

Universidade do Sol: Relatório Técnico 01, Novembro de 2013.

# Eficiência de coletores solares e comparações entre tubos evacuados e coletores planos



Considerações teóricas e avaliação experimental

Eng. Lúcio César de Souza Mesquita, Ph.D.

Universidade do Sol  
Rodovia Marechal Rondon, km 274 - Prédio 5  
CEP 18650-000 - São Manuel/SP

[www.universidadedosol.org.br](http://www.universidadedosol.org.br)



UNIVERSIDADE DO SOL





## Índice

|   |    |
|---|----|
| Introdução .....  | 01 |
| Tipos de coletores solares .....                              | 01 |
| Eficiência de coletores solares e áreas de referência .....   | 05 |
| Teste experimental de comparação de produção de energia ..... | 13 |
| Conclusões e considerações finais .....                       | 20 |
| Anexo A - Fotos Adicionais .....                              | 23 |

## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 01: Coletor solar plano fechado .....  | 02 |
| Figura 02: Instalação de coletores planos abertos para aquecimento de piscina .....   | 02 |
| Figura 03: Detalhe do condensador de tubos evacuados de vidro simples com tubos de calor .....  | 03 |
| Figura 04: Tubos evacuados de vidro duplo: na esquerda modelo tipo fluxo direto, na direita, modelo de fluxo indireto com tubo de calor .....   | 04 |
| Figura 05: Modelo de tubo evacuado com refletores na sua parte posterior .....  | 04 |
| Figura 06: Definição das áreas externa, transparente e de absorvedor em um coletor plano 06   |    |
| Figura 07: Coletores evacuados com espaçamento entre os tubos .....   | 06 |
| Figura 08: Curvas de eficiência para um mesmo coletor à vácuo com base na área de absorvedor (vermelho), área transparente (azul) e área externa (verde) .....  | 08 |
| Figura 09: Curvas de performance de coletores de tubos evacuados participantes do programa norte-americano de certificação .....  | 09 |
| Figura 10: Curvas de performance de coletores de tubos evacuados participantes do programa norte-americano de certificação, além de 2 coletores planos do programa norte-americano e dois coletores planos do PBE/INMETRO. .... | 11 |
| Figura 11: Tabela de comparação de coletores à vácuo X coletores planos extraída do material comercial de um fornecedor/importador de tubos à vácuo .....   | 12 |
| Figura 12: Dimensões dos coletores usados nos experimentos .....  | 13 |
| Figura 13: Sistemas de aquecimento solar utilizados nos experimentos .....  | 14 |
| Figura 14: Sistemas de aquecimento utilizados nos experimentos com reservatório de apoio R1 .....   | 15 |
| Figura 15: Resultado da avaliação experimental comparativa entre coletores planos e coletor por tubos à vácuo .....   | 18 |
| Figura 16: Resultados dos testes da primeira fase .....   | 19 |
| Figura 17: Resultados dos testes da segunda fase .....  | 19 |
| Figura A1: Detalhe do sistema com coletores planos .....  | 23 |
| Figura A2: Detalhe do sistema com coletores de tubos à vácuo .....  | 24 |
| Figura A3: Detalhe da cabeceira do coletor de tubos à vácuo .....   | 25 |
| Figura A4: Detalhe do condensador do tubo de calor (Heat Pipe) do tubo à vácuo .....  | 25 |
| Figura A5: Detalhe do ponto de encaixe do condensador do tubo de calor na cabeceira do coletor .....  | 26 |
| Figura A6: Vista em perspectiva dos dois sistemas, lado nordeste .....  | 26 |
| Figura A7: Vista em perspectiva dos dois sistemas, lado noroeste .....  | 27 |
| Figura A8: Detalhe da lateral da entrada de água fria do coletor de tubos à vácuo .....   | 27 |
| Figura A9: Detalhe do retorno de água quente no reservatório térmico do coletor plano .....   | 28 |

## Lista de Tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1: Resultados dos testes da primeira fase ..... | 16 |
| Tabela 2: Produção específica dos dois sistemas .....  | 17 |
| Tabela 3: Resultados dos testes da segunda fase .....  | 17 |
| Tabela 4: Produção específica dos dois sistemas .....  | 18 |

## Eficiência de coletores solares e comparações entre tubos evacuados e coletores planos: considerações teóricas e avaliação experimental.

Eng. Lúcio César de Souza Mesquita, Ph.D.

Universidade do Sol

Rodovia Marechal Rondon, km 274 - Prédio 5 - CEP 18650-000 - São Manuel/SP

[www.universidadedosol.org.br](http://www.universidadedosol.org.br)

### Introdução

Em todo o mundo, os coletores solares térmicos mais comuns são os planos e os tubulares à vácuo. Apesar de já existirem coletores planos comerciais desde o começo do século XX, seu desenvolvimento se deu mais expressivamente depois da primeira crise do petróleo, no começo da década de 1970. Os coletores tubulares à vácuo, por sua vez, foram criados nessa mesma época, através de esforços tecnológicos, principalmente, nos EUA, Alemanha e Austrália.

No Brasil, até recentemente, o mercado era atendido exclusivamente por coletores solares planos e, na sua grande maioria, de fabricação nacional. Nos últimos anos, entretanto, tem havido uma maior oferta de coletores solares tubulares à vácuo, sendo que, com essa nova opção, veio também uma certa dificuldade por parte de profissionais do setor e da construção civil de entender as peculiaridades dessa tecnologia e as diferenças de performance entre esses coletores.

O objetivo dessa publicação é de apresentar as bases para os cálculos e medições de eficiência de coletores solares e também alguns números comparativos entre os dois tipos de coletores.

### Tipos de Coletores Solares

Os coletores planos são bem conhecidos e há relativamente pouca variação construtiva entre a maioria dos modelos disponíveis. O componente principal de um coletor é o seu absorvedor. O absorvedor é formado por aletas e tubos, que ficam alocados em uma caixa isolada termicamente e que recebe uma cobertura transparente. Tais modelos são chamados de coletores planos fechados (figura 1). Algumas vezes usa-se mais de uma cobertura, apesar de não ser muito comum tal arranjo. Há ainda modelos mais simples, usados para aquecimento de piscinas, que não possuem caixa, isolamento e cobertura, como os mostrados na figura 2. Esses são chamados de coletores planos abertos. É interessante notar que coletores abertos para aplicações de baixa temperatura são normalmente mais eficientes que os coletores planos fechados e coletores à vácuo. Isso aponta para um conceito importante na aplicação de coletores solares: o equipamento mais eficiente e/ou mais efetivo depende da temperatura de trabalho e nem sempre um coletor mais sofisticado ou caro tem eficiência maior para uma determinada faixa de temperatura.



Figura 1: Coletor solar plano fechado.  
Fonte: Soletrol.



Figura 2: Instalação de coletores planos abertos para aquecimento de piscina. Fonte: Suacci.

Já os coletores tubulares à vácuo possuem uma maior variedade construtiva.

Os modelos podem ser:

- de vidro único ou vidro duplo, também chamado tipo Sydney;
- de contato direto, quando o fluido a ser aquecido passa dentro do tubo evacuado, ou indireto, quando o calor é transportado para fora do tubo através dos chamados tubos de calor (heat pipe);
- com refletores ou sem refletores.

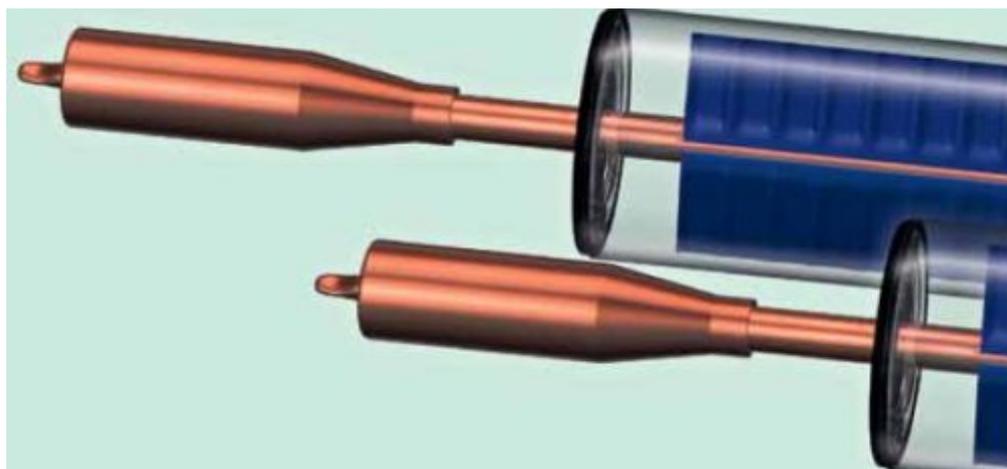


Figura 3: Detalhe do condensador de tubos evacuados de vidro simples com tubos de calor. Fonte: machine-hystory.com

Os primeiros modelos desenvolvidos usavam vidro único, como o da figura 3, mas tal arranjo trazia um grande desafio tecnológico ligado à manutenção do vácuo, especialmente na vedação entre o vidro e a tampa metálica por onde passa o tubo. Assim, para evitar essa dificuldade, foram desenvolvidos os tubos à vácuo de vidro duplo (figura 4). Nesse caso, apesar de trazer uma redução de eficiência, o vácuo fica contido entre dois tubos de vidro unidos nas duas extremidades, algo parecido com uma garrafa térmica, evitando-se a selagem vidro-metal.

Como os tubos à vácuo são abertos apenas em uma de suas extremidades, para facilitar a drenagem e o arranjo hidráulico dos sistemas, foram desenvolvidos também coletores que utilizam tubos de calor para transportar o calor até a cabeceira ou “manifold” do coletor. Tubos de calor usam uma pequena quantidade de líquido que se evapora dentro do tubo quando recebe calor, e depois se condensa quando troca calor com a água mais fria que passa na cabeceira do coletor.

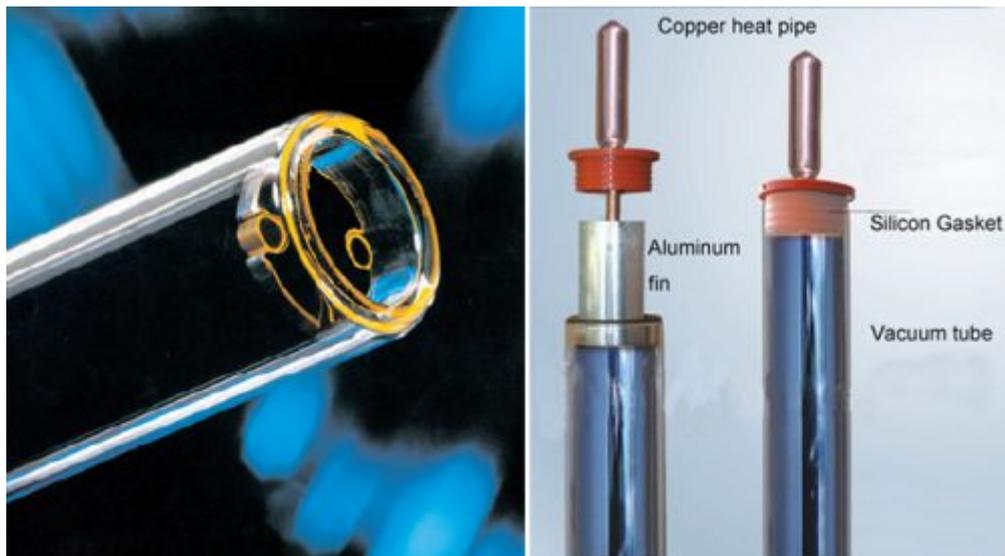


Figura 4: Tubos evacuados de vidro duplo: na esquerda modelo tipo fluxo direto, na direita, modelo de fluxo indireto com tubo de calor. Fonte: Microtherm, SunRay.

Os coletores à vácuo de vidro único são, em geral, mais eficientes que coletores à vácuo de vidro duplo, e coletores de fluxo direto são mais eficientes que coletores que usam tubos de calor, ou seja, fluxo indireto.



Figura 5: Modelo de tubo evacuado com refletores na sua parte posterior. Fonte: Andy Schroder.

## Eficiência de coletores solares e áreas de referência

Desde o começo do desenvolvimento comercial do aquecimento solar tem havido uma busca constante por normas e procedimentos de testes que possam avaliar a performance dos equipamentos. Isso é muito importante, não somente para os técnicos do setor, pois dá a eles parâmetros técnicos que são usados nos projetos dos sistemas, mas também ao consumidor, já que os ajuda a diferenciar entre as tecnologias disponíveis.

Eficiência é um termo usado em engenharia para medir o rendimento de um equipamento quando comparado a uma referência, ou o máximo teórico de rendimento possível. No caso de coletores, um coletor solar com 100% de eficiência seria aquele que convertesse toda a irradiação solar em aquecimento do fluido, sem nenhuma perda. Isso é impossível, pois todos os coletores possuem perdas. A começar pelas perdas óticas, pois parte da irradiação é refletida pelo vidro dos coletores ou pelo próprio absorvedor.

Além das perdas óticas, existem também as perdas térmicas. Os coletores à vácuo foram desenvolvidos para minimizar essas perdas térmicas. Além dos fatores óticos e térmicos, também podemos dizer que a eficiência de um coletor depende de fatores geométricos, ou seja, como o espaço ocupado pelo coletor é aproveitado.

Mas, voltemos à definição de eficiência: 
$$\eta = \frac{Q_{\text{útil}}}{I \times A} \quad (1)$$

Onde  $\eta$  é a eficiência (de 0 a 1);

$Q_{\text{útil}}$  é a potência útil coletada, em W;

$I$  é a irradiação solar incidente sobre o coletor, em W/m<sup>2</sup> e

$A$  é a área do coletor, em m<sup>2</sup>.

Dessa forma, se um coletor tem 50% de eficiência, isso quer dizer que ele converte em calor útil, ou aquecimento do fluido, 50% de toda a irradiação incidente sobre ele. A equação acima é extremamente simples, mas a sua aplicação não é, assim, tão direta. Isso porque podemos escolher diferentes áreas para o coletor quando fazemos esses cálculos.

Os coletores solares podem ser definidos por três áreas distintas: área externa (ou bruta), área transparente ou área de absorvedor. Em coletores planos, essas três áreas são muito parecidas, como fica evidente na figura 6, mas em coletores de tubos evacuados, não. Nesses coletores existe um espaçamento entre os tubos e, com isso, há uma grande diferença entre a área externa do coletor, que é efetivamente a área ocupada pelo mesmo, e a área transparente. A figura 7 mostra uma foto de uma instalação de tubo evacuado onde é possível notar o espaçamento entre os tubos.



Figura 6: Definição das áreas externa, transparente e de absorvedor em um coletor plano.



Figura 7: Coletores evacuados com espaçamento entre os tubos. Fonte: Radiant Solar, Inc.

Obviamente, o calor útil gerado pelo coletor não se altera com a escolha da área de referência. Mas a eficiência calculada, sim. Por exemplo, usando dados de 104 modelos de coletores de tubos evacuados certificados pelo programa norte-americano de coletores solares, chamado de SRCC (*Solar Rating & Certification Corporation, 2013*), a relação entre área transparente e área externa varia entre 0,92 e 0,32, com um valor médio de 0,67.

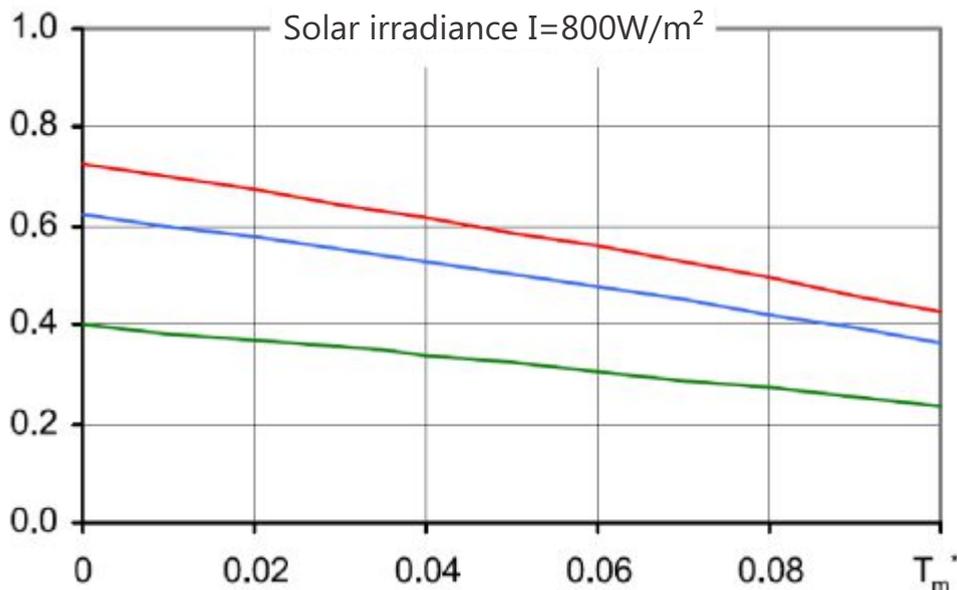
Isso quer dizer que, na média, a área transparente é 33% menor que a área externa nesses modelos, ou seja, para cada  $m^2$  de área externa, teríamos  $0,67 m^2$  de área transparente. Isso também equivale a dizer que, em média, a área externa é 49% maior que a área transparente. Tipicamente, para coletores planos, essa diferença é de 5%. Como a equação "1" nos mostra que a eficiência calculada é inversamente proporcional à área de referência escolhida, quando usamos a área transparente como referência, os números da eficiência ficam maiores.

Para evitar maiores confusões, os diversos programas de testes adotam uma única área como referência para os cálculos de um determinado coletor. No Brasil, usamos a área externa para os dados da etiqueta do INMETRO. Nos EUA também se usa a área externa. Na Europa, usa-se a área transparente, apesar da nova norma europeia apresentar uma mudança para área externa também. Não é possível dizer qual área usada está tecnicamente correta.

É uma questão de ponto de vista. Por um lado, há aqueles que acreditam que a área externa representa melhor a eficiência prática de um coletor, já que está baseada na área que será efetivamente ocupada pelo mesmo. Por outro lado, os proponentes da área transparente argumentam que o uso da mesma elimina os efeitos geométricos, apresentando as diferenças de performance térmica entre os coletores. O mais importante é que o consumidor e projetista saibam a diferença entre as duas e tenham certeza de qual está sendo apresentada pelo fornecedor para poder comparar produtos em uma mesma base.

Todos os coletores tem sua eficiência reduzida quando operam com temperaturas de fluido maiores e sob condições de menor irradiação. Essa redução pode ser menor ou maior dependendo da tecnologia empregada. Assim, os resultados da eficiência dos coletores são normalmente representados por curvas (ou retas) que mostram como a eficiência varia com a diferença entre a temperatura do fluido no coletor e a temperatura ambiente, e também com a irradiação solar (Duffie e Beckman, 2006).

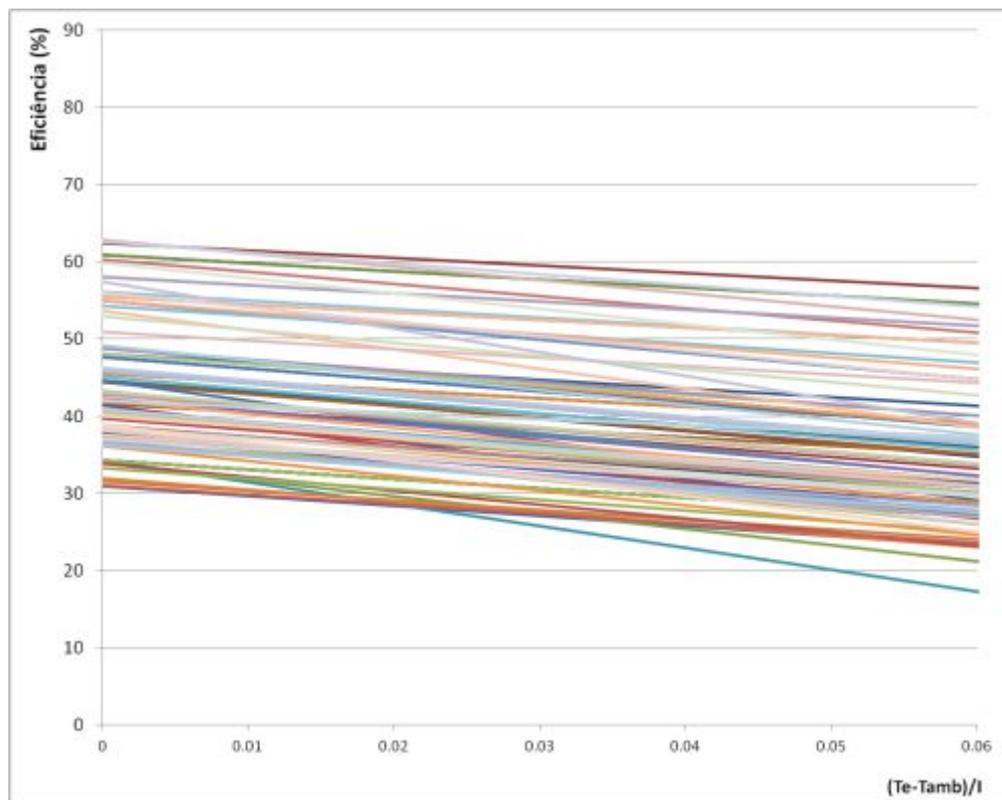
A figura 8, apresentada pelo laboratório suíço de energia solar SPF, mostra curvas de eficiência versus a temperatura média do fluido com irradiação de  $800 W/m^2$  para um coletor solar de tubos à vácuo. As três curvas se referem ao mesmo coletor, apenas usam áreas de referência diferentes. A curva em vermelho foi feita usando-se a área de absorvedor, a azul com a área transparente e a verde utilizou a área externa. No final, é o mesmo coletor, testado sob as mesmas condições. A única diferença é a forma de apresentar os resultados e calcular a eficiência. Mas, se você fosse o vendedor desse coletor, qual curva você apresentaria para o seu cliente?



$T_m^*$  é igual a  $(T_e - T_{amb})/I$ , onde  $T_e$  é a temperatura do fluido na entrada do coletor e  $T_{amb}$  é a temperatura ambiente.  $I$  é a irradiação solar.

Figura 8: Curvas de eficiência para um mesmo coletor à vácuo com base na área de absorvedor (vermelho), área transparente (azul) e área externa (verde). Fonte: SPF.

Hoje, no Brasil, não há coletores solares de tubos evacuados testados dentro do programa do INMETRO, fato que deverá mudar com a Certificação Compulsória, em vigor a partir de julho de 2014. Não há nenhuma restrição aos coletores evacuados dentro do programa. Até a entrada em vigor da portaria da compulsoriedade, no programa de etiquetagem voluntário, a decisão cabe a cada fabricante ou importador de testar ou não o seu equipamento. Infelizmente, o que se observa no mercado, na maioria das vezes, são dados de testes de coletores evacuados baseados em área transparente sendo oferecidos no Brasil para comparar com coletores planos testados aqui com base na área externa. E, testes feitos sob normas e condições diferentes não possibilitam a comparação correta, sendo que, muitas vezes, são coletores que não foram nem mesmo testados. E isso é um grande problema. Quando o programa de etiquetagem para coletores solares planos foi criado, não havia uma base comparativa no Brasil, e muitos fornecedores exageravam na exposição das vantagens de eficiência dos seus produtos, muitas vezes por falta de informação. E, ao longo dos anos, pudemos ver que havia uma grande diferença de performance entre alguns modelos, sendo que, aos poucos, os produtos de menor rendimento foram eliminados do programa. O mesmo acontece com os tubos à vácuo. Há uma grande diferença de performance entre os modelos disponíveis, mas o consumidor hoje no Brasil não tem como diferenciar. A figura 9 mostra a representação do rendimento de todos os coletores de tubos evacuados do programa norte-americano - 104 modelos ao todo (SRCC, 2013). Fica evidente a enorme variação de eficiência entre os diversos modelos, o que reforça a necessidade de testes sob condições controladas para que se possa avaliar o rendimento de um determinado coletor.



$(T_e - T_{amb})/I$ , onde  $T_e$  é a temperatura do fluido na entrada do coletor e  $T_{amb}$  é a temperatura ambiente.  $I$  é a irradiação solar.

Figura 9: Curvas de eficiência térmica instantânea de coletores de tubos evacuados participantes do programa norte-americano de certificação.

Outro ponto que causa uma grande confusão é a diferença entre energia e temperatura. Embora relacionadas, essas duas variáveis são muito diferentes e algumas pessoas acreditam que um coletor que atinge uma temperatura mais alta é mais eficiente, o que não é necessariamente correto. Por exemplo, caso alguém concentre a irradiação solar com uma lupa, pode-se chegar a temperaturas muito altas, mas isso normalmente é feito com baixa eficiência. No caso de aquecimento de água, a energia está ligada ao calor específico da água e à sua temperatura. Digamos que precisamos aquecer 200 litros de água de 20°C para 40°C, típico de um sistema de aquecimento para banho. O calor necessário para tal operação, se o aquecimento for feito com 100% de eficiência, é dado pela equação (2) abaixo:

$$Q = C_p \times m \times (T_q - T_f) \quad (2)$$



Onde  $Q$  é o calor necessário, em kJ;  
 $C_p$  é o calor específico da água, 4,186 kJ/kg °C;  
 $m$  é a massa de água a ser aquecida, em kg, sendo que 1 litro tem a massa de aproximadamente 1 kg;  
 $T_q$  é a temperatura da água quente, em °C;  
 $T_f$  é a temperatura da água fria, em °C.

Assim, chegamos a 16.744 kJ, que seria a energia necessária para aquecer esse volume de água nas temperaturas que estabelecemos. Poderíamos utilizar essa mesma quantidade de energia para aquecer um volume menor de água, e teríamos como resultado uma temperatura maior. Por exemplo, com a mesma quantidade de energia poderíamos aquecer 100 litros de 20°C para 60°C. Mas isso não quer dizer que precisaríamos de menos área coletora para gerar essa energia, pois a energia necessária continua sendo a mesma. O aumento da temperatura foi possível devido à redução do volume de água quente produzido. A não ser que a eficiência do coletor fosse maior a 60°C do que a 40°C, o que não é verdade, a área de coletores será, no mínimo, igual à necessária para o primeiro caso.

A produção de menor volume de água quente (que é o produto final da aplicação da energia), até possibilita se aumentar a temperatura, desde que seja mantida a energia necessária, e, por conseguinte, sem diminuir a área de coletores. Infelizmente, um grande número de profissionais tem dificuldade de entender esse conceito básico. Ao diminuir-se o volume de água a ser aquecido, situação que pode comprometer o atendimento às necessidades do usuário, a energia e a área necessária não diminuem. Assim, na comparação entre projetos de sistemas de aquecimento solar deve-se analisar em cada uma das propostas a quantidade de energia gerada, o volume de água quente produzido e sua temperatura especificada, e que devem ser adequados para atender com conforto as necessidades definidas nas várias épocas do ano.

**A única forma de diminuir a área necessária é aumentando a eficiência do coletor, o que nunca acontece com o aumento de temperatura, independente da tecnologia adotada. Altas temperaturas não colaboram e podem comprometer o rendimento do sistema. Veja na página 13 o resultado de um interessante teste comparativo sobre esse aspecto.**

E, já que tocamos no assunto de temperatura e eficiência, vale repetir a figura 9 com as curvas de eficiência dos coletores à vácuo do programa norte-americano, mas agora com a adição de quatro curvas (figura 10). As duas curvas em vermelho tracejado representam os dois melhores coletores planos testados no programa dos EUA. As duas curvas em preto tracejado representam coletores planos do programa brasileiro. A curva mais acima representa o coletor plano de maior performance do programa brasileiro e a curva abaixo um coletor típico do limite mínimo de performance de coletores classificados como "A". Também foi adicionada a reta em azul na vertical, que marca o ponto de operação onde  $(T_e - T_{amb})/I$  é igual a 0,02. Esse ponto foi selecionado dentro do programa de etiquetagem como sendo representativo da operação de coletores solares para banho, e a eficiência divulgada na etiqueta é baseada exatamente nesse ponto.



É possível notar que mesmo o coletor plano com a mínima performance para se atingir o nível "A" do Programa Brasileiro de Etiquetagem - PBE do INMETRO teria uma eficiência superior à grande maioria dos coletores à vácuo, e que os coletores planos de alto rendimento possuem eficiência significativamente superior na faixa de trabalho de aquecimento para banho.

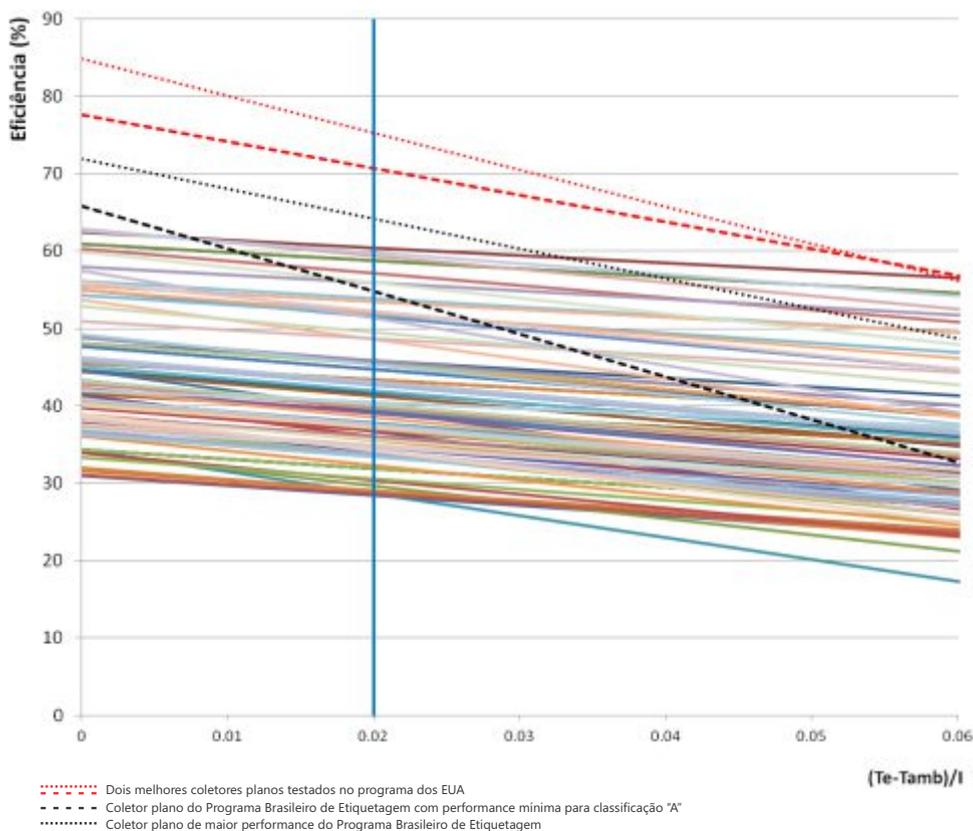


Figura 10: Curvas de eficiência térmica instantânea de coletores de tubos evacuados participantes do programa norte-americano de certificação, além de 2 coletores planos do programa norte-americano e dois coletores planos do PBE/INMETRO.

Assim, quando compreendemos os fatos e os dados disponíveis de rendimento de coletores, é possível ver que, na maioria das vezes, os coletores planos são mais eficientes que os coletores de tubos evacuados para o aquecimento de banho. Isso é possível observar tanto através das curvas de performance disponíveis, como através de simulações computacionais ou experimentos. Quando usamos a área externa do coletor como referência, os coletores planos são, via de regra, mais eficientes. Isso quer dizer que é necessária uma menor área de coletor para aquecer o mesmo volume de água.

As reduzidas perdas de calor dos coletores à vácuo fazem com que esses sejam vantajosos para operação em temperaturas mais altas, tipicamente acima de 75°C, o que é importante muitas vezes em projetos de aquecimento para processos industriais, ou para sistemas de ar-condicionado solar por resfriadores a absorção.

Quando avaliamos os números, o mais impressionante é que se criou uma prática comercial no Brasil em relação aos coletores à vácuo baseada em informações absurdas.

A figura 11 apresenta uma imagem extraída do sítio da internet de um fornecedor onde é apresentada uma comparação entre os coletores planos tradicionais e os coletores à vácuo. Nela, pode-se ver uma informação que se tornou prática no mercado nacional: que os coletores à vácuo seriam duas vezes mais eficientes que os coletores planos ou, em outras palavras, eles necessitariam de apenas metade da área no telhado.

Não há nenhuma base técnica e científica para dar suporte a tal afirmação. E que nos perdoem as crianças, mas um coletor solar com eficiência máxima de 99% é tão verídico quanto Papai Noel.

|   |  |
|---|--|
| <b>Aquece até 100° C</b>  | <b>Aquece até 65° C</b>  |
| <b>99% de eficiência térmica</b>  | <b>50% de eficiência térmica</b>   |
| <b>Aquece em dias nublados (aproximadamente 60°C)</b>   | <b>Aquece pouco em dias nublados (aproximadamente 30°C)</b>                        |
| <b>NÃO polui o telhado, pois ocupa uma pequena área quadrada</b>  | <b>Polui o telhado, pois ocupa quase o dobro da área quadrada do mesmo</b>         |
| <b>Suportes acompanham o equipamento</b>  | <b>NÃO tem os suportes de reservatório e de placas</b>                             |
| <b>Aquece mais lentamente mas atinge temperaturas bem elevadas (aproximadamente 4 a 5 horas de sol)</b> | <b>Aquecimento mais rápido mas é limitada (aproximadamente 4 a 5 horas de sol)</b> |
| <b>Vida útil estimada em 100 anos</b>   | <b>Vida útil 10 anos</b>   |

Figura 11: Tabela de comparação de coletores à vácuo X coletores planos extraída do material comercial de um fornecedor/importador de tubos à vácuo.

Mas para dar números experimentais ao que foi discutido anteriormente, apresentaremos dados de um teste comparativo realizado entre Maio e Setembro de 2013, na cidade de São Manuel (SP).

## Teste Experimental de Comparação de Produção de Energia

### Procedimentos e Aparato

Para realizar os testes foram montados dois sistemas em São Manuel - SP (latitude  $-22^{\circ} 43' 52''$ , longitude  $-48^{\circ} 34' 14''$  e altitude 709 metros). Um dos sistemas com coletores planos comuns, com absorvedor pintado e sem superfície seletiva, típico dos coletores usados no Brasil. O outro sistema recebeu um coletor de tubos evacuados de vidro simples, com tubos de calor (heat pipe) e aletas com superfície seletiva.

A área externa dos dois sistemas é aproximadamente a mesma. A área externa do coletor de tubo evacuado é de  $2,88 \text{ m}^2$  e sua área transparente de  $1,75 \text{ m}^2$  (sem considerar a área do refletor). As suas dimensões são apresentadas na figura 12. O coletor plano possui área externa de  $1,434 \text{ m}^2$  e área transparente de  $1,27 \text{ m}^2$ . Para que as áreas externas fossem aproximadamente iguais, foram usados dois coletores solares planos, com uma área externa total de  $2,87 \text{ m}^2$ .

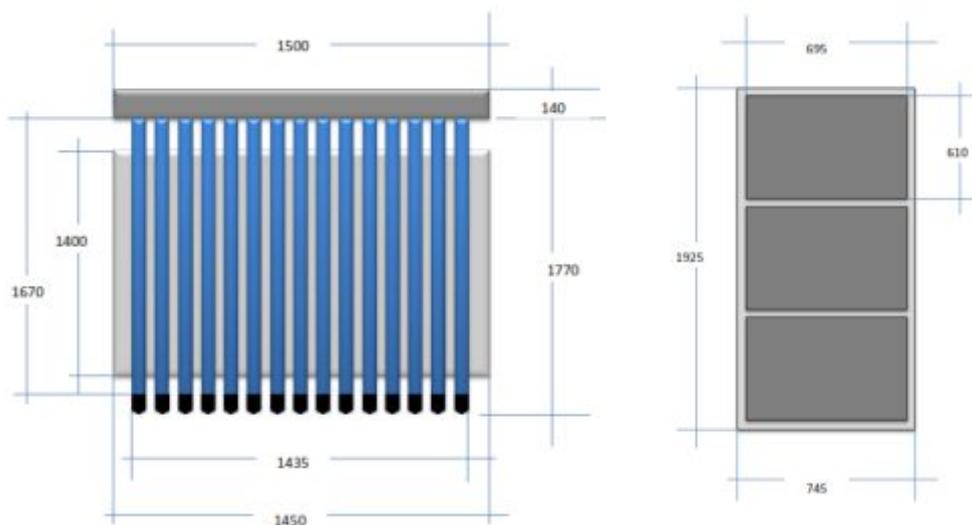


Figura 12: Dimensões dos coletores usados nos experimentos.



Figura 13: Sistemas de aquecimento solar utilizados nos experimentos.

Os dois sistemas foram montados lado a lado, e ligados a reservatórios térmicos idênticos, com 200 litros de capacidade cada, operando por termosifão (figura 13). Os coletores foram instalados com orientação norte e inclinação de  $20^\circ$ . O procedimento de teste seguiu a seguinte rotina:

- no começo da manhã, a água do reservatório térmico R1 da figura 14 é circulada para os reservatórios térmicos até que as temperaturas dos reservatórios sejam homogêneas. Dessa forma, os dois sistemas iniciam o dia com temperaturas aproximadamente iguais e relativamente frias.
- ao final do dia, a água de cada reservatório é misturada através de uma motobomba, de forma que sua temperatura média possa ser medida. A energia acumulada é então calculada pela diferença de temperatura entre o começo e o fim do dia, levando-se em consideração o volume armazenado e o calor específico, como na equação 2.



Figura 14: Sistemas de aquecimento utilizados nos experimentos com reservatório de apoio R1.

Além das medidas de temperatura, dados de temperatura ambiente e irradiação solar foram coletados através de uma estação meteorológica local, com o sensor de irradiação no plano horizontal.

Após uma primeira fase de testes, o reservatório do coletor à vácuo foi substituído por um modelo de 100 litros de capacidade, de forma que se pudesse verificar sua performance com uma configuração mais próxima à que tem sido usada em alguns casos no Brasil, com um coletor e um reservatório de 100 l.

## Resultados

A tabela 1 apresenta os resultados dos testes realizados na primeira etapa, com ambos os sistemas ligados a reservatórios térmicos de 200 litros.



Tabela 1: Resultados dos testes da primeira fase.

|            |                                |                         | Coletor de Tubo Evacuado |      |                       | Coletor Plano  |      |                       |
|------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------|------|-----------------------|----------------|------|-----------------------|
| Data       | Irrad.<br>(MJ/m <sup>2</sup> ) | T ambiente<br>média (C) | T água em (°C)           |      | Energia Total<br>(MJ) | T água em (°C) |      | Energia Total<br>(MJ) |
|            |                                |                         | Início                   | Fim  |                       | Início         | Fim  |                       |
| 2013-05-01 | 15,51                          | 26,09                   | 25,2                     | 44,2 | 15,69                 | 25,6           | 53,4 | 22,95                 |
| 2013-05-02 | 16,32                          | 25,57                   | 25,3                     | 46,3 | 17,34                 | 25,6           | 53,5 | 23,03                 |
| 2013-05-07 | 16,94                          | 20,85                   | 22,5                     | 42,1 | 16,18                 | 22,7           | 53,2 | 25,18                 |
| 2013-05-08 | 16,80                          | 18,39                   | 21,2                     | 41,2 | 16,51                 | 21,5           | 51,3 | 24,60                 |
| 2013-05-09 | 17,05                          | 20,92                   | 20,1                     | 43,2 | 19,07                 | 20,2           | 53,2 | 27,24                 |
| 2013-05-10 | 16,34                          | 22,01                   | 21,1                     | 42,2 | 17,42                 | 21,3           | 52,2 | 25,51                 |
| 2013-05-13 | 14,71                          | 24,13                   | 26,7                     | 43,3 | 13,70                 | 26,9           | 51,6 | 20,39                 |
| 2013-05-14 | 12,45                          | 24,16                   | 25,3                     | 39,2 | 11,48                 | 25,5           | 45,3 | 16,35                 |
| 2013-05-15 | 13,34                          | 25,72                   | 26,4                     | 41,8 | 12,71                 | 26,1           | 49,5 | 19,32                 |
| 2013-05-16 | 6,33                           | 23,24                   | 26,3                     | 30,9 | 3,80                  | 26,5           | 34,8 | 6,85                  |
| 2013-05-17 | 10,75                          | 19,08                   | 21,8                     | 32,1 | 8,50                  | 21,7           | 39,1 | 14,36                 |
| 2013-05-20 | 12,50                          | 25,18                   | 27,3                     | 41,2 | 11,48                 | 27,1           | 49,3 | 18,33                 |
| 2013-05-21 | 10,13                          | 23,50                   | 25,2                     | 37,5 | 10,15                 | 25,5           | 42   | 13,62                 |
| 2013-05-31 | 11,75                          | 23,67                   | 20,7                     | 33,9 | 10,90                 | 20,8           | 44,1 | 19,24                 |
| 2013-06-03 | 8,34                           | 21,08                   | 20,9                     | 29,6 | 7,18                  | 20,6           | 36,8 | 13,37                 |
| 2013-06-04 | 14,91                          | 19,71                   | 19                       | 37,9 | 15,60                 | 18,7           | 46,2 | 22,70                 |
| 2013-06-05 | 14,83                          | 21,45                   | 20,1                     | 39,3 | 15,85                 | 20,3           | 48,7 | 23,45                 |
| 2013-06-06 | 14,56                          | 23,21                   | 22,4                     | 41,2 | 15,52                 | 22,7           | 49,7 | 22,29                 |
| 2013-06-07 | 14,45                          | 23,05                   | 23,8                     | 42   | 15,03                 | 24,1           | 50,5 | 21,79                 |
| 2013-06-10 | 9,27                           | 22,14                   | 26,6                     | 35,9 | 7,68                  | 26,4           | 41,6 | 12,55                 |
| 2013-06-11 | 8,14                           | 21,75                   | 22,8                     | 33,5 | 8,83                  | 23,1           | 39,9 | 13,87                 |
| 2013-06-12 | 11,48                          | 22,97                   | 20                       | 37,4 | 14,36                 | 21             | 44,7 | 19,57                 |
| 2013-06-13 | 13,01                          | 24,40                   | 21,4                     | 36,8 | 12,71                 | 21,9           | 47,6 | 21,22                 |
| 2013-06-14 | 14,03                          | 21,45                   | 21,9                     | 37,5 | 12,88                 | 22,2           | 47,7 | 21,05                 |
| 2013-06-18 | 13,24                          | 21,62                   | 21,6                     | 38,7 | 14,12                 | 22,3           | 46,5 | 19,98                 |

Durante o período de teste, o sistema com coletores planos produziu 488,8 MJ e o sistema com o coletor de tubos evacuados produziu 324,7 MJ, uma variação de 34%. Se considerarmos a produção média específica durante esses 25 dias, teríamos:



Tabela 2: Produção específica dos dois sistemas.

|          | Produção total durante os dias de testes (MJ) | Produção por área transparente (MJ/dia. m <sup>2</sup> ) | Produção por área externa (MJ/dia. m <sup>2</sup> ) |
|----------|---|--|---|
| Plano    | 488,8   | 7,7  | 6,8   |
| Evacuado | 324,7   | 7,4  | 4,5   |

Na segunda fase, onde o reservatório do sistema de tubos evacuados foi substituído por um modelo de 100 litros, os resultados foram semelhantes à primeira fase.

Tabela 3: Resultados dos testes da segunda fase.

| Data       | Irrad.(MJ/m <sup>2</sup> ) | T ambiente média (°C) | Coletor de Tubo Evacuado |      |                    | Coletor Plano  |      |                    |
|------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------|------|--------------------|----------------|------|--------------------|
|            |                            |                       | T água em (°C)           |      | Energia Total (MJ) | T água em (°C) |      | Energia Total (MJ) |
|            |                            |                       | Início                   | Fim  |                    | Início         | Fim  |                    |
| 2013-08-07 | 15,02                      | 23,80                 | 22,9                     | 52,5 | 12,37              | 23             | 52,2 | 24,11              |
| 2013-08-08 | 14,72                      | 24,32                 | 24,2                     | 51,8 | 11,54              | 24,1           | 51,6 | 22,70              |
| 2013-08-09 | 14,64                      | 25,19                 | 25,5                     | 48,9 | 9,78               | 25,3           | 50   | 20,39              |
| 2013-08-12 | 16,12                      | 21,26                 | 21,1                     | 48,9 | 11,62              | 21,3           | 50,8 | 24,35              |
| 2013-08-13 | 11,16                      | 24,38                 | 22,3                     | 43,7 | 8,95               | 22,8           | 44,2 | 17,67              |
| 2013-08-16 | 17,03                      | 18,72                 | 20,2                     | 48,6 | 11,87              | 20,5           | 49,5 | 23,94              |
| 2013-08-19 | 16,02                      | 20,76                 | 22,3                     | 48,1 | 10,78              | 22,5           | 48,8 | 21,71              |
| 2013-08-20 | 17,05                      | 21,51                 | 20,8                     | 50,7 | 12,50              | 20,5           | 50,5 | 24,77              |
| 2013-08-21 | 15,42                      | 22,91                 | 21,6                     | 49,4 | 11,62              | 21,6           | 49,8 | 23,28              |
| 2013-08-22 | 11,77                      | 24,22                 | 24,8                     | 43,4 | 7,77               | 24,9           | 43,1 | 15,03              |
| 2013-08-23 | 16,48                      | 28,00                 | 25,1                     | 52,8 | 11,58              | 24,8           | 51,5 | 22,04              |
| 2013-08-26 | 9,81                       | 21,18                 | 27,6                     | 32,3 | 1,96               | 27,3           | 32,1 | 3,96               |
| 2013-08-27 | 5,63                       | 11,58                 | 17,9                     | 20,9 | 1,25               | 18,2           | 22,5 | 3,55               |
| 2013-08-28 | 17,59                      | 16,27                 | 13,2                     | 44,7 | 13,17              | 13             | 46,6 | 27,74              |
| 2013-08-29 | 18,16                      | 19,71                 | 15,3                     | 48,6 | 13,92              | 15             | 48,8 | 27,90              |
| 2013-08-30 | 18,35                      | 23,75                 | 19,5                     | 54,8 | 14,76              | 19,8           | 54,1 | 28,32              |
| 2013-09-02 | 15,50                      | 26,51                 | 24,5                     | 50,6 | 10,91              | 24,8           | 52   | 22,45              |
| 2013-09-05 | 18,60                      | 22,58                 | 18,7                     | 51,3 | 13,63              | 18,5           | 49,7 | 25,76              |

Durante o segundo período de teste, o sistema com coletores planos produziu 379,7 MJ e o sistema com o coletor de tubos evacuados produziu 190,0 MJ, uma variação de 50%. Se considerarmos a produção média específica durante esses 18 dias, teríamos:

Tabela 4: Produção específica dos dois sistemas.

|          | Produção total durante os dias de testes (MJ) | Produção por área transparente (MJ/dia.m <sup>2</sup> ) | Produção por área externa (MJ/dia. m <sup>2</sup> ) |
|----------|---|---|---|
| Plano    | 379,7   | 8,3   | 7,4   |
| Evacuado | 190,0   | 6,0   | 3,7   |

Como era de se esperar, a redução de volume reduziu o rendimento do sistema com os coletores de tubos evacuados. Os resultados do total de energia produzido em cada fase são apresentados também na figura 15.

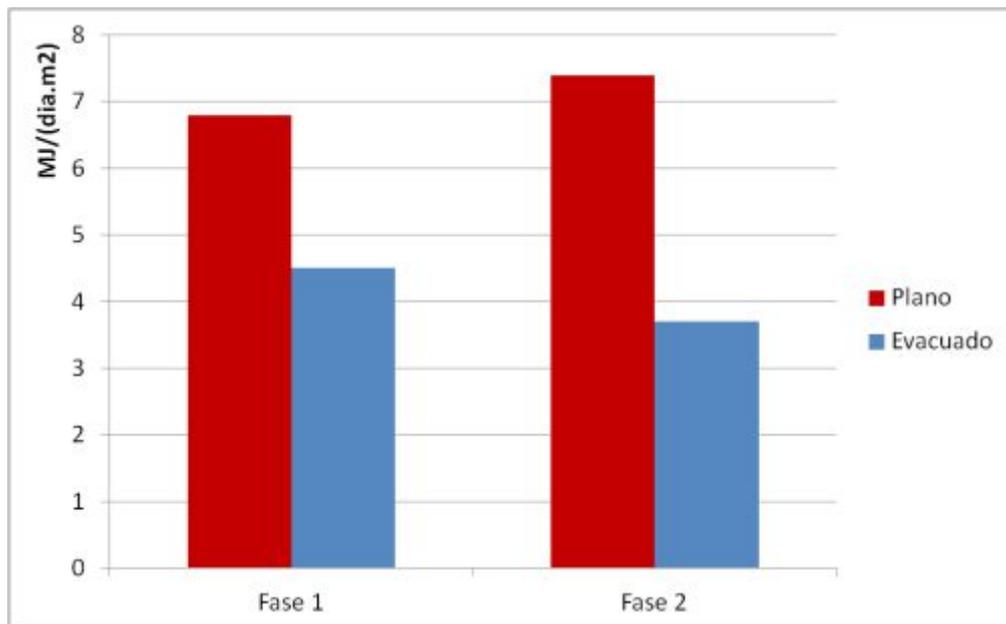


Figura 15: Resultado da avaliação experimental comparativa entre coletores planos e coletor por tubos à vácuo.

Os resultados de cada dia da fase 1 e 2 são apresentados de forma gráfica nas figuras 16 e 17.

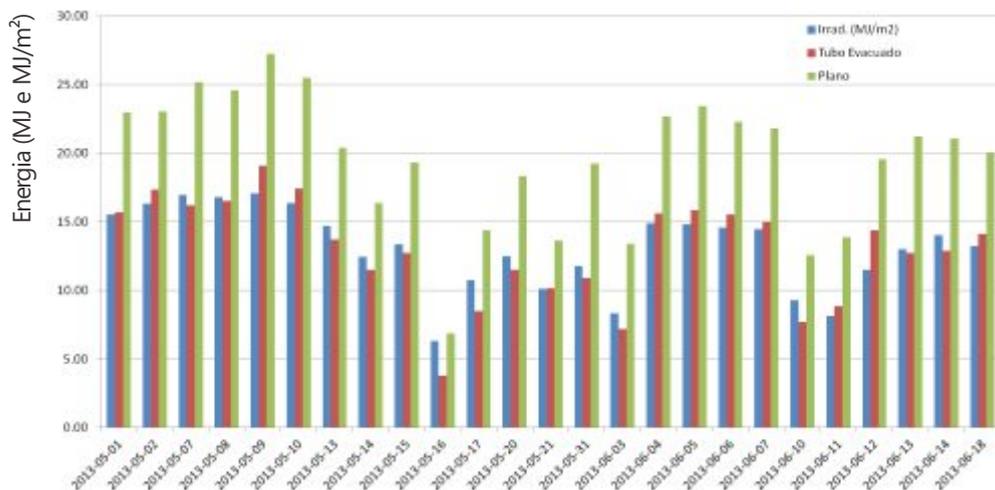


Figura 16: Resultados dos testes da primeira fase.

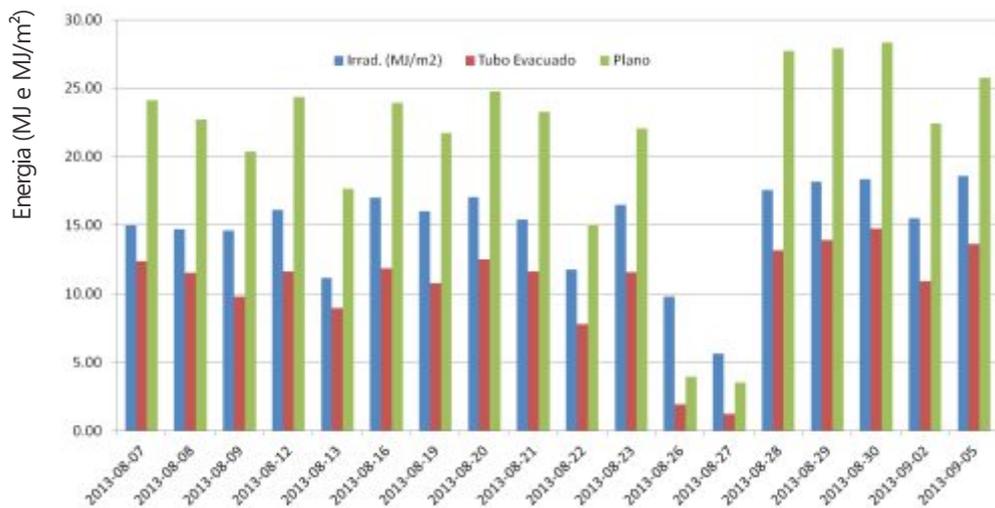


Figura 17: Resultados dos testes da segunda fase.

## Conclusões e Considerações Finais

Os coletores de tubos evacuados são uma importante peça no “arsenal” de tecnologias da energia solar térmica. Eles têm sido empregados com sucesso em muitos países e possuem vantagens interessantes, particularmente quando se trabalha em condições de temperaturas elevadas nos coletores, como em processos industriais acima de 75°C. Entretanto, o que vemos hoje no Brasil é uma grande quantidade de fornecedores prometendo rendimento e produção de energia que não condizem com a realidade técnica e científica dos equipamentos. Parte dessa atitude estará corrigida quando da obrigatoriedade dos testes dentro do Programa Brasileiro de Certificação do INMETRO, mas é preciso que técnicos e usuários estejam conscientes das reais potencialidades dos equipamentos independentemente desse processo. Como vimos, existe uma grande variação de rendimento entre diversos fornecedores e somente a participação em programas de testes permite a avaliação e comparação entre os equipamentos. Além disso, os programas de certificação e etiquetagem verificam também aspectos construtivos ligados à qualidade dos equipamentos, assim como o controle de qualidade na fabricação.

Obviamente, os testes aqui apresentados são limitados às condições específicas dos equipamentos empregados, mas servem de alerta e exemplo de que os coletores de tubos evacuados, nas condições de aquecimento de água para banho, possuem performance geralmente inferior aos coletores solares planos, particularmente se considerarmos a área externa dos equipamentos, isto é, a área ocupada nos telhados e coberturas das edificações. Isso pode ser comprovado através de testes como os aqui apresentados, ou através de simulações computacionais dos sistemas a partir de dados de testes dos coletores solares realizados pelos laboratórios.

Vale lembrar, ainda, que a análise de viabilidade comparativa de um sistema de aquecimento solar passa, obrigatoriamente, pela relação custo X benefício, isto é, além da avaliação de rendimento e produção de energia, é preciso uma comparação também de custos dos equipamentos.

Espera-se que o presente documento seja útil no sentido de esclarecer alguns pontos cruciais da análise de rendimento de coletores solares e contribuir para uma melhor compreensão das tecnologias de aquecimento solar. O Brasil possui um potencial gigantesco para as aplicações da energia solar térmica, mas o crescimento sustentável do setor depende de práticas comerciais e técnicas respaldadas por profissionalismo e baseadas em respeito absoluto ao consumidor.

### Referências Bibliográficas

- Duffie, J.A.; Beckman, W.A. Solar engineering of thermal processes. 3ª edição. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2006.
- INMETRO, Programa Brasileiro de Etiquetagem. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/qualidade/eficiencia.asp>. Acesso em 11 de Novembro de 2013.
- SRCC, Solar collector ratings, Disponível em: <http://www.solar-rating.org/ratings/index.html>. Acesso em 11 de Novembro de 2013.

### Lúcio César de Souza Mesquita

Diretor-Presidente da Thermosol Consulting e Diretor Técnico da Universidade do Sol, formou-se em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Minas Gerais e recebeu o título de Ph.D. também em Engenharia Mecânica pela Queen's University (Canadá). Projetista e consultor em energia solar térmica, Lúcio tem 20 anos de experiência na área, com projetos no Brasil, Estados Unidos e Canadá, incluindo-se mais de 200 projetos de médio e grande porte para edifícios residenciais, hotéis, hospitais, estabelecimentos de ensino e indústrias. Já atuou como consultor de dezenas de empresas e organismos como Departamento de Aquecimento Solar da ABRAVA, governo canadense (Natural Resources Canada), Prefeitura de Toronto, Enerworks, DuPont, Acesita, ALCAN, Prefeitura de Belo Horizonte, WINROCK Foundation, 7AC Technologies, VALE SA, Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e Soletrol; co-autor do Guia de Termografia Solar e autor de diversas publicações sobre aquecimento solar.





## Anexo A – Fotos Adicionais



Figura A1: Detalhe do sistema com coletores planos.



Figura A2: Detalhe do sistema com coletores de tubos à vácuo.

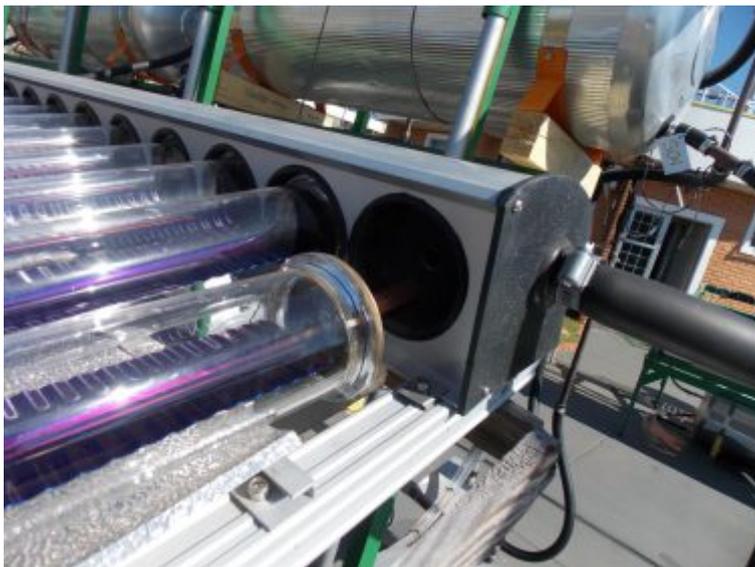


Figura A3: Detalhe da cabeceira do coletor de tubos à vácuo.



Figura A4: Detalhe do condensador do tubo de calor (Heat Pipe) do tubo à vácuo.



Figura A5: Detalhe do ponto de encaixe do condensador do tubo de calor na cabeceira do coletor.



Figura A6: Vista em perspectiva dos dois sistemas, lado nordeste.



Figura A7: Vista em perspectiva dos dois sistemas, lado noroeste.



Figura A8: Detalhe da lateral da entrada de água fria do coletor de tubos à vácuo.



Figura A9: Detalhe do retorno de água quente no reservatório térmico do coletor plano.





UNIVERSIDADE DO SOL

Mesquita, L.C.S. Eficiência de coletores solares e comparações entre tubos evacuados e coletores planos: considerações teóricas e análise experimental. São Manuel: Universidade do Sol, Relatório Técnico n. 1, 2013.

Todos os direitos reservados à Universidade do Sol  
Permitida a reprodução desde que citada a fonte





**UNIVERSIDADE DO SOL**

---

**Universidade do Sol**

Rodovia Marechal Rondon, km 274 - Prédio 5  
CEP 18650-000 - São Manuel/SP

[www.universidadedosol.org.br](http://www.universidadedosol.org.br)