

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO TÉRMICO DE UM SISTEMA SOLAR DE AQUECIMENTO DE ÁGUA
RESIDENCIAL PARA DUAS CONFIGURAÇÕES DE SUPERFÍCIE ABSORVEDORA

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

Como parte dos requisitos para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

Rivaldo Ferreira de Abreu

Orientador: Prof. Dr. José Ubiragí de Lima Mendes

Co-Orientador: Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza

Outubro/2009
Natal - RN

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO TÉRMICO DE UM SISTEMA SOLAR DE AQUECIMENTO DE ÁGUA
RESIDENCIAL PARA DUAS CONFIGURAÇÕES DE SUPERFÍCIE ABSORVEDORA

Rivaldo Ferreira de Abreu

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final.

Prof. Dr. José Ubiragi de Lima Mendes – UFRN – Orientador
Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza - UFRN – Co-orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Ubiragi de Lima Mendes – UFRN

Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza – UFRN

Prof. Dr. Roberto Silva de Souza – IFRN

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a toda minha Família pelo apoio e estímulo, em especial a Ricardo e Bárbara.

PENSAMENTO

*"Não existe nada tão comovente -
nem mesmo atos de amor ou ódio -
como a descoberta de que não se está
sozinho".*

(Autor desconhecido)

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, - PPPGEM/UFRN, por possibilitar-me concretizar este curso de mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelos financiamentos ao trabalho realizado.

A Profª. Núbia Moura na sua incansável disposição para atender e resolver os problemas dos alunos do programa.

Ao prof. Caribé pela sua valiosa contribuição tirando dúvidas em matemática.

Ao Roberto Silva de Souza da manutenção por disponibilizar materiais reutilizáveis na montagem do protótipo.

Aos colegas de eletrotécnica: Carlos D’Alexandria Bruni, Pedro, Cezar, Elenise, Ednaldo e a todos aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram para o desenvolvimento do meu trabalho.

Os meus agradecimentos ao meu Orientador Prof. José Ubiragi de Lima Mendes e ao meu Co-orientador Prof. Luiz Guilherme Meira de Souza, pelos seus ensinamentos, que possibilitaram me orientar, com dedicação e conhecimento de causa no desenvolvimento do trabalho.

Ao Aldo Paulino de Medeiros Júnior com sua participação na montagem do novo protótipo e no dia a dia do trabalho, ao Thyeno Fernandes Câmara que contribuiu com sua participação nos ensaios e o Sr. Wilson Justino com sua ajuda quando foi solicitado.

Ao Reginaldo Dias dos Santos e Rafaela Oliveira Gomes com suas colaborações e a todos aqueles que de forma direta e/ou indireta contribuíram na realização deste trabalho.

RESUMO

Apresenta-se um coletor solar a ser utilizado em um sistema para aquecimento de água destinada ao banho, cujas principais características são o baixo custo e fáceis processos de fabricação e montagem. A superfície absorvedora do coletor é formada por uma chapa de alumínio com oito aletas onde se alojam tubos de PVC. A área de captação da radiação solar global corresponde a 1,3 m². A caixa do coletor foi confeccionada em madeira, tem cobertura de vidro plano transparente e isolamento térmico de raspa de pneu e poliestireno expandido (EPS). Os tubos absorvedores foram ligados em paralelo através do uso de conexões de PVC e fixados à chapa pelo uso de perfis metálicos e arrebites. Todo o conjunto absorvedor recebeu pintura de preto fosca para uma melhor absorção da radiação solar incidente. O sistema absorvedor funcionou em regime de termo-sifão e o conjunto absorvedor do coletor foi testado para duas configurações: com os tubos voltados para cima, expostos diretamente à incidência dos raios solares e voltados para baixo, trocando calor com a chapa por condução. Determinou-se a configuração mais eficiente para o fim proposto. O coletor solar foi conectado a um reservatório térmico, de baixo custo formando o sistema de aquecimento solar de água. Foram avaliados parâmetros térmicos que comprovaram a viabilidade do sistema de aquecimento estudado.

PALAVRAS-CHAVE: Coletor Solar, Aquecimento de água, Energia solar, Reciclagem, Baixo custo.

ABSTRACT

It presents a solar collector to be used in a system for heating water for bathing, whose main characteristics are its low cost and easy manufacturing and assembly. The absorbing surface of the collector is formed by an aluminum plate with eight flaps where they lodge PVC pipes. The catchment area of solar radiation corresponds to 1.3 meters. The collector box was made of wood, is covered by transparent glass and thermal insulation of tire chips and expanded polystyrene (EPS). Absorber tubes were connected in parallel through the use of PVC fittings and fixed to the plate by the use of metal poles and rivets. The entire absorber received paint flat black for better absorption of sunlight. The system worked on a thermosiphon assembly and absorber of the collector has been tested in two configurations: with the tubes facing up, directly exposed to the impact of sunlight and facing down, exchanging heat with the plate by conduction. It was determined the most efficient configuration for the correct purpose. The solar collector was connected to a thermal reservoir, also alternative, low-cost forming the system of solar water heating. We evaluated thermal parameters that proved the viability of the heating system studied.

KEYWORDS: Alternative solar collector, Water heating, Solar energy, Recycling, Low cost.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Apresentação do trabalho..... | 1 |
| 1.2 Objetivos..... | 6 |
| 1.2.1 Objetivo geral..... | 6 |
| 1.2.2 Objetivos específicos..... | 6 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 7 |
| 2.1. Avaliação dos recursos solares..... | 7 |
| 2.2. A importância da energia solar..... | 9 |
| 2.3. O Coletor solar para aquecimento de líquidos..... | 9 |
| 2.3.1. Os coletores solares alternativos para aquecimento de água..... | 11 |
| 2.3.2. Os coletores alternativos no mundo..... | 11 |
| 2.3.3 Desenvolvimento de coletores solares alternativos no LES/UFRN..... | 15 |
| 2.4. Os reservatórios térmicos..... | 17 |
| 2.4.1. Convencionais..... | 17 |
| 2.4.2. Alternativos..... | 19 |
| 2.5. A importância da análise e quantificação da degradação..... | 20 |
| 2.6. O cloreto de polivinila (PVC)..... | 21 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 23 |
| 3.1 Processos de construção, montagem e de ensaio do sistema de aquecimento proposto..... | 23 |
| 3.2. Desenvolvimento teórico..... | 33 |
| 3.2.1. Determinação dos parâmetros térmicos..... | 33 |
| 3.2.1.1. Coeficiente global de perdas | 33 |
| 3.2.1.2. Determinação da eficiência térmica..... | 34 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 35 |
| 4.1. Resultados de eficiência térmica do coletor estudado..... | 35 |
| 4.1.1. Configuração I – tubos absorvedores voltados para cima + RTA200..... | 35 |
| 4.1.2 Configuração II – tubos absorvedores voltados para baixo + RTA200..... | 35 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2. Resultados de perda térmica para determinação da eficiência térmica do coletor..... | 38 |
| 4.2.1. Perda térmica – configuração I..... | 48 |
| 4.2.2. Perda térmica – configuração II..... | 49 |
| 4.3. Comparação entre as duas configurações estudadas..... | 50 |
| 4.4. Perda térmica do reservatório térmico alternativo..... | 52 |
| 4.5. Custos do sistema de aquecimento..... | 53 |
| 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES..... | 55 |
| 5.1. CONCLUSÕES..... | 55 |
| 5.2. SUGESTÕES | 56 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 57 |

LISTAS DE FIGURAS

- Figura 2.1. Esquema básico de um sistema de aquecimento solar convencional.
- Figura 2.2. Sistemas de aquecimento alternativos solares de água.
- Figura 2.3. Sistema ASBC retirado de Varella (2004).
- Figura 2.4. Coletores ASBC e Coletor PET em teste.
- Figura 2.5. Boilers convencionais disponíveis no mercado.
- Figura 2.6. Reação de degradação do PVC.
- Figura 3.1. Ligação entre tubos e conexões.
- Figura 3.2. Formação da grade absorvedora.
- Figura 3.3. Fixação da grade absorvedora na chapa absorvedora.
- Figura 3.4. Montagem da caixa do coletor.
- Figura 3.5. Colocação do isolante térmico no fundo da caixa do coletor.
- Figura 3.6. Colocação da grade absorvedora na caixa do coletor.
- Figura 3.7. Instalação do coletor no suporte.
- Figura 3.8. Etapas da fabricação e montagem do RTA100.
- Figura 3.9. Reservatório térmico alternativo – RTA200.
- Figura 3.10. Configurações de conjunto absorvedor testadas.
- Figura 3.11. Sistema de aquecimento alternativo proposto, nas suas duas configurações.
- Figura 4.1. Comportamento assumido pelas médias horárias das temperaturas de entrada e saída e da diferença de temperatura no coletor - configuração I.
- Figuras 4.2. Comportamento assumido pelas médias horárias radiação solar global - configuração I.
- Figuras 4.3. Comportamento assumido pelas médias horárias da eficiência térmica - configuração I.
- Figura 4.4. Comportamento médio diário assumido pelos parâmetros medidos durante os ensaios - configuração I.
- Figura 4.5. Comportamento médio dos níveis de temperatura no interior do reservatório térmico para os dias de ensaios realizados - configuração I.
- Figura 4.6. Comportamento assumido pelas médias horárias das temperaturas de entrada e saída e da diferença de temperatura no coletor - configuração II.
- Figuras 4.7. Comportamento assumido pelas médias horárias radiação solar global - configuração II.

Figuras 4.8. Comportamento assumido pelas médias horárias da eficiência térmica - configuração II.

Figura 4.9. Comportamento médio diário assumido pelos parâmetros medidos durante os ensaios - configuração II.

Figura 4.10. Comportamento médio dos níveis de temperatura no interior do reservatório térmico para os dias de ensaios realizados - configuração II.

Figura 4.11. Parâmetros de perda térmica – configuração I.

Figura 4.12. Parâmetros de perda térmica – configuração II.

Figura 4.13. Estratificação no reservatório térmico dos níveis de temperatura medidos – configurações I e II.

LISTAS DE TABELAS

- Tabela 4.1. Dados do primeiro dia de ensaio – configuração I.
- Tabela 4.2. Dados do segundo dia de ensaio - configuração I.
- Tabela 4.3. Dados do terceiro dia de ensaio - configuração I.
- Tabela 4.4. Valores médios horários dos três dias de ensaios - configuração I.
- Tabela 4.5. Resultados médios gerais obtidos para os três dias de ensaios - configuração I.
- Tabela 4.6. Níveis de temperatura da água aquecida em vários pontos do reservatório para cada dia de ensaio - configuração I.
- Tabela 4.6. Dados do primeiro dia de ensaio - configuração II.
- Tabela 4.7. Dados do segundo dia de ensaio - configuração II.
- Tabela 4.8. Dados do terceiro dia de ensaio - configuração II.
- Tabela 4.9. Valores médios horários dos três dias de ensaios - configuração II.
- Figuras 4.8. Comportamento assumido pelas médias horárias da eficiência térmica - configuração II.
- Tabela 4.10 mostra os resultados médios gerais obtidos para os três dias de ensaios para a configuração II.
- Tabela 4.10. Resultados médios gerais obtidos para os três dias de ensaios - configuração II.
- Tabela 4.11. Níveis de temperatura média em vários pontos do reservatório térmico para cada dia de ensaio - configuração II.
- Tabela 4.12. Resultados médios gerais para os dias de ensaio de cada configuração estudada.
- 4.13. Resultados médios gerais para os dias de ensaio de cada configuração estudada – temperaturas no reservatório térmico.
- Tabela 4.14. Dados da simulação de banhos – configuração I.
- Tabela 4.15. Resultados do teste realizado com o reservatório térmico alternativo proposto.
- Tabela 4.16. Custo dos materiais utilizados na montagem do coletor.

SÍMBOLOS

Alfabeto Latino

| | | |
|--------------------------|--|-----------------------|
| ρT | Gradiente de temperatura entre entrada e saída do fluido | [°C] |
| \dot{m} | Vazão mássica | [kg/s] |
| A [m ²] | Área do coletor (área exposta à radiação solar) | |
| I | Radiação solar global | [kW/m ²] |
| $P_{\text{abs.}}$ | Potência absorvida pelo coletor | [W] |
| P_p | Potência perdida pelo coletor | [W] |
| P_u | Potência transferida ao fluido de trabalho | [W] |
| T_{am} | Temperatura ambiente | [°C] |
| T_{mp} | Temperatura média da superfície da placa | [°C] |
| U_{loss} | Coefficiente global de perda térmica | [W/m ² .K] |

Alfabeto grego

| | | |
|------------|--|----------------------|
| ρ | Peso específico | [g/cm ³] |
| η_t | Eficiência térmica do coletor e/ou sistema | [%] |
| c_p | Calor específico da água | kJ/kg °C |
| α_p | Absortividade da placa | |
| τ_v | Transmissividade do vidro | |

1. INTRODUÇÃO

1.1 Apresentações do trabalho

O aquecimento global é uma realidade incontestável. As previsões são em alguns casos mais catastróficas que os alertas que os cientistas ambientais nas últimas décadas vêm fazendo. A substituição de combustíveis convencionais, principalmente do petróleo e seus derivados, por fontes renováveis de energia atingem caráter de imprescindibilidade. Nesse contexto a energia solar tem merecido um destaque especial, juntamente com a energia eólica, que foi a fonte energética que mais avançou nas últimas décadas.

A natureza está respondendo as agressões praticadas pelo homem. O avanço das marés, a alteração do calendário das chuvas, a diminuição da espessura da camada de gelo nos pólos e o aumento perceptível da temperatura ambiente em todas as partes do mundo, são marcas profundas que traduzem a reação do planeta à agressão massiva do ser humano a sua sustentabilidade.

Nas duas últimas décadas as energias alternativas estiveram no centro das discussões principalmente nos países mais desenvolvidos. Conscientes de que o planeta não suporta mais tanta agressão, busca-se encontrar formas alternativas de geração de energia, que não acarretem em danos tão profundos como gerados pelas fontes fósseis.

A participação das fontes renováveis nas matrizes energéticas de vários países teve aumento substancial. Países como os Estados Unidos, Espanha, Inglaterra, Alemanha, Portugal, Austrália, China, Índia, estão investindo e desenvolvendo tecnologia para substituírem os combustíveis fósseis por energias limpas. Já existem metas preestabelecidas para as próximas décadas, onde se evidencia um aumento significativo das fontes limpas em relação às fontes sujas de geração de energia.

Esse interesse pelas energias alternativas não se dá prioritariamente pela consciência dos malefícios das energias fósseis. Dá-se pelo aumento sucessivo do preço do barril de petróleo. Na presente década o preço do barril superou a marca dos US\$ 150.00. Com esse preço a utilização de energias renováveis pode tornar-se competitiva.

Mas apesar do modelo dominante não priorizar a saúde planeta, os sinais de que a natureza já não suporta tanto CO₂ são evidentes. O aquecimento global prenunciado e constatado a cada ano conduz a perspectivas catastróficas. Urge que se produza uma

mudança de rota na geração energética sob pena de inviabilizarmos a condição de sobrevivência humana no nosso planeta.

E, assim, as nações mais desenvolvidas vão ser obrigadas a seguirem essa reversão de rota, até para garantirem a competitividade tecnológica para a geração por fontes alternativas, pois a moeda mais forte é a tecnologia. Nesse sentido países emergentes como o Brasil, que não possuem grandes projetos que não utilizam essas fontes, estão sujeitos aos atrasos tecnológicos de mercado e de geração de recursos significativos, condenando nosso povo a uma exclusão cada vez mais significativa.

O aquecimento solar de água, a geração indireta de energia elétrica através do uso de concentradores solares e a conversão direta da energia solar em energia elétrica através do uso das células fotovoltaicas representam aplicações extremamente viáveis e suas utilizações têm crescido exponencialmente em todo o mundo, principalmente nos países mais desenvolvidos.

O Brasil é um país privilegiado em relação ao potencial solar disponível, e a região nordeste apresenta um potencial médio em torno de 600 W/m^2 , chegando a picos em torno de 1000 W/m^2 . Esses potenciais colocam a região nordeste como uma região extremamente viável para a implantação de quaisquer instalações solares, para suas várias aplicações.

Segundo o Balanço Energético Nacional (**BEN 2007**), 45% do consumo de energia elétrica no Brasil é direcionado para o setor de edificações, sendo 80,0% correspondente a empresas e residências e 12% a administração pública, com cifras alcançando 13,8% do Produto Interno Bruto do país (www.mme.gov.br).

O setor residencial responde por 23% do consumo nacional de energia e o consumo do chuveiro elétrico é o segundo maior em uma residência, correspondendo a 25%, perdendo apenas para o refrigerador/freezer que corresponde a 30%. Sua utilização atinge o horário de pico das 18:00 às 19:00 horas, correspondendo a 8,5% da demanda nacional de energia neste horário (**Reis, 2009**).

Estes dados apontam a importância da substituição da fonte elétrica pela fonte solar para a obtenção de água quente principalmente para diminuir-se o consumo de energia elétrica convencional, aliviando a matriz energética brasileira.

Os dispositivos solares utilizados para a produção de água quente são os coletores que podem ser divididos em dois grupos os convencionais e os alternativos, sendo os planos mais utilizados. Tais coletores geralmente são constituídos por tubos absorvedores de cobre, chapa absorvedora de cobre ou alumínio, cobertura de vidro e isolamento térmico de lã de vidro e a grade absorvedora confeccionada na configuração em paralelo.

Os sistemas de aquecimento são geralmente constituídos por mais de um coletor, ligados geralmente em paralelo, trabalhando em regime de termossifão ou fluxo forçado; por um armazenador térmico geralmente de cobre ou inox e de tubos para a condução de calor, geralmente o CPVC. Tais sistemas são de preço ainda relativamente caro, não estando acessível à maioria da população. Para uma residência com quatro pessoas, o sistema fica acima de R\$ 3.000,00. (US\$1.667,00)

Buscando-se formas para baratear o custo dos sistemas de aquecimento, vem-se estudando a mais de 25 anos no LES/UFRN sistemas alternativos de baixo custo, utilizando materiais alternativos, para tornar viável o uso da energia solar para o fim proposto tornando-a acessível a uma maior parcela da população, como forma de socializar o seu uso.

Foram desenvolvidas, construídas e estudadas várias gerações de coletores alternativos de diferentes materiais e geometrias, de custo mais baixo que os coletores e sistemas de aquecimento de mercado (**Souza, 2000, 2002, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009; Costa, 2007, Santos, 2008, Reis, 2009**).

Esse trabalho apresenta um sistema de aquecimento solar de água para fins residenciais, composto por um coletor solar plano alternativo e um reservatório térmico para o armazenamento da água quente produzida pelo coletor.

A placa absorvedora do coletor é composta por oito aletas para alojar os tubos absorvedores aumentando a área de troca térmica entre placa e tubos absorvedores. Estudaram-se duas configurações para determinar-se qual a configuração mais eficiente: tubos voltados para cima e tubos voltados para baixo.

Para esse estudo comparativo serão determinados parâmetros térmicos que espelham a eficiência de um coletor solar: coeficiente global de perda térmica, eficiência térmica e temperaturas médias da água quente produzida. Portanto, a novidade principal do presente trabalho será demonstrar qual o tipo de configuração que propicia a obtenção de uma maior

eficiência, se com os tubos voltados para cima, onde predomina a troca radiativa ou se com os tubos voltados para baixo, onde predomina a transferência de calor condutiva.

Outra inovação do trabalho é a utilização de raspas de pneu como isolante térmico, colocado sobre a superfície inferior interna do coletor. A utilização desse elemento representa uma contribuição ecológica, pelo uso racional das sucatas de pneu que trazem grandes danos ao ambiente

Serão avaliadas as viabilidades térmicas e econômicas do sistema de aquecimento solar de água que utiliza tubos de PVC e chapa de alumínio de calha como superfícies absorvedoras, e cujo reservatório térmico foi confeccionado a partir de um tambor de polietileno de 200 litros utilizado para armazenamento de água ou lixo residencial. Tal reservatório apresenta custo muito menor que os reservatórios convencionais fabricados em cobre ou inox.

Quando se opta pelo uso do plástico como elemento absorvedor e condutor tem-se que investigar os efeitos das degradações térmicas e por ultravioleta, inerentes à exposição de tubos plásticos aos efeitos da radiação solar, uma vez que essas degradações podem trazer danos aos tubos absorvedores. **(Souza, 2002)**, demonstrou que essas degradações causam danos apenas microestruturais aos tubos, não comprometendo a sua macroestrutura. Essa constatação não inviabiliza, portanto, o uso de tubos de PVC como elementos absorvedores e condutores de radiação solar.

A exposição do PVC à radiação solar e ao calor causa degradação, produzida pela perda de massa ou quebra de ligações, com surgimento de duplas ligações na cadeia principal, quando do processo de perda (separação) do HCL da mesma. Essas degradações fragilizam o material e também podem ser críticas para a processabilidade do PVC, quando dos processos de fabricação empregados para a obtenção de cada tipo **(Santos, 2008)**.

No caso do tubo de PVC, essa degradação é mais crítica para níveis de temperatura acima de 250°C, embora a degradação térmica se inicie para temperaturas acima de 60°C, alcançando limite crítico para temperaturas acima de 75°C, onde começa o seu processo de deflexão **(Souza, 2002)**.

Embora vários aditivos possam ser empregados no combate a estas degradações, resolveu-se evitá-las através de soluções mais simples e inovadoras, capazes de viabilizar o presente estudo no campo dos materiais, a partir da utilização de tubos disponíveis no

mercado. Portanto, não se utilizou qualquer tipo de aditivo, o que representa outro fator inovador do trabalho.

O efeito degradativo por UV pode ser minimizado através do uso de uma película protetora, que é a própria tinta a ser utilizada para aumentar o poder de absorção dos tubos, quando submetidos à energia eletromagnética do sol.

Portanto, será também avaliada a susceptibilidade à degradação térmica dos tubos absorvedores de PVC através da quantificação da temperatura média da superfície externa dos mesmos, diagnosticando-se se é atingida a temperatura crítica para o início do processo térmico degradativo, em torno de 60°.

O sistema de aquecimento proposto é destinado à obtenção de água quente para o banho de uma família com quatro pessoas em substituição ao chuveiro elétrico.

O estudo proposto está dividido em cinco capítulos que têm as seguintes abordagens:

O Capítulo 1 apresenta o trabalho desenvolvido, suas inovações e seus objetivos gerais e específicos.

O capítulo 2 apresenta um estudo sobre revisão da literatura nos campos da energia, dos coletores alternativos e das degradações inerentes à exposição do PVC à radiação ultravioleta e ao calor, e as propriedades dos materiais utilizados na fabricação do sistema de aquecimento proposto.

O capítulo 3 apresenta a proposta em estudo, mostrando o coletor construído, seus princípios de funcionamento e processos de fabricação e montagem. Apresenta, também, dois reservatórios térmicos alternativos de baixo custo para a substituição dos reservatórios usuais, de cobre ou aço inoxidável, de custo elevado. Apresenta também a metodologia experimental empregada.

O capítulo 4 mostra os resultados e as discussões dos dados obtidos no levantamento de desempenho do sistema proposto, utilizando o coletor fabricado.

O capítulo 5 trata das conclusões e sugestões, em função da análise dos resultados obtidos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Comprovar as viabilidades térmicas e econômicas do sistema de aquecimento solar estudado e avaliar a configuração do conjunto absorvedor mais eficiente.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Projetar e construir um sistema de aquecimento solar de custo mais baixo que os convencionalmente utilizados;
2. Ensaiai tal sistema determinando seus parâmetros térmicos;
3. Avaliar os níveis de temperatura da degradação inerente ao uso do PVC como elemento absorvedor de radiação solar;
4. Demonstrar a competitividade do sistema em estudo em relação a outros sistemas convencionais;
5. Avaliar a viabilidade do sistema na obtenção de água quente destinada ao banho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nas duas últimas décadas a fonte motora para a utilização da energia solar em muitos países esteve relacionada aos contextos ambiental local e global. Isto representa uma premissa parcialmente verdadeira, uma vez que os principais motivos para o desenvolvimento da energia solar foram o alto custo das fontes convencionais, a seguridade nacional de energia e o equilíbrio do comércio.

Se o mundo se move em direção a uma economia de energia verdadeiramente sustentável será essencial integrar essas relativamente novas tecnologias solares com as plantas energéticas não renováveis hoje disponíveis, de forma mais efetiva, levando em conta os fatores tecnológicos e socioeconômicos envolvidos em tais processos de transição.

Ênfases recentes na degradação ambiental, a poluição atmosférica e o aumento de temperatura da Terra causado pelas plantas de potência convencionais têm ressaltado a natureza benigna das tecnologias energéticas renováveis.

2.1. Avaliação dos recursos solares

A radiação que chega a Terra está disponível continuamente em grande quantidade, como também está amplamente distribuída sobre a sua superfície. Isto representa uma vantagem imediata considerando-se seu uso de uma forma descentralizada. Porém conduz à conclusão de que se torna necessária a utilização de grandes áreas de coletores para o uso da energia solar em larga escala. Embora a energia solar seja gratuita, seu custo inicial é elevado.

A quantidade de radiação solar incidente sobre uma superfície depende da localização geográfica, dia do ano, condições do tempo, nebulosidade, umidade e turbidez, orientação e ângulo de inclinação do coletor. Há, naturalmente, os efeitos diurnos e noturnos a serem considerados quando se projeta um sistema solar; e isto introduz a necessidade de armazenamento elétrico e/ou térmico para as condições de tempo nublado e uso noturno da energia.

Os efeitos atmosféricos da Terra espalham a radiação solar de tal forma que, na superfície há duas componentes da radiação: a radiação direta vinda da posição do sol no céu e radiação difusa proveniente das nuvens e da abóbada. A proporção relativa destes dois tipos

de radiação é importante quando se seleciona o tipo de coletor a ser usado em um sistema solar, assim como os locais para a sua utilização.

O uso da energia solar tem crescido significativamente nos últimos anos principalmente em países desenvolvidos que já possuem políticas de redução da massiva utilização de fontes convencionais de energia, que é exclusivamente de origem fóssil. Os Estados Unidos já construíram várias plantas solares de grande porte, para geração de até 300MW; a Austrália construiu uma planta eólico-solar com capacidade de geração de 200MW. E pretende fazer mais três, utilizando torres de 1000m de altura.

A comunidade européia já planeja a construção de uma planta solar utilizando concentradores no deserto do Saara, para a geração em primeira escala de 100MW, para suprir de energias os países da Europa. Nesse contexto Alemanha, Japão, Espanha, Inglaterra, Portugal, França, China e outros têm investido massivamente na geração de energia limpa utilizando fontes renováveis, onde se destacam as energias solar e eólica; como

Já existe um projeto para a substituição da fonte fóssil para a geração da energia elétrica nos Estados Unidos, onde toda a produção seria através das energias solar. Projeta-se um investimento de 400 bilhões de dólares até 2050 e espera-se um preço do kWh em torno de seis centavos de dólar, preço equivalente ao pago na atualidade pelo kWh gerado por fonte fóssil.

Especialistas em tecnologia solar prevêm uma queda de até seis vezes no preço do kW obtido a partir da energia solar até o ano 2015. Espera-se que os efeitos da produção cada vez mais crescente reduzam esse valor para US\$1.00 ou US\$0.80 por kWh (www.sciam.com.br).

A Alemanha já anunciou a fabricação de uma célula fotovoltaica com eficiência de 40% o que representa um avanço científico incomensurável, uma vez que as células disponíveis comercialmente apresentam eficiência na faixa de 12 a 16%.

Esse avanço vai causar uma massificação da geração de eletricidade através do uso da fonte solar no mundo e reduzir o custo do kWh gerado que ainda é muito mais alto que o obtido com fonte fóssil, em torno de dezesseis centavos de dólar nos Estados Unidos, cerca de três vezes mais caro.

A melhoria das plantas solares usadas para todas as aplicações exige a incorporação de avanços nos campos da eletrônica e de circuitos de computadores, e benefícios de recentes e contínuos avanços na tecnologia de materiais tais como a produção de avançados materiais compósitos.

2.2. A importância da energia solar

As massas continentais, excluídas as regiões Árticas e Antártica, possuem uma área de cerca de $132,5 \times 10^{12} \text{m}^2$. Portanto, a incidência solar sobre essas massas continentais é $4,77 \times 10^8 \text{GWh/dia}$. Logo, a incidência em um ano é de $1,74 \times 10^{11} \text{GWh}$ (Souza, 2002).

Considerando-se que o consumo energético anual atual corresponde a $1,5 \times 10^8 \text{GWh}$, conclui-se que a energia solar disponível nas massas continentais representa mais de 1.000 vezes o consumo de energia da humanidade. Isso equivale a dizer que menos de 1% da energia solar disponível nas massas continentais seria suficiente para suprir de energia à humanidade (Souza, 2002).

Uma vez que a luz solar está disponível em todas as regiões da Terra e pode ser usada de forma descentralizada, a opção solar para a geração de eletricidade dispensa o caro transporte da energia através de redes de distribuição, inerentes ao sistema convencional.

Os equipamentos solares têm um grande potencial em países tropicais, entre os quais se encontra o Brasil, com disponibilidade equivalente a $1,13 \times 10^{10} \text{GWh}$, por possuírem significativos potenciais solares e receberem energia solar em quase todo o ano, como acontece no nordeste brasileiro (Souza, 2002).

2.3. O coletor solar para aquecimento de líquidos

O coletor solar para aquecimento de líquidos difere do painel fotovoltaico porque utiliza a energia solar para aquecer um fluido e não para gerar eletricidade.

O coletor solar é o equipamento principal do sistema de aquecimento solar, sendo responsável pela absorção e transferência da radiação solar para um fluido de trabalho sob a forma de energia térmica.

Na Figura 2.1 são apresentados os componentes principais de um sistema de aquecimento solar convencional, quais sejam: Módulo ou caixa: geralmente de alumínio suporta e protege todos os componentes do coletor; Cobertura transparente: geralmente de vidro, permite a passagem da radiação e reduz a perda de calor para o meio; Tubulação: geralmente de cobre, são tubos interconectados através dos quais o fluido circula dentro e fora do coletor; Placa de absorção: é responsável pela absorção e transferência de energia solar para o fluido de trabalho; Reservatório térmico: para acúmulo de água quente. Geralmente de inox; Reservatório de água fria: Para alimentar o coletor e também a residência.

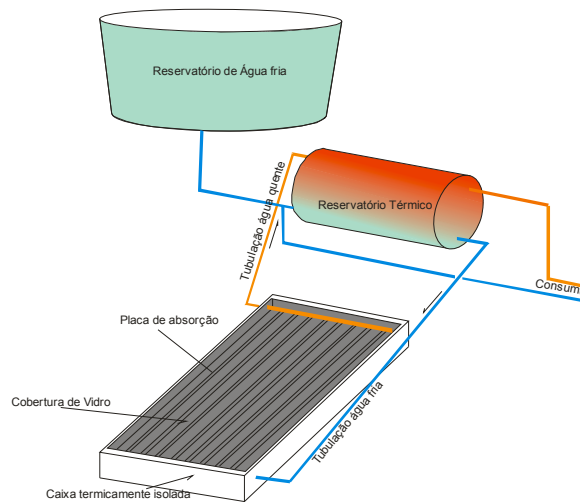


Figura 2.1. Esquema básico de um sistema de aquecimento solar convencional.

O funcionamento de um aquecedor solar é muito simples. O efeito estufa gerado pela transformação da energia absorvida pela grade absorvedora é o responsável pelo aquecimento da água. A água fria no fundo do reservatório entra no coletor, aquece-se, diminui sua densidade e flui em direção a saída do coletor, voltando para o reservatório térmico. Esse processo de circulação natural só é cessado quando a água do reservatório estiver na mesma temperatura da água no interior do coletor ou quando a radiação solar incidente for insuficiente para promover a gradiente térmico necessário à sua circulação.

Os coletores alternativos para aquecimento de água têm-se constituído na principal linha de pesquisa no âmbito do Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar da UFRN, já tendo sido desenvolvidas, construídas e estudadas várias gerações destes tipos de

coletor. Busca-se, de forma prioritária, o barateamento do custo de fabricação de um sistema de aquecimento de água solar.

Estes coletores foram objetos de estudo de oito Dissertações de Mestrado, apresentadas ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN. A seguir far-se-á uma breve discussão sobre a história deste tipo de coletor, em nível mundial e local, mostrando os resultados alcançados por várias de suas gerações e as análises que conduziram ao desenvolvimento do presente trabalho.

2.3.1. Os coletores alternativos no mundo

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

Um sistema de aquecimento solar foi desenvolvido e construído no Centro Incubador de Empresas Tecnológicas – (**CIETEC/SP 1999**), e foi chamado de Coletor Solar de Baixo Custo – ASBC. Este coletor não possui cobertura. Este sistema para uma família de quatro pessoas é formado três placas coletoras de 0,91 m² de PVC interligadas e pintadas de preto e por um reservatório de volume igual a 170 litros. Cada placa coletora é composta por um perfil modular de forro de PVC, com tubos de PVC acoplados as suas extremidades. Funciona em regime de termossifão.

(**Cristofari, et al. 2002**), propuseram em, estudar um novo material para a caixa do coletor, que se caracteriza por ter baixa condutividade térmica, ser mais resistente à corrosão, ter baixo peso e menor custo; por ter uma geometria retangular de passagem de fluxo para aumentar sua rigidez; e por utilizar uma nova metodologia de cálculo onde a capacidade calorífica de vários componentes é levada em conta, permitindo uma simulação dinâmica do comportamento do sistema.

(**Souza 2004**) estudou comparativamente dois tipos de coletores, um alternativo e outro plano convencional, demonstrando a competitividade do coletor alternativo com grade absorvedora constituído por múltiplos tubos de PVC em relação ao coletor plano convencional com tubos de cobre.

(**Sociedade do Sol 2004**) construiu um coletor utilizando garrafas pet e embalagens TETRA PAK. Este coletor é composto por 80 garrafas pet e tem grade absorvedora formado por oito tubos de PVC ligados em paralelo. Testes realizados com o ASBC e com o coletor de PET mostraram que o ASBC é 17,2% mais eficiente (**Varela, 2004**).

(**Souza 2005**) estudou um coletor alternativo constituído por apenas três elementos: caixa, grade absorvedora e vidro. A caixa foi confeccionada em material compósito e a grade absorvedora era composta de múltiplos tubos de PVC ligados em paralelo, utilizando uma configuração que permitia a diminuição do espaço entre os tubos. O sistema em estudo demonstrou se viável para o fim proposto.

(**Souza 2006**) estudou um sistema de aquecimento alternativo de baixo custo composto por um coletor solar alternativo e um reservatório térmico alternativo. O coletor tinha grade absorvedora de PVC e o reservatório foi confeccionada a partir de um tambor de polietileno de 200 litros, utilizado para armazenamento de água e/ou lixo, revestido por material compósito a base de gesso, EPS triturado e água. Foram demonstradas as viabilidades térmica, econômica e de materiais do sistema em estudo.

(**Souza 2007**) estudou um sistema de aquecimento alternativo constituído por um coletor com grade absorvedora de tubos de PVC ligados em paralelo através de tês de PVC de mesmo diâmetro e um reservatório térmico alternativo construído a partir de um tambor de polietileno revestido por um cilindro confeccionado em fibra de vidro. O sistema mostrou-se eficiente para o aquecimento de água residencial.

(**Javier 2008**) determinou a eficiência de dois coletores, um convencional e outro com materiais alternativos abundantes na sua região. Avaliou-se o desempenho utilizando um simulador solar e depois em condições reais de operação. Demonstrou que o coletor com materiais alternativos funciona tão bem quanto um coletor construído com materiais convencionais.

(**Leal 2008**) construiu um modelo de coletor solar térmico, para aquecimento de água, produzido com materiais recicláveis e de baixo custo (tubos em PVC, caixas acartonadas Tetrapak e garrafas PET pós-consumo) e que apresentou uma relação custo/benefício extremamente competitiva se comparado aos modelos industriais.

(Silva A, et AL 2008) desenvolveu uma ferramenta para simulação numérica de sistemas de aquecimento de água utilizando energia solar, baseado nos modelos apresentados na literatura. O modelo de simulação apresentado no seu trabalho permite calcular a radiação solar total incidente no coletor, levando em consideração as características da cobertura, a simulação do desempenho do coletor, e prediz o perfil de temperatura do tanque de acumulação de água quente, considerando perfil de carga térmica a ser suprida, e a temperatura estratificada.

(Souza 2008) Construiu um sistema de aquecimento de água solar trabalhando em regime de termossifão, constituído por dois coletores alternativos e um reservatório armazenador de água também alternativo. Os coletores foram construídos a partir da utilização de garrafas PET, latas de cerveja, refrigerantes e tubos de PVC de ½” e os reservatórios térmicos a partir de um tambor de polietileno de 250 litros, revestido por um cilindro de fibra de vidro, tendo EPS triturado entre as duas superfícies. Mostrou-se que tal sistema de aquecimento alternativo, apresenta viabilidades térmica, econômica e de materiais.

(Neto et al 2008) apresentou análises técnicas e econômicas, para dois coletores solares não convencionais de plástico e quatro coletores convencionais. Os dados desses coletores foram obtidos de seus fabricantes e utilizados nas análises técnicas e econômicas. Foi fabricado um coletor não convencional para testes no laboratório. Um dos coletores de plástico apresentou índices econômicos compatíveis com um coletor convencional. Foram relacionadas neste trabalho três variáveis: a produção mensal específica de energia, a durabilidade e o custo inicial dos coletores.

(Krenzinger 2008), (Pozzebon 2008) apresentaram um software de simulação de aquecimento de água, Termosim, suas interfaces gráficas e discussões sobre os modelos matemáticos aplicados nos seus componentes, apresentando-o como ferramenta importante nas análises de comportamento térmico dos sistemas de aquecimento de água por energia solar. Os modelos matemáticos do coletor solar e balanço térmico do tanque foram validados com o confronto dos resultados experimentais de (Siqueira 2003).

(Ferreira et al 2008) analisou a viabilidade técnica da redução do uso de energia elétrica pela substituição dos chuveiros elétricos por aquecedores solares. Demonstrou as viabilidades técnica, econômica e ambiental da substituição dos chuveiros elétricos pelos sistemas aquecedores / reservatórios.

(Santos 2008) construiu um coletor alternativo utilizando garrafas pet, latas de cervejas, refrigerantes e tubos de PVC de ½". A grade absorvedora era formada por oito tubos de PVC, ligados através de conexões T do mesmo material e diâmetro. No interior das unidades aquecedoras em número de 48, formadas por duas garrafas pet, com o tubo no interior, foram colocadas duas aletas, fabricadas com as latas de cerveja e refrigerantes, envolvendo o tubo para aumentar a área de absorção da radiação solar.

(Molero 2008) apresentou um modelo matemático multidimensional e transitório para coletores solares planos. Baseou-se nos elementos finitos e é flexível prever o comportamento de diferentes configurações: coletores de tubo paralelo, de serpentina ou de placas paralelas, juntamente com outras possibilidades não usuais como o uso de fluidos absorventes com placa superior semitransparente. O modelo foi validado com os resultados experimentais de um coletor solar comercial de tubos paralelos onde se obteve uma grande similaridade entre a curva de eficiência real e a simulada.

(Fasulo et al 2008) estudaram as vantagens e limitações que possuem o policarbonato celular. Concluíram que este material não está apto para trabalhar em contato permanente com a água. Os resultados mostraram que o material mantém suas propriedades dentro das 500 horas de exposição.

2.3.2. Desenvolvimento de coletores solares alternativos no LES/UFRN

Buscando formas de obtenção de um sistema de aquecimento a baixo custo, vem-se estudando a mais de 20 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. Foram desenvolvidos, construídos e estudados vários tipos de coletores alternativos de diferentes materiais e geometrias, com custo inferior aos coletores e sistemas de aquecimento disponíveis no mercado.

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 alternativos planos com tubos de PVC, com

diferentes formas de ligação entre os tubos da grade absorvedora. A experiência adquirida com esses coletores serviu de base para a realização do presente trabalho.

A Figura 2.2 mostra sistemas de aquecimento solar alternativos para aquecimento de água destinada ao banho, estudados por Souza et al.



Figura 2.2. Sistemas de aquecimento solares de água estudados no LMHES/UFRN.

Outro sistema de aquecimento alternativo a baixo custo com o objetivo de socializar o aquecimento solar de água foi desenvolvido e construído no Centro Incubador de Empresas Tecnológicas – CIETEC/SP em 1999, e recebeu o nome de Coletor Solar de Baixo Custo-ASBC. O ASBC tem coletores similares aos usados em piscinas, não possuindo, portanto, cobertura transparente (Varela, 2004).

Esse sistema para uma família de quatro pessoas é composto por três placas coletoras de 0,91 m² de PVC interligadas e pintadas de preto e por um reservatório de volume igual a 170 litros. Cada placa coletora é composta de um perfil de forro de PVC modular (do tipo

forro de escritório, postos de gasolina) com tubos de PVC acoplados às suas extremidades. Funciona em regime de termossifão. A Figura 2.3 mostra o sistema de aquecimento ASBC.



Figura 2.3. Sistema ASBC retirado de Varella (2004).

Outro coletor alternativo foi desenvolvido e construído pela Sociedade do Sol, uma ONG paulista, utilizando garrafas PETS e embalagens de leite, TETRA PAK. A Figura 2.4 mostra dois coletores em teste, o ASBC e o de garrafas PETS.



Figura 2.4. Coletores ASBC e Coletor PET em teste (COSTA, 2007).

2.4. Os reservatórios térmicos

2.4.1. Convencionais

Os reservatórios térmicos convencionalmente utilizados em sistemas solares de aquecimento, chamados boiler, são geralmente fabricados em aço inoxidável, cobre ou aço carbono, para volumes de até 15 mil litros. Podem ser horizontais ou verticais, sendo constituídas por duas superfícies cilíndricas, uma interna e outra externa, tendo entre as mesmas, um isolamento térmico, geralmente a lã de vidro. A Figura 2.5 mostra reservatórios térmicos convencionais, com detalhes construtivos.

Podem ser de Baixa pressão e Alta Pressão. Os de baixa pressão são mais econômicos e são indicados para instalações nos projetos em que a caixa de água fria esteja logo acima do boiler, sendo que o seu nível de água deverá estar no máximo com 2 m para os modelos em cobre e 5,0 m para os modelos em inox.

Os modelos de baixa pressão não podem ser pressurizados ou alimentados com água da rede pública. Os de Alta pressão são recomendados para sistemas pressurizados e instalações onde a caixa de água fria está muito elevada, no máximo quarenta metros.

BOILER VERTICAL DE NÍVEL



Modelo AVN

Os Boilers Vertical de Nível são indicados para instalações em que a caixa de água fria venha a trabalhar ao lado do boiler solar.

| Tambor interno em cobre ou aço inoxidável | | | | | Bitolas Hidrául. | | |
|---|-------|------|-------|-------|------------------|------|-------|
| CAPACID. | DIÂM. | ALT. | VOLTS | WATTS | ENTR. | SADA | SOLAR |
| AVN 200 | 800 | 610 | 220 | 3000 | 3/4" | 1" | 3/4" |
| AVN 300 | 870 | 750 | 220 | 3000 | 3/4" | 1" | 3/4" |
| AVN 400 | 970 | 750 | 220 | 3000 | 3/4" | 1" | 3/4" |
| AVN 500 | 1080 | 750 | 220 | 3000 | 3/4" | 1" | 3/4" |
| AVN 600 | 1080 | 910 | 220 | 3000 | 3/4" | 1" | 3/4" |

BOILER HORIZONTAL



Modelo BH

São fabricados boilers em aço inoxidável, 304, 306, cobre e aço carbono com pintura anticorrosiva em epoxi, a partir de 50 até 15.000 litros.

| Medidas em mm | | | | | | | | | | |
|---------------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|----------------|------|
| Litros | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 1000 | 2000 |
| Comprim | 1000 | 1200 | 1200 | 1600 | 1900 | 2300 | 2700 | 3000 | 3600 | 3800 |
| Altura | 500 | 500 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 900 |
| Watts | 3000w/220volts/monofásico | | | | | | | | 6000w/220volts | |
| Bitola Hid | 1" Polegada | | | | | | | | 1.1/2" | |

Pressão máxima de trabalho
Baixa pressão: Cobre (2mca); Inox (5mca)/ Alta pressão: 40mca

Figura 2.5. Boilers convencionais disponíveis no mercado, fonte: www.astrosol.com.br.

2.4.2. Alternativos

Os reservatórios térmicos alternativos estão muito pouco presentes na literatura, sendo geralmente confeccionados em plástico rígido ou em fibra de vidro. Por ser o elemento constituinte de um sistema de aquecimento solar de água de maior custo (alcançando valores em torno de R\$ 1.000,00 para um volume de 200 litros, que é o mais utilizado nas instalações residenciais de pequeno porte) são imprescindíveis as pesquisas que utilizem materiais alternativos para a diminuição do seu custo.

Tais materiais, porém têm que dotar o tambor térmico de baixa condutividade térmica, característica de um bom isolante térmico, imprescindível para a diminuição da perda térmica na água aquecida, principalmente para uso durante a noite e início da manhã, períodos críticos pela ausência ou baixo nível de radiação solar global.

(Souza 2006) construiu e testou outro reservatório alternativo que consistia de um tambor de polietileno utilizado para armazenamento de água ou lixo de 200 litros revestido por um cilindro fabricado em fibra de vidro, tendo no espaço entre o tambor e o cilindro externo, EPS triturado. O fundo do reservatório foi fabricado em material compósito e a tampa em fibra de vidro. A eficiência térmica do tambor alternativo era menor que os reservatórios convencionais.

Para o nível mais crítico que acontece durante a noite, a perda foi de 7,5°C, 50% maior que a obtida com os reservatórios convencionais, porém não inviabiliza o uso desse tipo de reservatório térmico proposto, uma vez que apesar desse aumento significativo, a perda foi baixa, exigindo apenas uma temperatura na água pelos coletores um pouco acima para a obtenção de um nível maior no interior do reservatório térmico. Ressalta-se, ainda, o preço do reservatório alternativo proposto, muito menor que os reservatórios convencionais.

No que diz respeito à resistência mecânica do reservatório alternativo proposto não se verificou danos à sua estrutura, demonstrando suportar o peso correspondente ao volume de água contido no reservatório. Não houve também ocorrência de vazamentos, o que atesta sua boa vedação, obtida através de resina ortoftálica.

2.5. A importância da análise e quantificação da degradação

Os resultados térmicos, obtidos com coletores que utilizam o plástico como elemento absorvedor de radiação solar, demonstram a viabilidade desses coletores. Porém para que este tipo de coletor possa ser competitivo em termos de mercado, é necessário um estudo acerca das degradações relativas ao tempo de vida útil deste referido protótipo.

Como já foi ressaltado o combate às degradações pode ser feito através da adição de estabilizadores e outros aditivos durante o processo de manufatura dos tubos. Entretanto o presente estudo optou pela utilização de tubos disponíveis comercialmente, com o percentual de cloro convencional, cerca de 57%, criando condições para torná-lo bom absorvedor térmico, sem conduzi-lo ao nível de degradação térmico e podendo também eliminar a degradação por UV através da utilização de uma grade absorvedora protegida da radiação.

(Souza 2002) demonstrou que as degradações térmicas e por UV fragilizam o material, e quantificou esses níveis de desgastes. Demonstrou as mudanças nas propriedades ocasionadas pela submissão das amostras a níveis de temperatura e radiação solar global, por vários períodos de tempo.

2.6. O cloreto de polivinila (PVC)

A seguir, far-se-á uma breve abordagem sobre o Cloreto de Polivinila, enfatizando suas principais características, as propriedades que são utilizadas para a sua caracterização e a forma como é obtido ([www. institutodopvc.com.br](http://www.institutodopvc.com.br)).

o cloreto de polivinila (PVC) é o mais usado componente da família vinila. Seu valor comercial resulta de várias características que podem ser traduzidas em duas palavras-chave: versatilidade e durabilidade.

Sua versatilidade se traduz pela utilização de seus produtos nas mais diversas finalidades, desde a condução de água fria e esgotos, até a impermeabilização de barragens. É importante destacar que na maioria dos casos, a utilização de componentes de PVC implica na diminuição do custo do sistema instalado e em todos os casos, a utilização desses componentes permite que o sistema tenha um bom desempenho ao longo de toda a sua vida útil, com manutenção de mais baixo custo.

Sua durabilidade está associada ao fato de que os componentes utilizados na construção civil têm vida útil superior a 20 anos e, em alguns casos a 50 anos. É importante notar que o PVC, por ser um plástico, não sofre corrosão. Além disso, os compostos de PVC utilizados na fabricação de componentes de construção civil trazem incorporados produtos, tais como antioxidantes estabilizantes ao ultravioleta, que permitem a manutenção de suas propriedades ao longo de toda a vida útil.

O PVC apresenta as seguintes características básicas:

1. É quimicamente inerte;
2. É resistente as intempéries (sol, maresia, chuva e vento);
3. É impermeável a gases e líquidos;
4. É bom isolador térmico, elétrico e acústico. Sua condutividade térmica fica na faixa entre 0,15 e 0,21 W/m.K;
5. Mantém as propriedades por longos períodos de tempo;
6. É leve o que facilita seu manuseio;
7. É resistente a ação de fungos, bactérias, insetos e roedores;
8. É durável: sua vida útil em construções é superior a 50 anos;
9. Não propaga chamas: é auto-extinguível, reciclável e reciclado e fabricado com baixo consumo de energia.

O PVC apresenta uma ampla versatilidade de processamento podendo ser obtido em uma ampla variedade de equipamentos, com cada forma podendo ser alterada mais adiante por componentes para alcançar propriedades particulares no produto final que varia das espécies mole para rígida.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Processos de construção, Montagem e Ensaio do sistema de aquecimento de água proposto.

O sistema de aquecimento construído é formado por um coletor solar plano e um reservatório térmico. O coletor do sistema de aquecimento solar apresenta áreas externa e interna de 1,50 m² e 1,30 m², respectivamente.

O protótipo estudado é constituído pelos cinco elementos usuais de um coletor solar convencional, quais sejam: cobertura transparente, chapa absorvedora, grade absorvedora, isolante térmico e caixa armazenadora.

A cobertura transparente é um vidro plano de 3,0 mm de espessura; a chapa absorvedora é uma chapa de alumínio de 0,5 mm ondulada com oito aletas; a grade absorvedora é formada por oito tubos de PVC com diâmetro externo de 20 mm, ligados em paralelo através de joelhos e conexões em tê do mesmo material e mesmo diâmetro; o isolante térmico utilizado foi a raspa de pneu e a caixa do coletor foi construída em compensado de 15 mm de espessura.

O processo de fabricação do *coletor aletado* é constituído pelas seguintes etapas:

1. Corte da chapa de alumínio utilizando tesoura;
2. Conformação da chapa para confecção das aletas, utilizando processo artesanal;
3. Corte dos tubos de PVC utilizando lâmina de serra;
4. Lixamento dos terminais dos tubos para fixação com cola;
5. Corte dos perfis de alumínio utilizados para fixação da grade absorvedora na chapa absorvedora através do uso de lâmina de serra;
6. Corte do compensado para a confecção das peças que constituíam a caixa do coletor, utilizando serra elétrica;
7. Corte do vidro de cobertura utilizando ferramenta de diamante;
8. Corte das placas de EPS para isolamento lateral da caixa.

O processo de montagem do *coletor* foi constituído pelas seguintes etapas:

1. Fixação dos tês e joelhos de PVC nos tubos utilizando cola;



Figura 3.1. União entre tubos e conexões de PVC.

2. Fixação dos segmentos de conexão entre os tubos da grade absorvedora;

3. Formação da grade absorvedora através da fixação dos elementos de conexão através de cola de PVC e colocação desta na placa absorvedora;



Figura 3.2. Formação da grade absorvedora.

4. Fixação da grade absorvedora na chapa absorvedora, alojando todos os tubos nas aletas, através da operação de rebiteamento dos perfis de alumínio de seção quadrada com 1,2 cm;



Figura 3.3. Fixação da grade absorvedora na chapa absorvedora.

5. Montagem da caixa do coletor utilizando pregos;



Figura 3.4. Montagem da caixa do coletor.

6. Colocação do isolante térmico no fundo e laterais da caixa do coletor;



Figura 3.5. Colocação do isolante térmico no fundo da caixa do coletor.

7. Pintura da grade e chapa absorvedoras e da caixa do coletor utilizando tinta esmalte sintético preto fosco;

8. Colocação da grade absorvedora na caixa do coletor;



Figura 3.6. Colocação da grade absorvedora na caixa do coletor.

9. Colocação do vidro de cobertura na caixa do coletor;

10. Colocação do coletor no suporte com inclinação de $15,5^{\circ}\text{S}$, de acordo com a latitude de Natal, correspondente a $5,5^{\circ}\text{S}$.

A Figura 3.7. Mostra o coletor montado, com todos os elementos constituintes.



Figura 3.7. Coletor para aquecimento de água montado.

Foram construídos dois reservatórios térmicos, um de 200 litros e outro de 100 litros de volume interno. O reservatório de 100 litros foi construído utilizando-se duas bombonas uma de 100 e outra de 200 litros, com a de 100 litros ficando colocada no interior da de 200 litros. No espaço entre as duas bombonas colocou-se bagaço da casca de coco na função de isolante térmico.

Os processos de fabricação e montagem do reservatório térmico de 100 litros (RT100) compreenderam as seguintes etapas:

1. Corte da tampa superior do tambor de polietileno de 200 litros, utilizado formão e martelo;
2. 4. Abertura dos furos para saída de água, para consumo e entrada de água proveniente do coletor, nas duas bombonas, utilizando serra copo;
3. Colocação do bagaço da casca de coco no fundo do reservatório de 200 litros;
4. Colocação do tambor de 100 litros no interior do tambor de 200 litros;
5. Montagem das conexões de entrada, saída e de consumo de água, com termopares instalados para a medida das temperaturas;
6. Colocação do isolamento térmico no espaço entre as duas bombonas;

7. Instalação da bóia de alimentação de água fria do reservatório;
8. Colocação da tampa do reservatório de 200 litros.

As Figuras a seguir mostram algumas das etapas dos processos de fabricação e montagem do RTA100. O reservatório térmico um (RTA100) proposto encontra-se mostrado na Figura 3.8.



Figura 3.8. Etapas da fabricação e montagem do RTA100.

O reservatório térmico construído apresenta baixo volume em função da não existência de uma bombona com volume superior a 200 litros que o acomodasse no seu interior, para

assim o volume do reservatório corresponder a 200 litros, volume de água quente capaz de suprir as necessidades diárias de uma família de quatro pessoas.

Em função dessa limitação de volume do reservatório construído, resolveu-se testá-lo para avaliar sua resistência térmica, porem partiu-se para utilização de um reservatório térmico também de 200 litros cujos processos de construção e montagem estão descritos a seguir.

O reservatório térmico dois (RTA 200) foi confeccionado a partir de um elemento base, um tambor de polietileno de 200 litros. O reservatório foi aberto em sua tampa superior e foi colocado no interior de um tambor confeccionado em fibra de vidro com espessura em torno de 5,0 mm. A tampa do reservatório foi construída em fibra de vidro. No espaço entre os dois elementos básicos, cilindro de fibra e tambor de polietileno foi colocado uma camada de EPS triturado.

O processo de fabricação do reservatório proposto compreendeu as seguintes etapas:

1. Corte da tampa superior do tambor de polietileno de 200 litros, utilizado como elemento base, através do uso de formão e martelo;
2. Colocação no fundo do tambor de tubulação para saída de água para os coletores;
3. Confeção do tambor de fibra de vidro que envolve o tambor de polietileno, utilizando molde de eucatex, através do processo hand-lay-up;
4. Abertura dos furos para saída de água para consumo e entrada de água proveniente do(s) coletor (es), utilizando serra copo;
5. Confeção da tampa do reservatório utilizando molde de compensado.

O processo de montagem do tambor reservatório proposto compreendeu as seguintes etapas:

1. Colocação de EPS triturado no fundo do tambor de fibra;
2. Abertura do furo no tambor de fibra para a passagem da tubulação do tambor de polietileno;
3. Colocação do reservatório de polietileno no tambor de fibra;
4. Colocação do EPS triturado no espaço entre os dois cilindros;
5. Colocação das conexões para retirada de água para consumo e entrada de água no reservatório proveniente do(s) coletor (es);

6. Colocação de espuma no espaço entre os dois cilindros na parte superior dos mesmos;

7. Colocação da tampa do reservatório térmico.

O reservatório térmico dois (RTA200) proposto encontra-se mostrado na Figura 3.9.



Figura 3.9. Reservatório térmico – RTA200.

O sistema de aquecimento foi ensaiado para duas configurações distintas: CONFIGURAÇÃO I – Com os tubos absorvedores voltados para cima e CONFIGURAÇÃO II - com os tubos voltados para baixo (Costa, 2007, Santos, 2008, Reis, 2009). A Figura 3.10 mostra as duas configurações testadas.

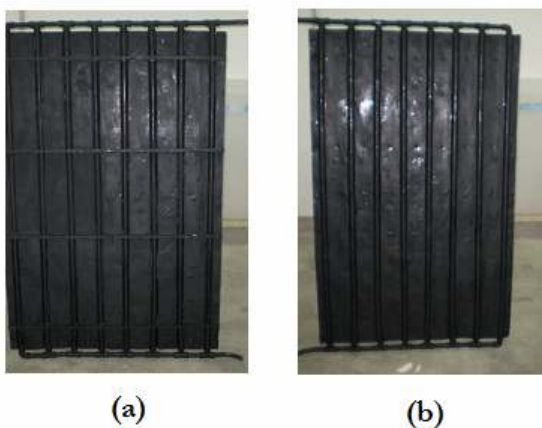


Figura 3.10. Configurações do conjunto absorvedor testado – (a) tubos para cima
(b) tubos para baixo

O sistema de aquecimento proposto funciona em regime de termossifão para um volume de água de 200 litros e foi ensaiado para a determinação de sua eficiência térmica. Foram medidos parâmetros que o caracterizam e são necessários para a análise do seu desempenho térmico. Foi também avaliada a susceptibilidade dos tubos de PVC, de atingirem o nível crítico para o início da degradação térmica em torno de 60 °C.

A inclinação em relação à horizontal dada aos coletores foi de 15,5° S isso em função da latitude do local, no caso de Natal, que é de 5,5° S.

Foram medidas as temperaturas de entrada e saída do fluido do coletor, as temperaturas da superfície superior da placa absorvedora, as temperaturas dos tubos absorvedores, as temperaturas da água contida no reservatório em vários pontos (fundo, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, topo) e radiação solar global.

As temperaturas de entrada e saída do fluido do fluido no interior do reservatório térmico foram medidas entre 8:00 e 15:00 horas, a cada de 30 minutos; as temperaturas da placa absorvedora foram medidas entre 11:00 e 13:00 horas, período de radiação máxima e constante, onde se avaliou a perda máxima apresentada pelo coletor. A temperatura final da água aquecida foi medida após as sete horas de funcionamento.

Os ensaios foram realizados em dias de boas condições solarimétricas, altos índices de radiação solar global e baixa nebulosidade para permitir uma análise comparativa mais real entre os vários dias de ensaio.

A susceptibilidade ao início do processo de degradação térmica pode ser estimada através dos níveis de temperatura alcançados pela superfície externa dos tubos absorvedores, que não devem alcançar 60°C.

A autonomia do sistema foi também avaliada no que diz respeito ao número de dias em que o sistema esteve apto para propiciar água quente na temperatura ideal de banho para uma residência com quatro pessoas.

Os banhos foram simulados às 07:00, 12:00 e 18:00 horas, retirando-se 40 litros de água quente do reservatório térmico de 150 litros, através de um registro localizado a $\frac{2}{3}$ de sua altura, a partir de sua base. Ressalte-se que a simulação dos banhos deu-se numa condição mais crítica do que a que ocorre na situação real, sem a mistura da água quente do reservatório com a água fria proveniente da rede.

Para testar a eficiência térmica, encheu-se o reservatório térmico alternativo e o interligou-se a um ou dois coletores em série propostos. Após um dia de funcionamento do sistema de aquecimento, às 15:00 horas, mediu-se a temperatura da água contida no reservatório, correspondente a 45°C e cortou-se a comunicação do mesmo com o coletor para evitar a troca térmica entre o reservatório e o coletor durante a noite.

Colocou-se um termopar de cromel-alumel no interior do reservatório térmico proposto para medir a temperatura da água, outro na superfície externa do mesmo para medir sua temperatura e outro para medir a temperatura ambiente. As temperaturas foram medidas utilizando um termômetro digital, com precisão de $\pm(0,1\% + 0,5^\circ\text{C})$.

O sistema de aquecimento proposto, nas suas duas configurações, encontra-se mostrado na Figura 3.11.



3.2. Desenvolvimento teórico

Os parâmetros que melhor caracterizam a eficiência térmica de um coletor solar são a eficiência térmica, a potência perdida e o coeficiente global de perdas.

3.2.1. Coeficiente global de perdas

A placa coletora após receber radiação se aquece, surgindo, em consequência, um gradiente de temperatura entre a mesma e o ar ambiente, fazendo com que parte da energia captada flua do coletor para a atmosfera, que se constitui nas perdas térmicas do coletor.

O parâmetro que engloba todas essas perdas é o Coeficiente Global de Perdas (U_{loss}), que pode ser determinado por três métodos distintos, quais sejam: Método da Perda Térmica, Método das Trocas Térmicas e Método da Inversão de Fluxo (**DUFFIE&BECKMAN, 1991, INCROPERA, 2003**). Nesse trabalho será usado o método da perda térmica (ou método da potência perdida) para a determinação do U_{loss} .

Este método consiste na determinação do Coeficiente Global de Perda Térmica através do conhecimento da potência incidente no coletor (P_{inc}) potência absorvida pelo coletor ($P_{abs.}$), potência transferida ao fluido de trabalho (P_u), temperatura média de placa (T_{mp}) e temperatura ambiente (T_a), da área do coletor (A), da vazão mássica (m), do calor específico do fluido (c_p) e da diferença de temperatura do fluido obtida no sistema (ΔT), (α_p) absorvidade da placa, (τ_v) transmissividade do vidro conforme as equações (3.2) a (3.6).

$$P_{inc} = I.A \quad (3.2)$$

$$P_{abs} = \tau_v . \alpha_p . I.A \quad (3.3)$$

$$P_u = \dot{m} . c_p . \Delta T \quad (3.4)$$

$$P_p = P_{abs} - P_u \quad (3.5)$$

$$U_{loss} = \frac{P_p}{A.(T_{mp}-T_a)} \quad (3.6)$$

3.2.1.2. Determinação da eficiência térmica

A eficiência térmica do coletor no sistema de aquecimento proposto, pode ser calculada pela equação (3.7).

$$\eta_t = \frac{P_u}{A . I} \quad (3.7)$$

Onde:

P_u = potência total útil transferida ao fluido de trabalho, em kW.

I = radiação solar global, em kW/m².

A = área do coletor (área exposta à radiação solar), em m².

\dot{m} = vazão mássica, em kg/s.

c_p = calor específico da água, em kJ/kg °C.

ΔT = gradiente de temperatura entre entrada e saída do fluido, em °C.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Neste capítulo serão avaliados os resultados dos ensaios para as duas configurações estudadas. Serão mostrados os dados gerais médios horários de cada dia e dados médios diários dos ensaios feitos para cada tipo de configuração.

4.1. Resultados de eficiência térmica do coletor estudado.

4.1.1. Configuração I – tubos absorvedores voltados para cima + RTA200

As Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os valores médios dos parâmetros medidos nos testes realizados com o sistema de aquecimento para a Configuração I.

Tabela 4.1. Dados do primeiro dia de ensaio – **configuração I**

| TEMPO (Hora) | T _{entrada} (°C) | T _{saida} (°C) | ΔT (°C) | I (kW/m ²) | η _t (%) |
|--------------|---------------------------|-------------------------|---------|------------------------|--------------------|
| 8:00 -9:00 | 27 | 39 | 12 | 0,65 | 44 |
| 9:00 -10:00 | 28 | 43,5 | 14,5 | 0,68 | 54 |
| 10:00 -11:00 | 30 | 45,5 | 15,5 | 0,7 | 52 |
| 11:00 -12:00 | 32,3 | 47,2 | 14,9 | 0,71 | 5 |
| 12:00 -13:00 | 34,3 | 47,3 | 13 | 0,7 | 44 |
| 13:00 -14:00 | 36,3 | 47,4 | 11,1 | 0,6 | 44 |
| 14:00 -15:00 | 37,8 | 47,3 | 9,5 | 0,55 | 41 |
| MÉDIA | | | 13,1 | 0,66 | 47 |

Tabela 4.2. Dados do segundo dia de ensaio - **configuração I**

| TEMPO (Hora) | T _{entrada} (°C) | T _{saida} (°C) | ΔT (°C) | I (kW/m ²) | η _t (%) |
|--------------|---------------------------|-------------------------|---------|------------------------|--------------------|
| 8:00 -9:00 | 27 | 40,1 | 13,1 | 0,65 | 48 |
| 9:00 -10:00 | 28 | 43,5 | 15,5 | 0,68 | 54 |
| 10:00 -11:00 | 30 | 46,5 | 16,5 | 0,72 | 54 |
| 11:00 -12:00 | 32 | 47,4 | 15,4 | 0,73 | 5 |
| 12:00 -13:00 | 34 | 47,1 | 13,1 | 0,73 | 43 |
| 13:00 -14:00 | 36 | 47,5 | 11,5 | 0,7 | 39 |
| 14:00 -15:00 | 37,5 | 47,4 | 9,9 | 0,65 | 36 |
| MÉDIA | | | 13,6 | 0,69 | 46 |

Tabela 4.3. Dados do terceiro dia de ensaio - **configuração I**

| TEMPO (Hora) | T_{entrada} (°C) | T_{saida} (°C) | ΔT (°C) | I (kW/m²) | η_t (%) |
|-------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 8:00 -9:00 | 27 | 40,2 | 13,2 | 0,65 | 48 |
| 9:00 -10:00 | 29,5 | 43,9 | 14,4 | 0,68 | 5 |
| 10:00 -11:00 | 31 | 47,5 | 16,5 | 0,72 | 54 |
| 11:00 -12:00 | 33,2 | 49,1 | 15,9 | 0,73 | 52 |
| 12:00 -13:00 | 35,1 | 49 | 13,9 | 0,73 | 45 |
| 13:00 -14:00 | 36,2 | 48,5 | 12,3 | 0,7 | 42 |
| 14:00 -15:00 | 38,1 | 47,3 | 9,2 | 0,65 | 34 |
| MÉDIA | | | 13,6 | 0,69 | 46 |

A Tabela 4.4 mostra os valores médios horários dos três dias de ensaios no reservatório para a Configuração I.

Tabela 4.4. Valores médios horários dos três dias de ensaios - configuração I.

| TEMPO (Hora) | T_{entrada} (°C) | T_{saida} (°C) | ΔT (°C) | I (kW/m²) | η_t (%) |
|-------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 8:00 -9:00 | 27 | 39,8 | 12,8 | 0,65 | 49 |
| 9:00 -10:00 | 28,5 | 43,6 | 15,2 | 0,7 | 53 |
| 10:00 -11:00 | 30,3 | 46,5 | 16,2 | 0,71 | 53,3 |
| 11:00 -12:00 | 32,5 | 47,9 | 15,4 | 0,72 | 50,7 |
| 12:00 -13:00 | 34,4 | 47,8 | 13,3 | 0,72 | 44 |
| 13:00 -14:00 | 36,1 | 47,8 | 11,6 | 0,67 | 41,7 |
| 14:00 -15:00 | 37,8 | 47,3 | 9,5 | 0,62 | 37 |
| MÉDIA | | | 13,4 | 0,68 | 46,2 |

Os gráficos das Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 mostram o comportamento assumido pelas médias dos parâmetros médios medidos durante os ensaios realizados com a Configuração I.

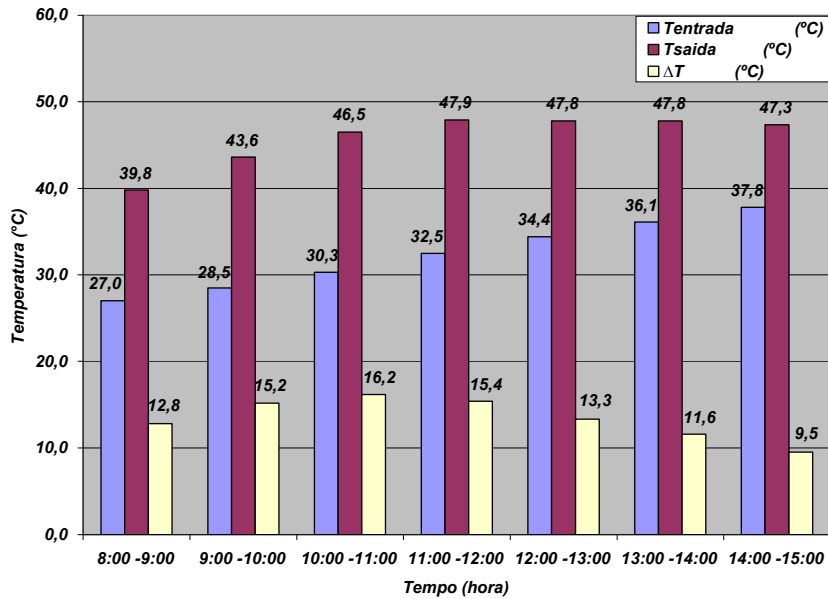
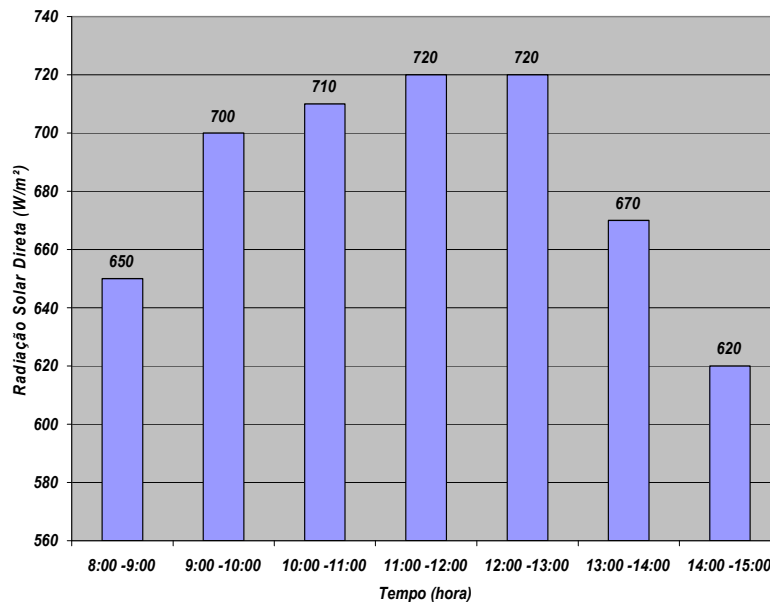


Figura 4.1. Comportamento assumido pelas médias horárias das temperaturas de entrada do coletor e saída e da diferença de temperatura no coletor - configuração I.



Figuras 4.2. Comportamento assumido pelas médias horárias radiação solar global - configuração I.

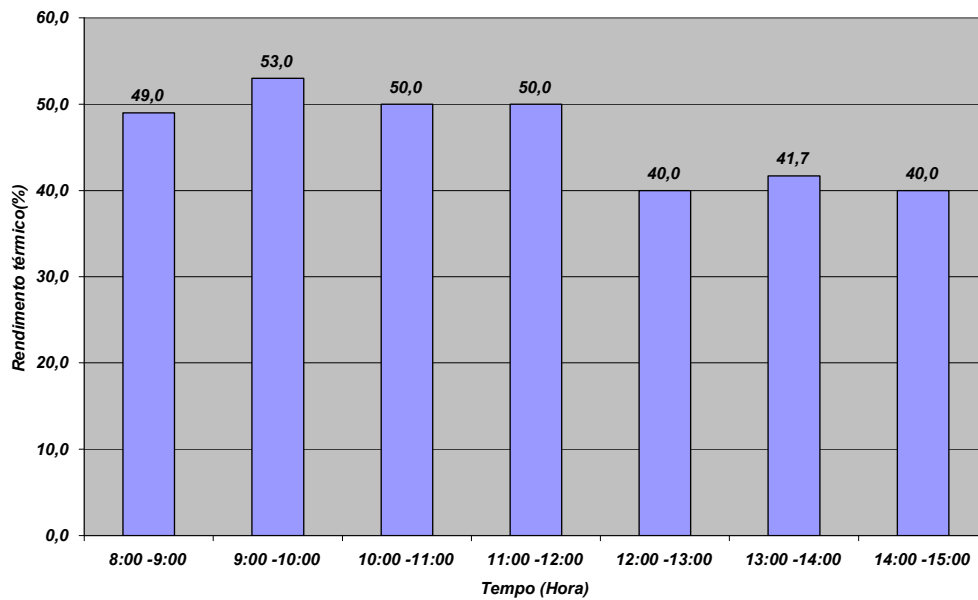


Figura 4.3. Comportamento assumido pelas médias horárias da eficiência térmica - configuração I.

A Tabela 4.5 mostra os resultados médios gerais obtidos para os três dias de ensaios no coletor para a configuração I.

Tabela 4.5. Resultados médios gerais obtidos para os três dias de ensaios - configuração I.

| <i>DIAS DE ENSAIO</i> | ΔT (°C) | <i>I</i> (kW/m²) | η_t (%) |
|------------------------------|---------------------------------------|--|------------------------------------|
| <i>DIA 1</i> | <i>13,1</i> | <i>0,66</i> | <i>47</i> |
| <i>DIA 2</i> | <i>13,6</i> | <i>0,69</i> | <i>46</i> |
| <i>DIA 3</i> | <i>13,6</i> | <i>0,69</i> | <i>46</i> |
| <i>MÉDIA</i> | <i>13,4</i> | <i>0,68</i> | <i>46,3</i> |

O gráfico da Figura 4.4 mostra o comportamento médio diário assumido pelos parâmetros medidos durante os ensaios com a configuração I.

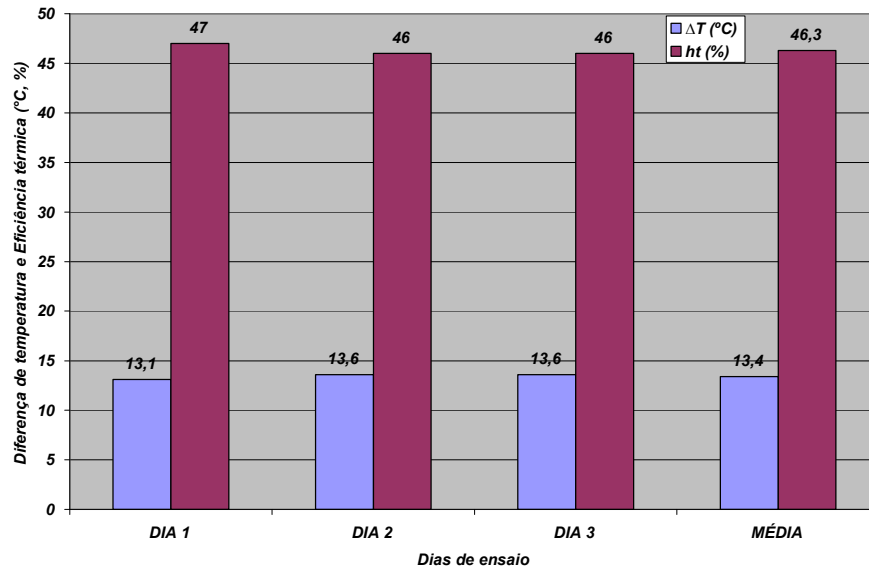


Figura 4.4. Comportamento médio diário assumido pelos parâmetros medidos durante os ensaios - **configuração I**.

Os dados das tabelas mostram que a temperatura de saída do coletor sempre esteve acima dos 40°C, sendo a maior média horária registrada de 49,1 °C. A temperatura de entrada no coletor, no início dos testes, sempre esteve praticamente igual à temperatura ambiente.

A eficiência média do coletor nesta configuração ficou em torno de 46,3%, abaixo em relação aos coletores convencionais (com eficiência superior a 55%), porém superior a maioria dos coletores alternativos, com eficiência térmica em torno de 30 a 35%.

A média da radiação solar global para todos os dias ensaiados esteve em torno de 680 W/m², demonstrando-se a escolha correta para o ensaio comparativo entre as configurações. Foram escolhidos dias de baixa ou ausência de nebulosidade para a caracterização de condições solarimétricas próximas para todos os dias de ensaio.

A Tabela 4.6 apresenta os níveis de temperatura da água aquecida em vários pontos do reservatório para cada dia de ensaio.

Tabela 4.6. Níveis de temperatura da água aquecida em vários pontos do reservatório para cada dia de ensaio - configuração I.

| DIAS DE ENSAIO | T_{baixo} (°C) | T_{1/4} (°C) | T_{1/2} (°C) | T_{3/4} (°C) | T_{cima} (°C) |
|-----------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| DIA 1 | 38,7 | 39,2 | 40,5 | 41,5 | 41,8 |
| DIA 2 | 38,5 | 39,1 | 41,2 | 42,2 | 42,5 |
| DIA 3 | 38,8 | 40,4 | 42,2 | 42,9 | 43 |
| MÉDIA | 38,7 | 39,6 | 41,3 | 42,3 | 42,3 |

$$T_{\text{média}} = 40,8^{\circ}\text{C}$$

O gráfico da Figura 4.5 mostra o comportamento médio dos níveis de temperatura no interior do reservatório térmico do sistema de aquecimento estudado para os dias de ensaios realizados.

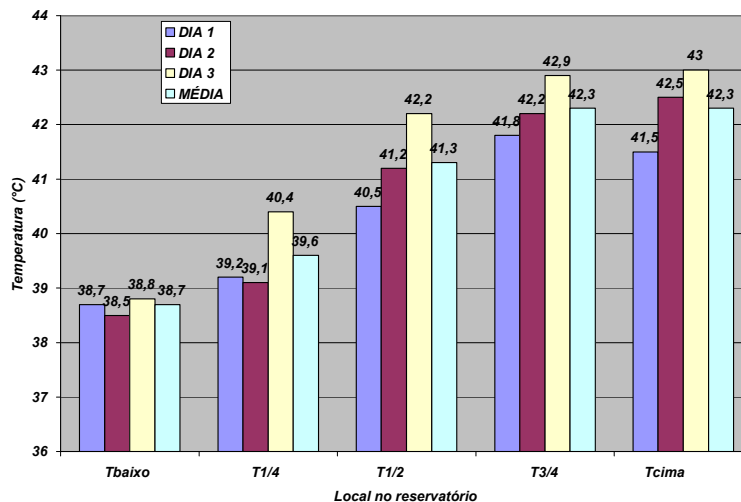


Figura 4.5. Comportamento médio dos níveis de temperatura no interior do reservatório térmico para os dias de ensaios realizados - configuração I

O sistema foi capaz de propiciar água quente no final do dia, com temperatura em média de $4,0^{\circ}\text{C}$ acima da temperatura considerada ideal para o banho, que é de 36°C demonstrando assim ser possível em 1(dia) funcionamento, atingir o seu objetivo, mesmo tendo uma eficiência térmica inferior em relação aos coletores convencionais e apesar de estar sendo ensaiado em um período de temperatura ambiente inferior, altos índices de

umidade relativa e condições solarimétricas inferiores as registradas na estação de verão convencional.

Em todos os pontos do reservatório térmico obtiveram-se níveis de temperatura acima da temperatura exigida para o banho, entre 34 e 36°C. A diferença entre o nível de temperatura mais elevado, na parte de cima do reservatório e o menor, na parte de baixa, correspondeu a 8,6% o que demonstra que quase toda água contida no tambor esteve perto da uniformidade pretendida.

4.1.2 Configuração II – tubos absorvedores voltados para baixo + RTA200

As Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8 apresentam os valores médios dos parâmetros medidos nos testes realizados com o sistema de aquecimento para a configuração II.

Tabela 4.6. Dados do primeiro dia de ensaio - configuração II

| TEMPO (Hora) | T_{entrada} (°C) | T_{saida} (°C) | ΔT (°C) | I (kW/m²) | η_t (%) |
|-------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 8:00 -9:00 | 27,6 | 37,1 | 9,5 | 0,6 | 38 |
| 9:00 -10:00 | 27,9 | 39,9 | 12 | 0,65 | 44 |
| 10:00 -11:00 | 29,2 | 41,2 | 12 | 0,69 | 41 |
| 11:00 -12:00 | 29,7 | 41,9 | 12,2 | 0,7 | 41 |
| 12:00 -13:00 | 31,9 | 42,9 | 10,9 | 0,7 | 37 |
| 13:00 -14:00 | 35,2 | 44,9 | 9,7 | 0,67 | 34 |
| 14:00 -15:00 | 38 | 43 | 5 | 0,6 | 2 |
| MÉDIA | | | 10,20 | 0,66 | 36 |

Tabela 4.7. Dados do segundo dia de ensaio - configuração II (25/03)

| TEMPO (Hora) | T_{entrada} (°C) | T_{saida} (°C) | ΔT (°C) | I (kW/m²) | η_t (%) |
|-------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 8:00 -9:00 | 26,9 | 37,3 | 10,30 | 0,60 | 41 |
| 9:00 -10:00 | 28,2 | 38,4 | 10,20 | 0,62 | 39 |
| 10:00 -11:00 | 29,9 | 39,2 | 9,30 | 0,65 | 34 |
| 11:00 -12:00 | 30,9 | 42,0 | 11,10 | 0,68 | 39 |
| 12:00 -13:00 | 31,8 | 42,0 | 10,20 | 0,70 | 35 |
| 13:00 -14:00 | 34,2 | 43,5 | 9,30 | 0,66 | 34 |
| 14:00 -15:00 | 36,0 | 43,0 | 7,00 | 0,60 | 28 |
| MÉDIA | | | 9,63 | 0,64 | 36 |

Tabela 4.8. Dados do terceiro dia de ensaio - configuração II

| TEMPO (Hora) | T_{entrada} (°C) | T_{saida} (°C) | ΔT (°C) | I (kW/(m²)) | η_t (%) |
|-------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 8:00 -9:00 | 27,0 | 37,0 | 10,00 | 0,61 | 39 |
| 9:00 -10:00 | 28,0 | 39,4 | 11,40 | 0,70 | 39 |
| 10:00 -11:00 | 30,0 | 40,8 | 10,80 | 0,71 | 36 |
| 11:00 -12:00 | 31,0 | 41,3 | 10,30 | 0,71 | 34 |
| 12:00 -13:00 | 32,0 | 42,6 | 10,60 | 0,70 | 36 |
| 13:00 -14:00 | 33,1 | 43,0 | 9,90 | 0,67 | 35 |
| 14:00 -15:00 | 35,2 | 44,1 | 8,90 | 0,63 | 33 |
| MÉDIA | | | 10,27 | 0,68 | 36 |

A Tabela 4.9 mostra os valores médios horários dos três dias de ensaios para a configuração II.

Tabela 4.9. Valores médios horários dos três dias de ensaios - configuração II.

| TEMPO (Hora) | T _{entrada} (°C) | T _{saida} (°C) | ΔT (°C) | I (kW/m ²) | η_t (%) |
|--------------|---------------------------|-------------------------|-----------------|------------------------|--------------|
| 8:00 -9:00 | 27,17 | 37,13 | 9,93 | 0,603 | 0,393 |
| 9:00 -10:00 | 27,93 | 39,73 | 11,8 | 0,663 | 0,401 |
| 10:00 -11:00 | 29,7 | 40,4 | 10,7 | 0,683 | 0,37 |
| 11:00 -12:00 | 30,53 | 41,73 | 11,2 | 0,697 | 0,38 |
| 12:00 -13:00 | 31,9 | 42,5 | 10,57 | 0,7 | 0,36 |
| 13:00 -14:00 | 34,17 | 43,8 | 9,63 | 0,667 | 0,343 |
| 14:00 -15:00 | 36,4 | 43,37 | 6,97 | 0,61 | 0,27 |
| MÉDIA | | | 10 | 0,66 | 35,7 |

Os gráficos das Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 mostram o comportamento assumido pelas médias dos parâmetros médios medidos durante os ensaios realizados com a configuração II

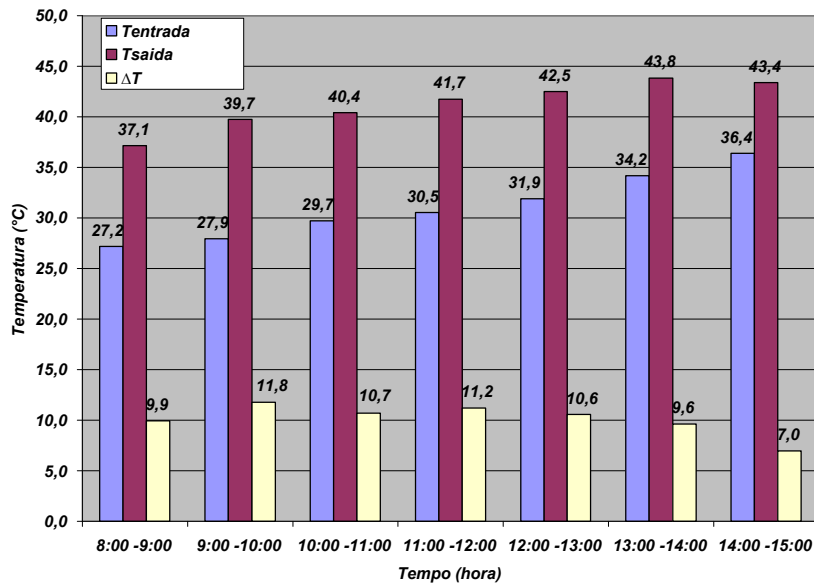


Figura 4.6. Comportamento assumido pelas médias horárias das temperaturas de entrada e saída e da diferença de temperatura no coletor - configuração II.

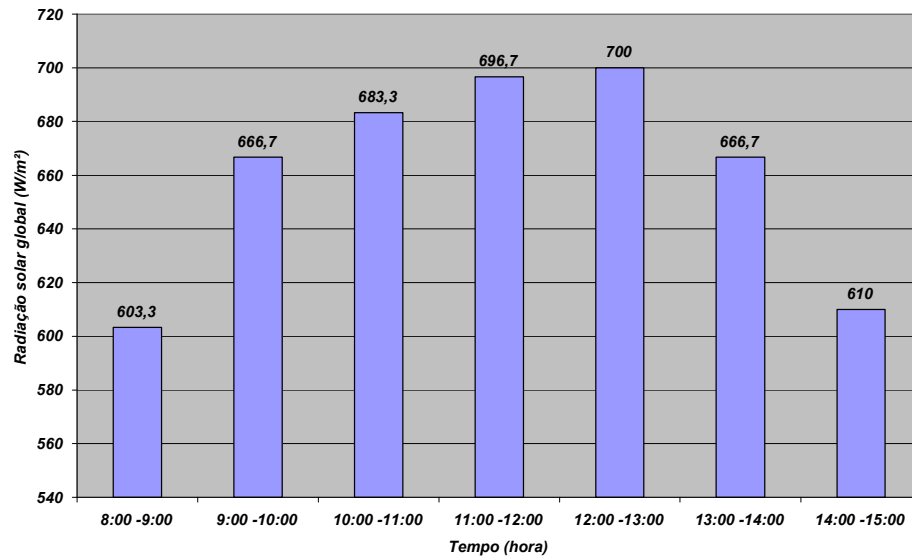


Figura 4.7. Comportamento assumido pelas médias horárias radiação solar global - configuração II.

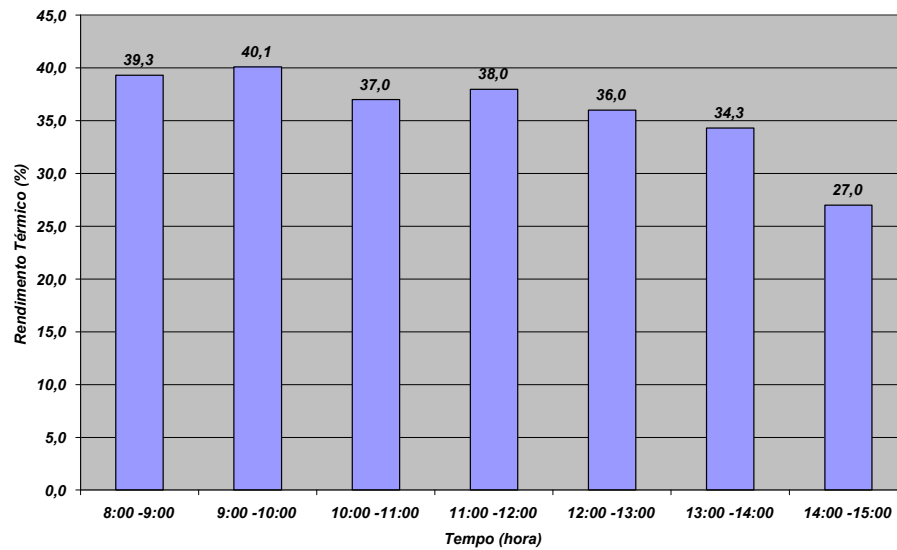


Figura 4.8. Comportamento assumido pelas médias horárias da eficiência térmica - configuração II.

A Tabela 4.10 mostra os resultados médios gerais obtidos para os três dias de ensaios no coletor para a configuração II.

Tabela 4.10. Resultados médios gerais obtidos para os três dias de ensaios - configuração II.

| DIAS DE ENSAIO | ΔT (°C) | I (kW/m ²) | η_t (%) |
|-----------------------|--------------------|---------------------------|-----------------|
| DIA 1 | 10,2 | 0,66 | 36 |
| DIA 2 | 9,6 | 0,64 | 35 |
| DIA 3 | 10,3 | 0,68 | 36 |
| MÉDIA | 10 | 0,66 | 35,7 |

O gráfico da Figura 4.9 mostra o comportamento médio diário assumido pelos parâmetros medidos durante os ensaios com a configuração II.

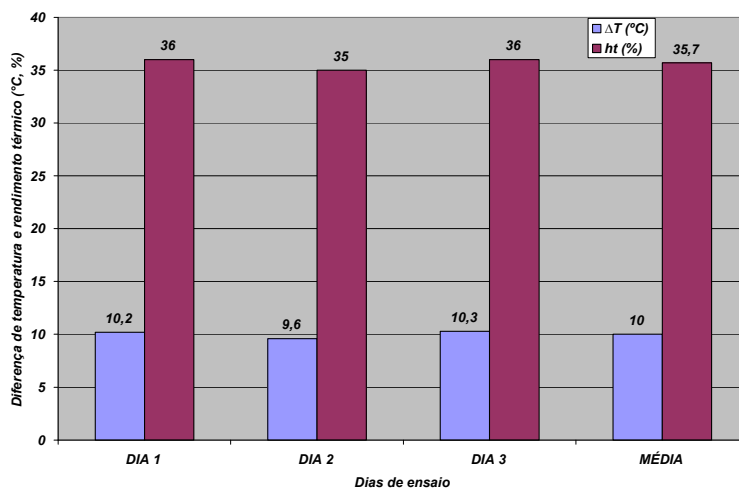


Figura 4.9. Comportamento médio diário assumido pelos parâmetros medidos durante os ensaios - configuração II.

Os dados das tabelas mostram que a temperatura de saída do coletor sempre esteve acima dos 37°C, sendo a maior média horária registrada de 43,8 °C.

A eficiência média do coletor nesta ficou em torno de 35,7%, dentro da faixa correspondente aos coletores alternativos, com eficiência térmica em torno de 30 a 35%.

A média da radiação solar global para todos os dias ensaiados esteve em torno de 660 w/m². Foram escolhidos dias de baixa ou ausência de nebulosidade para a caracterização de condições solarimétricas próximas para todos os dias de ensaio.

A Tabela 4.11 apresenta os níveis de temperatura da água aquecida em vários pontos do reservatório para cada dia de ensaio.

Tabela 4.11. Níveis de temperatura média em vários pontos do reservatório térmico para cada dia de ensaio - configuração II

| <i>DIAS DE ENSAIO</i> | T_{baixo} (°C) | T_{1/4} (°C) | T_{1/2} (°C) | T_{3/4} (°C) | T_{cima} (°C) |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| <i>DIA 1</i> | 36 | 37 | 38,5 | 39,4 | 40,3 |
| <i>DIA 2</i> | 35,5 | 36,5 | 38,2 | 39 | 39,5 |
| <i>DIA 3</i> | 36,5 | 38,4 | 39,6 | 40,2 | 40,7 |
| <i>MÉDIA</i> | 36 | 37,3 | 38,8 | 39,6 | 40,2 |

$$T_{\text{média}} = 38,4^{\circ}\text{C}$$

O gráfico da Figura 4.10 mostra o comportamento médio dos níveis de temperatura no interior do reservatório térmico – configuração II.

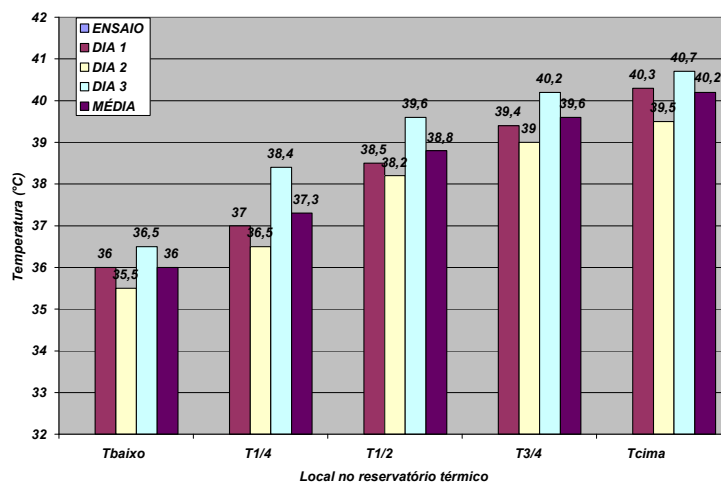


Figura 4.10. Comportamento médio dos níveis de temperatura no interior do reservatório térmico para os dias de ensaios realizados - configuração II.

O sistema foi capaz de propiciar água quente no final do dia, com temperatura em média de 2,0 a 4,0°C C acima da temperatura considerada ideal para o banho, que está na faixa entre 34 e 36°C, demonstrando assim ser possível em 1(um) dia funcionamento, atingir o seu objetivo, mesmo tendo uma baixa eficiência térmica em relação aos coletores convencionais.

No que diz respeito aos níveis de temperatura medida em vários pontos do reservatório térmico, percebe-se que estiveram acima dos níveis médios exigidos para o banho, entre 34 e 36°C. A diferença entre o nível de temperatura mais elevado, na parte de cima do reservatório e o menor, na parte de baixa, correspondeu a 10,5%, o que demonstra que quase toda água contida no tambor esteve perto da uniformidade pretendida.

4.1. Resultados de perda térmica para determinação da eficiência térmica do coletor estudado.

4.2.1. Perda térmica – CONFIGURAÇÃO I

Para avaliar a perda térmica do coletor solar foram medidos os níveis de temperatura de parâmetros inerentes a esse processo, que se encontram mostrados em seus valores médios nas Figuras 4.11 para a configuração I.

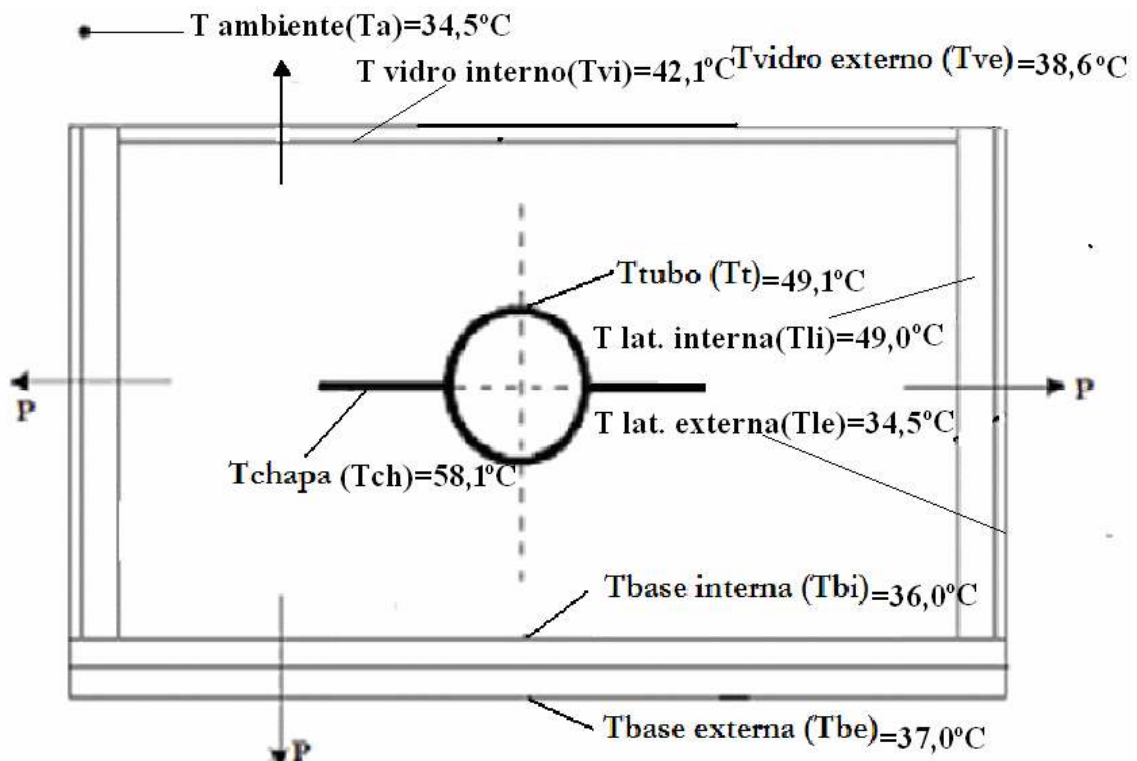


Figura 4.11. Parâmetros de perda térmica – configuração I.

Utilizando os valores contidos na Figura 4.11 calculou-se a perda térmica correspondente ao coletor, através do procedimento mostrado abaixo, obtendo-se o valor correspondente a 8,1 W/m².K.

$$P_{inc} = I.A = 700.1,3 = 910,0Watts$$

$$P_{abs} = \tau_v.\alpha_p.I.A = 0,85.0,9.700.1,3 = 696,7 Watts$$

$$P_u = \dot{m}.c_p.\Delta T = 33.15 = 495 Watts$$

$$P_p = P_{abs} - P_u = 696,1 - 495 = 201,1 Watts$$

$$U_{loss} = \frac{P_p}{A.(T_{mp}-T_a)} = \frac{293,5}{1,3.(53,6 - 34,5)} = 8,1 W / m^2 .K$$

Esse valor está abaixo do limite superior de perda térmica para os coletores convencionais, em torno de 12 W/m².K, o que demonstra a boa eficiência do isolamento térmico empregado. Esse resultado mostra que a raspa de pneu pode ser empregada como isolante térmico em coletores solares, representando uma opção ecologicamente correta para a substituição da lã de vidro, elemento isolante geralmente empregado.

4.2.2. Perda térmica – CONFIGURAÇÃO II

Para a determinação da perda térmica da configuração II foram utilizados os parâmetros mostrados na Figura 4.12.

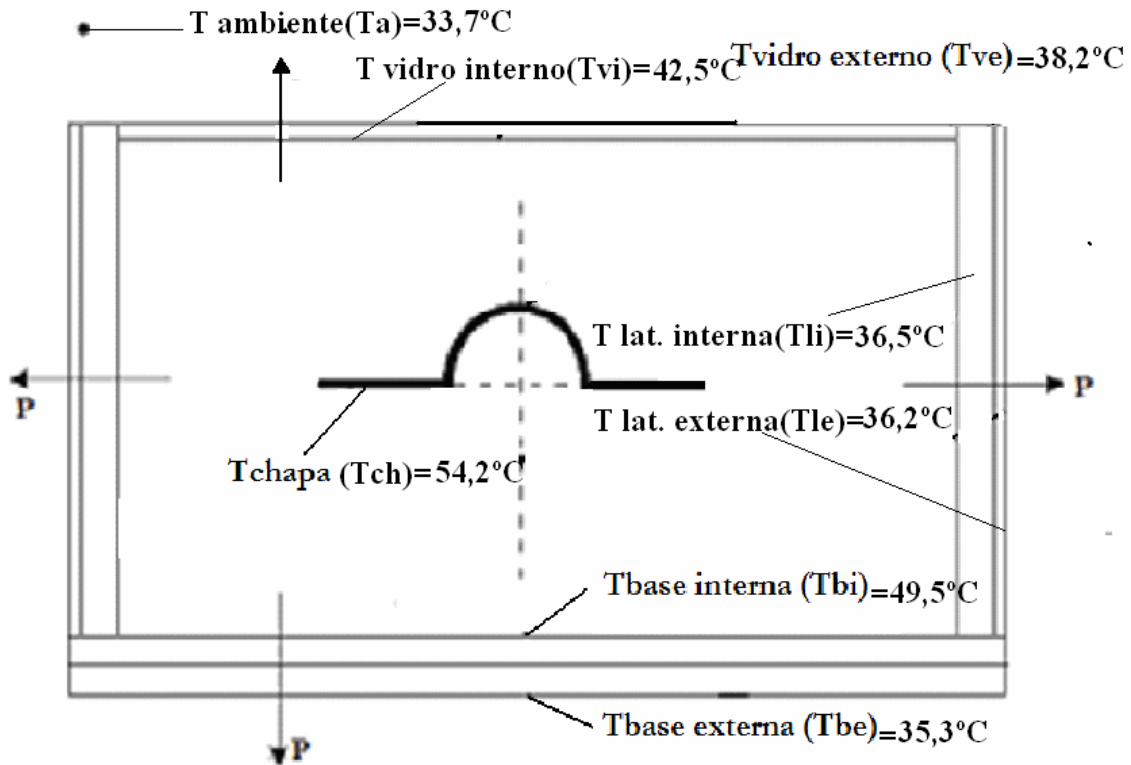


Figura 4.12. Parâmetros de perda térmica – configuração II.

Utilizando os valores contidos na Figura 4.13 calculou-se a perda térmica correspondente ao coletor, através do procedimento mostrado abaixo, obtendo-se o valor correspondente a $10,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

$$P_{inc} = I \cdot A = 700 \cdot 1,3 = 910,0 \text{ Watts}$$

$$P_{abs} = \tau_v \cdot \alpha_p \cdot I \cdot A = 0,85 \cdot 0,9 \cdot 700 \cdot 1,3 = 696,7 \text{ Watts}$$

$$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = 33 \cdot 12,2 = 402,6 \text{ Watts}$$

$$P_p = P_{abs} - P_u = 696,1 - 402,6 = 293,5 \text{ Watts}$$

$$U_{loss} = \frac{P_p}{A \cdot (T_{mp} - T_a)} = \frac{293,5}{1,3 \cdot (56,1 - 33,7)} = 10,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

O valor encontrado está dentro do limite superior de perda térmica para os coletores convencionais, em torno de 12 W/m².K, o que demonstra a boa eficiência do isolamento térmico empregado.

Os valores médios e máximos da temperatura da superfície externa dos tubos absorvedores de PVC, 49,0°C e 55,2°C estiveram bem abaixo da temperatura para início da degradação térmica, em torno de 60°C, o que demonstra que é viável a utilização de tubos de PVC como elementos absorvedores em coletores solares.

4.3. Comparação entre as duas configurações estudadas

As Tabelas 4.12 e 4.13 mostram os resultados médios obtidos para cada configuração estudada no que diz respeito aos parâmetros medidos e calculados para o diagnóstico comparativo entre as duas configurações estudadas.

Tabela 4.12. Resultados médios gerais para os dias de ensaio de cada configuração.

| CONFIGURAÇÃO | ΔT (°C) | I (kW/m²) | η_t (%) | U_{loss} (W/m².K) |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|--|
| TUBOS PARA CIMA + RTA200 | 13,4 | 0,68 | 46,3 | 8,1 |
| TUBOS PARA BAIXO + RTA200 | 10,0 | 0,66 | 35,7 | 10,1 |
| DIFERENÇA | 25,40% | 3,0% | 23,0% | 25% |

A configuração que apresentou um melhor desempenho com relação a esses parâmetros foi a I, com os tubos voltados para cima, como já era esperado, uma vez que nessa posição os tubos recebem energia diretamente dos raios solares incidentes no coletor. Na configuração II os tubos são aquecidos secundariamente por condução.

No que diz respeito à diferença de temperatura gerada no coletor a configuração I foi 25,4% mais eficiente, para uma diferença de radiação de apenas 20 watts/m², equivalente a 3,0%. A eficiência térmica da configuração I foi cerca de 30.0% mais eficiente e a perda térmica das duas configurações foi praticamente igual.

4.13. Resultados médios gerais das temperaturas da água no reservatório para cada configuração estudada.

| CONFIGURAÇÃO | T_{baixo} (°C) | T_{1/4} (°C) | T_{1/2} (°C) | T_{3/4} (°C) | T_{cima} (°C) | T_{média} (°C) |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| TUBOS PARA CIMA + RTA200 | 38,7 | 39,6 | 41,3 | 42,3 | 42,3 | 40,8 |
| TUBOS PARA BAIXO + RTA200 | 36 | 37,3 | 38,8 | 39,6 | 40,2 | 38,4 |
| DIFERENÇA | 7,00% | 5,80% | 6,00% | 6,40% | 5,00% | 5,90% |

Com relação aos níveis de temperatura no reservatório a uniformidade pretendida, T_{cima} igual a T_{baixo} , esteve próxima de ser alcançada para as duas configurações, porém as temperaturas da água nos vários pontos medidos para a configuração I foram superiores as obtidas com a Configuração II

Para uma maior garantia de fornecimento de água quente, com uma maior segurança na autonomia, recomenda-se a utilização da configuração I pela maior eficiência apresentada pelo sistema.

A Figura 4.13 mostra a estratificação dos níveis de temperatura medidos no reservatório térmico para as duas configurações estudadas.

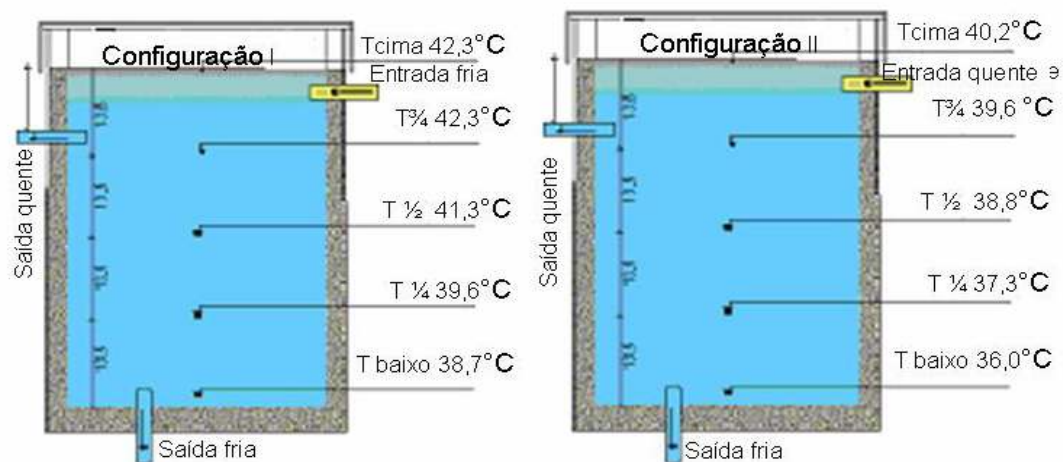


Figura 4.13. Estratificação no reservatório térmico dos níveis de temperatura medidos – configurações I e II.

4.4. Perda térmica do reservatório térmico – RTA200

Os resultados do teste para avaliar a eficiência térmica do reservatório térmico foram realizados por Santos, 2008 e encontram-se apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15. Resultados do teste realizado com o RT200

| TEMPO (HORA) | Táguia (°C) | Tambiente (°C) | Treserv. cima(°C) | Treserv. meio(°C) | Treserv. baixo(°C) |
|--------------|-------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 18:00 | 45 | 26 | 27 | 27,5 | 28 |
| 20:00 | 44,2 | 25,5 | 25,1 | 25,6 | 26,2 |
| 22:00 | 43,5 | 25 | 25,1 | 25,6 | 25,6 |
| 00:00 | 42,9 | 25 | 25,1 | 25,2 | 25,6 |
| 02:00 | 42,5 | 24,9 | 24,9 | 25,5 | 25,6 |
| 04:00 | 41,8 | 25 | 25 | 25,4 | 25,5 |
| 06:00 | 40,9 | 27,7 | 28 | 30,4 | 28,7 |
| 07:00 | 40,6 | 28,4 | 28,8 | 29,6 | 28,4 |
| 09:00 | 40,1 | 31,8 | 36 | 36,8 | 32,3 |
| 11:00 | 40,1 | 31,9 | 38,5 | 35,5 | 33,7 |
| 13:00 | 40,1 | 32 | 38 | 36 | 34,5 |
| 15:00 | 40,8 | 31,4 | 37 | 35 | 34 |
| 16:00 | 40,7 | 30 | 35 | 33 | 32 |

Os dados mostrados demonstram a boa eficiência térmica do reservatório térmico proposto. Houve uma queda de temperatura, durante as 24 horas, correspondente a 4,7°C, dentro da média apontada pela literatura para reservatórios térmicos convencionais, de cobre ou inox, que apresentam valores inferiores a 5°C para o nível de temperatura testado. Ressalta-se, ainda, o preço do reservatório proposto, muito menor que os reservatórios convencionais.

No que diz respeito à resistência mecânica do reservatório alternativo proposto não se verificou danos à sua estrutura, demonstrando suportar o peso correspondente ao volume de água contido no reservatório. Não houve também ocorrência de vazamentos, o que atesta sua boa vedação, obtida através de resina ortoftálica.

4.5. Custos do sistema de aquecimento

A Tabela 4.16 apresenta os materiais utilizados na fabricação do coletor. O custo de fabricação do coletor por m² ficou em torno de R\$ 208,00 (US\$ 115.6).

Tabela 4.16. Custo dos materiais utilizados na montagem do coletor.

| MATERIAL | UNID. | QUANT. | CUSTO UNIT.(R\$) | CUSTO TOTAL (R\$) | CUSTO TOTAL (S\$) |
|---------------------|----------------|--------|------------------|-------------------|-------------------|
| Tubos PVC ½" | m | 15 | 1,2 | 18 | 10 |
| Chapa de alumínio | m ² | 1 | 20 | 20 | 11,1 |
| Conexões PVC | Unid. | 20 | 0,5 | 10 | 5,6 |
| Cola PVC | Unid. | 1 | 2 | 2 | 1,1 |
| Madeirit | unid. | 1 | 80 | 80 | 44,4 |
| Folha de EPS | unid. | 1 | 3 | 3 | 1,7 |
| Esmalte preto fosco | litros | 1 | 10 | 15 | 8,3 |
| Vidro transparente | m ² | 1,5 | 60 | 60 | 33,3 |
| | | | TOTAL | 208 | 115,5 |

O custo de fabricação dos reservatórios térmicos **RTA200** e **RTA100** ficou em torno de R\$ 200,00 (Santos, 2008) e o custo de fabricação do sistema ficou, portanto, abaixo de R\$ 500,00, correspondente a US\$ 277.00.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com base nos objetivos definidos serão apresentadas as conclusões a seguir, bem como algumas sugestões para possíveis trabalhos futuros, de modo a torná-los mais eficientes e competitivos com demais tipos de coletores.

5.1. CONCLUSÕES

1. O sistema solar de aquecimento demonstrou-se viável para o aquecimento residencial de água destinada ao banho, para uma família de quatro pessoas, devendo ter o banheiro dupla tubulação, uma para água fria e outra para água quente. Seu custo de fabricação ficou abaixo de R\$500,00 (US\$277.00), menor que os coletores convencionais comercialmente disponíveis;

2. O sistema mostrou-se de fácil fabricação e montagem, apresentando baixo peso e facilidade no manuseio do coletor;

3. O coletor solar alternativo em suas duas configurações estudadas apresentou eficiência térmica superior a dos coletores alternativos mostrados pela literatura, em torno de 20 a 35%, e a configuração I apresentou eficiência térmica competitiva com alguns coletores convencionais;

4. Dentre as configurações estudadas a **configuração I** mostrou-se mais viável por apresentar superioridade em relação aos parâmetros medidos e calculados;

5. Apesar de apresentar resultados inferiores a **configuração II** também pode ser utilizada para a obtenção de água quente para banho residencial;

6. O reservatório térmico utilizado mostrou-se viável para ser utilizado em sistemas de aquecimento, por apresentar um nível de perda térmica próximo aos reservatórios convencionais e um baixo custo;

7. O sistema solar de aquecimento apresentou uma significativa taxa de aquecimento, pois a temperatura no fundo do tambor esteve próxima da temperatura do nível superior, aproximando-se da obtenção de uma temperatura uniforme em toda massa líquida, ideal para um sistema de aquecimento;

8. A temperatura da superfície externa dos tubos de PVC esteve abaixo do nível crítico para início do processo de degradação térmica. No que diz respeito à degradação por UV tal efeito é amenizado pela tinta preto fosco que recobre os tubos absorvedores, que contém pigmentos pretos absorvedores de radiação ultravioleta;

9. A perda térmica do coletor estudado esteve muito próxima do limite máxima para os coletores convencionais, em torno de $12\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$, o que demonstra a eficiência dos isolantes térmicos empregados;

10. O sistema de aquecimento apresentou uma significativa autonomia, podendo ser aumentada com a construção de um coletor de maior área ou mesmo com a utilização de outro coletor em série. Poder-se-ia estudar também a ligação em paralelo para uma melhor taxa de aquecimento, sem aumentar significativamente o custo do sistema, uma vez que o custo das placas é baixo.

5.2. SUGESTÕES

1. É imprescindível que se instale o sistema em um banheiro, com bóia de alimentação do reservatório térmico e ligação do coletor ao ponto de banho. Faz-se necessário também a introdução de alguns acessórios (registros, bóias, válvulas de retenção);

2. É necessário se fazer testes por um período mais longo para verificar a sua durabilidade e resistência às intempéries e assim confirmar sua competitividade com coletores disponíveis no mercado;

3. Para testar o sistema de aquecimento na situação real, é importante a realização de testes para simulação de banho, que não foram operacionalizados em função das condições solarimétricas inadequadas durante o período de ensaios.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COSTA, R.N.A., **viabilidades térmica, econômica e de materiais de um sistema solar de aquecimento de água a baixo custo para fins residenciais**, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFRN, 2007.

CRISTOFARI, C. Et al., *Modeling and performance of a copolymer solar water heating collector*, Solar Energy, v. 72: (2), p. 99-112, 2002.

DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, II edition, New York, John & Sons, 757 p.,1991.

FASULO. A, at al. *El uso del policarbonato em dispositivos solares*. XIV Congreso Ibérico y IX Congreso Iberoamericano de Energia Solar, Vigo, Galicia, España, 2008.

INCROPERA, F.P., Dewitt, D.P., *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, Guanabara Koogan, 4ª edição, Rio de Janeiro, 2003.

INSTITUTO DO PVC. Disponível em < <http://www.institutodopvc.org>>. Acesso em: 24 maio. 2009.

JAVIER. F.F.R. *Evaluación de La performance de diferentes colectores solares de placa plana usando um simulador solar, construídos com materiales no convencionales*. XIV Congreso Ibérico y IX Congreso Iberoamericano de Energia Solar, Vigo, Galicia, España, 2008.

JÚNIOR, F.S., *Otimização e Desempenho Térmico de um Coletor Solar Alternativo com Tubos Absorvedores de Cobre*, 1995. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

MOLERO.N., et. al. *Nuevo modelo detallado del comportamiento térmico de captadores plano*. XIV Congreso Ibérico y IX Congreso Iberoamericano de Energia Solar, Vigo, Galicia, España, 2008.

NETO, J.H.M., et al. *Análise técnica e econômica de coletores solares de baixo custo e convencionais utilizados para aquecimento de água de banho*, CEBENS – ISES –CLA. II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Latino-Americana da ISES, Florianópolis/SC - 2008.

POZZEBON, F., KRENZINGER. A.. *Desenvolvimento de um programa de simulação computacional para análise de sistemas térmicos de aquecimento de água*, CEBENS – ISES –CLA.

II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Latino-Americana da ISES, Florianópolis/SC - 2008.

REIS, E.P., *Análise do desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar utilizando coletor com superfície absorvedora em chapas de forro de PVC*, 2009. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

Santos, N.R.G., *Projeto, Construção e Análise de Desempenho de Coletores Solares Alternativos utilizando garrafas PET*, 2008. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SHAH, L.J., *Investigation and Modeling of Thermal Conditions in Low Flow SDHW Systems*, Department of Buildings and Energy, Technical University of Denmark, Report R-034, 1999.

SILVA A. C.G.C, et al. *Modelo de simulação numérica para sistemas de aquecimento de água utilizando energia solar*, CEBENS – ISES –CLA. II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Latinoamericana da ISES, Florianópolis/SC - 2008.

SOUZA, L.G.M., *Low cost alternative solar collector with PVC tubes absorption surface* COBEM 2005 – Congresso Internacional de Engenharia Mecânica, Ouro Preto – 2005.

SOUZA, L.G.M., *Alternative solar energy water heating system*, COBEM 2007 – Congresso Internacional de Engenharia Mecânica, Brasília- 2007.

SOUZA, L.G.M., *System of heating of swimming pool for solar energy*, COBEM 2007 – Congresso Internacional de Engenharia Mecânica, Brasília- 2007.

SOUZA, L.G.M., *Análise comparativa entre coletor solar plano convencional e coletor solar alternativo composto por múltiplos tubos de PVC*, IV CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Belém - PA, 2004.

SOUZA, L.G.M., BEZERRA, J.M., Sistema Alternativo de Aquecimento Solar, CONEM – CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, Natal, 2000.

SOUZA, L.G.M., *Coletor solar não convencional, de baixo custo, composto por múltiplos tubos absorvedores de PVC*, IV CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Belém - PA, 2004.

SOUZA, L.G.M., et al. *Sistema de aquecimento solar utilizando elementos recicláveis*, CEBENS – ISES –CLA. II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Latinoamericana da ISES, Florianópolis/SC - 2008.

SOUZA, L.G.M., Gomes, U.U., *Coletor Solar Aletado com Tubos de PVC formando um Novo Modelo de Configuração em Série*, CONEM, João Pessoa/PB, 2002.

SOUZA, L.G.M., Gomes, U.U., *Coletor Solar em Labirinto com Tubos Absorvedores de PVC*, CONEM, João Pessoa/PB, 2002.

SOUZA, L.G.M., Gomes, U.U., *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, 2002.

SOUZA, L.G.M., *Sistema de aquecimento solar de água para aplicações residenciais utilizando materiais alternativos*, V CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Recife-Pe, 2006.

SOUZA, L.G.M., *Coletor solar alternativo com grade absorvedora mista*, VI CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Salvador-Ba, 2008.

Trends in Renewable Energies, SolarAccess.com, Canadian Association for Renewable Energies, 2009.

VARELLA, F.K.O.M., *Tecnologia solar residencial: inserção de aquecedores solares de água no Distrito de Barão Geraldo – Campinas*, Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, Campinas-São Paulo, 2004.

OUTRAS REFERÊNCIAS CONSULTADAS

BEZERRA, A.M., *Aplicações térmicas da energia solar*, Editora Universitária - UFPb, João Pessoa, 2001.

BEZERRA, J.M., *Análise de um Sistema Alternativo para Aquecimento de água por Energia Solar*, 1999. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

CENSOLAR, *La Energía Solar: Aplicaciones Prácticas*, Tercera edición, Sevilla, 1999.

GIL, M. C.; SANTOS, A.C., *Energía solar térmica de baja temperatura*, CENSOLAR (Centro de Estudios de la Energía Solar), PROGNSA, Sevilla, 2001.

JÚNIOR, F.S., *Otimização e Desempenho Térmico de um Coletor Solar Alternativo com Tubos Absorvedores de Cobre*, 1995. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

LOURENÇO, J.M., *Estudo de um Coletor Solar Alternativo, usando Tubos Absorvedores de Alumínio*, 1997. 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

MANO, E. B., *Polímeros como materiais de engenharia*, Editora Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 2000.

RAGAB, A.R.; ALAWI, H., *Weathering effects on the fracture properties of polyvinyl pipes*, *Journal of Testing and Evaluation*, 9: (1), 44-49, 2001.

RIVERA, D.A.L., *Projeto de Construção e Análise de Desempenho de um Coletor Solar Alternativo a Baixo Custo*, 1994. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

Trends in Renewable Energies, SolarAccess.com, Canadian Association for Renewable Energies, 2009.

Associação Brasileira da Indústria do PET, Disponível em www.abipet.org.br, acesso em Maio de 2009

PÁGINA PESSOAL DE ROBERTO MASSARU WATANABE, disponível em www.ebanataw.com.br acesso Maio de 2009

Energia Solar, Arnaldo Souza Bezerra, disponível em <http://mourabezerra.sites.uol.com.br/>, acesso em Maio de 2009.

Projekte - TuTech Innovation GmbH - Wissen Technologie Maerkte, disponível em <http://tutech.de/root/tutech.tutech.net/text/Projekte/path?sessionid=>, acesso em Maio de 2009

Sociedade do Sol, disponível em <http://www.sociedadedosol.org.br/>, acesso Maio de 2009.

Vick Comércio de Plásticos e Isolantes, disponível em <http://www.vick.com.br/vick/>, acesso em Maio 2009

Astrosol aquecedores, disponível em www.astrosol.com.br, Acesso em Maio de 2009.

Ministério de Minas e Energia, disponível em WWW.mme.gov.br, acesso em Maio de 2009

Scientific American Brasil, disponível em <http://www2.uol.com.br/sciam/>, acesso em junho de 2009.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)