

EFICIÊNCIA DE UM COLETOR TERMOSSOLAR DE PLACAS PLANAS USANDO SUSPENSÕES DE TiO_2 E Al_2O_3

Caio Vinicius Pinheiro Vital – caio.vital@gmail.com

Isaías Barbosa Soares – ibaso13@gmail.com

Luis Arturo Gómez-Malagón – lagomezma@poli.br

Escola Politécnica de Pernambuco - Universidade de Pernambuco-Recife-PE

Resumo. A energia solar é uma das mais significantes formas de fonte de energias renováveis e que tem sido considerada de enorme potencial para suprir grande parte das necessidades energéticas no futuro. O Brasil possui áreas de incidência solar que são comparáveis às melhores regiões do mundo. Nesse contexto, têm sido desenvolvidos coletores solares térmicos de placas planas, que têm o papel de absorver a radiação solar e distribuir essa energia através de um fluido térmico. Neste trabalho, foi verificada a eficiência de um coletor solar térmico residencial de placas planas, utilizando como fluido térmico suspensões de dióxido de titânio (TiO_2) e alumina (Al_2O_3) em água com uma fração volumétrica de 0,1% em volume. Os resultados mostraram um aumento de 3,3% de eficiência com o uso do TiO_2 e um aumento de 6,0% de eficiência com o uso do Al_2O_3 , em comparação ao uso da água como fluido térmico.

Palavras-chave: Energia Solar, fluidos térmicos, coletor solar.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de sistemas que funcionam através de energias renováveis possuem a grande vantagem de isentar o uso de combustíveis fósseis, os quais são poluentes. A energia solar é uma das mais significantes fontes de energia renovável, sendo seu custo altamente dependente dos avanços tecnológicos realizados nessa área (Fu *et al.*, 2015). O recurso de energia solar é abundante no Brasil e algumas áreas do Nordeste possuem valores de radiação média anual comparáveis às melhores regiões do mundo (Tiba, 2000). Em 2014, o país ficou entre os cinco países com maior capacidade de aquecimento através de coletores solares (REN21, 2015), o que mostra sua importância no cenário global de produção de energia solar térmica.

Os coletores solares térmicos (ou termossolares) de absorção direta ou de placas planas são os dispositivos utilizados para absorver a radiação solar e transportar o calor através de um fluido térmico, comumente água, etileno glicol e óleos. (Chaudhari, 2014). No entanto, esses fluidos possuem uma condutividade térmica relativamente baixa, não permitindo uma alta transferência do calor do sol aos reservatórios térmicos. Sendo assim, vem sendo aplicado o uso de partículas muito finas (nanopartículas) de metais (ouro, prata, zinco, entre outros) ou óxidos de metais (TiO_2 , Al_2O_3 , CuO , entre outros) nesses fluidos térmicos convencionais, afim de se aumentar a condutividade térmica dos mesmos (Oliveira, 2012). Said *et al.*, (2015) conseguiram um aumento de até 16% na eficiência com o uso de nanofluidos de TiO_2 (com 0,1% em volume e vazão de 0,5 kg/min) em coletor de placas solares planas. Chaji *et al.*, (2013) analisaram o uso do mesmo nanofluido com diferentes concentrações em coletores solares de placas planas e constatou aumento de até 7% na eficiência em relação à água pura. Yousefi *et al.*, (2012) utilizaram um nanofluido de óxido de alumínio e obtiveram aumento de até 28,3% da eficiência dos coletores.

A tecnologia desses coletores termossolares já é bem conhecida, mas um aumento da sua eficiência pode ser conseguido com a otimização de aspectos construtivos ou com o desenvolvimento desses novos fluidos de trabalho anteriormente mencionados (He *et al.*, 2015). Neste trabalho, foi avaliada a eficiência de um coletor termossolar de placas planas de uso residencial, utilizando como fluido térmico suspensões de TiO_2 e alumina (Al_2O_3) em água, cada qual com 0,1% de fração volumétrica, e a comparação de sua eficiência com a utilização de água. A avaliação foi realizada através de um sistema de aquisição de dados de temperatura, radiação e controle de vazão no coletor.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção engloba o procedimento de fabricação das suspensões de óxido de titânio e alumina em água, bem como descreve o coletor de placas planas utilizado no experimento.

2.1 Preparação das suspensões

O dióxido de titânio (TiO_2) utilizado no experimento foi de procedência comercial, da marca Redelease®, com 93,5% de pureza e massa específica de 4,1 g/cm³. A alumina (Al_2O_3) foi da marca Degussa, com 99% de pureza com 3,9g/cm³ de massa específica. Cada suspensão foi preparada adicionando-se a quantidade adequada para formar uma

fração volumétrica de 0,1% de sólido. Foram preparados 10 L de cada uma das suspensões, o suficiente para o procedimento experimental do coletor termossolar. Foi utilizado um béquer de 2 L para as preparações. Para cada batelada, colocou-se 1 L de água destilada no béquer e manteve-se uma agitação constante, superior a 200 rpm com uso de um agitador magnético. Em seguida, adicionou-se o sólido de forma lenta e constante, até formação da suspensão (Fig. 1). Finalmente, completou-se o volume com água até os 2 L. O procedimento foi repetido com o intuito de completar os 10 L.

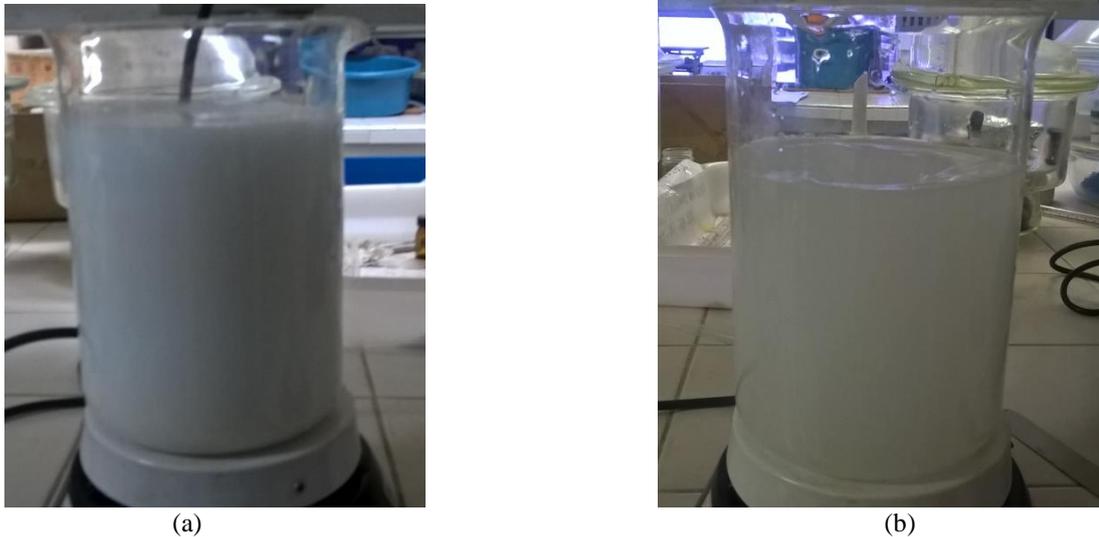


Figura 1 - Preparação das suspensões utilizadas no teste para o coletor termossolar. (a) Suspensão de TiO_2 ; (b) Suspensão de alumina.

Para calcular as densidades das suspensões obtidas, utilizou-se a Eq. (1) citada por Said *et al.*, (2015), a qual é:

$$\rho_s = \left(\frac{m_f + m_p}{V_f + V_p} \right) = \left(\frac{\rho_f V_f + \rho_p V_p}{V_f + V_p} \right) = (1 - \phi_p) \rho_f + \phi_p \rho_p \quad (1)$$

Em que ρ é a densidade, m é a massa, V é o volume e ϕ é a fração volumétrica. Os subíndices s , f e p , se referem, respectivamente, à suspensão, ao fluido e à partícula. Para a suspensão de dióxido de titânio, a densidade calculada da suspensão, considerando que a massa específica da água a 25°C é de $0,997 \text{ g/cm}^3$ (Green e Perry, 2008), é de:

$$\rho = (1 - \phi_p) \rho_f + \phi_p \rho_p = (1 - 0,001) \times 0,997 \text{ g/cm}^3 + 0,001 \times 4,1 \text{ g/cm}^3 = 1,0001 \text{ g/cm}^3$$

E para a alumina:

$$\rho = (1 - \phi_p) \rho_f + \phi_p \rho_p = (1 - 0,001) \times 0,997 \text{ g/cm}^3 + 0,001 \times 3,9 \text{ g/cm}^3 = 0,9999 \text{ g/cm}^3$$

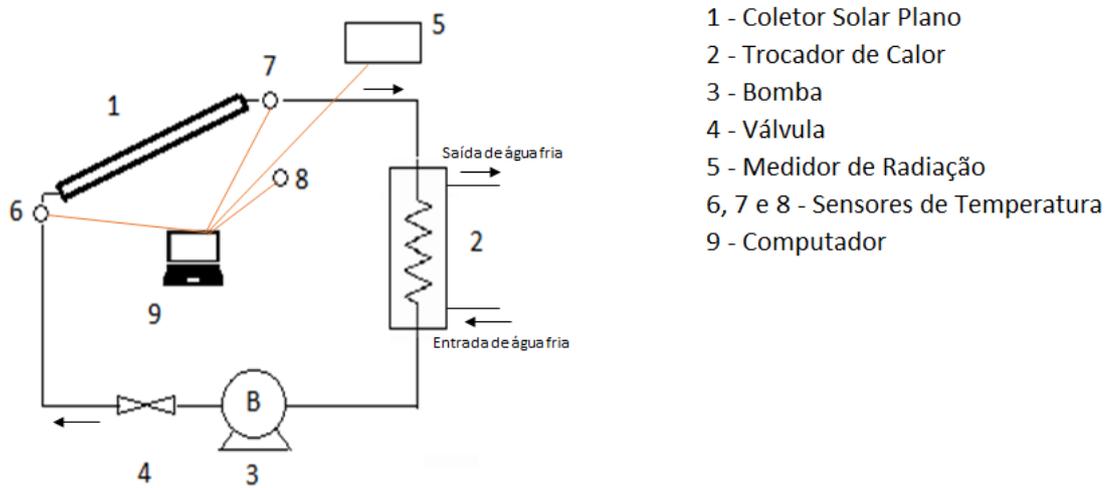
Logo, ambas as densidades são praticamente iguais ao do fluido de trabalho original.

2.2 Coletor termossolar

O sistema de aquecimento solar utilizado nos experimentos (Fig. 2) é um coletor de uso residencial da marca Termomax, modelo P-10 com área de 1 m^2 . A Fig. 3 mostra a descrição de seus componentes.



Figura 2 - Coletor termossolar utilizado nos experimentos.



- 1 - Coletor Solar Plano
- 2 - Trocador de Calor
- 3 - Bomba
- 4 - Válvula
- 5 - Medidor de Radiação
- 6, 7 e 8 - Sensores de Temperatura
- 9 - Computador

Figura 3 - Componentes do sistema de aquisição de dados do coletor termossolar residencial utilizado nos experimentos.

O coletor foi instalado no Laboratório de Energia Solar da Escola Politécnica de Pernambuco/UPE, em Recife (latitude 08° 03' 14" S e longitude 34° 52' 52" W) com inclinação de 8° orientado para o norte verdadeiro. As características do coletor estão contidas na Tab. 1.

Tabela 1 - Características do coletor termossolar residencial utilizando nos experimentos

Característica	Valor	Unidade de medida
Área de absorção	1,00	m ²
Espessura do vidro	3,00	mm
Diâmetro de entrada/saída	7/8	pol
Quantidade de tubos	8	-
Massa (vazio)	12,10	kg
Massa (cheio)	13,13	kg
Material-caixa	Alumínio	-
Material-aletas	Alumínio	-
Material-tubos	Cobre	-
Material-isolamento	Lã de PET	-

Foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados utilizando a plataforma Arduino. Os sensores foram conectados às entradas da plataforma e foi implementado um software para interpretar e enviar os dados de temperatura e irradiação do Arduino para um computador via porta USB. No computador, os dados foram recebidos e armazenados em arquivos de texto através de um programa escrito na linguagem *Processing*.

Para medir a irradiação, foi utilizado um painel fotovoltaico calibrado através de uma célula fotovoltaica de referência. A Fig. 4 mostra o painel instalado ao lado do coletor e com a mesma inclinação.



Figura 4 - Painel voltaico calibrado utilizado nos experimentos.

Os terminais do painel foram ligados a um resistor de potência para converter a corrente de saída num sinal de tensão (0 – 5 V).

As medições de temperatura foram realizadas por sensores de temperatura do modelo DS18B20 do fabricante *Maxim Integrated*. O sensor é capaz de medir temperaturas de -55 °C até 125 °C com resolução configurável de até 12 bits e acurácia de 0,5 °C. Os dados de vários sensores podem ser lidos por apenas uma entrada do Arduino através do protocolo de comunicação 1-Wire. Foram utilizados um sensor para medir a temperatura de entrada no coletor, um para a temperatura de saída do coletor e dois para a temperatura ambiente. Os sensores que mediam as temperaturas de entrada e saída foram inseridos na tubulação e foi feita vedação com massa epóxi. Os sensores foram calibrados com o auxílio de um termômetro de mercúrio.

O trocador de calor utilizado foi um trocador de calor de casco e tubos caseiro, com casco feito em tubo de PVC e tubos internos de cobre. Foi instalado um sistema de bombeamento de água fria controlado através de uma válvula.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento utilizado foi semelhante ao empregado por Yousefi *et al.* (2012). Não foi possível utilizar o procedimento descrito na norma brasileira ABNT 15747-2009 pelo fato de os instrumentos utilizados não atenderem aos requisitos de incerteza de medição estabelecidos. O procedimento utilizado consiste na obtenção de valores de eficiência instantânea para diferentes combinações de radiação incidente, temperatura de entrada do fluido no coletor e temperatura ambiente. A análise é realizada em regime permanente. Para tal, os valores de irradiação incidente, temperatura ambiente, temperatura de entrada do fluido no coletor e vazão mássica devem ser aproximadamente constantes para a obtenção de cada ponto. Além disso, o período de teste é dividido em dois períodos: um de 15 minutos para estabilização do sistema e outro de 5 minutos para coleta efetiva de dados. Dessa forma, há forte dependência das condições climáticas do local (Rojas *et al.*, 2008), sendo ideal a condição de céu limpo.

Conhecidos os valores das temperaturas de entrada e saída do fluido no coletor e a vazão mássica, é possível calcular o calor útil (Q_u) através da Eq. 2:

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_o - T_i) \quad (2)$$

Assim, é possível obter o valor da eficiência instantânea, que relaciona o calor útil com a radiação incidente no coletor através da Eq. 3 ou da Eq. 4:

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_c G_T} = \frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{A_c G_T} \quad (3)$$

$$\eta_i = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \left(\frac{T_i - T_a}{G_T} \right) \quad (4)$$

Onde A_c é a área de absorção do coletor.

Considerando os valores de $(\tau\alpha)$, F_R e U_L constantes, o gráfico de η_i em função de $(T_i - T_a)/G_T$, seria uma reta com coeficiente linear $F_R(\tau\alpha)$ e coeficiente angular $-F_R U_L$ (Duffie e Beckman, 2013).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, foram obtidos dados utilizando a água como fluido de trabalho.

A vazão de circulação do fluido foi ajustada para 60 kg/h e a temperatura de entrada do fluido no coletor estabilizada inicialmente no valor mais próximo possível da temperatura ambiente para obtenção da eficiência máxima. Não foi possível igualar a temperatura de entrada à temperatura ambiente (o que daria mais garantias sobre os valores de eficiência obtidos) tendo em vista que o trocador de calor empregado utiliza água a temperatura ambiente para controlar a temperatura do fluido. Após a estabilização e aquisição dos dados, a temperatura de entrada foi gradualmente aumentada para obtenção dos demais pontos.

A Fig. 5 mostra os valores de temperatura e irradiação típicos para a aquisição de dados de um ponto.

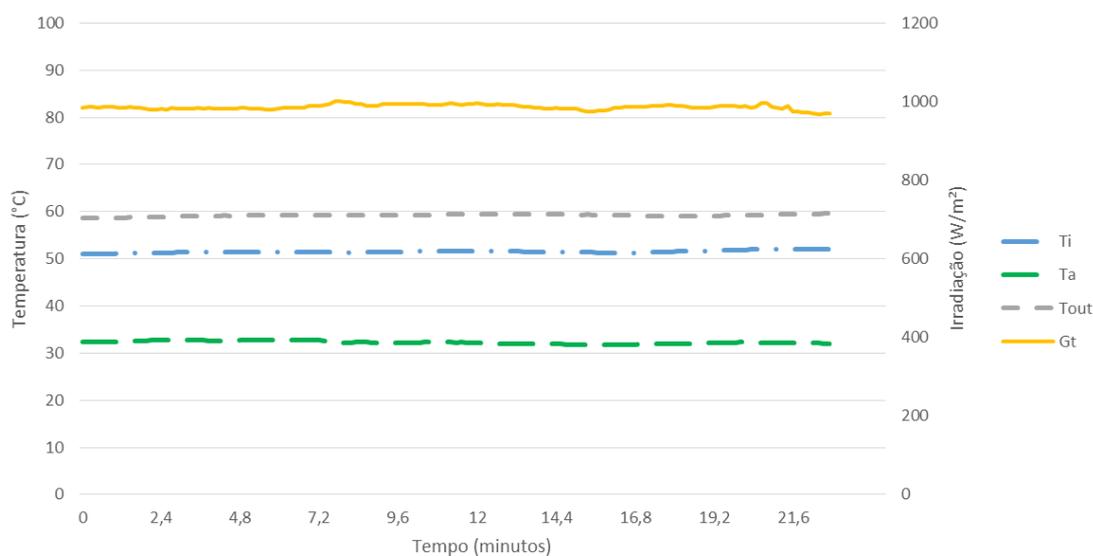


Figura 5 - Valores de temperatura e irradiação solar para a aquisição de dados por ponto.

O processo foi repetido utilizando as suspensões de TiO_2 e Al_2O_3 como fluidos de trabalho, operando-se à mesma vazão (60 kg/h).

Após obtenção dos pontos, foram selecionados os melhores dados experimentais e os mesmos foram ajustados por regressão linear utilizando o método dos mínimos quadrados através do software Microsoft Excel.

A Fig. 6 mostra os resultados das curvas de eficiência para todos os fluidos de trabalho utilizados.

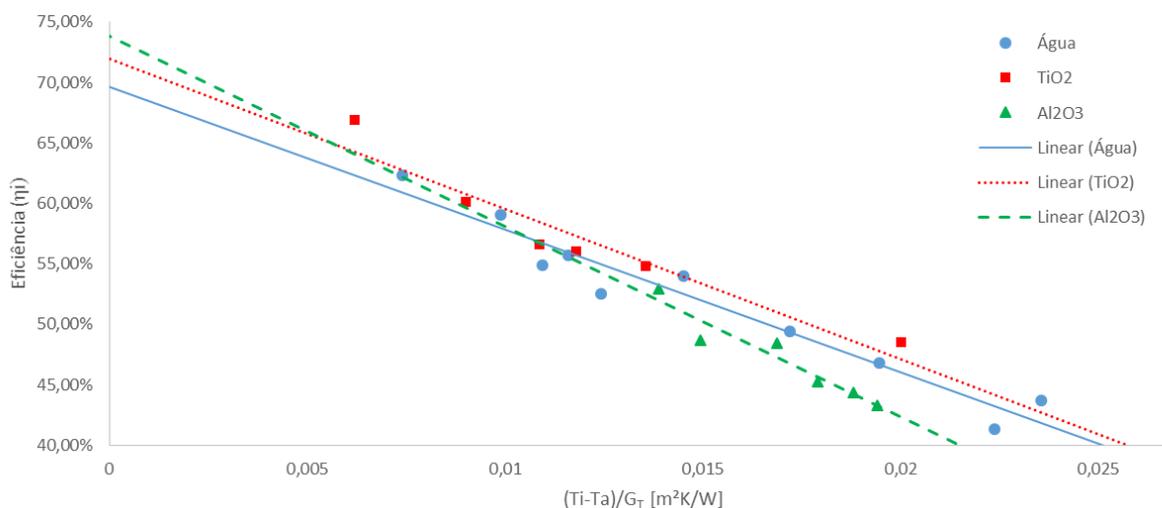


Figura 6 - Curvas de eficiência obtidas para os experimentos do coletor termossolar, utilizando os fluidos de trabalho estudados. Água (●); suspensão de TiO_2 (■); suspensão de Al_2O_3 (▲).

A Tab. 2 mostra os valores dos parâmetros característicos do coletor de acordo com o fluido utilizado.

Tabela 2 - Parâmetros do coletor obtidos experimentalmente para diferentes fluidos de trabalho.

Fluido	F_{RU_L}	$F_R(\tau\alpha)$	R^2
Água	11,81	0,6963	0,9443
Suspensão TiO_2	12,43	0,7198	0,9218
Suspensão Al_2O_3	15,73	0,7386	0,9209

Os resultados mostram, através do valor do parâmetro $F_R(\tau\alpha)$, que a eficiência máxima foi obtida com a utilização da suspensão de Al_2O_3 (73,86%), o que é consideravelmente maior do que a eficiência com a utilização de água como fluido de trabalho. No entanto, há um aumento no fator de remoção (F_{RU_L}) com o uso do óxido de alumínio.

Observa-se que o valor do fator de remoção obtido com a suspensão de TiO_2 é bastante semelhante ao da água, porém a utilização do dióxido de titânio resulta numa maior eficiência.

O aumento da eficiência pela utilização da suspensão de TiO_2 em relação à água é de 3,3%, valor compatível com o obtido por Chaji *et al.* (2013). No caso da suspensão de Al_2O_3 , o aumento foi de 6,0%.

5. CONCLUSÃO

Foi investigado o efeito do uso de suspensões de TiO_2 e Al_2O_3 com fração de 0,1% em volume como fluido térmico de trabalho num coletor solar de placa plana em sistema ativo indireto em comparação à água.

Os resultados mostram que a utilização das suspensões de TiO_2 e Al_2O_3 aumentaram a eficiência máxima do coletor em 3,3% e 6,0%, respectivamente. Os valores de fator de remoção obtidos para a água e a suspensão de TiO_2 foram bastante semelhantes. Já para a suspensão de Al_2O_3 , o valor do fator de remoção foi mais elevado, resultando numa redução acentuada da eficiência com o aumento da temperatura de entrada do fluido no coletor (por isso, é possível notar no gráfico da Fig. 6 que a alumina só proporciona eficiência maior que a água até um valor de 0,011 na abscissa).

Diferentes valores de vazão mássica, assim como outras concentrações volumétricas nas suspensões podem ser avaliados com o intuito de otimizar os valores de eficiência e fator de remoção.

Dessa forma, o uso dessas suspensões é promissor para aumentar a eficiência do coletor termossolar residencial de placas planas em sistemas indiretos.

REFERÊNCIAS

- Chaji, H., Ajabshirchi, Y., Esmailzadeh, E., Heris, S. Z., Hedayatizadeh, M., Kahani, M., 2013. Experimental Study on Thermal Efficiency of Flat Plate Solar Collector Using TiO_2 /Water Nanofluid, *Modern Applied Science*, vol. 7, n. 10, p. 60-69.
- Chaudhari, K.S., 2014. Applications of Nanofluid in Solar Energy – A Review, *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol 3, n.3, p. 460-463.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons.
- Fu, Y., Liu, X., Yuan, Z., 2015. Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China, *Journal of Cleaner Production*, vol. 86, p. 180-190.
- Green, D.W., Perry, R.H., 2008. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 8a Edição, McGraw-Hill.
- He, Q., Zeng, S., Wang, S., 2015. Experimental Investigation on the efficiency of flat-plate solar collectors with nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, n. 88, p. 165-171.
- Oliveira, G.A., 2012. Síntese e Caracterização de Nanofluidos de Prata, Dissertação de Mestrado, Universidade de Uberlândia, Minas Gerais.
- REN21, 2015. Disponível em: <<http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report>>. Acesso em: nov. 2015.
- Rojas. D., Beerman, J., Klein, S. A., Reindl, D. T., 2008. Thermal performance testing of flat-plate collectors, *Solar Energy*, n. 82, p. 746-757.
- Said, Z., Sabiha, M.A., Saidur, R., Hepbasli, A., Rahim, N.A., Mekhilef, S., Ward, T.A., 2015. Performance enhancement of a Flat Solar collector using Titanium dioxide nanofluid and Polyethylene Glycol dispersant, *Journal of Cleaner Production*, vol 92, p 343-353.
- Tiba, C., 2000. Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Terrestres. Ed. Universitária da UFPE.
- Yousefi, T., Veysi, F., Shojaeizadeh, E., Zinadini, S., 2012. An experimental investigation on the effect of Al_2O_3 - H_2O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors, *Renewable Energy*, n. 39, p. 293-298.

EFFICIENCY OF A FLAT PLATE SOLAR COLLECTOR USING TiO_2 AND Al_2O_3 SUSPENSIONS

Abstract. Solar energy is one of the most significant forms of renewable energy source and which has been considered as enormous potentially to supply a great part of the energy needs in the future. Brazil has areas of solar radiation that

are comparable to the best regions of the world. In this context, it has been developed thermal flat plate solar collectors, which have the property of absorbing the solar radiation and distribute the power through a thermal fluid. In this study, the efficiency was evaluated in a residential solar thermal collector flat plates, using as a thermal fluid, suspensions of titanium dioxide (TiO_2) and alumina (Al_2O_3) in water with a volume fraction of 0.1%. The results showed a increase of 3.3% in energetic efficiency by using TiO_2 and a increase of 6.0% with the use of Al_2O_3 if they are compared to the use of water as a thermal transfer fluid.

Key words. *Solar Energy, thermal fluids, solar collectors.*