

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA PLACA COLETORA DE UM COLETOR  
TÉRMICO EM ENSAIO *INDOOR*

por

César Leonardo Miorando

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2014.

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA PLACA COLETORA DE UM COLETOR  
TÉRMICO EM ENSAIO *INDOOR*

por

César Leonardo Miorando

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Thamy Cristina Hayashi

Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Eng. Letícia Jenisch Rodrigues

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Pedro Barbosa Mello

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, 14 de novembro de 2014.

Dedico este trabalho principalmente aos meus pais,  
que me apoiaram e estiveram ao meu lado  
em todas as decisões importantes da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais por me proporcionarem a oportunidade de continuar meus estudos e obter meu diploma de Engenheiro Mecânico.

Às minhas irmãs e cunhados por me apoiarem e me incentivarem nos trabalhos e estudos sempre que conversávamos sobre o assunto.

À minha namorada Joseane, que foi muito importante durante minha formação, tanto na graduação, quanto nas questões pessoais, estando ao meu lado e me ajudando em todas as horas.

À minha professora orientadora Leticia Jenisch Rodrigues, ao doutorando Tiago Haubert Andriotty e ao técnico João Batista da Rosa, por me auxiliarem durante a realização do meu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), através de seus conhecimentos, dedicação de tempo e disposição na elaboração dos testes experimentais.

A todos os professores que participaram da minha trajetória como estudante, dedicando suas vidas à formação de tantas outras e principalmente por me ajudarem na constituição da pessoa que sou hoje.

A todos os meus amigos que me incentivaram a chegar ao fim de mais esta jornada e aos amigos e colegas que iniciaram juntamente comigo o curso de Engenharia Mecânica.

MIORANDO, C. L. **Avaliação da Influência da Geometria da Placa Coletora de Um Coletor Térmico em Ensaio Indoor**. 2014. 14 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

## RESUMO

Este trabalho visa avaliar o desempenho de um coletor térmico em regime permanente utilizando placas coletoras com geometria em “U” e geometria em “V”. Durante os ensaios, realizados em laboratório (*indoor*), foram utilizados como fonte de energia radiante um banco de 12 lâmpadas incandescentes de 200 W cada, como fonte de radiação, e um ventilador de 3 kW de potência, para prover o fluxo de ar forçado. Foram medidas as temperaturas de entrada e saída do ar no coletor através de sensores do tipo PT100. A maior diferença de temperatura foi de 6 °C e ocorreu na placa coletora com geometria em “V”. A placa coletora com geometria em “U” com 1/4 de abertura obteve uma diferença de temperatura de 4,9 °C. Através da avaliação da razão da variação de temperatura do fluido em relação à área de material utilizado para a construção das placas, pôde-se verificar que a placa em “U”, de 1/4 de abertura, obteve a melhor relação, 4% a mais quando comparada à placa em geometria em “V”.

**PALAVRAS-CHAVE:** coletor térmico, placa coletora com geometria em “U”, placa coletora com geometria em “V”, eficiência de coletores térmicos em regime permanente.

MIORANDO, C. L. **Indoor Evaluation of the Absorber Geometry Influence of an Air Heater**. 2014. 14 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

## ABSTRACT

This study aimed to evaluate the performance of an air heater in steady state using collector plates with geometry "U" and geometry "V". During the tests performed in the laboratory (*indoor*), it was used as radiant energy source a bank of 12 incandescent bulbs of 200 W each one like a radiation source and a fan of 3 kW of power to provide the air flow. In tests were measured the inlet and outlet temperatures of the air in the collector through of the type PT100 sensors. The greatest temperature difference was 6 °C occurred in the collector plate with "V" geometry. The collector plate with "U" geometry of 1/4 opening obtained a 4.9 °C temperature difference. By evaluating the ratio of the fluid temperature variation relative from area of material used for the construction of the plates, it was observed that the plate with "U" geometry of 1/4 opening got the best value, 4% more when compared to plate with "V" geometry.

**KEYWORDS:** air heater, “U” absorber, “V” absorber, stead state efficiency.

## ÍNDICE

	Página
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVO .....	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	2
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	3
5. CASO DE ESTUDO .....	5
6. METODOLOGIA.....	7
7. RESULTADOS.....	8
7.1 Determinação da incerteza propagada .....	10
8. CONCLUSÃO.....	11
REFERÊNCIAS.....	12
APÊNDICE I – Curvas de Calibração e Operação dos PT100s utilizados. ....	13

## 1. INTRODUÇÃO

Um coletor térmico normalmente é formado por uma estrutura (caixa) de madeira isolada em sua base e nas laterais e coberta por uma superfície de vidro por onde entram os raios solares. O coletor solar possui duas aberturas para ocorrer o fluxo de ar que transportará o calor. Em seu interior há placas, normalmente de metal e pintadas de preto, para aumentar a absorvidade da radiação incidente, que recebem os raios solares. Neste sentido, tem como objetivo principal fornecer calor através do aquecimento de suas placas e disponibilizar este calor. Desta forma, o coletor solar pode ser usado para aquecimento de água, calefação em casas e até mesmo na secagem natural de frutas.

O método de secagem de frutas de forma natural vem sendo adotado com mais frequência nos últimos anos por algumas famílias como forma de auxiliar e contribuir com o aumento da renda familiar. Nesta mesma perspectiva, microempresas se constituem para atuar neste mercado, tendo como foco os consumidores que visam buscar métodos de alimentação mais saudáveis. Ainda, com fins pedagógicos, a fazenda de educação ambiental Quinta da Estância, em conjunto com o Laboratório de Ensaio Térmicos e Aerodinâmicos (LETA) construiu um secador solar de frutas com a finalidade de propiciar às crianças experiências de aprendizagem. A proposta da fazenda é demonstrar na prática como ocorre o processo de secagem das frutas, desde os processos físicos envolvidos no funcionamento do equipamento, até o processo químico e biológico de desidratação das mesmas, como meio de aumentar seu tempo de armazenagem e comercialização.

A preocupação em ingerir alimentos cultivados e mantidos em condições de consumo por mais tempo, sem o uso de conservantes e agrotóxicos, vem aumentando com o passar dos anos. Esta preocupação desperta o interesse em produzir alimentos mais saudáveis, da maneira mais natural possível para evitar o uso de produtos químicos usados na produção em larga escala. Com o intuito de aperfeiçoar este processo a fim de prolongar as propriedades orgânicas mantidas pelo fruto, através da desidratação das frutas, novas técnicas de secagem surgiram, exigindo um melhor desempenho dos coletores solares. Assim, visando obter um melhor rendimento do processo de convecção natural através da vazão de ar que entra na câmara de secagem, segundo Anil *et al.*, 2014, várias formas geométricas para coletores solares foram testadas.

A secagem de frutas pelo método de desidratação vem aumentando entre produtores, que conhecem esta forma de agronegócio. Dentre os fatores que motivam os produtores a aderirem a este método de secagem de frutas é a padronização da construção e funcionamento das câmaras de secagem, o que oferece um caráter prático do processo.

No método de desidratação de frutas, a energia é acumulada em uma "placa" aquecida pela radiação emitida pelo sol e, posteriormente, entrega calor para a vazão de ar

que realiza a secagem. Este calor é levado até o contato com as frutas, desidratando-as para retardar o processo de decomposição e, através deste processo, poder aumentar seu tempo de comercialização para consumo sem o uso de conservantes químicos.

A busca por meios de obter uma melhor eficiência tornou-se motivo de estudo entre muitos pesquisadores da área de energia solar. Várias formas geométricas foram testadas no intuito de analisar qual apresenta melhor eficiência em promover o acúmulo de energia e realizar a entrega para o fluido de trabalho.

## 2. OBJETIVO

Este trabalho visou avaliar o desempenho de um coletor térmico, em regime permanente através de ensaios realizados em laboratório (*indoor*), utilizando diferentes placas coletoras, em geometria em “U” e geometria em “V”.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A busca pelo melhor desempenho de coletores solares é um tema que vem sendo objeto de estudo de alguns pesquisadores da área de energia solar. Estudos realizados, comparando vários fatores que influenciam diretamente na obtenção da melhor eficiência de acúmulo e transporte de energia térmica, visam analisar o coletor solar que obtém melhor rendimento. Dentre os fatores analisados, cabe destacar a geometria da placa coletora, o ângulo de incidência dos raios solares, a vazão mássica ideal, a área do coletor solar e o período diário de maior irradiação sobre a superfície do coletor. Testes realizados por Mahboub e Moumami, 2011, Joudi e Mohammed, 1985, El-Sebaei *et al.*, 2011, entre outros, compararam tais fatores de forma a obter uma combinação eficiente a fim de alcançar o melhor desempenho possível.

Em todos os testes realizados por estudiosos da área de energia, um fator importante ficou comprovado: um aumento na área de absorção da energia solar acarreta em maior área de contato com o fluxo de ar, isto implica em um aumento da transferência de calor devido a maior área de transferência. Segundo Incropera *et al.*, 2008, o rendimento de absorção de energia será máximo se as propriedades do corpo se aproximarem das propriedades de um corpo negro. A radiação pode fornecer maior quantidade de energia quanto maior o número de vezes que sofrer reflexão na superfície do coletor antes de abandonar a placa. Isto acarreta em uma maior temperatura alcançada pela placa que poderá ser entregue para a vazão mássica de ar.

Ainda, pesquisadores como, Joudi e Mohammed, 1985, investigaram o desempenho de placas coletoras com geometria em “V”, com ângulo de incidência dos raios solares variado para estações de inverno e verão. Para o melhor desempenho, os testes foram realizados

apenas em dias claros, para obter apenas radiação direta. Os resultados indicaram um melhor rendimento para uma vazão mássica entre 0,016 e 0,0385 kg/s.m<sup>2</sup>.

Ell-Sebaili *et al.*, 2011, realizaram comparações entre placa plana e em “V”. Com o auxílio de um soprador, realizando vazão forçada, utilizaram ar ambiente como fluido de trabalho escoando pelos dois lados da placa (duplo passe). Para os dados coletados e analisados concluíram que a placa em “V” tem um rendimento de 11% a 14% a mais que a placa plana. A eficiência máxima da placa em “V” foi de 70%, alcançada para uma vazão mássica de 0,031 kg/s m<sup>2</sup>. Acima desta vazão, a troca de calor entre a placa e o fluido de trabalho não ocorria adequadamente.

Os testes realizados por Karim e Hawlader, 2004, em que foi comparado o desempenho entre coletores de placa plana aletada verticalmente e em “V”, apontam que nos testes de passe simples e duplo, os resultados não foram diferentes. O coletor “V” mostrou rendimento superior de 10% a 15% para passe simples e de 5% a 11% para duplo passe. Segundo os pesquisadores, este coletor demonstrou ser muito útil para a aplicação de secagem.

#### 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A luz visível emitida por lâmpadas incandescentes resulta do aquecimento dos seus filamentos de tungstênio. A maior parte da energia resultante deste processo encontra-se na faixa do infravermelho. A quantidade de radiação ultravioleta produzida é desprezível e completamente absorvida pelo bulbo da lâmpada que é de vidro. A figura abaixo mostra a distribuição espectral, normalizada, da lâmpada de tungstênio.

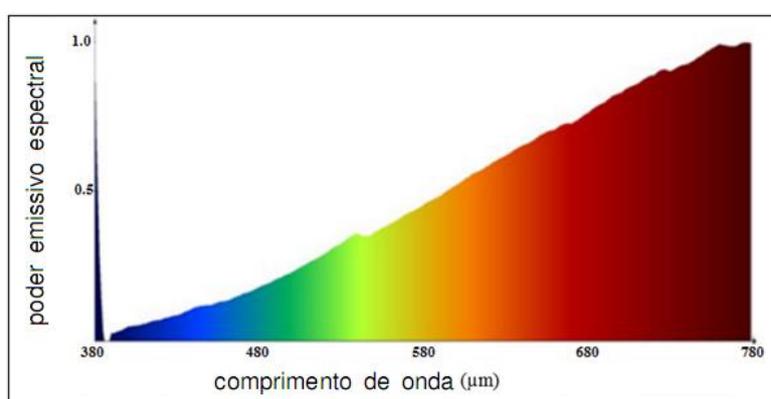


Figura 4.1 – Distribuição espectral normalizada para uma lâmpada de tungstênio. [Andriotty, 2012].

As componentes da irradiação incidente sobre uma superfície podem ser divididas em reflexão, absorção e transmissão, conforme mostra a Figura 4.1, explicitada anteriormente. Nos materiais, a transmissividade pode variar de acordo com suas propriedades e com o

comprimento de onda incidente. O vidro, por exemplo, tem sua transmissividade afetada pelo comprimento de onda e pelo teor de ferro em sua composição. Para vidros comuns, temperados, o valor da transmissividade é de  $\tau = 0,82$  [Krenzinger, 2010].

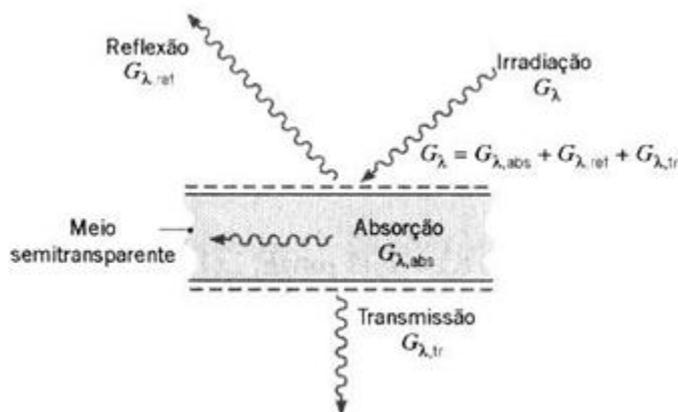


Figura 4.2 – Processo de absorção, reflexão e transmissão associados a um meio semitransparente. [Incropera et al., 2008].

A absorvidade indica a fração de radiação incidente absorvida pelo material. Esta propriedade também é influenciada pelo comprimento de onda e pela direção da radiação incidente. Por outro lado, dependendo de como refletem a radiação incidente, as superfícies podem ser consideradas difusas ou especulares. Para superfícies difusas ou rugosas, a intensidade da radiação refletida independe do ângulo de reflexão. Já para superfícies especulares ou polidas, a intensidade da radiação refletida depende do ângulo de incidência.

Segundo Arno, 2010, para o cálculo da eficiência térmica dos coletores, as seguintes considerações devem ser observadas: a cobertura deve possuir alta transparência para a radiação solar e alta absorvância para a radiação infravermelha; a placa absorvedora deve ser preta e possuir alta condutividade térmica; a caixa deve ter excelente isolamento térmico nas laterais e no fundo. Vale ressaltar que, embora as características acima contribuam para maximizar o rendimento de um coletor, a eficiência do mesmo envolve uma série de outros parâmetros e certa complexidade experimental. Maiores detalhes podem ser encontrados em [Arno, 2010].

Matematicamente, a eficiência de um coletor é expressa por [Karim e Hawlader, 2014]

$$\eta_i = \frac{C_p \dot{m} \int_{t_1}^{t_2} (T_s - T_e) dt}{A_c \int_{t_1}^{t_2} G_T dt} \quad (4.1)$$

na qual  $\eta_i$  é a eficiência instantânea,  $T_e$  é a temperatura do ar na entrada do coletor e  $T_s$  é a temperatura do ar na saída do coletor,  $G_T$  é a irradiância solar no plano do coletor, em  $W/m^2$  e  $A_c$  é a área do coletor, em  $m^2$ . Ainda segundo Karim e Hawlader, 2014, para casos em regime estacionário, a eficiência de um coletor solar a ar é dada pela equação de Hottel-Whillier-Bliss

$$\eta = \frac{Q_U}{A_c G_T} = F_R(\tau\alpha)_{eff} - F_R U_L \frac{(T_e - T_a)}{G_T} \quad (4.2)$$

na qual,  $Q_U$  é a energia útil ganha pelo coletor,  $F_R(\tau\alpha)_{eff}$  representa o ganho do coletor,  $F_R U_L$  representa as perdas do coletor,  $T_e$  é a temperatura do ar na entrada do coletor e  $T_a$  é a temperatura ambiente.

Experimentalmente, a eficiência em regime permanente pode ser obtida em função das propriedades do fluido, isto é, escrevendo-se o calor útil em termos da variação na temperatura do fluido [Duffie e Beckman, 1999].

$$\eta = \frac{C_p \dot{m} (T_s - T_e)}{A_c G_T} \quad (4.3)$$

Neste trabalho,  $A_c$  é a área da seção perpendicular ao fluxo de radiação, conforme norma NBR 15.747-2 [ABNT, 2009], e  $A_{mat}$  é a área total da placa coletora, em  $m^2$ .

## 5. CASO DE ESTUDO

Para realização dos testes em laboratório, primeiramente, construiu-se o coletor solar, formado por uma caixa de madeira em MDF com as seguintes dimensões: 1 metro de comprimento, 0,3 metros de largura e 0,15 metros de altura. As paredes laterais e inferior possuem dois centímetros, 2 cm, de espessura. A parte superior do coletor é composta por uma placa de vidro de 3 mm de espessura, com transmissividade  $\tau = 0,82$ , Figura 5.1.

As placas coletoras são de aço galvanizado com 0,6 mm de espessura, com geometrias em “U” e em “V”. As placas em “U” possuem um raio de 5 cm, totalizando uma circunferência de 31,41 cm, apresentando três aberturas com medidas diferentes. As aberturas são de 1/8, 1/6 e 1/4 da circunferência total, conforme podem ser visualizadas nas Figuras 5.2 e 5.3.

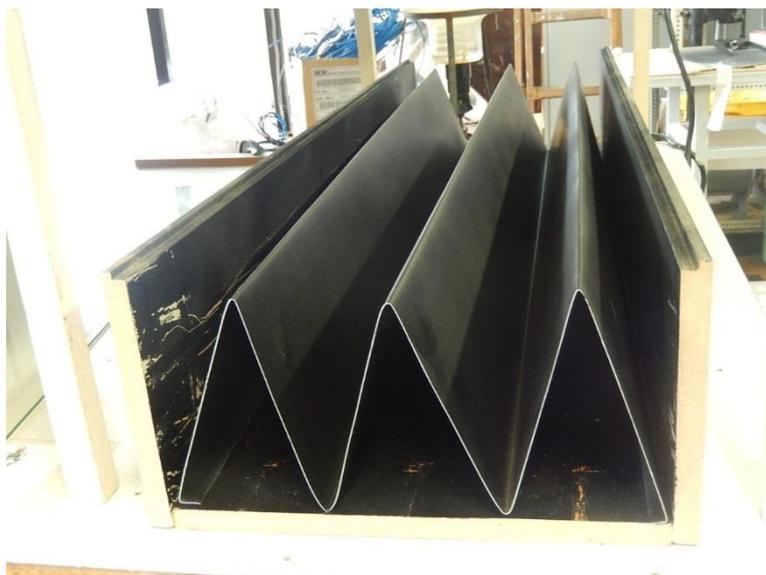


Figura 5.1 – Coletor solar com placa coletora de geometria em “V”.

As chapas foram pintadas com tinta preta fosca para aumentar a absorção da radiação, objetivando o aumento da temperatura interna no coletor. Cabe ressaltar que as paredes e o fundo do coletor, na parte interna, também foram pintadas com tinta preta fosca, a qual apresenta uma refletividade  $\rho = 0,038$  e, conseqüentemente,  $\alpha = 0,962$ .

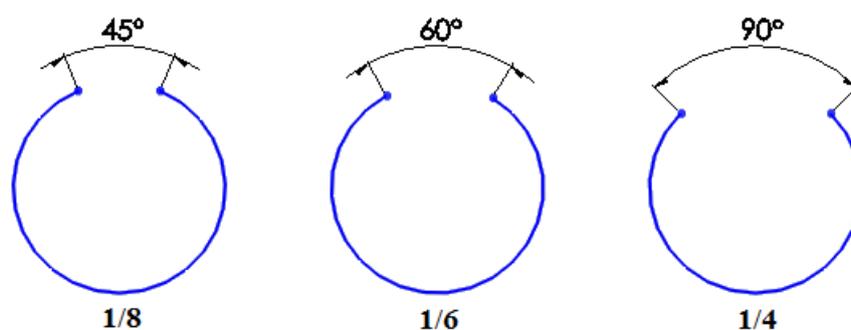


Figura 5.2 – Representação das aberturas das placas em “U”.

A radiação provém de uma bancada composta por 12 lâmpadas incandescentes de 200 W de potência, cada uma, posicionadas paralelamente a 35 cm de altura do coletor solar. Ambos, coletor solar e bancada de lâmpadas, estão instalados sobre uma mesa com inclinação nula em relação ao plano horizontal, Figura 5.4.

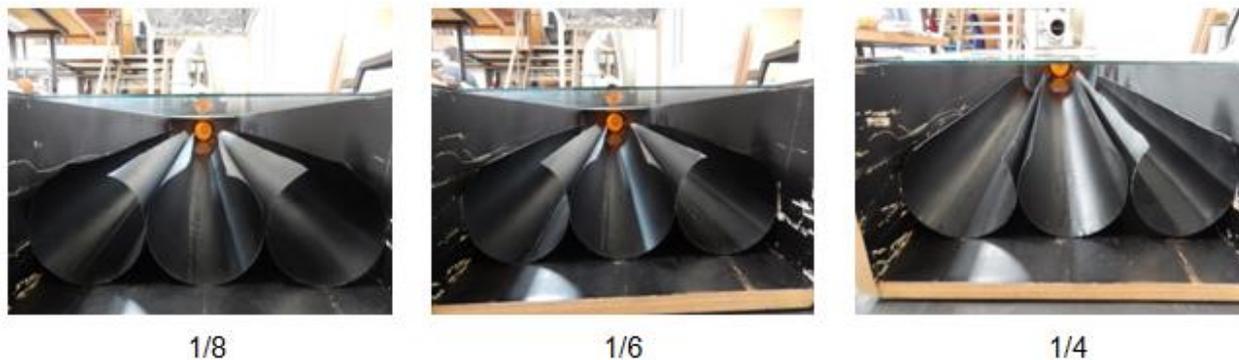


Figura 5.3 – Disposição das aletas no interior do coletor solar.

Para realização da medição da temperatura de entrada e de saída do coletor foram utilizados dois PT100 já calibrados anteriormente no próprio laboratório com outro PT100 calibrado e aferido em laboratório regularizado pelo INMETRO. A corrente de ar foi produzida por um ventilador de 3 kW de potência, operando a 25 Hz e transportado por um duto de 100 mm de diâmetro até a entrada do coletor. Para a realização dos testes foi utilizada uma vazão volumétrica de  $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Figura 5.4 – Bancada de ensaios.

## 6. METODOLOGIA

Os testes foram realizados em um único dia, para evitar que os parâmetros avaliados sofressem alterações, permitindo utilizar a análise em regime permanente. O primeiro teste foi

realizado utilizando o coletor com formato em “V”. Primeiramente posicionou-se a bancada de ensaio na posição horizontal, para evitar desníveis entre a tomada e a saída de ar do coletor e, posteriormente, a bancada de lâmpadas foi posicionada de modo a ficar centralizada sobre o coletor. Em seguida, foram colocados os bocais de entrada e saída do ar. Os PT100 foram colados a uma distância de 0,65 metros da entrada e 0,53 metros da saída do coletor, para evitar que sofressem influência decorrente do calor gerado pelas lâmpadas.

Após os equipamentos estarem ligados, esperou-se entre 20 e 25 minutos para realizar as medições. Este intervalo de tempo foi necessário para que a temperatura da placa coletora ficasse estabilizada, permitindo a análise em regime permanente. A partir da estabilização da temperatura foram realizadas as medidas das temperaturas do ar antes e depois do coletor.

Após o primeiro teste, manteve-se a mesma estrutura da bancada. Substituiu-se, apenas, a placa coletora de formato em “V”, pela placa de formato em “U” com 1/8 de perímetro de abertura. Logo foi executado o mesmo procedimento para aquisição dos dados. Para os testes com as placas de formato em “U” com 1/6 e 1/4 do perímetro de abertura, foram mantidas as mesmas configurações da bancada e de aquisição de dados.

Para controlar a diferença de pressão ocasionada pela placa de orifício, utilizada para medir a vazão, foi utilizado um Transdutor Diferencial de Pressão (LD301). O Transdutor serviu para regular a diferença de pressão e garantir, em todos os testes, que a condição de perda de carga no escoamento de ar seria a mesma até a entrada do coletor. Desta forma, buscou-se garantir que os resultados dependeriam somente das configurações geométricas das placas coletoras.

## 7. RESULTADOS

Os testes foram realizados para uma vazão de 0,02 m<sup>3</sup>/s. Considerando-se que a temperatura ambiente era de aproximadamente 25 °C, Tabela 7.3, a vazão mássica foi de 0,024 kg/s. O soprador foi mantido em uma frequência constante de 25 Hz, que proporcionou uma velocidade de escoamento na saída do coletor de 2,5 m/s. Para que a perda de carga fosse mantida constante para todos os testes, até a entrada do coletor, o Transdutor Diferencial de Pressão informava uma diferença de pressão, a qual foi tomada como referência.

A tabela a seguir mostra as áreas superficiais totais de cada placa coletora,  $A_{mat}$ . A placa coletora em “V” foi tomada como referência e, para as demais placas, foram calculadas as porcentagens em relação a placa coletora em “V”. Para cada placa coletora foram realizadas vinte medidas. As variações de resistência nos PT100, de entrada e saída do coletor, foram medidas a cada 3 segundos.

Tabela 7.1 – Áreas superficiais totais das placas coletoras

Placa	$A_{mat}$ (m <sup>2</sup> )	%
V	0,90	100,00
U – 1/8	0,82	91,63
U – 1/6	0,79	87,27
U – 1/4	0,71	78,54

Os valores medidos pelos PT100, em ohms, foram convertidos para graus Celsius a partir das respectivas curvas de operação, Apêndice 1. De acordo com o fabricante, a incerteza associada ao sensor é de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . A partir da comparação dos resultados, percebe-se que para a placa coletora em “U” de 1/4 de abertura, a relação entre a variação de temperatura,  $\Delta T$ , por sua área superficial total foi a maior. A tabela a seguir mostra os resultados coletados pelos PT100 e as relações feitas entre as variações de temperatura com as áreas superficiais totais das placas coletoras,  $A_{mat}$ .

Tabela 7.3 – Temperaturas de entrada e saída do coletor e suas relações com as áreas totais de material utilizado,  $A_{mat}$ , de cada placa coletora.

Placa	$T_{ent}$ (°C)	$T_{sai}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$A_{mat}$ (m <sup>2</sup> )	$\Delta T/A_{mat}$ ((°C)/m <sup>2</sup> )	%
V	24,8	30,8	6,0	0,9	6,67	100
U – 1/8	24,9	30,0	5,2	0,82	6,26	93,86
U – 1/6	25,0	29,7	4,7	0,79	5,96	89,38
U – 1/4	24,6	29,5	4,9	0,71	6,96	104,41

Um fator importante no que se refere a construção do coletor é que atualmente, o custo do metro quadrado da placa de cobre está em torno de R\$ 300,00. Comparando-se as geometrias propostas, seria gasto por volta de R\$ 213,00 para a confecção das placas em “U” 1/4 e R\$ 270,0 para a confecção da placa em geometria em “V”. Uma economia de R\$ 57,00 por coletor construído, equivalente a 21%.

Foram medidos os fluxos de radiação emitidos pela bancada de lâmpadas que estavam incidindo sobre o coletor através de um piranômetro calibrado em  $0,2 \text{ mV/Wm}^{-2}$ , com uma incerteza de  $\pm 5\%$  do valor medido. O gráfico a seguir mostra o comportamento do fluxo de radiação incidente sobre a superfície do coletor ao longo do comprimento e da largura.

Vários pontos ao longo do comprimento e da largura do coletor foram medidos para determinar o fluxo de radiação incidente no plano do vidro. A variação do fluxo ocorreu entre  $513,30 \text{ W/m}^2$  e  $684,70 \text{ W/m}^2$ , estabelecendo a média da irradiância de  $626,12 \text{ W/m}^2$ , para os trinta pontos medidos. Considerando-se a transmissividade do vidro,  $\tau = 0,82$ , a irradiação que

chega ao plano do coletor é, em média,  $G_T = 513,42 \text{ W/m}^2$ . Esta irradiação foi determinada a partir da integração ao longo da placa.

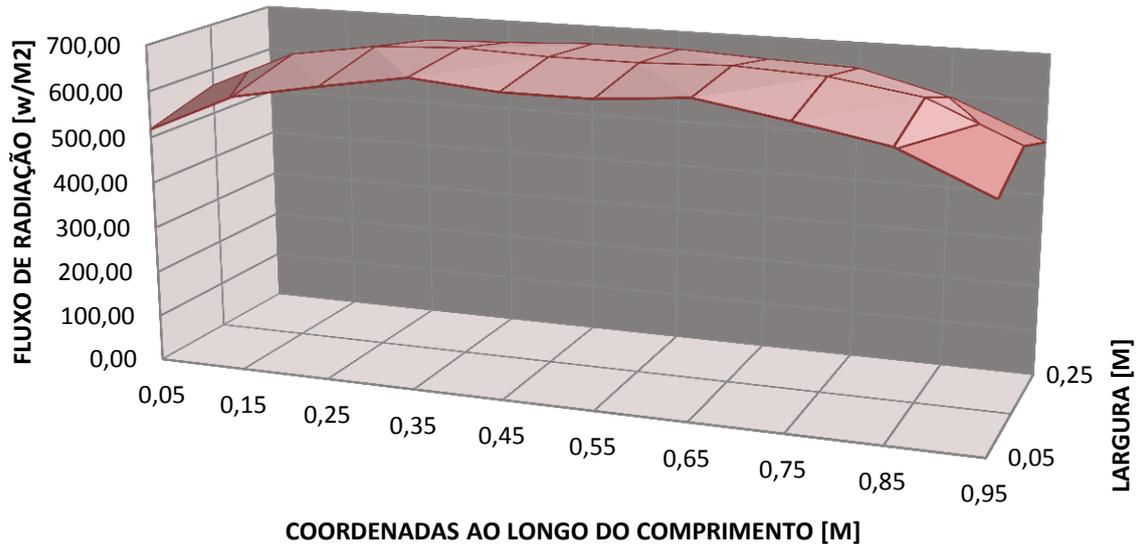


Figura 7.1 – Distribuição fluxo de radiação incidente sobre a superfície do coletor ao longo do comprimento e da largura.

### 7.1 Determinação da incerteza propagada

Pode-se estimar a propagação do desvio padrão de uma grandeza a partir do desvio padrão de suas variáveis dependentes. Para tanto, tomando-se a grandeza  $Y$ , define-se a incerteza propagada  $U_r$ , segundo Kline e McClintock, 1953 *apud* Holman, 1996, como sendo

$$U_r = \left\{ \left[ \left( \frac{\partial V}{\partial x_i} u_i \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial V}{\partial x_n} u_n \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (7.1)$$

Tomando-se como parâmetros variáveis  $\Delta T$  e  $G_T$ , a incerteza propagada pode ser determinada através de

$$U_\eta = \left\{ \left[ \left( \frac{Cp \dot{m}}{A_c G_T} (0,5) \right)^2 + \left( -\frac{Cp \dot{m} \Delta T}{A_c G_T^2} (25,67) \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (7.2)$$

Os resultados para determinação da incerteza propagada encontram-se na tabela 7.5.

Tabela 7.5 – Determinação da incerteza propagada para as medições realizadas.

Placa	$U_n$	%
V	4,046E-03	0,40
U – 1/8	3,767E-03	0,38
U – 1/6	3,626E-03	0,36
U – 1/4	3,695E-03	0,37

## 8. CONCLUSÃO

Neste trabalho avaliou-se qualitativamente o desempenho de um coletor térmico em regime permanente utilizando diferentes geometrias de placas coletoras. Os ensaios, realizados em laboratório (*indoor*), utilizaram como fonte de energia radiante um banco de 12 lâmpadas incandescentes, como fonte de radiação, e um ventilador para fornecer o fluxo de ar. Os parâmetros analisados foram a variação de temperatura do fluido e a área total de material gasta na construção da placa coletora, pois este tipo de coletor costuma ser utilizado em secadores de frutas e ervas, principalmente por pequenos agricultores.

Ao retomar o objetivo deste estudo que teve por finalidade avaliar o desempenho de um coletor térmico, em regime permanente através de ensaios realizados em laboratório (*indoor*), utilizando diferentes placas coletoras, em geometria em “U” e geometria em “V” percebeu-se que ao comparar a razão entre esses dois parâmetros, a placa com geometria em “U”, de 1/4 de abertura, obteve a melhor relação, mesmo quando comparada à placa em geometria em “V”.

Ainda, cabe destacar que a diferença entre as variações de temperatura entre as placas, em regime permanente, não excedeu 2 °C. Conforme mencionado anteriormente, o custo do metro quadrado da placa de cobre está em torno de R\$ 300,00. Comparando-se as geometrias propostas, seria gasto por volta de R\$ 213,00 para a confecção das placas em “U” 1/4 e R\$ 270,0 para a confecção da placa em geometria em “V”. Uma economia de R\$ 57,00 por coletor construído, equivalente a 21%.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se a construção das curvas de eficiência dos dois coletores citados acima. Para tanto, será necessário avaliá-los para 16 configurações diferentes de radiação incidente. Neste caso, sugere-se que os ensaios sejam feitos *outdoor*, ou seja, em campo. A construção dessas curvas permitirá identificar para quais condições os coletores são mais eficientes.

## REFERÊNCIAS

Andriotty, T.H., “**Projeto experimental para comparação de solução gerada a partir do método inverso em cálculos de iluminação artificial para uma condição de iluminamento uniforme no plano de trabalho**”. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, UFRGS. Porto Alegre, 2012.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “**NBR 15.747-2: Sistemas solares térmicos e seus componentes - Coletores solares- Parte 2: Métodos de ensaio**”. Rio de Janeiro, 2009.

Duffie, J.A., Beckman, W.A., “**Solar engineering of thermal processes**”, Philadelphia: Taylor and Francis, 2<sup>o</sup> Ed., 1999.

El-Sebaili, A.A., Aboul-Enein, S., Ramadan, M.R.I., Shalaby, S.M., Moharram, B.M., “Investigation of thermal performance of double pass-flat and v-corrugated plate solar air heaters”. **Energy**, vol. 36, n.2, fevereiro. 2011, p. 1076–1086.

Holman, J.P., **Experimental Methods for Engineers**, New York: McGraw-Hill, 6<sup>a</sup> Ed, 1996.

Incropera, F.P., Dewitt, P.D., Bergman, L.T., Lavine, A.S., “**Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**”, São Paulo: LTC, 6<sup>a</sup> Ed., 2008.

Joudi, K.A., Mohammed, A.I., “Experimental performance of a solar air heater with a “V” corrugated absorber”. **Energy Conversion and Management**, vol. 26, n.2, 1986, p. 193–200.

Karim, M.A., Hawlader, M.N.A., “Performance investigation of flat plate, v-corrugated and finned air collectors”. **Energy**, vol. 31, n.4, março 2006, p. 452–470.

Kline, S. J., McClintock, F. A., "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments", **Mech. Eng.**, Jan. 1953, p. 3.

Krenzinger, A. (Org.). “**Radiação Solar e Conversão Térmica de Energia Solar**”. Notas de aula da disciplina ENG03072 Energia Solar Térmica - UFRGS. Porto Alegre, 2010. 210 p.

Mahboub, C., Moumami, N., “Calculation of the glass cover temperature and the top heat loss coefficient for 60<sup>o</sup> vee corrugated solar collectors with single glazing”. **Solar Energy**, vol. 86, n.2, fevereiro 2012, p. 804–808.

## APÊNDICE I – Curvas de Calibração e Operação dos PT100s utilizados.

## PT100 Entrada

