

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DE UM COLETOR SOLAR DE PLACA PLANA OPERANDO COM INFILTRAÇÃO/CONDENSAÇÃO DE ÁGUA

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

João Vitor de Navarro Moreira – joaovitornavarro@gmail.com

Thiago de Almeida Silvério – thiago@pucminas.br

Cristiana Brasil Maia – cristiana@pucminas.br

Lauro Vilhena de Machado Neto – lvilhena@pucminas.br

Antonia Sônia Alves Cardoso Diniz – asacd@pucminas.br

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

Resumo. O aquecimento de água com uso de coletores solares como alternativa viável às formas convencionais, notadamente, em comparação à eletricidade, exige constantes estudos sobre os resultados obtidos com sua aplicação. Embora seja considerada uma tecnologia consolidada, visto sua ampla utilização, o emprego dos coletores solares para aquecimento de água ainda demanda alguns estudos, principalmente sobre seu comportamento em resposta a situações adversas, como por exemplo, seu uso com infiltração de água. As especificações presentes nas normas técnicas vigentes sobre o máximo aceitável de umidade no interior de coletores solares é objeto de grande discussão, principalmente por parte dos fabricantes, que questionam a real eficácia de algumas exigências de qualidade. Tal questionamento, somado a um grande índice de reprovação de diferentes modelos quando submetidos aos testes de conformidade, impõe a obrigação da real comprovação do efeito da infiltração/condensação na eficiência dos coletores solares de placa plana. Em concordância com o que foi descrito, este trabalho que objetiva fornecer um conjunto de informações detalhadas do comportamento dos coletores solares submetidos a uma condição de operação específica, contribuindo para o aprimoramento da metodologia de certificação. A metodologia adotada inclui procedimentos experimentais baseados nas normas técnicas aplicáveis, de modo a se obter informações sobre a resposta do coletor solar em situações normais de funcionamento e em situações forçadas de infiltração/condensação de água. Os procedimentos experimentais compreendem ensaios realizados em um Simulador Solar para avaliação do desempenho térmico de um coletor solar plano a partir de quantidades pré-estabelecidas de massa de água injetada. Os resultados permitem possíveis inferências nas normas técnicas em uso com aplicações diretas no mercado de aquecimento solar. Considerando apenas o comportamento da eficiência térmica do coletor solar estudado, os resultados encontrados indicam que o limite mais adequado para o máximo de água infiltrada é de aproximadamente 50% superior ao admitido atualmente na norma técnica que é de 30g de água por metro quadrado de área coletora.

Palavras-chave: Coletor Solar, Eficiência, Infiltração, Condensação.

1. INTRODUÇÃO

A substituição de uma tecnologia já consolidada por qualquer proposta de alternativa só é possível quando são obtidos comprovados ganhos com sua utilização, principalmente, em relação a custos. Em resumo, o emprego de uma nova tecnologia exige resultados superiores aos obtidos com a utilização das opções ditas convencionais, com redução de custos e ganhos de valor ambiental. Portanto, o aquecimento de água com uso de coletores solares, como alternativa viável às formas convencionais, notadamente, em comparação a utilização da eletricidade, exige constantes estudos sobre os resultados obtidos com sua aplicação, promovendo seu uso na medida do desenvolvimento da tecnologia empregada. Diversos autores, citados a seguir, desenvolveram estudos sobre a avaliação dos diversos parâmetros que influenciam na eficiência energética de um coletor ou associação de coletores.

Chiou (1982) considera que a distribuição de vazão nos tubos de elevação é usualmente não uniforme sobre condições normais de operação. Tal condição pode estar associada a imperfeições na construção, instalações impróprias dos coletores solares ou problemas de deposição e entupimento dos tubos. Em seu trabalho, são considerados dezesseis modelos com distribuição inadequada de fluxo. A degradação da eficiência do coletor devido aos efeitos da não-uniformidade do fluxo é determinada para vários coletores em condições de produção/operação. Conclusivamente um parâmetro de não-uniformidade do fluxo é introduzido para representar as divergências da má distribuição do fluxo em relação a seu principal valor. Foi, então, encontrado neste estudo uma relação única entre o grau de deteriorização da eficiência do coletor devido ao efeito de não-uniformidade do fluxo e seu respectivo o parâmetro de não uniformidade do fluxo.

Hahne (1985) estuda os efeitos de parâmetros construtivos sobre a eficiência de coletores solares de placa plana, observando ganhos mais significativos decorrentes de melhorias nas propriedades radiantes do absorvedor e das coberturas transparentes. Assim, uma alta qualidade dos materiais e um alto estado de tecnologia são pré-requisitos.

Lund (1986) introduz um fator de forma que descreve em detalhes os vários projetos de dutos, obtendo desta forma uma aplicabilidade geral. Lund emprega as equações de condução bi-dimensional na placa e de transferência de calor

no duto. Em contraste com métodos anteriores, o seu método é aplicável para todos os projetos de dutos e avalia a transferência de calor desenvolvida e as variáveis que afetam o desempenho térmico da placa.

O modelo físico, desenvolvido por Wang e Wu (1990), discute a não-uniformidade do fluxo de água nos tubos de distribuição. O sistema de equações gerado com base nas leis de conservação de massa, energia e momentum é composto por 19 equações para cada tubo e foi adotado como referência no desenvolvimento do presente trabalho.

Oliva et al. (1991) propõem um modelo numérico para a determinação do comportamento térmico de um coletor solar. O modelo leva em consideração os aspectos multidimensionais e transientes que caracterizam o fenômeno de transferência de calor em um coletor solar. O modelo permite a análise da influência de alguns aspectos como: distribuição não uniforme do fluxo, áreas de sombreamento e variações na dimensão e propriedades de diferentes elementos. Perers (1993) sugere um método dinâmico para arranjo de coletores solares, ensaiados e avaliados com informações padrões e programas de simulação.

O objetivo de seu trabalho era encontrar uma conexão prática e suficientemente precisa entre a medida experimental de eficiência de um coletor operando externamente e os parâmetros de eficiência de um coletor que podem ser usados em programas de simulação para previsão da eficiência a longo termo, com base em médias horárias.

Jones e Lior (1994) prevêm uma distribuição da vazão nas calhas inferiores e superiores de coletores solares, muitas vezes sendo mantido o termo em inglês *manifolds*, negligenciando os efeitos transientes. O modelo desenvolvido é hidrodinâmico e discreto, gerando um sistema de equações algébricas simultâneas não-lineares que são resolvidas numericamente para 54 combinações diferentes das principais variáveis independentes. Em seus resultados, concluem que a razão entre o diâmetro do tubo de elevação e o diâmetro da calhas tem grande influência sobre a má distribuição do escoamento em coletores solares típicos.

Kikas (1995) investiga uma distribuição de fluxo laminar isotérmica e não-isotérmica através de coletores solares de água. Equações algébricas de primeira e segunda ordem foram desenvolvidas para uma distribuição laminar de fluxo totalmente desenvolvido (isotérmico e não-isotérmico), levando em consideração resultados experimentais sobre perda de pressão em junções. Kikas prevê que a taxa de fluxo isotérmico entre dois tubos de elevação não depende do número total de tubos de elevação ou da taxa total de vazão no circuito, mas apenas da localização deles no circuito. Além disso, ele sugere que um esforço para se obter resultados mais detalhados da queda de pressão na vazão dos tubos de elevação é necessário. O efeito da variação do coeficiente de transferência de calor dentro do coletor solar com a vazão, como também o efeito da não-uniformidade da temperatura da água ao longo das calhas é deixado para investigação.

Dymond e Kutscher (1997) propõem o desenvolvimento de um modelo para coletores solares com base na má distribuição de fluxo que acontece em construções de grande escala como é mostrado em fotografias com infravermelho. Esta distribuição deficiente de fluxo pode penalizar o desempenho da associação de coletores devido às maiores perdas convectivas e radiantes de calor. Este artigo descreve o desenvolvimento de um programa de computador que permite aos projetistas prever a não-uniformidade do fluxo e sua eficiência final.

Bosanac e Nielsen (1997) discutem como parâmetros operacionais podem diferir consideravelmente em comparação com valores teóricos baseados em resultados de ensaios de laboratório para um único coletor. Tais discrepâncias podem ser causadas por isolamento inapropriado de arranjo de tubulações, distribuição não-uniforme do fluxo dentro do arranjo, dentre outros.

Hilmer et al. (1999) apresentam uma solução numérica e validação do modelo dinâmico de coletores solares operando sob regime de vazões variáveis, com a inclusão do método de resolução de um conjunto gerado de equações diferenciais parciais de primeira ordem típicas. A contribuição deste método é permitir o tratamento da vazão dependente do tempo radiação não-uniforme espacialmente ou coeficientes de transferência de calor variáveis.

Kazeminejad (2002) propõe uma análise numérica do fluxo bi-dimensional em um coletor solar de placa plana, discutindo sobre o grande número de parâmetros que influenciam a eficiência de um coletor de placa plana. Dentre estes, citou parâmetros construtivos, operacionais, meteorológicos e ambientais, além da temperatura do fluido à entrada do coletor, da sua vazão mássica e do espaçamento entre os tubos de distribuição.

Weitbrecht et al. (2002) propõem um método experimental com grande precisão para determinação da vazão e de medidas de pressão em cada tubo de elevação, com objetivo de investigar a relação entre as perdas nas junções e os números de Reynolds locais. Além disto, desenvolvem cálculos semi-empíricos, usados em uma análise de sensibilidade inferindo sobre as várias distribuições de vazão possíveis em coletores solares. Concluem que a distribuição do fluxo depende primordialmente da relação entre as perdas energéticas nos tubos de elevação e as perdas energéticas nas calhas inferiores e superiores.

Kang M. et al. (2006) conduziram um modelo numérico para estudar o desempenho térmico de uma grande associação de coletores solares, que podem ser integrados como parte da estrutura de um telhado, sem grandes dificuldades. Segundo os autores, a associação de coletores solares consiste de uma rede de tubos de elevação e calhas para simular coletores conectados em série, formando um grande coletor. Os resultados mostram que a eficiência térmica da associação de coletores é principalmente influenciada pela quantidade de tubos de elevação, pela taxa de vazão mássica, condutividade térmica e espessura da placa absorvedora. Diferenças na faixa de 2,5 a 8,0% foram detectadas, dependendo do parâmetro específico testado. Uma das conclusões do autor é que a água nas calhas de divisão (inferiores) permanece praticamente à mesma temperatura de entrada no coletor solar, apesar de haver alguma transferência de calor através das paredes dos tubos de elevação.

A contribuição do presente trabalho, em complementação aos estudos anteriores elaborados pelos autores citados, trata do desenvolvimento de uma análise do comportamento térmico de coletores solares de placa plana antes e após a infiltração de água em seu interior, na pesquisa realizada não se encontrou nada relacionado a este assunto.

1.1 Problema

Embora considerada como tecnologia de conversão já consolidada, visto sua ampla utilização, o emprego dos coletores solares para aquecimento de água ainda demanda alguns estudos, principalmente sobre seu comportamento frente a algumas situações adversas, caso da dimensão da influência da infiltração/condensação no seu desempenho global. Tal questionamento, somado ao alto índice de reprovação de modelos de diferentes fabricantes quando submetido a testes, impõe a obrigação da real comprovação do efeito da infiltração/condensação no rendimento global do coletor.

A metodologia de alguns ensaios específicos, conforme descrita nas devidas normas técnicas, podem induzir afirmações precipitadas sobre o real desempenho de um coletor solar. É o caso de métodos avaliativos com objetivo de constatar a presença de água no interior do coletor devido à infiltração/condensação. Portanto, um estudo detalhado do comportamento do coletor solar em condições de infiltração/condensação, com a devida mensuração da queda de rendimento, é de interesse, não só da comunidade acadêmica, devido à produção de conhecimento sobre o assunto, mas principalmente dos fabricantes, uma vez que o resultado desse trabalho pode apontar para a necessidade de alteração das normas técnicas vigentes. Em resumo, o problema apresentado é a ausência de uma real comprovação do efeito da queda de eficiência térmica do coletor solar quando este é submetido à operação com infiltração/condensação.

1.2 Hipótese

Comprovadamente, a presença de água no interior do coletor diminui a eficiência do mesmo, uma vez que parte da radiação solar destinada para aquecer o fluido de trabalho, é “perdida” no aquecimento da água infiltrada. Entretanto, o grau da queda de rendimento do coletor devido à infiltração/condensação ainda é desconhecido, uma vez que ainda não foi devidamente mensurado.

O entendimento prévio é que a dimensão da queda na eficiência térmica do coletor solar devido à infiltração/condensação seja proporcional à massa de água no interior do equipamento. A hipótese é de se observar uma queda significativa de rendimento do coletor solar na medida do acréscimo de água no seu interior, comprovando o efeito direto da infiltração/condensação na operação do equipamento. Também é sugestivo que o limite especificado na norma técnica não esteja na medida adequada, uma vez que impõe a reprovação de um número substancial de equipamentos, de diferentes modelos e fabricantes.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Em concordância com o exposto, se insere esse respectivo projeto que objetiva: fornecer um conjunto de informações detalhadas do comportamento dos coletores solares submetidos a uma condição de operação específica ao determinar a relevância do efeito da infiltração/condensação no seu rendimento global, contribuindo com o aprimoramento da metodologia de certificação dos coletores, inclusive, como referência para a próxima revisão das normas aplicáveis.

2.2 Objetivos específicos

No intuito de cumprir o propósito apresentado para o projeto, esse trabalho objetiva como resultados intermediários:

1. Detalhar o ensaio experimental aplicável ao caso, em conformidade com a devida norma técnica;
2. Realizar testes no coletor solar de acordo com os procedimentos definidos por norma técnica;
3. Obter conjunto completo de dados sobre a resposta do coletor solar em situação normal e em situação forçada de infiltração/condensação;
4. Tratar os dados coletados;
5. Comparar o desempenho obtido em ambos os testes, notadamente, em relação ao rendimento global do coletor solar;
6. Apresentar resultado sobre o real efeito da infiltração/condensação no desempenho dos coletores solares;
7. Avaliar em termos analíticos o efeito da infiltração/condensação, com base na literatura referenciada;
8. Indicar possíveis inferências nas devidas normas técnicas.

3. METODOLOGIA

3.1 Descrição técnica

A descrição do projeto é apresentada a seguir e contempla a descrição técnica referente aos ensaios experimentais, informações de detalhes construtivos de montagem, instrumentação, instalação e do Simulador Solar, além das especificações técnicas e documentação gráfica dos sistemas e equipamentos utilizados.

Conforme descrição introdutória da concepção do projeto, para atender a proposta do trabalho, será realizado um procedimento experimental para simulação de coletores solares em operação normal e em operação com infiltração/condensação, conforme diretrizes estabelecidas por norma técnica aplicável (ABNT NBR 15747-1, 2009) e (ABNT NBR 15747-2, 2009). A norma NBR 15747-1 (2009) especifica os requisitos de durabilidade (incluindo resistência mecânica), confiabilidade, segurança e desempenho térmico dos coletores solares de aquecimento de líquidos. Também inclui as disposições para a avaliação das conformidades com esses requisitos. A norma NBR 15747-2 (2009) especifica os métodos de ensaio para a validação dos requisitos de durabilidade, confiabilidade, segurança e desempenho térmico dos coletores solares de aquecimento de líquidos apresentados na norma anterior. A norma descreve três métodos de ensaio para a caracterização do desempenho térmico dos coletores solares de aquecimento de líquido. Com o objetivo específico de determinar a influência da infiltração/condensação no rendimento global do coletor solar, será realizado o ensaio de Desempenho Térmico de Aquecimento de Líquidos.

3.2 Montagem experimental

O coletor é montado de forma a permitir a circulação de ar em todo o seu entorno, protegido de eventuais correntes de ar quente e a uma altura do solo não inferior a 50 cm. A inclinação é tal que o fator de correção para o ângulo de incidência não varie mais que 2%, condição normalmente atendida com ângulos de incidência inferiores a 20°, para o caso de coletores de cobertura simples de vidro. Como os ensaios serão realizados no Simulador Solar, o coletor é fixado na bancada com ângulo de incidência igual a 0°, sem risco de sombreamento e com mínimo de radiação refletida pela superfície ao redor. A radiação simulada é praticamente igual à radiação solar direta. A temperatura das superfícies adjacentes ao coletor deve ser a mais próxima possível à do ambiente, minimizando a influência da radiação térmica nos resultados. No caso do Simulador Solar, esta condição climática é mantida pelo condicionamento da sala utilizando sistemas de refrigeração. Para maximizar a reprodutibilidade dos resultados, os coletores devem ser montados de forma que o ar possa circular livremente sobre todo seu entorno de maneira a considerar o vento incidente. No caso do Simulador Solar, são utilizados equipamentos para geração artificial de vento.

O Simulador Solar instalado no Grupo de Estudos em Energia (GREEN) da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG) é composto por um sistema de oito lâmpadas especiais do tipo Metal Halide Global (MHG) que totalizam uma potência de 40 kW. Este conjunto ilumina uniformemente uma área de 2,80 metros quadrados, sendo que a irradiação emitida possui um espectro bastante similar ao Sol. As lâmpadas são energizadas por fontes eletrônicas do tipo Electronic Power Supply (EPS) que são responsáveis por estabilizar e otimizar as características do espectro solar simulado. A irradiação emitida pelas lâmpadas do Simulador Solar é controlada por um computador que utiliza o software “Solar Soft” desenvolvido para essa aplicação. O dispositivo conhecido como “Céu Artificial” simula as perdas radiantes entre o coletor solar e a abóboda celeste e o sistema gerador de vento é ajustável desde velocidades próximas de zero até 4,5 m/s. O céu artificial é composto por duas placas de vidros temperados com baixo teor de ferro e com 8 mm de espessura, entre as quais escoa ar resfriado proveniente de um trocador de calor com água gelada.

A temperatura adequada para os ensaios no Simulador Solar está compreendida entre 15°C e 30°C, com variação máxima de 1,5°C. O sistema de condicionamento de ar tem a função de garantir que os resultados dos ensaios com o Simulador Solar sejam similares aos obtidos em condições reais.

As Figs. 01 e 02 apresentam os detalhes do simulador solar.

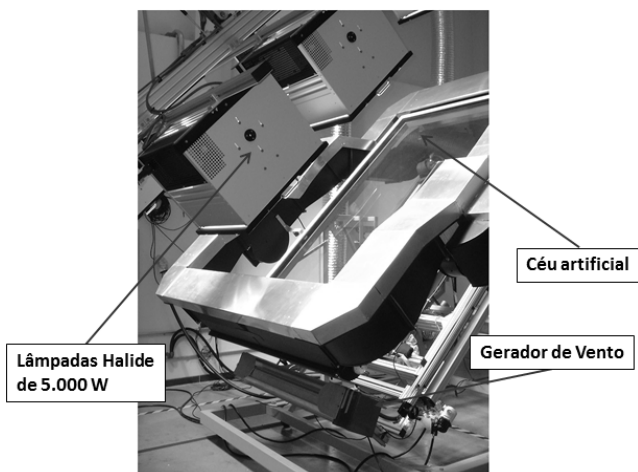


Figura 01 – Vista frontal do simulador solar.

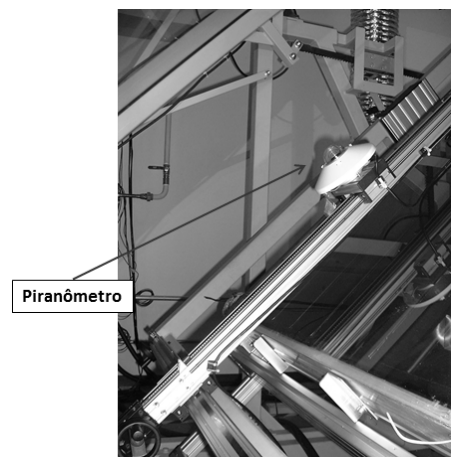


Figura 02 – Vista lateral do simulador solar.

3.3 Especificação técnica do coletor solar testado

Nas Tabs. 01 a 08 são apresentadas as especificações técnicas relevantes do modelo do coletor solar de placa plana utilizado nos experimentos.

Tabela 01 – Identificação e características gerais do modelo de coletor solar utilizado.

Aplicação	Banho
Tipo	Fechado
Peso do Coletor seco (kg)	35
Fluido de trabalho	Água
Pressão de trabalho (kPa)	600

Tabela 02 – Especificações técnicas da área externa.

Altura (mm)	2023
Largura (mm)	1030
Espessura (mm)	75
Área Externa (m ²)	2,08

Tabela 03 – Especificações técnicas da área transparente.

Altura (mm)	1977
Largura (mm)	984
Área Transparente (m ²)	1,94

Tabela 04 – Especificações técnicas da cobertura.

Material	Vidro Liso
Número de Peças	1
Espessura (mm)	3,2
Espaçamento Placa Absorvedora/Cobertura (mm)	30

Tabela 05 – Especificações técnicas da placa absorvedora.

Número de peças	01 peça / Tubo / Serpentina
Material	Cobre
Altura (mm)	1977
Largura (mm)	984
Espessura (mm)	0,1
Tipo de pintura	Especial - Superfície Seletiva
Absortividade (%)	95
Emissividade (%)	10

Tabela 06 – Especificações técnicas da tubulação/serpentina.

Número de Tubos	8
Material	Cobre
Comprimento (mm)	1970
Diâmetro Externo (mm)	6
Diâmetro Interno (mm)	5,2

Tabela 07 – Especificações técnicas da tubulação/calhas coletoras.

Material	Cobre
Número de Calhas	02 - Superior e Inferior
Comprimento (mm)	1070
Diâmetro Externo (mm)	18,1
Diâmetro Interno (mm)	16,3

Tabela 08 – Especificações técnicas do isolamento de Lã de Rocha.

Espessura nominal da base (mm)	25
Espaçamento entre placa absorvedora e base da caixa externa (mm)	30

3.4 Critérios de conformidade

As informações adicionais se referem aos requisitos para comprovação da conformidade de sistemas de aquecimento solar de acordo com o Regulamento Técnico da Qualidade (RTQ, 2012) para Sistemas e Equipamentos de Aquecimento Solar de Água, elaborado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Com base no documento referenciado acima, a comprovação da não conformidade com os requisitos de desempenho do coletor solar devido infiltração/condensação é obtido durante realização do ensaio de choque térmico/penetração de chuva. A verificação de penetração de água é medida através do cálculo da variação de peso do equipamento após a realização do ensaio, o qual é considerado não conforme para variação acima de 30 g/m² de área do coletor. O limite de 30 g/m² de área do coletor representa o máximo aceitável por norma técnica e pode ser menor conforme procedimento de ensaio próprio de cada centro de certificação.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os procedimentos básicos para a realização dos ensaios são apresentados a seguir:

1. Montagem da bancada de ensaio;
2. Configuração do Simulador Solar;
3. Instalação do coletor solar na bancada de ensaio do Simulador Solar;
4. Injeção de água no interior do coletor;
5. Inicialização do Simulador Solar (obtenção da condição de regime permanente);
6. Aquisição e armazenamento de dados;
7. Repetição dos passos anteriores para nova quantia de água injetada.

Os ensaios foram classificados da seguinte forma:

1. Ensaio 0 (sem água infiltrada);
2. Ensaio 1 (com 20,8 gramas de água);
3. Ensaio 2 (com 41,6 gramas de água);
4. Ensaio 3 (com 62,4 gramas de água).

Para efeito de comparação, o ensaio 0 foi realizado no ano anterior e se refere ao ensaio comercial do processo de certificação do respectivo modelo do coletor solar utilizado nos experimentos. Os ensaios 1, 2 e 3 foram realizados com o mesmo exemplar do modelo de coletor solar utilizado no ensaio 0, após a admissão de água nas quantias pré-estabelecidas. A água foi injetada no interior do coletor utilizando uma seringa de 10 mm e graduação de 0,1 mm através das calhas inferior e superior. As Figs. 03 e 04 ilustram o coletor solar analisado. A faixa de infiltração foi determinada a partir do máximo admitido de 5g/m², conforme procedimento interno próprio aos ensaios realizados no GREEN. As quantidades de água admitidas são equivalentes a 100%, 300% e 500% de excesso do limite mencionado.

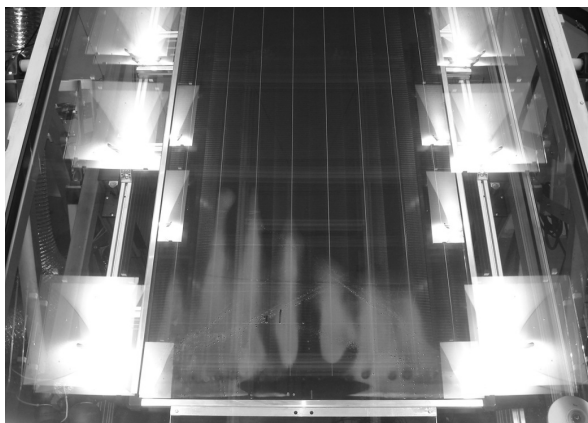


Figura 03 – Vista frontal do coletor solar.

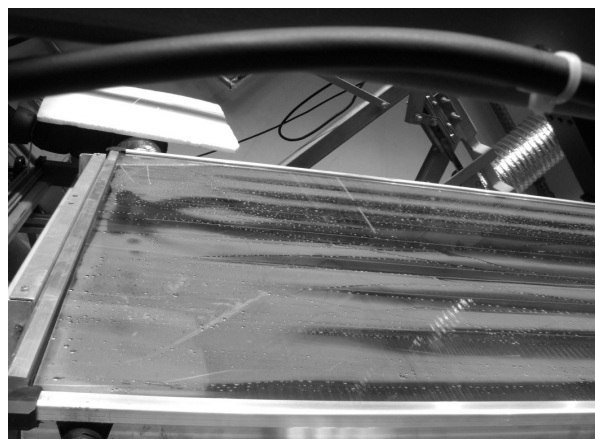


Figura 04 – Vista lateral do coletor solar.

5. RESULTADOS

Os dados obtidos no experimento foram tratados e são apresentados a seguir. A Tab. 09 resume as temperaturas médias do ambiente e entrada e saída do fluido de trabalho para cada ensaio realizado.

Tabela 09 – Temperaturas médias medidas nos ensaios realizados.

	Ensaio 0	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Temperatura ambiente média	24,40°C	25,02°C	23,51°C	26,30°C
Temperatura média da água na entrada	43,70°C	36,49°C	35,71°C	37,93°C
Temperatura média da água na saída	49,40°C	42,92°C	41,96°C	44,25°C

A Eq. (1.0) determina a eficiência térmica de um coletor solar de placa plana e será utilizada nas análises à seguir.

$$\eta = F_R (\tau\alpha) - F_R U_L \left[\frac{T_e - T_a}{G} \right] \quad (1.0)$$

Onde: η é a eficiência térmica do coletor solar de placa plana, F_R é o fator de remoção de calor do coletor, τ é a transmitância da cobertura de vidro, α é a absorvidade da cobertura de vidro, U_L é o coeficiente de perda de calor do coletor ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), T_e é a temperatura da água a entrada do coletor ($^\circ C$), T_a é a temperatura ambiente ($^\circ C$) e G é a radiação solar incidente sobre o plano do coletor (W/m^2).

A Tab. 10 apresenta os resultados das medidas de eficiência térmica média, máxima e mínima, parcela absorvida da radiação incidente, coeficiente global de transferência de calor e constante de tempo.

Tabela 10 – Resultados térmicos obtidos nos ensaios realizados.

	Ensaio 0	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
η_{med}	57,03%	60,79%	60,37%	59,51%
$\eta_{máx}$	58,28%	62,13%	61,70%	60,82%
$\eta_{mín}$	55,27%	59,46%	59,04%	58,28%
$Fr(\tau\alpha)$	0,688	0,734	0,710	0,716
FrU_L	3,763	4,037	3,056	3,826
Constante de tempo	43 s	40 s	42 s	42 s

Os resultados obtidos em termos da eficiência diária são apresentados na Tab. 11, a partir dos valores calculados para Produção de Energia calculada para os ensaios com infiltração (“Ensaio 0, 1, 2 e 3”).

Tabela 11 – Produção de Energia.

	Produção Específica	Produção Mensal
Ensaio 0	87,9 (kWh/m ² /mês)	182,8 (kWh/mês)
Ensaio 1	85,2 (kWh/m ² /mês)	177,4 (kWh/mês)
Ensaio 2	85,0 (kWh/m ² /mês)	177,0 (kWh/mês)
Ensaio 3	83,4 (kWh/m ² /mês)	173,7 (kWh/mês)

Tendo em vista que após a realização dos quatro ensaios previamente descritos, a Produção Específica de Energia reduziu em aproximadamente 3 % (avaliando os ensaios 0 e 3), realizou-se um quinto ensaio experimental, aqui denominado “Ensaio 4”, conforme os mesmos procedimentos adotados anteriormente, porém injetando 312 gramas de água, valor 5 vezes superior ao previsto no ensaio 3 e 500% maior que o limite máximo admitido na norma técnica. Com o intuito de simplificar a análise, os ensaios 1, 2 e 3 serão apresentados como um único ensaio, calculado a partir da média dos resultados obtidos individualmente.

Os dados obtidos com os ensaios 1, 2 e 3 indicam que o impacto na eficiência do equipamento não é significativo para valores mais comuns de infiltração. Os resultados dos experimentos com 20,8 g, 41,6 g e 64,4 g de água injetada são considerados iguais, uma vez que os valores são equivalentes ao se considerar a incerteza da bancada de ensaios que é de, aproximadamente, 2,2%. No comparativo entre os ensaios 1, 2 e 3 e o ensaio 4, é constatado queda significativa de eficiência de quase 4 pontos percentuais, o que é relativizado ao se considerar a condição extrema imposta de 312 gramas de água infiltrada, valor 30 vezes maior que o limite atual dos ensaios de certificação e 5 vezes maior que o máximo (30 g/m²) segundo regulamento técnico.

A análise conclusiva sobre o efeito da infiltração / condensação na eficiência do coletor solar pode ser observada na Tab. 12.

Tabela 12 – Quadro resumo dos valores obtidos nos ensaios realizados.

	Média (Ensaio 1, 2 e 3)	Ensaio 4
η_{med}	60,23%	56,30%
$\eta_{máx}$	61,55%	57,54%
η_{min}	58,91%	55,06%
$Fr(\tau\alpha)$	0,720	0,683
FrU_L	3,640	3,880
<i>Constante de tempo</i>	42 s	40 s

6. CONCLUSÕES

Quantitativamente, o valor da queda de eficiência do equipamento devido o admissão de 312 gramas de água, impõe, em termos lineares, uma proporção de 0,024% para cada grama de água. Ou seja, para uma aproximação linear, a queda na eficiência do coletor solar obtida nos ensaios realizados é de 0,048% / m² / grama de água injetada.

Deste modo, testes em equipamentos sem água infiltrada e com 45,8 gramas de água infiltrada possuem o mesmo resultado, considerando uma incerteza de 2,2%, o que é corroborado pelo resultado obtido com os ensaios 1, 2 e 3.

Considerando apenas a comportamento da eficiência térmica do coletor solar estudado, os resultados encontrados indicam que o limite mais apropriado para o máximo de água infiltrada é 50% superior ao admitido atualmente na regulamentação técnica, considerando as incertezas próprias ao procedimento de certificação. Como exemplo, para o modelo de coletor solar utilizado nos ensaios, o limite adequado seria de 110,0 gramas e não 62,4 gramas.

Os resultados encontrados sugerem que o efeito da infiltração/condensação na eficiência do coletor solar é relativizado de acordo com a massa de água admitida no interior do equipamento. Os resultados também quantificam a queda de rendimento devido à infiltração/condensação com base nos resultados experimentais e no modelo de coletor solar utilizado e confirma os resultados anteriores.

Toda a análise anterior é baseada nos resultados obtidos nos ensaios experimentais de um modelo específico de coletor solar cujo envelhecimento e degradação do isolamento térmico do equipamento, em função da penetração de água, não foram considerados. Tais variáveis podem, a longo prazo, influenciar de forma significativa a eficiência final do coletor solar.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 15747-1, 2009. Sistemas solares térmicos e seus componentes - Coletores solares - Parte 1: Requisitos gerais, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 15747-2, 2009. Sistemas solares térmicos e seus componentes - Coletores solares - Parte 2: Métodos de ensaio, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Bosanac, M., Nielsen, J. E., 1997. In situ check of collector array performance, *Solar Energy*, vol. 59, pp. 135 - 142.
- Chiou, J. P., 1982. The effect of nonuniform fluid flow distribution on the thermal performance of solar collector, *Solar Energy*, vol. 29, n. 6, pp. 487-502.
- Dymond, C., Kutscher, C., 1997. Development of a flow distribution and design model for transpired solar collectors, *Solar Energy*, vol. 60, n. 5, pp. 291-300.
- Hahne, E., 1985. Parameter effects on design and performance of flat plate solar collectors, *Solar Energy*, vol. 34, n. 6, pp. 497-504.
- Hilmer, F., Vajen, K., Ratka, A., Ackermann, H., Fuhs, W., Melsheimer, O., 1999. Numerical solution and validation of a dynamic model of solar collectors working with varying fluid flow rate, *Solar Energy*, vol. 65, n. 5, pp. 305-321.
- Jones, G. F., Lior N., 1994. Flow distribution in manifolded solar collectors with negligible buoyancy effects, *Solar Energy*, vol. 52, n. 3, pp. 289-300.
- Kang, M. C., Kang, Y. H., Lim, S. H., Wongee, C., 2006. Numerical analysis on the thermal performance of a roof integrated flat-plate solar collector assembly, *International Communications in Heat and Mass Transfer*.
- Kazeminejad, H., 2002. Numerical analysis of two dimensional parallel flow flat-plate solar collector, *Renewable Energy*, vol. 26, pp. 309-323.
- Kikas, N. P., 1995. Laminar flow distribution in solar systems, *Solar Energy*, vol. 54, n. 4, pp. 209-217.
- Lund, K. O., 1986. General thermal analysis of parallel-flow flat-plate solar collector absorbers, *Solar Energy*, vol. 36, n. 5, pp 443-450.
- Oliva, A., Costa, M., Perez, S. C. D., 1991. Numerical simulation of solar collectors: the effect of nonuniform and nonsteady state of the boundary conditions, *Solar Energy*, vol. 47, n. 5, pp. 359-373.
- Perers, B., 1993. Dynamic method for solar collector array testing and evaluation with standard database and simulation programs, *Solar Energy*, vol. 50, n. 6, pp. 517-526.

- 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>.
- Wang, X. A., Wu, L. G., 1990. Analysis and performance of flat-plate solar collector arrays, Solar Energy, vol. 45, n. 2, pp. 71-78.
- Weitbrecht, V., Lehmann, D., Richter, A., 2002. Flow distribution in solar collectors with laminar flow conditions, Solar Energy, vol. 73, n. 6, pp. 433-441.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THERMAL EFFICIENCY OF A FLAT PLATE SOLAR COLLECTOR OPERATING WITH INFILTRATION/CONDENSATION OF WATER

Abstract. *The water heating using solar collectors as a viable alternative to conventional forms, especially in comparison to electricity, requires constant study of the results obtained with its implementation. Although considered a consolidated technology, because of its wide use, the use of solar collectors for water heating still demands some studies, mostly about their behavior in response to adverse situations, such as its use with water infiltration. The specification in the current Technical Standards on the minimum acceptable moisture inside the solar collectors is widely debated, especially by manufacturers, who question the actual effectiveness of some quality requirements. Such questioning, coupled with a high rate of failure of different models when tested for compliance, imposes the obligation of the real evidence of the effect of infiltration / condensation efficiency of flat plate solar collectors. In accordance with what has been described, this project aims to provide a set of detailed information on the behavior of solar collectors subjected to a specific operating condition, to determine the relevance of the effect of infiltration / water condensation on its overall efficiency, contributing to improve the methodology of certification. The methodology includes experimental procedures based on technical standards in order to obtain information about the response of the solar collector in normal operation and in situations of forced infiltration/condensation of water. Experimental procedures include tests at Solar Simulator for evaluating the thermal performance of a flat solar collector, working for different boundary conditions, from pre-established quantities of water mass injected. The results allow inferences possible technical standards for use with direct applications in solar heating market. Considering only the behavior of the thermal efficiency of the solar collector studied, the results indicate that the most suitable limit for maximum infiltrated water is approximately 50% higher than the currently accepted technical standard which is 30g of water per square meter of solar collector area.*

Key words: *Solar Collector, Efficiency, Infiltration, Condensation, Water.*