

ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DE COLETORES A, B E C COM PENETRAÇÃO DE ÁGUA

Elisiane Silvia Acácio de Paiva – elisianepaiva5@gmail.com

Antonia Sonia Alves Cardoso Diniz – asacd@pucminas.br

Lucas Paglioni Pataro Faria – lucas.faria@pucminas.br

Thiago de Almeida Silvério – thiago@pucminas.br

Rafael Oliveira Barreto – rafaelbarreto@pucminas.br

Cristiana Brasil Maia – cristiana@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Grupo de Estudos em Energia (GREEN)

Resumo. O Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), coordenado pelo INMETRO, fornece informações sobre o desempenho e eficiência energética de diversos produtos, tais como refrigeradores, veículos e coletores solares. A grande maioria dos coletores solares testados pelo PBE é reprovado no ensaio de infiltração/condensação de água. Sabe-se que a presença de água no interior do coletor reduz a sua eficiência, uma vez que parte da radiação solar absorvida é perdida para aquecer a água infiltrada. No entanto, a determinação das perdas térmicas devido à infiltração ainda não foi quantificada ou medida. O objetivo do presente trabalho é avaliar experimentalmente a influência da infiltração de água na eficiência de coletores solares planos. Foram testados equipamentos de três classes de eficiência: A, B e C, com diferentes quantidades de água infiltrada. Para as amostras avaliadas, observou-se que a influência da quantidade de água infiltrada não é significativa. Portanto, este critério não deve ser usado para promover a aprovação dos coletores.

Palavras-chave: Eficiência, Coletores solares planos, Infiltração de água.

1. INTRODUÇÃO

A população mundial urbana vem crescendo rapidamente nos últimos anos (Pereira e Assis, 2013). Consequentemente, a demanda de energia pelo setor residencial urbano também vem crescendo. O consumo doméstico de energia resulta em um grande impacto na rede nacional de países industrializados e em desenvolvimento (Kilpatrick, Banfill e Jenkins, 2011). Uma parcela significativa da energia consumida no segmento residencial é atribuída ao aquecimento de água (Prado e Gonçalves, 1998). De acordo com Ghisi et al. (2007), estima-se que refrigeradores, aparelhos de ar condicionado e chuveiros elétricos sejam responsáveis por uma parcela que abrange de 60% a 70% do consumo residencial de energia no Brasil. Além disso, exceto pela região nordeste, cerca de 81% a 92% da população brasileira utiliza chuveiros elétricos. Uma vez que estes equipamentos consistem de uma resistência elétrica para aquecimento de água, eles requerem uma grande quantidade de energia (Oliveira e Rebelato, 2015). Uma alternativa interessante e que vem sendo cada vez mais usada para aquecer água para banho é a utilização de coletores solares planos. Estes dispositivos utilizam a energia solar, uma fonte limpa, renovável e abundante, como fonte de energia para aquecimento da água. Como o Brasil dispõe de altos níveis de radiação solar, os coletores podem substituir os chuveiros elétricos com vantagens.

A eficiência energética é geralmente usada como um dos parâmetros mais importantes para introduzir e comparar sistemas térmicos, incluindo os coletores solares planos (Jafarkazemi e Ahmadifard, 2013). A eficiência de coletores solares depende dos parâmetros do coletor e das perdas térmicas para o ambiente. Quanto maior a quantidade de energia que o fluido de trabalho conseguir absorver, maior a eficiência térmica do coletor. Para aumentar o desempenho destes equipamentos, têm sido utilizadas novas técnicas, baseadas principalmente no aumento do coeficiente de transferência de calor entre a placa absorvedora e o fluido de trabalho e no aumento da condutividade térmica do fluido de trabalho utilizando-se nano partículas (Suman, Khan e Pathak, 2015).

Diferentes países possuem diferentes padrões para caracterizar e avaliar a eficiência de coletores solares. A norma europeia mais importante para teste de coletores estabelece um método em regime permanente e permite a aplicação de um método quase dinâmico realizado em ambiente externo. Osório e Carvalho (2014) avaliaram e compararam ambos os métodos e concluíram que os resultados são semelhantes, sendo o método quase dinâmico considerado superior por demandar menor tempo. Cruz-Peragon et al. (2012) propuseram um método bidimensional em diferenças finitas para validar a caracterização de um coletor solar. Análises em regimes permanente e transiente foram desenvolvidas em diferentes condições e os resultados demonstraram a robustez do método.

Sözen, Menlik e Ünvar (2008) desenvolveram uma nova fórmula baseada em uma rede neural artificial para determinar a eficiência de coletores solares planos, para diferentes condições de temperatura ambiente, data, horário, radiação solar e ângulos de declinação e azimute.

No Brasil, há um programa nacional para avaliar e classificar os coletores solares com base em sua eficiência energética, o PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem. Para se determinar a eficiência, é necessário que o coletor seja avaliado através de uma série de testes padronizados realizados em laboratórios credenciados pelo Inmetro. Os testes avaliam diversos parâmetros, tais como pressão hidrostática, estanqueidade e infiltração de água. Após estes testes, é realizado o ensaio de eficiência e, de acordo com os resultados obtidos, os coletores recebem um grau, que varia de A até E. O grau recebido depende da produção de energia mensal específica – PEMe. Até junho de 2012, a participação dos coletores solares no PBE era voluntária. A partir desta data, a participação passou a ser compulsória, ou seja, os sistemas de aquecimento solar passaram a ter a sua classificação pelo PBE exigida para poderem ser comercializados no Brasil. As novas regras alteraram também os limites de PEMe para cada grau. A Tab. 1 indica os valores utilizados nas regras válidas até junho de 2012 e a Tab. 2 indica os valores utilizados nas novas regras.

Um dos testes realizados é o ensaio de choque térmico, no qual o coletor é exposto à água por um período determinado e, após este período, é determinada a quantidade de água infiltrada. Se esta quantidade exceder um determinado limite, o coletor é rejeitado e não pode ter a sua eficiência avaliada. Nas regras válidas até junho de 2012, o limite era de 5 g/m² de área e, nas regras novas, o limite foi ampliado para 30 g/m².

Tabela 1 - Classificação dos coletores de acordo com o PEMe (regras antigas).

Grau	Faixa de PEMe (kWh/mês-m ²)
A	PEMe > 77
B	71 < PEMe < 77
C	61 < PEMe < 71
D	51 < PEMe < 61
E	41 < PEMe < 51

Tabela 2 - Classificação dos coletores de acordo com o PEMe (regras novas).

Grau	Faixa de PEMe (kWh/mês-m ²)
A	PEMe > 80,3
B	73,3 < PEMe < 80,3
C	66,3 < PEMe < 73,3
D	59,3 < PEMe < 66,3
E	52,3 < PEMe < 59,3

Sabe-se que a água infiltrada tem potencial para reduzir a eficiência dos coletores solares, mas a influência da quantidade de água infiltrada na eficiência ainda não foi adequadamente avaliada. Faria et al. (2014) avaliaram a influência da infiltração de água em um coletor solar tipo A. O objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência térmica de coletores solares submetidos a diferentes níveis de infiltração de água. Os testes foram realizados em coletores avaliados como A, B e C de acordo com as regras anteriores do PBE.

2. TESTES EXPERIMENTAIS

Os testes experimentais para determinação da eficiência de coletores solares foram realizados em um ambiente fechado, utilizando-se um Simulador Solar. Este equipamento, instalado no Grupo de Estudos em Energia (GREEN) da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, possui uma potência total de 40 kW e um espectro de radiação similar ao do Sol. Ele é composto por um sistema de oito lâmpadas especiais do tipo Metal Halide Global (MHG), que ilumina uma área de 2,80 m². O dispositivo conhecido como céu artificial é composto por duas placas de vidro temperado de 8 mm de espessura com baixo teor de ferro, entre as quais escoar ar frio. O céu artificial simula as perdas radiantes entre o coletor e a abóboda celeste (Fig. 1).

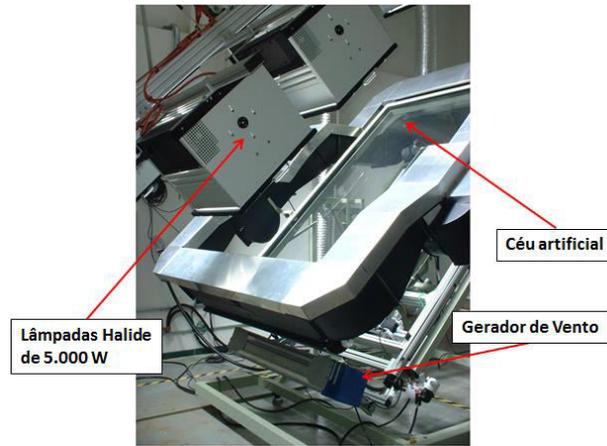


Figura 1 – Simulador solar, vista frontal.

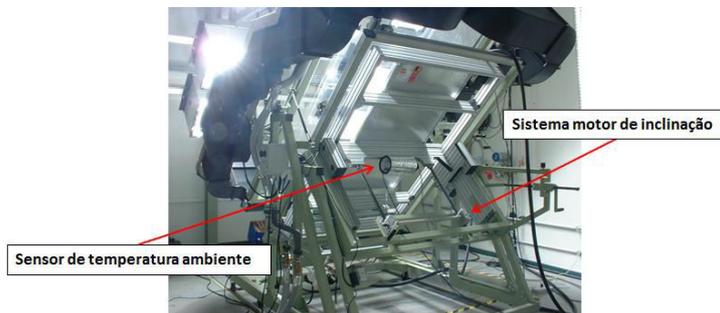


Figura 2 – Simulador solar, vista posterior.

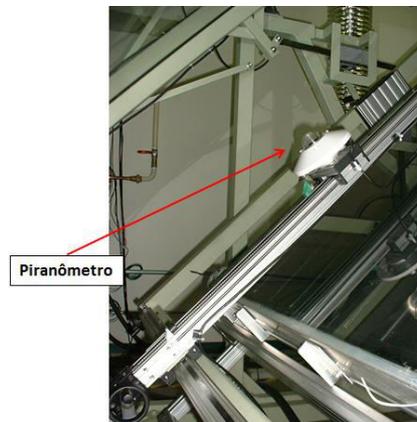


Figura 3 – Simulador solar e piranômetro.

Os testes experimentais foram realizados de acordo com as normas ABNT NBR 15747-1 e 15747-2. A ABNT NBR 15747-1 especifica os requisitos de durabilidade, confiabilidade, segurança e desempenho térmico de coletores solares de aquecimento de líquidos e as disposições para a avaliação das conformidades com estes requisitos. A ABNT NBR 15747-2 especifica os métodos de ensaio para a validação dos requisitos descritos na primeira.

A determinação da eficiência foi feita através da medição da radiação solar incidente no plano do coletor, das temperaturas de entrada e saída da água, da vazão de água e da temperatura ambiente, com os sensores indicados nas Fig. 2 e 3. Um piranômetro espectral de precisão (PSP – Precision Spectral Pyranometer) foi usado para a medição da radiação solar incidente, como indicado na Fig. 3. Termos resistências de platina (PT100) e um medidor de vazão foram usados para a medição das temperaturas e da vazão, respectivamente. A velocidade do vento foi controlada para se ajustar à faixa especificada nas normas. O sistema gerador de vento do Simulador Solar é ajustável desde velocidades próximas de zero até 4,5 m/s.

De acordo com o Regulamento Técnico da Qualidade (RTQ, 2012) para Sistemas e Equipamentos de Aquecimento Solar de Água, elaborado pelo INMETRO, a comprovação da não conformidade com os requisitos de desempenho do coletor solar devido à infiltração/condensação é feita durante a realização do ensaio de choque

térmico/penetração de chuva. A verificação da quantidade de água penetrada é feita através do cálculo da variação da massa do equipamento após o ensaio. Para que seja aprovado no ensaio, o limite máximo de água penetrada é de 5 g/m² de área do coletor para as regras antigas e 30 g/m² de área do coletor para as regras novas.

Coletores solares dos tipos A, B e C (de acordo com as regras antigas) foram testados, a fim de avaliar se a classe influencia os resultados. Os coletores foram submetidos ao ensaio de desempenho térmico, antes e após a admissão de água em seu interior. A água foi injetada no coletor utilizando-se uma seringa de 10 mm, com gradação de 0,1 mm, através das calhas inferior e superior. A quantidade de água penetrada variou de 5 g/m² a 30 g/m², de acordo com a Tab. 3. Os Ensaio denominados 1 a 4 foram realizados com quantidades de água penetrada de 5 g/m², 10 g/m², 20 g/m² e 30 g/m², respectivamente.

Tabela 3 - Área dos coletores e quantidade de água infiltrada.

Coletor	Área (m ²)	Quantidade de água (g)			
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
A	1.7068	0	17	34	51
B	1.0060	0	10.06	20.1	30.2
C	1.0171	0	10.17	20.35	30.5

3. ANÁLISE

A eficiência do coletor é definida como a razão entre o ganho útil de energia em um período de tempo e a energia solar incidente no mesmo período (Duffie e Beckman, 2006):

$$\eta = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int G dt} \quad (1)$$

G representa a irradiação solar total no plano do coletor (W/m²), A_c é a área do coletor (m²) e Q_u é o ganho útil de energia (W).

Nos ensaios realizados, a irradiação solar total é medida no plano do coletor, como indicado na Fig. 3. A área do coletor é determinada como o produto do comprimento e largura do mesmo. O ganho útil de energia é determinado através de um balanço de energia entre a entrada e a saída do coletor:

$$Q_u = \dot{m}(h_o - h_i) \quad (2)$$

\dot{m} representa a vazão mássica de água dentro do coletor (kg/s), h representa a entalpia específica da água (J/kg) e os subscritos o e i se referem à saída e à entrada do coletor, respectivamente. A variação de entalpia é dada por:

$$h_o - h_i = C_p(T_o - T_i) \quad (3)$$

C_p representa o calor específico a pressão constante da água e T, a temperatura. A vazão e as temperaturas são medidas durante os testes.

A eficiência térmica também pode ser dada por:

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

F_R é o fator de remoção de calor do coletor, $\tau \alpha$ representa o produto transmissividade-absortividade do sistema do coletor. Ele não é dado como o produto entre a transmissividade da cobertura τ e a absorvidade do vidro α . Ele deve ser interpretado como uma propriedade da combinação entre a cobertura e o vidro (Duffie e Beckman, 2006). U_L é o coeficiente global de perda de calor do coletor e T_a é a temperatura ambiente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em cada ensaio, foram medidos os valores de vazão, temperatura ambiente, temperaturas de entrada e saída da água e radiação solar. Os valores variaram durante os testes. A Tab. 4 apresenta os valores médios obtidos.

Tabela 4 - Valores médios obtidos nos ensaios.

	Vazão (kg/s)	T _a (°C)	T _i (°C)	T _o (°C)
Coletor A – Ensaio 1	0,0338	24,80	39,05	45,47
Coletor A – Ensaio 2	0,0338	24,72	42,52	48,66
Coletor A – Ensaio 3	0,0339	24,48	41,13	47,35
Coletor A – Ensaio 4	0,0339	25,88	41,91	48,24
Coletor B – Ensaio 1	0,0201	26,02	45,35	50,81
Coletor B – Ensaio 2	0,0198	26,49	46,47	52,03
Coletor B – Ensaio 3	0,0200	25,79	43,01	48,69
Coletor B – Ensaio 4	0,0200	25,61	42,22	48,01
Coletor C – Ensaio 1	0,0202	24,65	41,68	46,97
Coletor C – Ensaio 2	0,0202	24,25	37,75	43,38
Coletor C – Ensaio 3	0,0202	25,04	38,17	43,79
Coletor C – Ensaio 4	0,0201	25,57	42,16	47,53

Pode-se perceber que a penetração de água não provocou variações significativas na eficiência dos coletores. As variações máximas da eficiência média foram de 2,06%, 0,37% e 1,63% para os coletores dos tipos A, B e C, respectivamente. É importante ressaltar que, para o coletor do tipo B, as eficiências ficaram dentro da faixa de incerteza, o que significa que, para este coletor, a água não provocou nenhuma variação na eficiência. De acordo com os resultados apresentados, não foi possível estabelecer uma relação entre a quantidade de água infiltrada e a eficiência do coletor.

A eficiência de coletores solares pode ser expressa na forma de uma equação linear ou quadrática (Duffie e Beckman, 2006). Essas expressões são apresentadas na Tab. 4. A eficiência média é definida como sendo o valor obtido para a abscissa de 0,02, que corresponde ao valor médio para banho. As incertezas das eficiências são apresentadas na última coluna.

Tabela 5 - Expressões para a eficiência dos coletores.

	Expressão	Eficiência média	Incerteza
Coletor A - Ensaio 1	$\eta = 70,22 - 466,32\left(\frac{T_i - T_a}{G}\right)$	60.89%	0.32%
Coletor A – Ensaio 2	$\eta = 70,81 - 496,84\left(\frac{T_i - T_a}{G}\right)$	60.87%	0.33%
Coletor A – Ensaio 3	$\eta = 71,19 - 618,26\left(\frac{T_i - T_a}{G}\right)$	58.83%	0.41%
Coletor A – Ensaio 4	$\eta = 70,93 - 526,00\left(\frac{T_i - T_a}{G}\right)$	60.41%	0.37%
Coletor B – Ensaio 1	$\eta = 63,68 - 452,72\left(\frac{T_i - T_a}{G}\right)$	54.62%	0.34%
Coletor B – Ensaio 2	$\eta = 66,05 - 556,52\left(\frac{T_i - T_a}{G}\right)$	54.92%	0.38%
Coletor B – Ensaio 3	$\eta = 66,30 - 587,38\left(\frac{T_i - T_a}{G}\right)$	54.55%	0.40%
Coletor B – Ensaio 4	$\eta = 66,48 - 582,33\left(\frac{T_i - T_a}{G}\right)$	54.84%	0.41%
Coletor C – Ensaio 1	$\eta = 62,16 - 541,53\left(\frac{T_i - T_a}{G}\right)$	51.33%	0.37%
Coletor C – Ensaio 2	$\eta = 62,53 - 494,04\left(\frac{T_i - T_a}{G}\right)$	52.65%	0.34%
Coletor C – Ensaio 3	$\eta = 62,48 - 511,62\left(\frac{T_i - T_a}{G}\right)$	52.25%	0.36%
Coletor C – Ensaio 4	$\eta = 62,58 - 578,14\left(\frac{T_i - T_a}{G}\right)$	51.02%	0.41%

A partir dos resultados apresentados na Tab. 5 e da Eq. 4, pode-se determinar os valores dos parâmetros $F_R(\tau\alpha)$ e F_{RU_L} . $F_R(\tau\alpha)$ é um parâmetro indicativo da quantidade de energia absorvida pelo coletor e F_{RU_L} é um parâmetro indicativo da quantidade de energia perdida. Pode-se perceber que o coletor tipo A apresenta os maiores valores para $F_R(\tau\alpha)$, indicando que ele é capaz de absorver uma maior quantidade de energia que os demais, apresentando por isso maiores eficiências. Da mesma forma, o coletor tipo C apresenta os menores valores para este parâmetro e as menores eficiências.

A Tab. 6 apresenta os valores da produção de energia mensal, produção de energia mensal específica e as incertezas para cada coletor. Quando comparados os valores obtidos para cada coletor, não são observadas diferenças significativas em relação à água infiltrada. Para o coletor tipo A, a variação máxima foi de 4,3%. Por outro lado, como esperado, o coletor A apresenta maior PEMe, seguido pelos coletores B e C.

Tabela 6 - Expressões para a eficiência dos coletores.

	Produção de energia mensal (kWh/mês)	PEMe (kWh/mês-m ²)	Incerteza (kWh/mês-m ²)
Coletor A – Ensaio 1	145,13	84,87	0,32
Coletor A – Ensaio 2	144,83	84,70	0,33
Coletor A – Ensaio 3	138,84	81,19	0,41
Coletor A – Ensaio 4	143,46	83,90	0,37
Coletor B – Ensaio 1	77,49	75,97	0,34
Coletor B – Ensaio 2	77,42	75,90	0,38
Coletor B – Ensaio 3	76,73	75,22	0,40
Coletor B – Ensaio 4	77,17	75,66	0,41
Coletor C – Ensaio 1	72,25	70,83	0,37
Coletor C – Ensaio 2	74,40	72,95	0,34
Coletor C – Ensaio 3	73,74	72,29	0,36
Coletor C – Ensaio 4	71,62	70,22	0,41

As normas especificam que, quando a quantidade de água infiltrada no coletor exceder 5 g/m² de área do coletor (ou 30 g/m² de área) no ensaio de choque térmico/penetração de água, ele seja rejeitado e o ensaio de desempenho térmico não seja realizado. A análise realizada neste trabalho indicou que não é possível determinar que água infiltrada na faixa de 0 a 30 g/m² reduza a eficiência térmica de coletores solares. Assim, sugere-se que estes valores não sejam usados como referência para rejeitar um dado coletor.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi avaliada a influência da penetração de água na eficiência de coletores solares. Para tanto, equipamentos com diferentes valores de produção de energia mensal específica foram selecionados para análise, correspondentes às classes A, B e C. Os coletores foram submetidos a ensaios de desempenho térmico sem água infiltrada e, posteriormente, o processo foi repetido para quantidades de água infiltrada de 10, 20 e 30 g/m² de área do coletor.

A análise mostrou que não foram obtidas variações significativas na eficiência média ou na produção de energia dos coletores com a penetração de água, para nenhum tipo de coletor avaliado. Além disso, não pôde ser identificada uma relação entre a eficiência e a quantidade de água infiltrada. Pode-se concluir, portanto, que os limites estabelecidos pelas normas ABNT NBR 15747-1 e ABNT NBR 15747-2 são muito rigorosos e podem ser reavaliados.

Agradecimentos

Os autores agradecem à PUC Minas, FAPEMIG e CNPq.

REFERÊNCIAS

- Cruz-Peragon, F.; Palomar, J.M.; Casanova, P.J.; Dorado, M.P.; Manzano-Agugliaro, F., 2012. Characterization of solar flat plate collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, p. 1709-1720.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 2006. *Solar engineering of thermal processes*, third ed. John Wiley and Sons, Nova York.
- Faria, L.P.P.; Moreira, J.V.N.; Silvério, T.A.; Maia, C.B.; Machado Neto, L.V.; Diniz, A.S.A.C., 2014. Avaliação experimental da eficiência térmica de um coletor solar de placa plana operando com infiltração/condensação de água. V CBENS - V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife.
- Ghisi, E.; Gosch, S.; Lamberts, R., 2007. Electricity end-uses in the residential sector of Brazil. *Energy Policy*, v. 35, p. 4107-4120
- Jafarkazemi, F.; Ahmadifard, E., 2013. Energetic and exergetic evaluation of flat plate solar collectors. *Renewable Energy*, v. 56, p; 55-63
- Kilpatrick, R.A.R.; Banfill, P.F.G.; Jenkins, D.P., 2011. Methodology for characterizing domestic electrical demand for usage categories. *Applied Energy*, v. 88, n. 3, p. 612-621
- Oliveira, M.H.F.; Rebelatto, D.A.N., 2015. The evaluation of electric energy consumption in the Brazilian residential sector: A technological improvement proposal in order to increase its efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 49, p. 836-844.
- Osório, T.; Carvalho, M.J., 2014. Testing of solar thermal collectors under transient conditions. *Solar Energy*, v. 104. P. 71-81.
- Pereira, I.M.; Assis, E.S., 2013. Urban energy consumption mapping for energy management. *Energy Policy*, v. 59, p. 257-269.
- Prado, R.T.A.; Gonçalves, O.M., 1998. Water heating through electric shower and energy demand. *Energy and Buildings*, v. 25, n. 1, p; 77-82.
- RTQ, 2012. Regulamento Técnico da Qualidade para Sistemas e Equipamentos de Aquecimento Solar de Água, INMETRO. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001782.pdf>.
- Sözen, A.; Menlik, T.; Ünvar, S., 2008. Determination of efficiency of flat-plate solar collectors using neural network approach. *Expert Systems with Applications*, v. 35, n. 4, p. 1533-1539.
- Suman, S.; Khan, M.K.; Pathak, M., 2015. Performance enhancement of solar collectors—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 49, p. 192-210.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE THERMAL EFFICIENCY OF A, B, AND C SOLAR COLLECTORS WITH WATER INFILTRATION

Abstract. *PBE (Brazilian Labeling Program), coordinated by INMETRO, is a national program in Brazil that provide information about the performance and energetic efficiency of several devices, such as refrigerators, vehicles, and flat plate solar collectors. The vast majority of solar collectors tested by PBE fail in the topic of infiltration of water condensation. Arguably, the presence of water inside the collector decreases its efficiency, since part of the solar radiation is lost to heat the infiltrated water. However, the determination of the heat losses due to infiltration has not yet been properly measured or quantified. The aim of this study was to experimentally evaluate the influence of water infiltration in the efficiency of flat plate solar collectors. Devices from three classes of energetic efficiency: A, B, and C were evaluated, with different amounts of infiltrated water. For the samples evaluated, it was observed that the influence of the amount of water infiltrated on the efficiency is not significant. Therefore, this criterion should not be used to promote the rejection of the collector.*

Key words: *Efficiency, Flat plate solar collectors, Water infiltration.*