticas foram discriminadas como mostrado abaixo (Fig. 9).

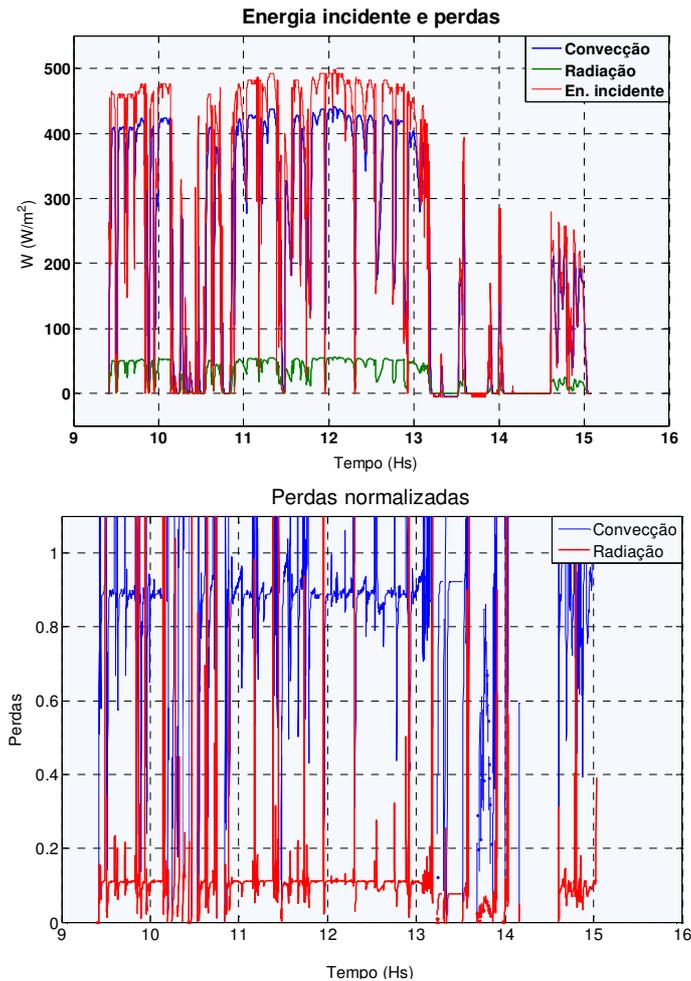


Figura 9- Gráficos representando as perdas energéticas.

A partir dos gráficos pode-se concluir claramente que o fator preponderante no que diz respeito às perdas é a convecção, sendo responsável por mais de 80% das perdas. Visando uma melhor avaliação da influência da convecção nas temperaturas atingidas foi desenvolvido no qual o tubo recebia um envoltório de vidro. (Ver seção 5.3).

5.3 Gráficos de temperaturas atingidas teoricamente pelo tubo de cobre com envoltório.

Na figura seguinte é apresentada a evolução da temperatura do tubo com e sem um envoltório de vidro de 25 mm de diâmetro e uma transmitância de 92% no visível e totalmente opaco ao infravermelho. Observam-se máximas sem e com envoltório de vidro de 106 °C e 335 °C respectivamente.

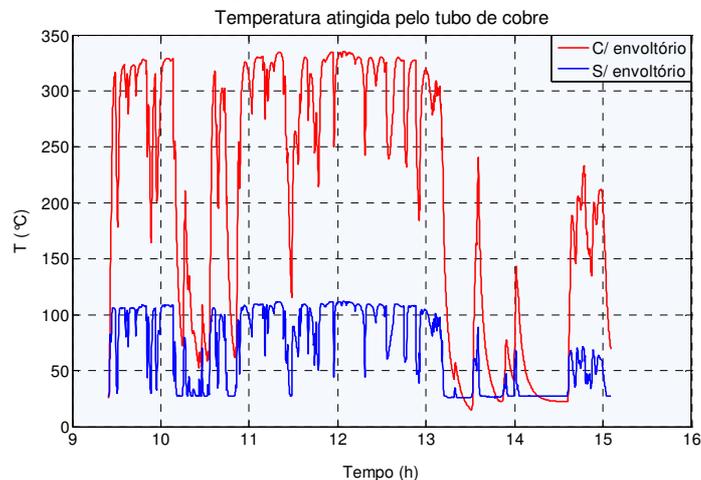


Figura 10- Temperatura atingida pelo tubo absorvedor com e sem envoltório de vidro. (Dia 30 de março de 2010).

Primeiramente foram determinados quais os fatores que influenciam no aquecimento do tubo com a presença de um envoltório de vidro e quais as conseqüências disso no processo de aquecimento levando em consideração seu calor específico, massa e em que proporção atenuaria as perdas energéticas. Assim percebe-se que o uso de técnicas que atenuem a convecção traria grandes benefícios no que diz respeito à eficiência do sistema.

5.4 Influência da área de abertura na evolução da temperatura

Para constatar que a geometria influencia na temperatura atingida foram comparados dados de temperaturas atingidas para diferentes áreas de abertura, mantendo todos os outros parâmetros. Como temperaturas máximas para $A = 0,7275 \text{ m}^2$, $A = 0,7275 \cdot 1,5 \text{ m}^2$ e $A = 0,7275 \cdot 2$, $106 \text{ }^\circ\text{C}$, $143 \text{ }^\circ\text{C}$ e $178 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente. Percebe-se que a temperatura não varia linearmente com a área e isso se deve principalmente ao termo de radiação que varia com a quarta potência da temperatura.

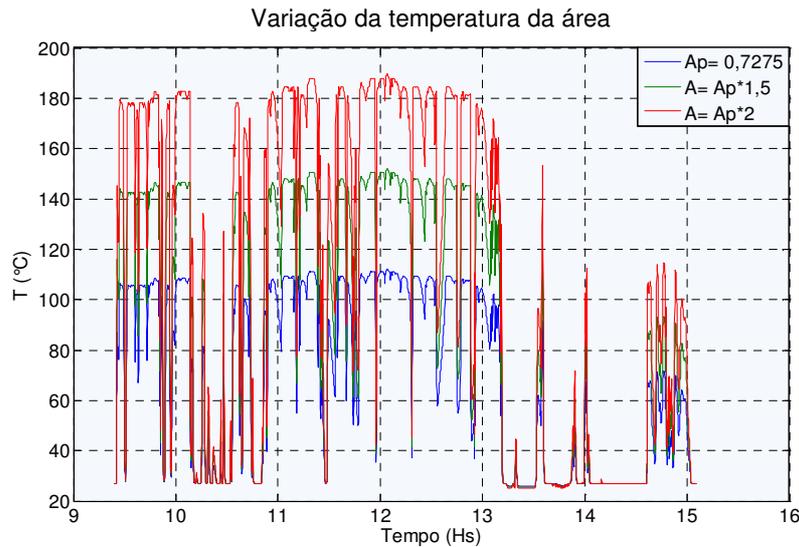


Figura 11- Influência das áreas de abertura nas temperaturas atingidas pelo sistema

5.5 Irradiância concentrada versus irradiância direta

Como foi dito no procedimento experimental, os resultados experimentais de radiação direta e concentrada foram confrontados e como foi constatada esta última é consideravelmente maior que a energia direta por um fator médio aproximadamente igual a 14. Daí pode-se perceber a utilidade desse tipo de coletor, pois, com um aparato relativamente simples foi possível majorar significativamente a intensidade recebida.

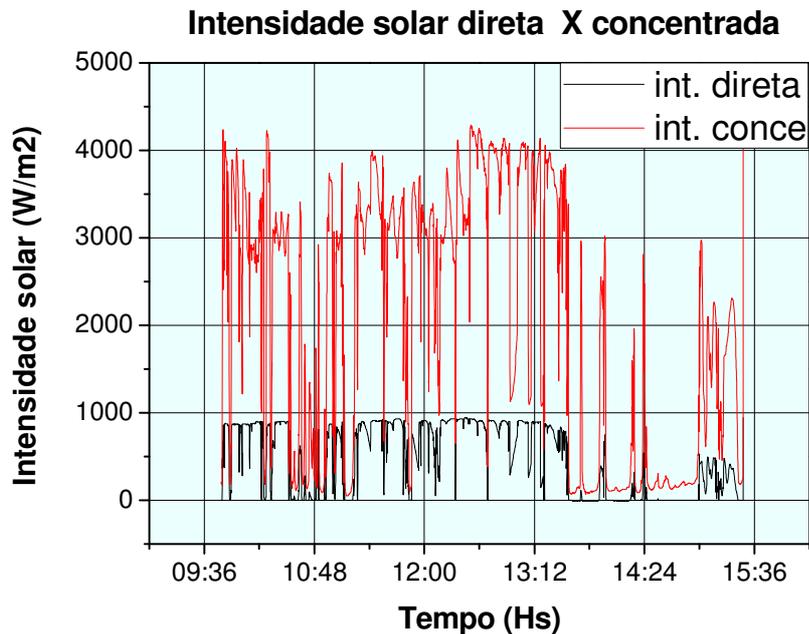


Figura 12- Gráfico comparativo entre intensidade direta e concentrada.

Com base nos dados de energia concentrada foi calculado ponto a ponto a eficiência ótica e construída uma curva (Fig. 15) com os valores obtidos.

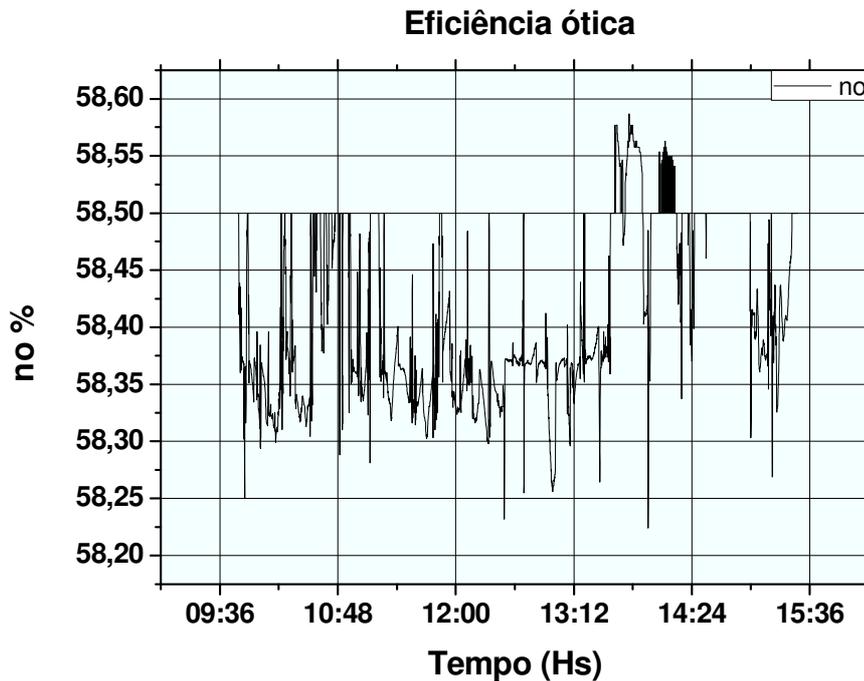


Figura 13 – Gráfico mostrando a eficiência ótica em cada ponto

Apesar dos valores de radiação concentrada e direta variarem muito, pode-se observar que a eficiência ótica varia muito pouco tendo um mínimo de 58,22397 e máximo de 58,5867.

6. CONCLUSÕES

No que tange aos aspectos geométricos, a investigação levou a concluir que a configuração cilíndrico-parabólica para um concentrador solar é bastante eficaz na concentração da radiação, aumentando-a em 14 vezes, fornecendo assim, uma vantagem sobre o coletor solar plano. Ainda sobre a geometria pode-se afirmar que a área do coletor exerce influência na temperatura atingida, tendo uma relação direta com esta. Também foi observado que a maior perda energética se dá por conta da convecção, podendo esta ser atenuada envolvendo o tubo absorvedor com material transparente a irradiação solar com a finalidade de impedir o contato direto do tubo com o ambiente externo. Além das perdas térmicas devem também ser levadas em conta, nos valores de temperatura atingidos, as perdas por possíveis defeitos de fabricação como imperfeição da superfície refletora, algum desvio na localização do tubo, bem como o fato de ter considerado constantes a temperatura ambiente, velocidade do vento ou ainda pode ter ocorrido imprecisão no acompanhamento do sol, apesar destes, o valor encontrado para uma refletividade de 65%, absorvidade de 90% foi de 52,26%, que é um valor que está dentro do aceitável para aparelhos usando um aparato com a mesma geometria (Kalogirou 2009).

Por fim pode ser afirmado que o modelo empregado é satisfatório, podendo ainda ser refinado por algum dos métodos de atenuação de perdas energéticas apresentado neste trabalho, ou ainda inserindo outras variáveis como umidade do ar, temperatura ambiente, variação do espectro devido à passagem de nuvens e gases, velocidade do vento, etc.

A temperatura é suficiente para processos de esterilização e desinfecção de ambientes, e pode-se pensar em várias outras utilizações para o fluido aquecido como aquecimento de piscinas e se temperaturas mais elevadas forem necessárias em outros processos, esse sistema pode ser usado como pré-aquecimento, diminuindo assim, os gastos de energia. Vale ressaltar que, além de condições extremamente favoráveis à implementação dessa tecnologia, com altas intensidades chegando a atingir mais 1000W/m² e um dia solar de aproximadamente 12 horas em quase todo o ano, a necessidade de melhorar a eficiência de sistemas solares, acentuam a viabilidade de implementar esse projeto para um melhor aproveitamento da energia solar.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Estadual de Feira de Santana e à FAPESB pelo auxílio financeiro dado a esse trabalho disponibilizando a estrutura física, como também, por meio da bolsa de iniciação científica - PROBIC.

REFERÊNCIAS

- Arasu, A. Valan & Sornakumar, T., Design, manufacture and testing of fiberglass reinforced parabolic trough for parabolic trough solar collectors. *Solar Energy* 81 (2007) 1273-1279.
- ASHRAE Standard 93, Methods of testing to determinate the thermal performance of solar collectors. ANSI/ASHRAE, 2003.
- Bezerra, Arnaldo Moura. 1990 *Aplicacoes praticas da energia solar : aquecedor de agua, fogao solar, secador de frutos, destilador de agua e silo-secador de graos*. Sao Paulo: Nobel, 1990. 134p ISBN 8521306369
- Coventry, Joe S., 2004. Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector, *Solar Energy* 78 (2005) 211-212
- Duffie, John A.; Beckman, William A. *Solar engineering of thermal processes*. 3.ed New York: John Wiley & Sons, c2006. ISBN 0471698678
- Kalogirou, S., 1996. Parabolic trough collector system for low temperature steam generation: design and performance characteristics, *Applied Energy*, No. 1. Pp. 1 19. 1996.
- Kalogirou, Soteris., 2009. *Solar energy engineering : processes and systems*, Elsevier.—1st ed.
- O. García-Valladares, N. Velázquez, Numerical simulation of parabolic trough solar collector: Improvement using counter flow concentric circular heat exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer* (2008), doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.08.004
- Palz, Wolfgang. 1981. *Energia Solar e fontes alternativas*. ed. rev. e ampl Sao Paulo: Hemus, 1981. 358p ISBN (Broch.)
- Reddy, K. S. & Kumar, K. Ravi, 2008. Thermal analysis of solar parabolic trough with porous disc receiver. Available online 23 December 2008
- Reddy, K. S. & Kumar, N. Sendhil, 2008. Combined laminar natural convection and surface radiation heat transfer in a modified cavity receiver of solar parabolic dish. *International Journal of Thermal Sciences* 47 (2008) 1647-1657.
- Tiwari, G. N., 2004. *Fundamentals , design, modeling and applications*. New Delhi: Narosa Publishing House, 2004. ISBN 81-7319-450-5

DEVELOPMENT OF A CYLINDRICAL-PARABOLIC SOLAR CONCENTRATOR TO HEATING'S FLUIDS

Abstract. *We design, calculated numerically and compare experimental data of temperature with values obtained from modeling of a cylindrical-parabolic solar concentrator for heating fluid, which consists of a stainless steel plate formed into a parabolic structure with the copper tube along the focus serving as absorber and a monitoring mechanism that always directs the concentrator to the sun so that solar rays focus perpendicularly to its aperture area "seen by the sun." Inside the tube is passed the fluid to be heated. In this study, we defined initially geometric parameters from a developed equation that relates them, so as to increase efficiency and concurrently in order to not compromise the joint's mobility at the monitoring of the sun's apparent movement. To model the system, differential equations were developed that take into account the physical parameters (absorptivity of the receiver tube, the mirror reflectivity, conductivity and thermal capacity of the materials involved, heat transfer by conduction and radiation) and geometric (concentration of the incident energy in focal region) of the hub. These equations were implemented in a computer program that calculates, based on input parameters, the temperature in the tube at any time, using the equations of the model and gives us the temporal evolution of temperature. To prove the validity of the theoretical model a solar collector was built according to the dimensions used in theoretical calculations and then comparing to the obtained results by both methods. It will be presented graphs showing the temporal evolution of temperature, energy losses, possible ways to mitigate losses and finally the thermal efficiency of the cylindrical-parabolic solar concentrator built.*

Key words: *energy, solar, concentrator, parabolic, instrumentation*