

ESTUDO TEÓRICO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DE UM COLETOR SOLAR DE PLACA PLANA SOB CONDIÇÕES DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA

Juliana Moreira Figueiredo – jumfigueiredo@hotmail.com

Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix, Núcleo de Arte e Tecnologia

Lucas Paglioni Pataro Faria – lucas.faria@izabelahendrix.edu.br

Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix, Núcleo de Arte e Tecnologia

Elizabeth Rodrigues Brito Ibrahim – elizabeth.ibrahim@izabelahendrix.edu.br

Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix, Núcleo de Arte e Tecnologia

Resumo. Com a crescente busca de energias alternativas, há um aumento na demanda pelo desenvolvimento e comercialização de coletores solares de placa plana utilizados no aquecimento de água para fins de uso domiciliar ou industrial. Para que esses equipamentos sejam inseridos no mercado é necessário que passem antes pelos testes de comprovação de qualidade e eficiência exigidos pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). Entretanto, a nova metodologia de teste aprovada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) está baseada em preceitos europeus, continente cujas características climáticas se diferenciam demasiadamente em relação às condições ambientais brasileiras. Avaliando o nível de exigência requerido para a aprovação dos equipamentos e mediante consulta ao laboratório do Grupo de Estudos em Energia (Green) da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, responsável pelos ensaios e liberação dos equipamentos para o Programa Brasileiro de Etiquetagem, constatou-se um elevado número de coletores não aprovados nos ensaios do PBE. Através da análise indutiva da modelagem matemática de dados através do software Trnsys ao se simular o efeito da infiltração/condensação de água no interior do coletor pretende-se avaliar a metodologia de testes empregada para atestar a eficiência de aquecimento do equipamento com ênfase para os efeitos da infiltração de água na eficiência do coletor, critério este que apresenta os maiores índices de reprovação. Tomando como base a monografia apresentada por Moreira (2012) que consiste na análise experimental de infiltração de água no coletor solar para as quantidades de 20,8g, 41,6g e 62,4g e sua relação com a eficiência do equipamento, elaborou-se um modelo matemático utilizando o software Trnsys Simulation Studio a fim de se confrontar os resultados obtidos experimentalmente e numericamente. Os resultados mostram que o efeito da infiltração de água na temperatura de saída de água quente do coletor, para as diversas concentrações previamente citadas, não é expressiva o suficiente para caracterizar uma queda na eficiência do equipamento.

Palavras-chave: Energia. Solar. Coletor. Infiltração. Eficiência.

1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento da energia solar, ou energia proveniente da captação da radiação direta emitida pelo sol, para aquecimento de água para banho, piscinas e até para processos industriais, tem apresentado crescimento no País. Segundo dados apresentados pelo Departamento Nacional de Aquecimento Solar (DASOL) (2011), o setor de aquecimento solar apresentou em 2011 um crescimento de 6,5% em relação ao ano anterior e chegou ao recorde de 1,029 milhão m² de coletores solares produzidos, como evidenciado na Fig.01.

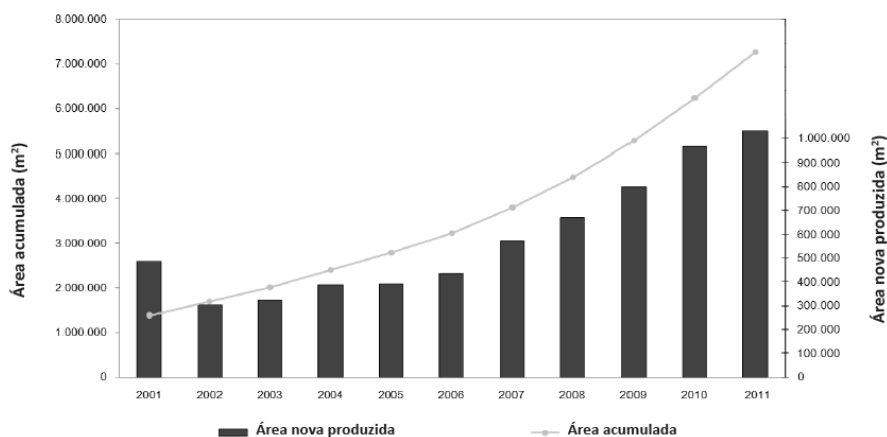


Figura1 – Evolução do mercado de aquecimento solar brasileiro até 2011.

Fonte: Departamento Nacional de Aquecimento Solar [2012?]

O governo brasileiro incentiva o uso do sistema de aquecimento solar, exigindo sua instalação em projetos habitacionais de interesse social, como é o caso do programa Minha Casa, Minha Vida (MOREIRA, 2012). Segundo Portal Brasil (2010) na segunda fase do referido programa, uma média de 350 mil casas seriam equipadas com painéis solares para aquecer a água do chuveiro. Todos os novos empreendimentos do programa voltados às famílias com renda de até três salários mínimos nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste teriam de vir equipados, obrigatoriamente, com sistema de captação de energia solar.

Esse crescimento reflete a busca por novas formas de obtenção de energia que não aquelas provenientes de recursos não renováveis. Nesse sentido a energia solar é uma fonte abundante, de fácil captação, mas precisa de condições ideais para seu aproveitamento. Além disso, sua utilização diminui a geração de impactos ambientais, tendo em vista que sua origem é renovável e permanente. Segundo Mano, Pacheco e Bonelli (2009), para cada metro quadrado de um coletor é possível economizar 55kg de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) por ano, ou evitar a inundação de 55m² de área florestal para a geração de energia elétrica, ou ainda eliminar o consumo anual de 215kg de lenha.

A aplicação da energia solar pode ser dividida em energia solar ativa e energia solar passiva. A energia passiva está relacionada à Arquitetura Solar, escolha de materiais para uso na planta e definições de projeto. Já a energia solar ativa dá-se de diferentes maneiras, das quais podem ser citadas a fotovoltaica ou térmica. Sendo a última o objeto de estudo deste trabalho.

Para captação e aproveitamento dessa energia solar térmica é necessária a utilização de um sistema de aquecimento solar, cujo principal componente é o coletor solar de placa plana. Coletores solares são equipamentos cujo fim específico é utilizar a energia solar térmica para o aquecimento de fluidos, líquidos ou gasosos, que posteriormente serão mantidos em reservatórios termicamente isolados até seu uso final, como água para banho [...] (MANO; PACHECO; BONELLI, 2009).

Em se tratando de coletores solares de placa plana, a maneira de atender essa demanda crescente por aproveitamento da energia solar térmica é garantindo a eficiência dos coletores e inserindo esses equipamentos no mercado.

Outras medidas de incentivo à utilização de sistemas de aproveitamento de energias renováveis têm surgido no país. Nesse aspecto pode ser citada a Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001 que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e o Decreto nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001 que regulamenta a Lei supracitada (BRASIL, 2001).

Há ainda programas governamentais como o Plano Nacional de Energia (PNE2030), ferramenta para o planejamento do setor energético no país e o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf) que instaura o PBE, este criado visando “prover os consumidores de informações que lhes permitissem avaliar o consumo de energia dos equipamentos eletrodomésticos e selecionar, na sua decisão de compra, aqueles de maior eficiência em relação ao consumo, possibilitando reduzir investimentos governamentais em novas unidades geradores e redução do consumo para a população em geral” (MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2011).

Para aprovação dos equipamentos segundo os critérios do PBE do Instituto Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial (INMETRO) é necessário submetê-los a testes de qualidade, sendo inicialmente aplicado o ensaio de choque térmico e em seguida o ensaio de penetração de chuva.

O primeiro ensaio consiste em deixar o coletor exposto à radiação solar diária mínima de 17 MJ/m² (dia válido) durante o período de 30 dias válidos, corridos ou não, com o aparelho isento de água em sua tubulação (condição não operacional). A cada intervalo de 10 dias válidos é feito o jateamento de água fria sob vazão controlada.

Para o ensaio de penetração de chuva consiste em detectar se na parte interna do coletor há presença de umidade, uma forma de fazê-lo é através da pesagem do equipamento antes e depois do teste.

Para normatização dos critérios de ensaios a serem realizados para que os coletores solares obtenham o selo de eficiência do PBE é utilizada como referência a norma NBR ABNT 15747-2: 2009 - Sistemas Solares Térmicos e seus

Componentes – Coletores Solares. Parte 2: Métodos de Ensaio, cuja fundamentação advém dos padrões europeus de ensaios (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009)

Havendo o aparelho apresentado qualquer infiltração de água na parte interna durante o ensaio de penetração de chuva, o mesmo é reprovado, não podendo continuar os ensaios para obtenção do selo de eficiência energética do Programa Brasileiro de Etiquetagens, o que se torna questionável, uma vez que essa infiltração pode apresentar pouca expressividade e mínima alteração na eficiência do equipamento.

A esse respeito pode ser citado o trabalho desenvolvido por Moreira (2012) que consiste na realização de procedimentos experimentais realizados no Simulador Solar para avaliação do desempenho térmico de um coletor solar plano, operando para diferentes condições de contorno, a partir de quantidades pré-estabelecidas de massa de água injetada. Em sua análise, os ensaios considerados válidos permitem projetar uma tendência de queda de eficiência devido à infiltração de massa de água. Contudo, os valores obtidos não permitem uma maior avaliação, uma vez que estão dentro da incerteza da bancada.

1.1 Objetivos

O objetivo da pesquisa foi avaliar a eficiência de um coletor solar de placa plana mediante a infiltração de água em seu interior, através da modelagem e simulação analítica de um coletor sob condições normais e mediante a infiltração de água em seu interior para avaliação dos efeitos dessa penetração em termos de sua eficiência energética.

Com base nos resultados numéricos encontrados pode-se propor novas formas de aplicar as metodologias de ensaio que não aquelas previstas nas NBRs supracitadas.

2. METODOLOGIA

2.1 Modelagem matemática

Foi utilizado o *software Trnsys Simulation Studio* (versão 4.0) (Trnsys, 2013) para que por meio de uma modelagem matemática fosse possível simular a real alteração analítica ocorrida na eficiência do coletor quando submetido à condição de infiltração/condensação de água em seu interior.

Conforme descrito por Duffie, J. A., Beckman, W.A.(1991) o *Trnsys* é um programa amplamente utilizado para simulação de processos térmicos modulares. Este que originalmente havia sido desenvolvido para aplicações de energia solar, é agora utilizado para simulação de diversos processos térmicos.

As principais aplicações incluem: sistemas de energia solar (sistemas solares térmicos e fotovoltaicos), edifícios de baixo consumo energético e sistemas de *heating, ventilation, and air conditioning* (HVAC)¹, sistemas de energias renováveis, cogeração e células de combustível. (TRNSYS, 2013)

Ainda segundo oTrnsys (2013) o *software* reconhece uma linguagem de descrição do sistema no qual o usuário especifica os componentes que constituem o sistema e o modo em que eles estão conectados. A biblioteca *Meteonorm* do Trnsys inclui os dados meteorológicos, tais como: radiação solar, temperatura ambiente, velocidade média dos ventos, etc, de diversas cidades do mundo.

Para simulação ficaram definidos os componentes de condições climáticas (Type 109), coletor solar (Type 1b), gráfico (Type 65c), eficiência e Resultados Finais (Type 25c).

As especificações e valores adotados para os componentes “coletor solar” e “condições climáticas” estão definidas no Tab 1.

¹ A tradução para *heating, ventilation, and air conditioning* (HVAC) é Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento.

Tabela 1 – Valores para os parâmetros utilizados na simulação

Coletor Solar								
Parâmetros	Ensaio 0		Ensaio1		Ensaio 2		Ensaio 3	
	Valor	Unid	Valor	Unid	Valor	Unid	Valor	Unid
Área de coletor	2,08	m ²	2,08	m ²	2,08	m ²	2,08	m ²
Calor específico do fluido	4,19	kJ/kg*K	4,19	kJ/kg*K	4,19	kJ/kg*K	4,19	kJ/kg*K
Eficiência Instantânea	0,64	-	0,68	-	0,66	-	0,67	-
Declive eficiência	3,50	W/m ² *K	3,76	W/m ² *K	2,84	W/m ² *K	3,56	W/m ² *K
Temperatura de entrada	38,46	C	38,46	C	38,46	C	38,46	C
Vazão de entrada	0,02	kg/s	0,02	kg/s	0,02	kg/s	0,02	kg/s
Temperatura ambiente	24,81	C	24,81	C	24,81	C	24,81	C
Reflectância do solo	0,20	-	0,20	-	0,20	-	0,20	-
Ângulo de incidência	0	graus	0	graus	0	graus	0	graus
Inclinação do coletor	45	graus	45	graus	45	graus	45	graus
Condições Climáticas								
Parâmetros	Ensaio 0		Ensaio1		Ensaio 2		Ensaio 3	
	Valor	Unid	Valor	Unid	Valor	Unid	Valor	Unid
Reflectância do solo	0,2	-	0,2	-	0,2	-	0,2	-
Inclinação da superfície	45	graus	45	graus	45	graus	45	graus
Azimute de superfície	180	graus	180	graus	180	graus	180	graus

Os ensaios 0, 1, 2 e 3 mencionados na Tab. 1 representam os experimentos realizados por Moreira (2012) com a injeção de água nas quantidades de 0g, 20,8g, 41,6g e 62,4g, respectivamente. Os valores admitidos correspondem a 100%, 300% e 500% de excesso do limite máximo de 5g/m² de área do coletor estabelecido para o resultado obtido no laboratório. Esse valor é ainda mais restritivo que o da norma técnica NBR 15747-2 que estabelece seu limite em 30g/m².

Os valores utilizados para configurar o programa foram os mesmos utilizados e/ou encontrados durante os experimentos, com exceção das variáveis temperaturas de entrada e temperatura ambiente que foram fixadas em 38,45°C e 24,80°C, respectivamente, considerando a média entre as temperaturas utilizadas nos ensaios.

A amostragem da análise consiste no período de 24h (1 dia) sob condições de radiação solar específica para a cidade de Belo Horizonte/MG. Tais dados foram obtidos da biblioteca *Meteonorm* do Trnsys (2013) e estão evidenciados no gráfico plotado do *software* e demonstrados na Fig. 02.

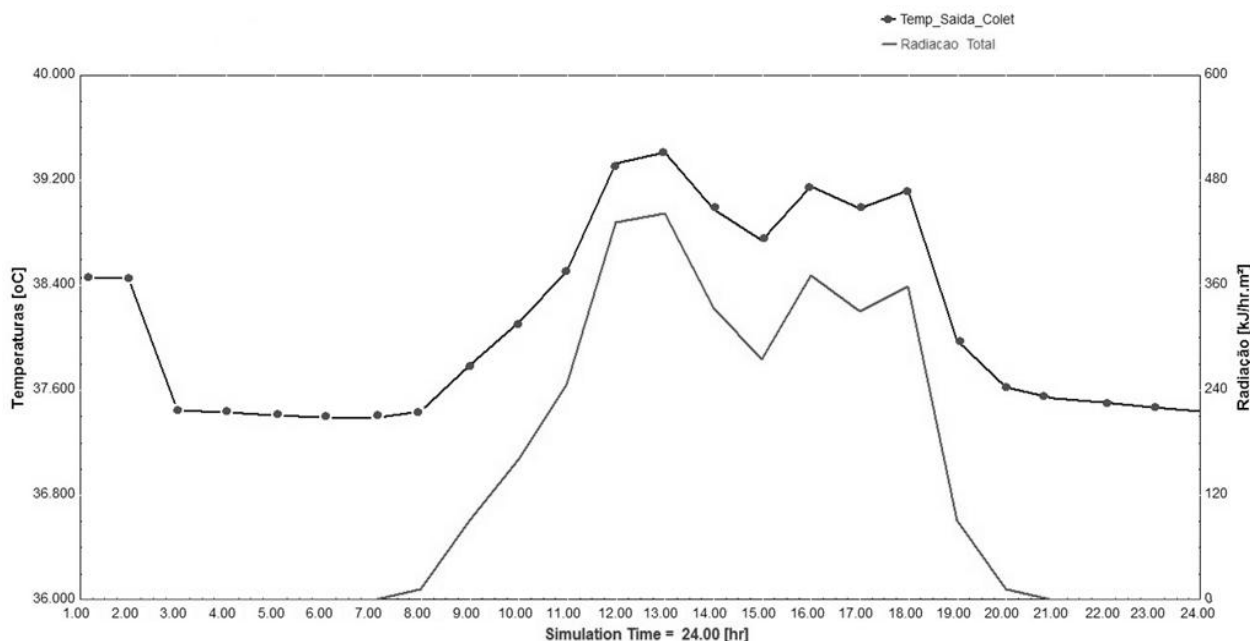


Figura 2 - Curva característica da radiação total obtida pelo Trnsys

3. RESULTADOS

Os resultados obtidos em termos da temperatura de saída do coletor solar são apresentados a seguir na Fig. 3, a partir dos dados obtidos pelo Trnsys para os ensaios 0, 1, 2 e 3. Para a análise dos dados da simulação, foi considerado o período de 07h00min às 19h00min, por ser o período de maior incidência da radiação solar. Em seu estudo, Moreira (2012) considera apenas o intervalo de 08h00min às 17h00min.

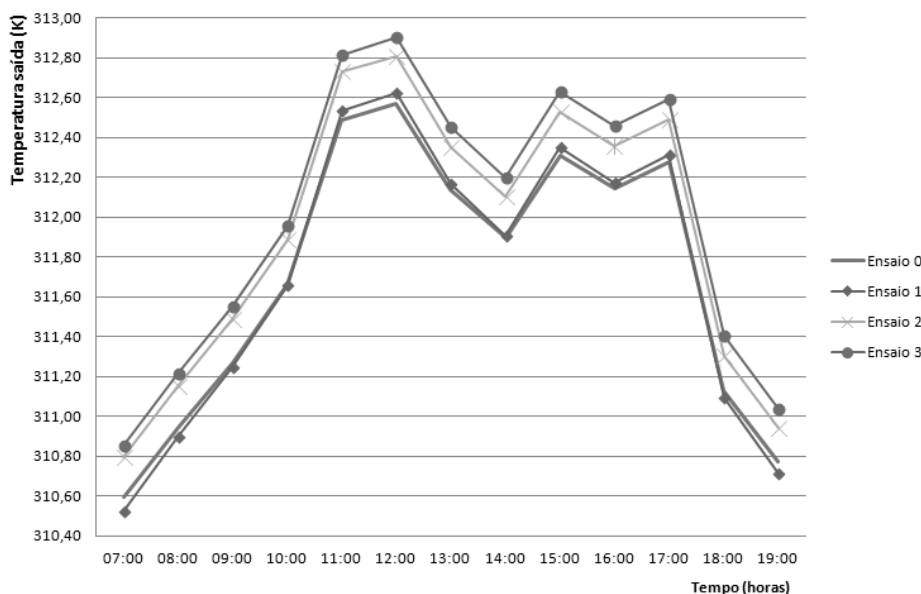


Figura 3 - Gráfico comportamento da temperatura de saída do fluido de trabalho do coletor solar

Mediante o comportamento das curvas expressas na Fig.3 referentes aos ensaios e para melhor visualização da variação ocorrida entre elas foram calculados os valores do erro absoluto, sendo encontrado no período de 11h00min a 12h00 as maiores variações de temperatura dos ensaios 1, 2 e 3 em relação ao ensaio 0.

Para o ensaio 1, essa variação ocorreu entre os valores de 0,00 a 0,07 °C. No ensaio 2 foram encontrados valor mínimo de 0,17 °C e máximo de 0,25°C. E no ensaio 3 foram encontrados valores entre 0,26 e 0,33 °C. Portanto, valores muito pequenos.

Comparando-se a Fig. 2 e Fig.3, tem-se que durante o período estudado o comportamento da temperatura de saída do fluido no coletor acompanha o comportamento da curva de incidência de radiação, pois possuem geometria similar e os pontos de pico coincidem para os horários de ambos os gráficos.

4. CONCLUSÃO

Levando-se em consideração o erro absoluto encontrado entre a variação das temperaturas de saída do fluido de trabalho na medida em que é injetada água no coletor solar, o valor é inexpressivo e está dentro do limite de incerteza da bancada de ensaio de 2,2%. Portanto, tem-se que a infiltração de água no equipamento não obteve grande impacto sobre o aquecimento do fluido de trabalho, logo, não afetou significativamente a eficiência do coletor solar de placa plana.

A infiltração em longo prazo pode trazer danos ao equipamento, pois, no decorrer dos anos, poderá haver avarias nos componentes do coletor (isolamento térmico, pintura das aletas, etc.) e as mesmas serem intensificadas pela presença do fluido. A análise realizada pela modelagem e os resultados obtidos não levam em consideração tal situação.

Mediante os dados simulados e de acordo com os resultados encontrados, conclui-se que o modelo matemático elaborado é validado pelo processo experimental apresentado por Moreira (2012), levando-se em consideração que os resultados encontrados em ambos os métodos de análise estão em conformidade. Para a análise da modelagem o maior desvio encontrado foi de 0,33°C no ensaio 3 para a inserção de 62,8g/m² de água.

Isso indica que o limite admitido por norma técnica (30 g/m² de área coletora) talvez deva ser reavaliado, na medida em que é reprovativo para valores de umidade que no modelo numérico aqui desenvolvido e no modelo experimental desenvolvido por Moreira (2012) possuem variações avaliadas como inexpressivas. Foram aqui avaliadas as temperaturas de saída do fluido do coletor e obtido desvio máximo de 0,33 °C já no experimento de Moreira (2012) foram encontrados resultados baseados na queda da eficiência térmica sob valor aproximado de 0,048% / m² / grama de água.

Para reafirmar as alterações encontradas nos experimentos, Moreira (2012) realizou ainda um quarto ensaio que consistiu na injeção de 312 gramas de água no interior do coletor e o mesmo manteve a mesma tendência do resultado o

que ainda não se mostrou significativo, ou seja, ainda que se tenha a infiltração de água em valor 500% superior ao estabelecido pela norma técnica, a queda de eficiência não se demonstrou expressiva.

Dessa forma, as pesquisas tornam-se relevantes para inclusão nas discussões de avaliação da norma técnica utilizada como parâmetro para os testes de avaliação da qualidade dos equipamentos de coletores solares e certificação dos mesmos no PBE.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Energia Solar**, 2005. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)> Acesso em: 20.maio.2013
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15747-2**, 2009. Sistemas solares térmicos e seus componentes - Coletores solares - Parte 2: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2009
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO (ABRAVA), 2003. Disponível em: <<http://www.abrava.com.br/Default.asp?Canal=8&Channel=Tm90JiMyMzc7Y2lhcw==&OperId=3952>> Acesso em: 25 .jun.2013.
- BRANCO, S. M. **Energia e meio ambiente**. 2.ed. São Paulo: Moderna, 2004
- BRASIL. Decreto nº 4.059/2001 – Regulamenta Lei nº 10.295/2001 - Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia
- BRASIL. Lei nº 10.295/2001 - **Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia**
- BRASIL. **Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030)**. Disponível em [Brasil.gov.br](http://www.brasil.gov.br): <<http://www.brasil.gov.br/sobre/economia/energia/planejamento/plano-nacional-de-energia-2030-pne-2030>> Acesso em 20.maio. 2013.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE AQUECIMENTO SOLAR (DASOL). **Dados de Mercado de 2011**, [2012?]. Disponível em: <<http://www.dasolabrava.org.br/informacoes/dados-de-mercado/>> Acesso em 12.nov.2013.
- DUFFIE, J. A., BECKMAN, W.A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). Etiquetas, [2012?]. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/etiquetas.asp>>. Acesso em 27.jun.2013
- MANO, E. B.; PACHECO, E. B.; BONELLI, C. M. . **Meio Ambiente, poluição e reciclagem**. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.
- MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA - MME. **Plano Nacional de Eficiência Energética**, 2011. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas_publicacoes.html> Acesso em 20.maio.2013.
- MOREIRA, J. V. N. **Avaliação do desempenho térmico de coletores solares em condição de operação com infiltração/condensação**, 2012. Dissertação (Graduação). Belo Horizonte, Pontifícia Universidade Católica (PUC Minas), nov.2012.
- REDE BRASIL DE CAPACITAÇÃO EM AQUECIMENTO SOLAR. **Curso de capacitação em aquecimento solar - Manual do professor**. Belo Horizonte, MG. 2006.
- TRNSYS, Official Website. Trnys 17, 2013. Disponível em: < <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/features.html>>. Acesso em 14.nov.2013
- PORTAL BRASIL. Infraestrutura - Novas moradias do Minha Casa, Minha Vida terão energia solar, 2010. Disponível em: < <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2010/11/novas-moradias-do-minha-casa-minha-vida-terao-energia-solar>>. Acesso em: 25.nov.2013.

FORMAT INSTRUCTIONS FOR PAPERS SUBMITTED TO THE CONGRESS

Abstract. *With the growing demand for alternative energy, there is an increasing demand for the development and marketing of flat plate solar collectors used for water heating for domestic sanitary usage or industrial purposes. For the Brazilian market these products must attend and pass all of the quality and efficiency tests required by the Brazilian Labeling Program. After evaluating the level required for the equipment approval and contacting the laboratories responsible for testing products under the Brazilian Labeling Program, it was found that a large number of collectors are not approved, thus not suitable for the market. This work aims to evaluate this methodology to attest the efficiency of the equipment with emphasis on the effects of water infiltration in collector efficiency by employing an inductive analysis of the mathematical modeling using the TRNSYS software to simulate the effect of infiltration/condensation of water inside the collector. Based on the monograph by Moreira. (2012) which consists in the experimental analysis of water infiltration into the solar collector to the amount of 20.8 g, 41.6 g and 62.4 g and its relation to the efficiency of the equipment, produced A mathematical model using TRNSYS Simulation Studio software in order to compare the results obtained experimentally and numerically. The results show that the effect of temperature on infiltration of water from the hot water outlet manifold for the various concentrations previously mentioned, it is not significant enough to characterize a reduction in equipment efficiency.*

Key words: *Energy. Solar. Collector. Infiltration. Efficiency.*