

COLETOR SOLAR NÃO CONVENCIONAL, DE BAIXO CUSTO, COMPOSTO POR MÚLTIPLOS TUBOS ABSORVEDORES DE PVC

Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza

Departamento de Engenharia Mecânica, UFRN, 59072-970, Natal-RN, Brasil,
lguilherme@dem.ufrn.br

Nilton Lúcio Fernandes da Silva

Aluno de Graduação em Engenharia Mecânica, UFRN, 59072-970, Natal-RN, Brasil

Vânio Vicente Santos Souza

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFRN, 59072-970, Natal-RN, Brasil

William Fernandes de Queiroz

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFRN, 59072-970, Natal-RN, Brasil

Reginaldo Dias dos Santos

Aluno de Graduação em Engenharia de Materiais, UFRN, 59072-970, Natal-RN, Brasil

Resumo. Apresenta-se um novo modelo de coletor solar não convencional, composto por múltiplas unidades de tubos absorvedores de PVC, ligados em paralelo, através de um novo modelo de ligação entre os mesmos e os tubos de entrada e saída de água. A caixa do coletor é confeccionada com um compósito de matriz cerâmica, e revestida com resina ortoftálica, propiciando a eliminação do isolamento térmico, usualmente lã de vidro. O coletor é composto por apenas três elementos: caixa, grade absorvedora e vidro. Serão abordados aspectos construtivos, demonstrando a facilidade de fabricação de tal protótipo, que se caracteriza por apresentar um custo de fabricação bastante reduzido. Apresentar-se-á dados de parâmetros térmicos do coletor, trabalhando em regime de termosifão para um volume de água da ordem de 250 litros. Demonstrar-se-á as viabilidades térmica, econômica e de materiais do coletor proposto, capacitando-o a servir de opção aos sistemas convencionais de aquecimento de mercado, principalmente para a obtenção de temperaturas da ordem de 40°C.

1. INTRODUÇÃO

O processo tecnológico atual sempre teve por base o uso de combustíveis não renováveis, representado principalmente pelo petróleo. Estima-se que as reservas atuais de petróleo estariam exauridas nas próximas décadas, na hipótese de uma continuidade de exploração destas ao nível atual. Dentro deste contexto, a busca por energias renováveis é imprescindível e vem sendo priorizada pelos países do primeiro mundo, que têm na tecnologia as fontes de dominação e de obtenção de riquezas. Dentre as fontes alternativas mais buscadas estão as energias eólica e solar, que apresentam as características de serem limpas, gratuitas e inesgotáveis.

A utilização da energia solar para obtenção de água quente destinada ao banho é uma das aplicações desta fonte energética mais viável e que tem sido objeto de inúmeros estudos mostrados na literatura especializada. Para o fim desejado são utilizados coletores solares planos, ou seja, coletores convencionais, com serpentinas ou grade de cobre em paralelo, chapa absorvedora do mesmo material, caixa de fibra de vidro ou perfil de alumínio, isolamento de lã de vidro e vidro

plano transparente como cobertura. São também utilizados coletores alternativos, trabalhando em regime de fluxo forçado, com uma ou mais passagens do fluido de trabalho no interior dos mesmos.

Esses materiais convencionalmente utilizados proporcionam um significativo rendimento ao citado coletor que são de custo elevado, principalmente o cobre, o que onera de sobremaneira a construção do protótipo e inviabiliza sua utilização para grande parte da população.

Buscando um modo de baratear o custo de fabricação de um protótipo solar destinado ao aquecimento de água para banho, desenvolveu-se um coletor solar alternativo, de menor custo que os convencionais planos. Este coletor tem como características principais o uso de tubos de PVC (poli cloreto de vinila), em substituição ao cobre convencionalmente usado e a sua caixa para é confeccionada através de uma mistura de gesso, pó de madeira e fibras de sisal, formando um compósito, de custo muito mais barato que os materiais convencionalmente utilizados, quais sejam: perfil de alumínio, fibra de vidro e chapas de aço.

Este tipo de material alternativo proposto apresenta a vantagem de ser um bom isolante térmico, o que elimina dois componentes de um coletor que são: a chapa absorvedora e o isolamento térmico.

Serão mostrados resultados dos ensaios realizados com o coletor em regime de termosifão, demonstrando-se suas viabilidades térmica, de materiais e econômica. Na análise de materiais abordar-se-á a questão das degradações térmica e por UV inerentes ao uso do PVC como superfície absorvedora da radiação solar

2. ESTADO DA ARTE

O principal objetivo do estudo de coletores alternativos é a redução do custo de fabricação, buscando a socialização do seu uso em sistemas de aquecimento de água doméstico e industrial, uma vez que o custo dos mesmos representa 50% do custo total de investimento para a aquisição de um sistema solar para aquecimento de água.

Este alto custo deve-se ao uso de materiais de alto custo na sua fabricação. Mesmo tendo longa vida útil, requerem alto investimento inicial, isto explica a baixa taxa de desenvolvimento de sistemas solares para aquecimento de água no mundo. Torna-se necessário e fundamental, o desenvolvimento de sistemas de menor custo com bom desempenho térmico. Com este objetivo, vários trabalhos foram desenvolvidos, demonstrando que os coletores solares plásticos de baixo custo têm sido estudados desde os anos 70 (Cristofari, et al., 2002).

Rivera, em 1994, apresentou trabalho sobre coletor alternativo tubular com múltiplas unidades absorvedoras de PVC. Lourenço, em 1997, mostrou os resultados alcançados com um coletor alternativo com grade absorvedora formada por múltiplos tubos de alumínio. Ambos demonstraram as viabilidades térmicas e econômicas de tais coletores, comprovando a competitividade dos mesmos em relação aos coletores convencionais.

O uso de um polímero absorvedor foi estudado por Van Niekerk et al., em 1996, com o objetivo de avaliar o desempenho de coletores com tubos paralelos na África do Sul. Matrawy e Farkas, em 1997, compararam um coletor com duas placas paralelas (TPPC), com, respectivamente, um coletor com tubos paralelos (PTC) e um coletor com tubos em serpentina (STC). Sob o mesmo ambiente e condições de desempenho, a eficiência do TPPC foi respectivamente 6,0 e 10% maior que o STC e PTC.

Shah, em 1999 apresentou estudo sobre a modelagem térmica em coletores domésticos para aquecimento de água à baixa vazão.

O uso de coletores com tubos para absorção de polipropileno e placas de absorção de polietileno de alta densidade é bastante enfocado pela literatura. Esses coletores são usados para aquecimento e climatização de piscinas (Gil, 2001)

Buscando formas de obtenção de um sistema de aquecimento a baixo custo, vem-se estudando há mais de 18 anos no âmbito do Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Norte sistemas alternativos para tornar viável o uso da energia solar para o fim considerado e torná-lo acessível a uma maior parcela da população.

Dentre os coletores estudados estão os coletores: de tubos paralelos formando uma serpentina; em labirinto, de placas paralelas tipo sanduíche, formado por unidades de aquecimento constituídas por bulbos de vidro (carcaças de lâmpadas fluorescentes tendo no seu interior tubos para absorção de PVC); e um alternativo plano com tubos de PVC. Com exceção deste último, todas as outras gerações foram postas a funcionar em regime de fluxo forçado, com somente uma passagem do fluido de trabalho no interior dos mesmos.

3. DESCRIÇÃO DO COLETOR PROPOSTO

Os coletores planos convencionais têm a configuração em paralelo e trabalham em regime de termosifão; seus tubos absorvedores são de cobre; em número de seis a oito, geralmente de 12,7mm, com tubulões de recepção e distribuição de 25,4mm ou 32mm e a chapa absorvedora é de cobre ou alumínio.

O coletor proposto tem como principais características à utilização de materiais alternativos de baixo custo para a construção de sua caixa e uma grade absorvedora multitubos, permitindo a obtenção de uma maior vazão circulante, que tem por objetivo acelerar a troca térmica entre fluido circulante e a água contida no reservatório térmico.

Antes da construção do protótipo, construiu-se vários modelos, com diferentes composições e materiais, para a escolha do material mais adequado, que apresentasse as características de bom desempenho térmico, resistência mecânica ao impacto e viabilidade econômica. Utilizou-se misturas dos seguintes materiais, para a obtenção de compósitos: gesso + pó de madeira; gesso + pó de madeira + agave; gesso+ isopor; gesso + pó de coco. Após avaliações térmica, econômica e de materiais, escolheu-se o compósito à base de gesso, pó de serra e agave, colocando-se ainda um reforço de tela de arame, no fundo da caixa.

O coletor foi construído com superfície absorvedora formada por 20 tubos de PVC de 20mm acoplados a tubulões formados por tubos de PVC de 50mm. A área do coletor é de aproximadamente $0,7m^2$ ($1,31 \times 0,51m$). O princípio de funcionamento e regime de trabalho são os mesmos do coletor convencional.

É importante ressaltar que com a utilização desta caixa para o coletor, o fundo da caixa funciona como superfície absorvedora, em contato com a tubulação absorvedora, e como seu material é um bom isolante térmico, dispensa-se, portanto, a colocação de um material isolante térmico entre a grade absorvedora e o fundo da caixa. Para evitar a absorção de água por parte da caixa, aplicou-se duas camadas de resina ortoftálica.

O processo de construção desse coletor seguiu as seguintes etapas:

1. Construção do molde da caixa;
2. Construção da caixa – em gesso, pó de madeira, agave e tela de arame;
3. Resinagem da caixa do coletor;
4. Construção do suporte para colocação da caixa;
5. Aplicação do elemento vedante na grade absorvedora (resina);
6. Corte da lâmina de cobertura de vidro plano transparente;

O processo de montagem seguiu os seguintes passos:

1. Montagem dos tubulões de recepção e distribuição;
2. Montagem da grade absorvedora;
3. Pintura da grade absorvedora;
4. Pintura da caixa do coletor;
5. Pintura do suporte da caixa;
6. Confecção dos furos de entrada e saída das tubulações na caixa, com serra copo;
7. Colocação do conjunto absorvedor no interior da caixa;
8. Colocação da lâmina de cobertura do coletor;
9. Aplicação de borracha de silicone para a vedação do coletor.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O sistema de aquecimento com o coletor plano alternativo foi ensaiado, em regime de termosifão, para um volume de 250 litros, sendo levantados parâmetros de temperatura de entrada de fluido no coletor, temperatura de saída do fluido do coletor, temperaturas internas e externas do coletor, temperaturas da água no reservatório térmico e radiação solar global caixa armazenadora, e temperatura do tubo absorvedor. No que diz respeito às temperaturas internas e externas do coletor, mediu-se: temperatura da água, na entrada e saída do coletor; temperatura do ar interno; temperatura das superfícies interna e externa do vidro, respectivamente; temperatura do ar externo; temperatura da superfície interna da base do coletor; temperatura da superfície externa da base do coletor; temperatura da superfície interna das faces laterais; temperatura da superfície externa das faces laterais; temperatura da placa absorvedora, em cinco pontos da grade (Souza, 1-4,2000-2002, Duffie,1991).

As temperaturas de entrada e saída da água no coletor foram medidas de 30 em 30 minutos, das 8h às 16h. As temperaturas do coletor foram medidas no intervalo entre 11h às 13h, de quinze em quinze minutos, período de radiação praticamente constante.

Para a medição de temperatura foram utilizados termopares de cobre-constantan, de diâmetros de 0,25 e 0,5mm, respectivamente, acoplados a um termômetro digital.

Como se desejava evitar que os tubos absorvedores alcançassem a temperatura crítica para o início do processo degradativo, $T>60^{\circ}\text{C}$, mediu-se os valores da temperatura externa dos mesmos em vários pontos da grade absorvedora para avaliar o comportamento desse parâmetro.

A literatura cita o desgaste do PVC quando submetido ao calor e à radiação ultravioleta, componente do espectro da radiação solar, porém não quantifica o nível de degradação, quando submetido a níveis de temperatura inerentes ao uso do tubo de PVC como elemento absorvedor em um coletor solar.

Souza, 2002, demonstrou que tais degradações podem ser combatidas através de maior volume de água no interior da grade absorvedora, o que faz com que a temperatura crítica não seja atingida e de uma pintura da mesma de preto fosco, inerente a obtenção de energia térmica a partir da energia eletromagnética, que atenua o efeito da degradante da radiação ultravioleta. O autor citado demonstrou que apesar de tais degradações o uso de tubos de PVC como elementos absorvedores e condutores de calor em coletores solares, é plenamente viável.

A caixa do coletor depois de construída, e passado por um processo de secagem correspondente a 72 horas, em estufa solar, apresentou um peso correspondente a 45 Kg, com seu suporte alcançando 5 Kg. O volume de água na grade absorvedora do coletor corresponde a 7 Kg. O vidro da cobertura pesa em torno 2 kg. Portanto, o peso total do coletor produzido corresponde a 59 kg.

O sistema de aquecimento em termosifão que utiliza o coletor proposto encontra-se mostrado na Fig. 1



Figura 1. Sistema de aquecimento em teste.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

As Tabelas 1,2 e 3 mostram os parâmetros médios que espelham a eficiência térmica do coletor em estudo para três dias de ensaio e as Figuras 2,3 e 4 espelham o comportamento comparativo assumido pelos mesmos.

Tabela 1. Resultados térmicos do coletor para o primeiro dia de teste.

Hora	T_{ef} (°C)	T_{sf} (°C)	ΔT (°C)	I (KW/m ²)	η_t (%)
9-10	30	35	5	0,7	0,592
10-11	31	36,5	5,5	0,72	0,634
11-12	31,5	37,5	6	0,75	0,664
12-13	32	37	5	0,75	0,553
13-14	35	36	1	0,72	0,115

Tabela 2. Resultados térmicos do coletor para o segundo dia de teste.

Hora	T_{ef} (°C)	T_{sf} (°C)	ΔT (°C)	I (KW/m ²)	η_t (%)
9-10h	30,5	36	5,5	0,7	0,652
10-11h	32	37,5	5,5	0,72	0,634
11-12h	32	37,5	5,5	0,75	0,608
12-13h	33	37	4	0,75	0,442
13-14h	37	37,5	0,5	0,72	0,057

Tabela 3. Resultados térmicos do coletor para o terceiro dia de teste.

Hora	T_{ef} (°C)	T_{sf} (°C)	ΔT (°C)	I (KW/m ²)	η_t (%)
9-10h	31	36	5	0,7	0,592
10-11h	32	37	5	0,72	0,576
11-12h	32,5	37,5	5	0,75	0,553
12-13h	33	37,3	4,3	0,75	0,475
13-14h	37	38,5	1,5	0,72	0,172

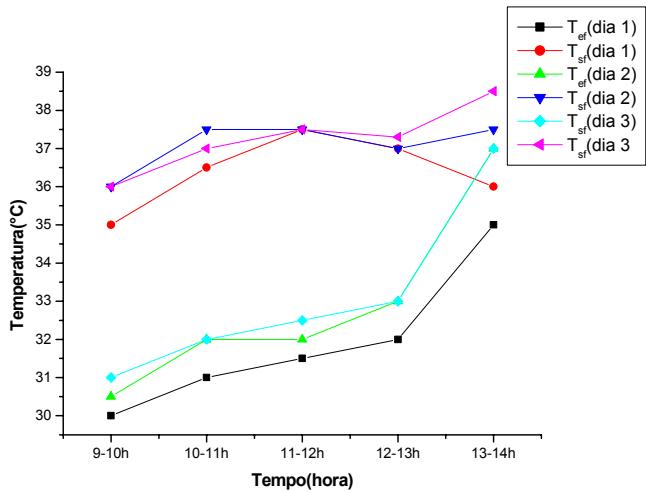


Figura 2. Níveis de temperatura de entrada e saída do fluido no coletor para os três dias de ensaio.

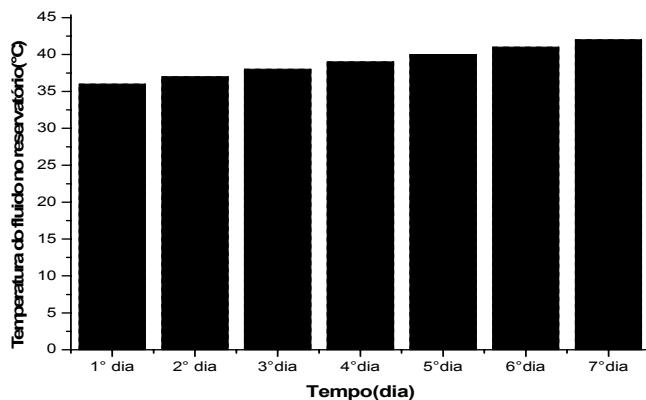


Figura 3. Temperatura da água no reservatório térmico após aquecimento.

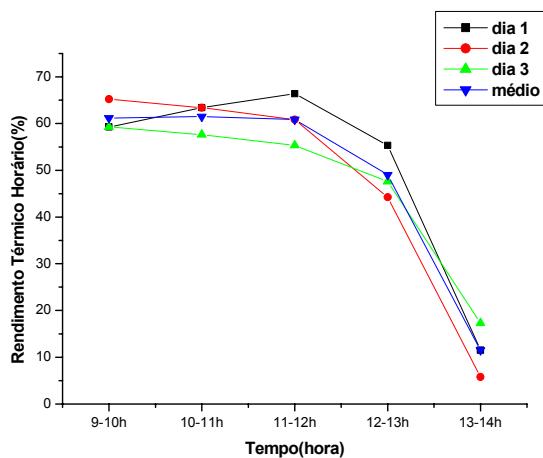


Figura 3. Rendimento térmico horário para os três dias de ensaio.

Os resultados térmicos gerais obtidos com o sistema demonstram a viabilidade do mesmo, pela obtenção de níveis de temperatura no interior do reservatório, que garantem o suprimento de água, na temperatura ideal para o banho, em um volume suficiente para quatro pessoas, considerando-se 60 l/dia.pessoa, segundo o que recomenda a literatura especializada. Considerando-se que o coletor do sistema tem área $0,7 \text{ m}^2$, tem-se clareza de sua eficiência, uma vez que para esse mesmo volume os sistemas de aquecimento convencionais são compostos por um ou mais módulos de $1,5 \text{ m}^2$.

Os rendimentos térmicos horários do coletor estiveram próximos de 60%, com temperatura máxima de saída de $43,5^\circ\text{C}$. A principal característica térmica do sistema foi a sua velocidade de aquecimento, na uniformização da temperatura no interior do reservatório. Pode-se perceber que com apenas cinco horas de trabalho, o reservatório já alcançava uma temperatura uniforme, para todo volume.

Constatou-se que a medida em que os dias foram passando que os níveis de temperatura alcançados pelo fluido no interior do coletor foram aumentando, cerca de 1°C por dia, no interior do reservatório.

Apesar do bom desempenho térmico do coletor, a temperatura de saída esteve um pouco aquém da temperatura desejada para a obtenção de níveis de temperatura no interior do reservatório, alcançando no sétimo dia 42°C . Essa temperatura de saída deve ser aumentada para que possa obter no reservatório uma temperatura capaz de proporcionar um nível proveniente da caixa de alimentação, após a utilização por parte da noite e consequentemente mistura com água fria, será possível através do aumento da área da caixa absorvedora, para em torno de 1m^2 , sendo mesmo assim bastante inferior aos coletores convencionais utilizados em sistemas de aquecimento solares. O nível de temperatura desejada para o volume de água contida no reservatório deve ser em torno de 45°C .

Em relação a temperatura da superfície externa dos tubos absorvedores, seus valores sempre estiveram abaixo da temperatura crítica para o inicio da degradação térmica, que é acima de 60°C . Ressalte-se que os valores máximos alcançados ($T_{mt} = 40,7^\circ\text{C}$) são muito menores que a temperatura de deflexão do PVC, acima de 75°C .

Outro parâmetro que espelha o comportamento térmico de um coletor solar é o coeficiente global de perdas, cujo valor foi calculado, em função dos dados presentes na Figura 5. A Tabela 4 mostra os valores de **Q_{ABSORVIDO}**, **Q_{UTIL}**, **Q_{PERDIDO}** e **Coeficiente Global de Perdas, U_{LOSS}** do coletor em estudo.

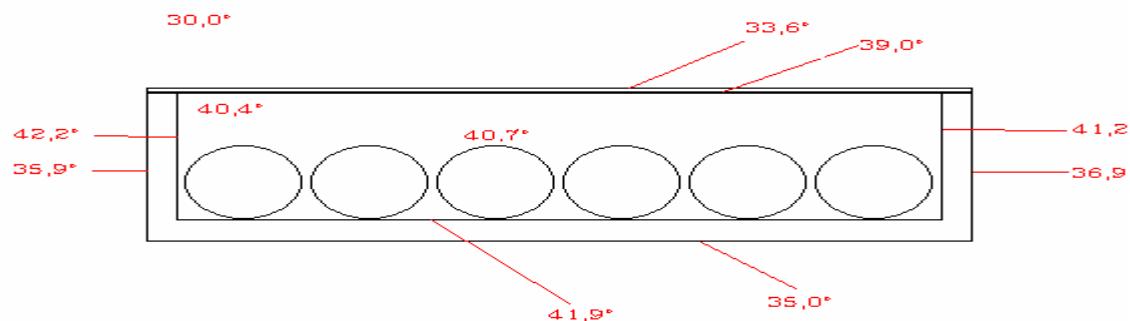


Figura 5. Níveis de temperatura no interior e exterior do coletor em estudo.

Tabela 4. Parâmetros de perda térmica para o coletor em estudo.

TIPO DE COLETOR	Q _{ABSORVIDO} (W)	Q _{UTIL} (W)	Q _{PERDIDO} (W)	U _{LOSS} (W/m ² .°K)
COLETOR ALTERNATIVO	401,6	320	81,6	10,9

Dos dados contidos na tabela acima se percebe que o coletor proposto apresenta um valor de perda térmica em torno de 20% do calor absorvido, com um calor entregue ao fluido de trabalho da ordem de 80%. Esses valores demonstram, a boa eficiência térmica do coletor, comprovada pelo seu coeficiente global de perda térmica em torno de $10,9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$, em consonância com Duffie & Beckman, 1991, que indica um valor para este coeficiente entre 6 e $12\text{W/ m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$.

No que diz respeito aos ensaios realizados para determinação de parâmetros de materiais pode-se perceber que o compósito utilizado apresenta boa resistência ao impacto, que é a principal solicitação a qual a caixa do coletor pode estar submetida, no que concerne a choques quando do seu manuseio e transporte. A introdução de uma armação metálica no compósito causa um aumento de cerca de 100% na sua resistência ao impacto.

Com relação a tração, compressão, flexão e torção as amostras produzidas, a partir do compósito obtido, não apresentaram significativa resistência a esses esforços, o que não inviabiliza a caixa proposta, uma vez que tais solicitações não serão usualmente impostas à estrutura.

Quanto a absorção de água, que será exigida quando do período de chuvas, com o coletor exposto ao ambiente, pode-se perceber que o revestimento aplicado ao compósito com resina ortoftálica mostrou-se eficaz. O coletor já se encontra exposta há mais de seis meses, tendo estado no mês de janeiro submetido a intenso índice pluviométrico.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

1. Os valores de eficiência e gradientes térmicos gerados demonstraram a viabilidade térmica do coletor e sistema de aquecimento propostos, e os níveis de temperatura alcançados na superfície externa dos tubos absorvedores demonstraram a viabilidade de utilização dos tubos de PVC como elementos absorvedores e condutores de calor, pelo não alcance do nível crítico para início do processo degradativo térmico em torno de 60°C ;
2. Ficou comprovado que a utilização do compósito para a caixa do coletor propiciou uma economia do seu custo de fabricação, uma vez que o coletor pode ser construído com, apenas três elementos em vez de cinco. O isolante térmico e a chapa absorvedora foram eliminados. Ressalte-se que o não uso da lã de vidro representa um avanço significativo no campo das pesquisas em energia solar, pois tal material é danoso à saúde;
3. O coletor proposto apresenta um custo de fabricação bem inferior aos coletores convencionais que utilizam o cobre como superfície absorvedora. Seu custo de fabricação ficou em torno de R\$ 50,00;
4. O funcionamento do sistema de aquecimento em termosifão não apresentou problemas no que concerne à sua operacionalidade;
5. A caixa do coletor mostrou-se resistente às intempéries atmosféricas;
6. A nova configuração de grade proposta, composta por múltiplos tubos de PVC ligados a tubulões também de PVC, demonstrou-se viável em relação a vedação entre os tubos e os tubulões, com a utilização de resina ortoftálica;
7. O coletor em estudo apresentou uma boa resistência mecânica, principalmente no que diz respeito ao impacto, que é a solicitação mais frequente ao qual o coletor pode estar submetido;
8. O peso da caixa do coletor pode ser extremamente diminuído, pela utilização do isopor em substituição ao pó de serra, o que já foi operacionalizado na construção de uma nova caixa.

7. REFERÊNCIAS

- Cristofari, C. Et al., 2002, Modeling and performance of a copolymer solar water heating collector, *Solar Energy*, v. 72: (2), p. 99-112.
Rivera, D.A.L., 1994, Projeto, Construção e Análise de Desempenho de um Coletor Solar Alternativo a Baixo Custo, Tese de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia.

- Lourenço, J.M., 1997, Estudo de um coletor solar alternativo usando tubos para absorção de alumínio, Tese de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN, Natal.
- Van Niekerk, W.M.K et al., 1996, Performance modeling of a parallel tube polymer absorber, Solar Energy, v. 58, p. 39-44
- Matrawy K.K., Farkas, I., 1997, Comparison study for three types of solar collectors for water heating, Energy Convers. Manage., v. 38, p. 861-869.
- Shah, L.J., 1999, Investigation and Modeling of Thermal Conditions in Low Flow SDHW Systems, Department of Buildings and Energy, Technical University of Denmark, Report R-034.
- Gil, M. C., Santos, A.C., 2001, Low-temp Thermal Solar Energy, Censolar (Study Center of the Solar Energy), Sevilla.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991 Solar Engineering of Thermal Processes, II edition, New York, John & Sons, 757 p.
- Souza, L.G.M., Gomes, U.U., 2002, Viabilidades térmica, econômica e de materiais da utilização de tubos de PVC como elementos absorvedores em coletores de um sistema de aquecimento de água por energia solar, Tese de Doutorado do Programa de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, UFRN.
- Souza, L.G.M., 2000, Sistema Alternativo de Aquecimento Solar, CONEM - Natal/RN .
- Souza, L.G.M., Gomes, U.U., 2002, Coletor Solar em Labirinto com Tubos Absorvedores de PVC, CONEM, João Pessoa/Pb.
- Souza, L.G.M., Gomes, U.U., 2002, Coletor Solar Aletado com Tubos de PVC formando um Novo Modelo de Configuração em Série, CONEM, João Pessoa/Pb.

Abstract. *A new model of solar collector not conventional is presented, composed for multiple units of PVC tubes in parallel to absorb solar radiation, through a new model of linking between same and the pipes of admission and water exit. The box of the collector is made with a composite of matrix ceramic, and coated with resin, propitiating the elimination of the thermal isolation, usually glass wool. The collector is composed for only three elements: box, absorb grid and glass. They will be boarded constructive aspects, demonstrating the easiness of manufacture of such archetype, that it is characterized for presenting a cost of manufacture sufficiently reduced. It will be presented values of thermal parameters of the collector, working in regimen of thermosiphon for a volume of water of the order of 250 liters. One will demonstrate the viability thermal, economic and of materials of the considered collector, enabling it to serve it of option to the conventional systems of market heating, mainly to the attainment of low temperatures.*