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

VIABILIDADES TÉRMICA, ECONÔMICA E DE MATERIAIS DE UM SISTEMA SOLAR DE AQUECIMENTO DE ÁGUA A BAIXO CUSTO PARA FINS RESIDENCIAIS

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

como parte dos requisitos para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

Raimundo Nonato Almeida Costa

Orientador: Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza

Natal, Junho/2007

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

VIABILIDADES TÉRMICA, ECONÔMICA E DE MATERIAIS DE UM SISTEMA SOLAR DE AQUECIMENTO DE ÁGUA A BAIXO CUSTO PARA FINS RESIDENCIAIS

Raimundo Nonato Almeida Costa

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÃNICA

sendo aprovada em sua forma final.

Luiz Guilherme Meira de Souza

Nome - Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza

Presidente

Prof. Dr. Caubi Ferreira _de Souza Júnior

Examinador externo

Prof. Dr. José Ubiragi de Lima Mendes

Examinador interno

“Uma das principais características do ser humano é a curiosidade, a necessidade de descobrir os segredos da natureza. Para alcançar esse objetivo, nem sempre a simples observação é suficiente. Por isso, há séculos o homem vem criando experimentos que simulam os fenômenos naturais. A interpretação lógica e criativa dos resultados desses experimentos tem sido um dos pilares do conhecimento cientifico”.

Usberco & Salvador, 1996.

Dedico este trabalho aos meus antepassados, Avós, Pais, Irmãos, Companheira, Filho, Sobrinhos, Afilhados e Amigos, com gratidão pela generosidade de seus espíritos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pelo auxílio na superação das dificuldades ao longo do curso, pela sabedoria e por sempre iluminar meu caminho, permitindo que eu vencesse mais uma etapa de minha vida.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRN, pois ao proporcionarem conhecimentos para o aprimoramento dos alunos, estão contribuindo também para a melhoria da Sociedade como um todo.

Um agradecimento especial ao meu Orientador Professor Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza, pela oportunidade, confiança, ensinamento, amizade, apoio, dedicação e pela valiosa orientação, sempre com clareza e paciência, na elaboração deste trabalho, que contribuiu para meu crescimento pessoal, intelectual, cientifico, profissional, principalmente na parte metodológica, sem a qual não seria possível a elaboração, desenvolvimento e realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduacão em Engenharia Mecânica – PPGEM/UFRN, pela realização deste Curso de Mestrado.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia – CEFET-BA, sem o qual não seria possível a realização deste curso. Agradeço pela confiança em minha capacidade e pelo suporte financeiro em quase todo o curso.

Ao Professor Dr. Rubens Maribondo do Nascimento, Coordenador do PPGEM/UFRN, pela oportunidade da realização deste Curso de Mestrado, convênio PPGEM(UFRN) / CEFET-BA.

À secretária do PPGEM/UFRN Marisa Mendonça pelo apoio e amizade dedicados no decorrer do Mestrado.

À Coordenação Técnica de Pós-Graduacão e Pesquisa CTPGP/CEFET-BA, pela excelência na execução de suas atividades e nas informações aos mestrandos.

Ao Laboratório de Maquinas Hidráulicas e Energia Solar da UFRN, que possibilitou a realização de todo o experimento deste trabalho.

Aos colegas de Pós-Graduação do CEFET-BA e da UFRN.

Aos novos amigos da UFRN, Luiz Guilherme, Vânio, Aroldo, Aldo Paulino, Reginaldo Dias, Hermínio, “Natan”, “Alessandro”, “Mosquito”, Ribeiro, Fernanda, pela amizade saudável e acolhedora.

Aos meus colegas da Coordenação de Física do CEFET-BA, pelo apoio e incentivo.

Ao colega e amigo Antônio Carlos Pereira Santos que foi um dos responsáveis pela realização do convênio entre as Instituições UFRN/CEFET-BA.

Aos meus alunos do CEFET-BA, pelo apoio e carinho.

Às Bibliotecas do CEFET-BA e da UFRN, pelo apoio e dedicação no decorrer do Mestrado.

A todos que participaram, de maneira direta ou indireta, na elaboração deste trabalho.

A Iara Luz Cunha pelo carinho e apoio

Ao meu Filho Kuaracy Endy M. Costa que é a razão maior da minha vida.

RESUMO

Apresenta-se um sistema de aquecimento solar de água, trabalhando em regime de termossifão, constituído por um, coletor solar alternativo e um reservatório armazenador de água também alternativo. O coletor foi construído com um material compósito a base de gesso e isopor e o reservatório térmico a partir de um tambor de polietileno de 200 litros utilizado para armazenamento de água e lixo recoberto por um cilindro em fibra de vidro, tendo isopor triturado entre as duas superfícies. A utilização do compósito e a nova forma de obtenção da grade absorvedora permitem que o coletor apresente apenas três elementos ao invés dos cinco característicos de um coletor convencional, diminuindo, portanto o seu custo. A superfície absorvedora dos coletores foi montada utilizando-se tubos de PVC pintados de preto fosco, ligados através de uma configuração em paralelo, utilizando como elementos de ligação conexões em T de PVC de mesmo diâmetro. Serão apresentados dados de eficiência e perda térmicas que demonstram a eficiência térmica do sistema de aquecimento proposto Abordar-se-á também aspectos relativos a susceptibilidade de degradação dos tubos de PVC quando expostos a radiação solar. Mostrar-se-á que tal sistema de aquecimento alternativo, que tem como principal característica seu baixo custo, apresenta viabilidades térmica, econômica e de materiais.

Palavras chaves: sistema solar alternativo, aquecimento solar de água, coletores solares, reservatório térmico alternativo, baixo custo, tubos de PVC.

ABSTRACT

An solar alternative system for water heating is presented. Is composed for one low cost alternative collector and alternative thermal reservoir for hot water storing. The collector of the system has box confectioned in composite material and use absorption coils formed for PVC tubes. The box of hot water storage was confectioned from a plastic polyethylene drum used for storage of water and garbage, coated for a cylinder confectioned in fiber glass. The principle of functioning of the system is the same of the conventionally. Its regimen of work is the thermosiphon for a volume of 250 liters water. The main characteristic of the system in considered study is its low cost, allowing a bigger socialization of the use of solar energy. It will be demonstrated the viabilities thermal, economic and of materials of the system of considered heating, and its competitiveness in relation to the available collectors commercially. Relative aspects will be boarded also the susceptibility the thermal degradation and for UV for the PVC tubes. It will be shown that such system of alternative heating, that has as main characteristic its low cost, presents viabilities thermal, economic and of materials.

Keywords: alternative solar system, water solar heating, solar collectors, low cost, PVC tubes, alternative thermal reservoir.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO 01

1.2 OBJETIVOS 04

1.2.1 OBJETIVO GERAL 04

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 05

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A IMPORTÂNCIA DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS 06

2.1.1 A IMPORTÂNCIA DA ENERGIA SOLAR 06

2.2 OS COLETORES ALTERNATIVOS 08

2.2.1 OS COLETORES ALTERNATIVOS NO MUNDO 08

2.2.2 DESENVOLVIMENTO DE COLETORES SOLARES ALTERNATIVOS NO LES/UFRN E NO BRASIL 10

2.3 OS RESERVATÓRIOS TÉRMICOS 15

2.3.1 CONVENCIONAIS 15

2.3.2 ALTERNATIVOS 16

2.4 A IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DA DEGRADAÇÃO 18

2.5 OS MATERIAIS COMPÓSITOS E CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO GESSO E EPS (POLIESTIRENO EXPANDIDO) 19

2.5.1 OS MATERIAIS COMPÓSITOS 19

2.5.2 O GESSO 19

a. A HISTÓRIA DO GESSO 19

b. AS PROPRIEDADES DO GESSO 20

2.5.3. O EPS (ISOPOR) 21

a. AS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO EPS 22

b. ALGUMAS PROPRIEDADES DO EPS (ISOPOR) 22

b.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA 22

b.2 PROPRIEDADES TÉRMICAS DO EPS 23

b.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO EPS 23

2.5.4 O CLORETO DE POLIVINILA 24

a. GENERALIDADES 24

b. CARACTERIZAÇÃO DO PVC 25

b.1 AS PROPRIEDADES FÍSICAS 25
b.1.1 AS PROPRIEDADES MECÂNICAS 25
b.1.2 AS PROPRIEDADES TÉRMICAS 26
b.1.3. AS PROPRIEDADES ELÉTRICAS 26
b.1.4. AS PROPRIEDADES ÓTICAS 26
b.1.5 AS PROPRIEDADES QUÍMICAS 26
c. A OBTENÇÃO DO PVC 28

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 30
3.1 MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS 30
3.2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO 34
a. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS 34
a1.COEFICIENTE GLOBAL DE PERDAS 34
a.1.1 MÉTODO DA TEMPERATURA MÉDIA DE PLACA 34
a.1.2 MÉTODO DA PERDA TÉRMICA 35
a.1.3 MÉTODO DAS TROCAS TÉRMICAS 35
a.1.3.1 PERDAS PELA COBERTURA 35
a.1.3.2 PERDAS PELAS LATERAIS E BASE DO COLETOR 41
a.2 DETERMINAÇÃO DO CALOR PERDIDO PELO COLETOR 41
a.3 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO TÉRMICO 42

RESULTADOS E DISCUSSÕES 43
4.1 SISTEMA DE AQUECIMENTO ALTERNATIVO 43
4.2 RESERVATORIO TÉRMICO ALTERNATIVO 53

CONCLUSÕES E SUGESTÕES 56

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 60

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Sistema de aquecimento proposto 11
Figura 2.2 Sistema ASBC 11
Figura 2.3 Coletor Alternativo proposto por Fantinelli 12
Figura 2.4. Coletores ASBC e Coletor PET em teste 13
Figura 2.5 Boilers convencionais disponíveis no mercado 15
Figura 2.6 Armazenador térmico alternativo construído em fibra de vidro 16
Figura 2.7 Reação de degradação do PVC 18
Figura 2.8 Esquema de obtenção do PVC 29
Figura 3.1 Sistema solar de aquecimento proposto 33
Figura 3.2 Processos térmicos em um coletor solar 37
Figura 4.1 Comportamento assumido pelos valores médios das temperaturas de entrada e saída do coletor em estudo para os vários dias de testes 47
Figura 4.2 Comportamento assumido pelos valores médios do gradiente de temperatura obtido no coletor em estudo 48
Figura 4.3 Comportamento assumido pelos valores médios da radiação solar global 48
Figura 4.4. Comportamento assumido pelos valores médios do rendimento térmico diário 49
Figura 4.5. Comportamento assumido em níveis de temperatura em vários pontos do reservatório térmico 50
Figura 4.6. Parâmetros de perda térmica do coletor em estudo 52
Figura 4.7. Queda de temperatura na água contida no reservatório proposto para avaliar sua perda térmica 54
Figura 4.8. Temperaturas da superfície externa do reservatório e ambiente para avaliar perda térmica 55
Figura 4.9. Reservatório térmico alternativo proposto 55

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Características dos coletores e do ensaio 13
Tabela 2.2 Resultados do ensaio térmico realizado com os dois coletores 14
Tabela 2.3 Principais propriedades do PVC 27
Tabela 4.1 Dados do primeiro dia de teste 43
Tabela 4.2 Dados do segundo dia de teste 43
Tabela 4.3 Dados do terceiro dia de teste 44
Tabela 4.4 Dados do quarto dia de teste 44
Tabela 4.5 Dados do quinto dia de teste 45
Tabela 4.6 Dados do sexto dia de teste 45
Tabela 4.7 Dados do sétimo dia de teste 46
Tabela 4.8 Dados médios dos dias de testes realizados com o coletor alternativo 47
Tabela 4.9. Níveis de temperatura em vários pontos do reservatório térmico para ensaio com duração de um dia 49
Tabela 4.10. Níveis de temperatura em vários pontos do reservatório térmico para vários dias de ensaio 50
Tabela 4.11. Dados de temperatura do ensaio de simulação dos banhos 51
Tabela 4.12. Resultados do teste realizado com o reservatório térmico alternativo proposto 53

NOMENCLATURA

β = coeficiente de dilatação térmica (1/^{o} C)

σ = constante de Stefan-Boltzman (W/m^2. K)

ν = difusividade molecular (m^2/s)

δ = espessura da camada de fluido(m)

$\tau\alpha$: produto transmitância x absortância

ΔT = gradiente térmico da água no coletor e/ou sistema (^{o}C).

η_t = rendimento térmico do coletor e/ou sistema(%)

τ_v = transmissividade do vidro

ε_{vi} = emissividade da cobertura de vidro

$\dot{m}$ = vazão mássica (kg/s)

A = área do coletor (área exposta à radiação solar) em m^2.

c_p = calor específico da água em KJ/kg ^{o}C.

e= espessura(m)

e_{caixa} = espessura do perfil da caixa (m)

e_{ch} = espessura da chapa (m)

e_{is} = espessura do isolamento (m)

e_{vi} = espessura do vidro (m)

g = constante da aceleração da gravidade (m/s^2)

H = comprimento da camada de fluido(m)

$h_{c(t - vi)}$ = coeficiente de transmissão de calor por convecção entre o tubo absorvedor e a superfície interna do vidro de cobertura (W/m^2.K)

$h_{c(ve - a)}$ = coeficiente de transmissão de calor por convecção entre a superfície externa do vidro e ao ar ambiente (W/m^2. K)

$h_{r(t - vi)}$ = coeficiente de transmissão de calor por radiação entre o tubo absorvedor e a superfície interna do vidro de cobertura (W/m^2. K)

$h_{r(ve - a)}$ = coeficiente de transmissão de calor por radiação entre a superfície externa do vidro e ao ar ambiente. (W/m^2.K)

I = radiação solar global(KW/m^2)

K = Condutividade Elétrica (W/m^2. ^{o}C)

k_{ar} = condutibilidade térmica do ar (W/m. K)

k_{caixa} = condutibilidade térmica do material da caixa (W/m.K)

k_{ch} = condutibilidade térmica da chapa (W/m. K)

k_{is} = condutibilidade térmica do isolamento (W/m. K)

k_{vi} = condutibilidade térmica do vidro (W/m.K)

N_u = número de Nusselt

$Q_{abs.}$ = calor absorvido pelo coletor(W)

Q_p = calor perdido pelo coletor(W)

$Q_{p(base)}$ = calor perdido pela base (W)

$Q_{p(lat)}$ =calor perdido pelas laterais (W)

$Q_{p(topo)}$ = calor perdido pelo topo (W)

$Q_{p(total)}$ = calor perdido total (W)

Q_u = calor transferido ao fluido de trabalho(W)

R_a = Número de Rayleigh

$R_{c(t-vi)}$ = Resistência convectiva entre o tubo e a superfície interna do vidro (m^2.K/ W)

$R_{c(ve-a)}$ = Resistência convectiva entre a superfície externa do vidro e ambiente (m^2.K/ W)

Req = Resistência térmica equivalente (m^2. K/ W)

$R_{eq(t-vi)}$ = resistência equivalente entre tubo e superfície interna do vidro (m^2. K/ W)

$R_{eq(ve-a)}$ = resistência equivalente entre a superfície interna do vidro e o ambiente(m^2. K/ W)

$R_{eq(vi-ve)}$ = resistência equivalente entre as superfícies interna e externa do vidro (m^2. K/ W)

$R_{k(vi-ve)}$ = Resistência condutiva entre as superfícies interna e externa do vidro (m^2. K/ W)

R_{Kc} = resistência condutiva pelo material da caixa (m^2. K /W)

R_{Kis} = resistência condutiva pelo isolamento térmico (m^2. K /W)

$R_{r(t-vi)}$ = Resistência radiativa entre o tubo e a superfície interna do vidro (m^2. K/ W)

$R_{r(ve-a)}$ = Resistência radiativa entre a superfície externa do vidro e o ambiente (m^2. K/ W)

T_A: temperatura média da superfície do absorvedor (ºC)

$T_{água}$ = temperatura da água no interior do reservatório térmico alternativo (ºC)

T_{be} = temperatura da base externa (ºC)

T_{bi} = temperatura da base interna (ºC)

T_e = temperatura de entrada do fluido no coletor (ºC)

T_f = temperatura do fluido no interior do reservatório térmico alternativo construído (ºC)

$\mathbf{T_i}$ = temperatura interna dos coletores (ºC)

$T_{int.}$ = temperatura da parede interna dos tubos para condução de fluido quente (ºC)

T_{le} = temperatura da lateral externa (ºC)

T_{li} = temperatura da lateral interna (ºC)

$T_{máx.}$t = temperaturas máxima da superfície externa dos tubos absorvedores (ºC)

T_{pm} = temperatura média da placa absorvedora (^{o} C).

T_s = temperatura de saída do fluido do coletor (^{o}C)

T_{sky} = temperatura da abóbada celeste (^{o}C).

T_t = temperatura média dos tubos (^{o}C)

T_{vi} = temperatura média da cobertura de vidro (^{o}C).

U_{topo} = coeficiente de perda térmica pela cobertura (W/m^2. K)

U_{base} = Perda térmica pelo fundo do coletor (W/m^2. K)

$U_{laterais}$ = Perda térmica pelas superfícies laterais do coletor (W/m^2. K)

U_{loss} = coeficiente global de perda térmica (W/m^2.K)

1. INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do trabalho

Com a ênfase dada à questão ambiental, que atinge caráter de imprescindibilidade quando se busca meios de amenizar os efeitos do nefasto aquecimento global, o mundo desenvolvido prioriza a utilização das energias limpas e renováveis. Nesse contexto a energia solar tem merecido um destaque especial, com todos os países criando programas de incentivo a sua utilizando, abrindo linhas de financiamento com baixas taxas de juros e subsidiando os preços de aquisição de tais equipamentos (**TRENDS IN RENEWABLE ENERGIES, 2006; YAKOV, 2000).**

O aquecimento de água através da utilização de coletores solares tem representado, juntamente com as células fotovoltáicas, conversoras da energia solar em eletricidade, uma das aplicações mais viáveis de utilização, tanto residencial quanto industrial (**LORENZO, 2001).**

O nordeste brasileiro apresenta um potencial solar bastante significativo, correspondente a uma disponibilidade média que se situa na faixa de 500 a 700 W/m^2, conforme Atlas de Irradiação Solar do Brasil **(BEZERRA, 2001).**

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2003, 42 % do consumo de energia elétrica no Brasil é direcionado para o setor de edificações, sendo 84,1 % correspondente a empresas e residências e 15,9 % a administração pública, com cifras alcançando 13,8 % do Produto Interno Bruto do país **(VARELLA, 2004).**

O setor residencial responde por 23 % do consumo nacional de energia e de acordo com manual de uma companhia de energia do Brasil 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 **(VARELLA, 2004).**

Estes dados apontam a importância da substituição da fonte elétrica pela fonte solar para a obtenção de água quente principalmente em tempo de racionamento de energia, ganhando contornos de imprescindibilidade uma vez que a opção hídrica brasileira para a geração de energia elétrica está praticamente com seus recursos exauridos.

Os dispositivos utilizados para a produção de água quente através da utilização da energia solar são os coletores que podem ser divididos em dois grupos os planos 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 é 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, sendo a primeira opção a mais empregada; por um armazenador térmico geralmente de cobre ou inox e de tubos para a condução de calor, geralmente o CPVC (Copolímero vinílico). Tais sistemas são de preço ainda relativamente caro, não estando acessível à maioria da população. Para uma residência com quatro pessoas, o sistema fica em torno de R$ 3.000,00.

Buscando-se formas para baratear o custo dos sistemas de aquecimento, vem-se estudando há mais de 15 anos no âmbito do LES/UFRN sistemas 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.

Baseados nos coletores LTC (temperature low collector), (**DICKINSON, 1880**), **Phillips** (**COMETA, 1978)** e coletores alternativos mostrados por **Cabirol**, **1978**, foram desenvolvidos, construídos e estudados várias gerações de coletores alternativos de diferentes materiais e geometrias, de custo mais baixo que o coletores e sistemas de aquecimento de mercado **(SOUZA, 2000, 2002, 2004, 2006; BEZERRA. 1999, LOURENÇO, 1997; JÚNIOR, 1995, RIVERA, 1994).**

Dentre os coletores estudados estão o coletor multitubos formando uma serpentina em série, o coletor em labirinto, o coletor de placas paralelas, o coletor formado por unidades de aquecimento constituídas por um bulbo de vidro (carcaças de lâmpadas fluorescentes) tendo em seu interior tubos absorvedores (**RIVERA, 1994, LOURENÇO, 1997**), o coletor plano convencional com tubos absorvedores de PVC. Com exceção do último, todas as outras gerações foram postas a funcionar em regime de fluxo forçado com apenas uma passagem do fluido de trabalho no interior dos mesmos.

Este trabalho apresenta um novo modelo de coletor, constituído por apenas três elementos, ao invés dos cinco que compõem um coletor convencional. O grande fator inovador desse trabalho, que lhe concede simplicidade e facilidade de construção e montagem está no uso de um material compósito de baixa condutividade térmica, nas funções simultâneas de absorvedor de radiação solar e isolante térmico.

Isso permite a não utilização de isolante térmico de lã de vidro, elemento indispensável em coletores convencionais, que apresenta um fator extremamente danoso que é o fato de ser cancerígeno, causando graves danos à saúde de quem o manuseia.

Uma outra inovação na construção do coletor é a forma de como os tubos estão conectados, constituindo a grade absorvedora. Nos coletores convencionais os tubos de cobre de ½” em número de 6 a 8 por metro linear de largura estão soldados a tubulações de entrada e saída de 1” ou 11/2”. No coletor em estudo 24 conexões em T de PVC são interligadas através de tubos de PVC de mesmo diâmetro, formando as tubulações de entrada e saída de água.

Em cada conexão está acoplado um tubo absorvedor, perfazendo, portanto, um total de 12 tubos de ¾” na grade absorvedora. Essa nova configuração permite que a grade absorvedora contenha 12 tubos por metro linear de largura, aumentando consideravelmente o volume de água no interior do coletor, aumentando, por conseguinte, a vazão circulante no coletor. Essa característica concede ao coletor uma maior velocidade de aquecimento da água contida no reservatório térmico.

Uma outra inovação do presente trabalho é a utilização de um novo tipo de reservatório térmico para o armazenamento da água aquecida pelo coletor, em substituição aos reservatórios convencionais de cobre ou inox, de elevado custo, em torno de R$ 1.000,00 para 200 litros.

Esse reservatório tem como elemento base um tambor de polietileno de volume igual a 200 litros, utilizado para depósito de água e/ou lixo, de custo equivalente a R$ 50,00, revestido de um cilindro confeccionado em fibra de vidro. Tal reservatório tem custo em torno de 30% em relação aos reservatórios convencionais de mercado.

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.

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 **(MANO, 2000).**

No caso do tubo de PVC, essa degradação é mais crítica para níveis de temperatura acima de 250ºC, embora a degradação térmica se inicie para temperaturas acima de 60ºC, alcançando limite crítico para temperaturas acima de 75ºC, onde começa o seu processo de deflexão **(YAO, 2001).**

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 um outro fator inovador do trabalho.

Espera-se que o maior volume de água contido no coletor, em função de um número maior de tubos absorvedores de diâmetro superior aos tubos convencionalmente usados, amenize os efeitos da degradação térmica, não sendo atingida a temperatura crítica para início da degradação térmica, em torno de 60°C. 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.

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

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

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

O capítulo 3 apresenta a proposta em estudo, mostrando o coletor construído, seu princípios de funcionamento e processos de fabricação e montagem, e suas diferenças em relação aos coletores convencionalmente utilizados. Apresenta, também, um reservatório térmico alternativo de baixo custo para a substituição dos reservatórios usuais, de cobre ou aço inoxidável, de custo elevado e a metodologia experimental empregada no desenvolvimento do presente trabalho.

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

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

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Estudar as viabilidades térmica, econômica e de materiais de utilização de um sistema de aquecimento alternativo de baixo custo que utiliza um coletor alternativo que é composto por tubos de PVC nas funções de absorvedor e condutor de calor.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Desenvolver, projetar e construir um sistema de aquecimento solar alternativo de custo mais baixo que os convencionalmente utilizados;

2. Ensaiar tal sistema determinando o seu desempenho térmico;

3. Demonstrar as viabilidades térmica, econômica e de materiais do sistema de aquecimento proposto;

4. Avaliar os níveis de degradação inerentes ao uso do PVC como elemento absorvedor de radiação solar;

5. Demonstrar a competitividade do sistema em estudo em relação a outros sistemas convencionais;

6. Avaliar a viabilidade do sistema na obtenção de água quente destinada ao banho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A importância das energias renováveis

Olhando para o futuro, perceber-se-á que o custo da energia tenderá a ser sempre maior e a crise de combustíveis fósseis e de madeira tornar-se-á mais e mais aguda. As formas de suprimento de energia estão determinando o curso dos desenvolvimentos social e econômico futuros. O suprimento de energia será a base para um elevado e sustentável nível de segurança e conforto. A energia também determinará o balanço ecológico.

As tecnologias e fontes energéticas que se usam nos dias atuais influenciarão significativamente o amanhã. Há também uma grande evidência de que a maioria das tecnologias energéticas em uso não é ecologicamente apropriada e tem o potencial de provocar sérias e irreversíveis mudanças climáticas, bem como a constatação de que a quase totalidade destas fontes energéticas não é renovável e estão se esgotando rapidamente. Em função dessas percepções, o direcionamento às fontes renováveis de energia é inevitável. As fontes de energia eólica, solar e de biomassa são abundantes, amplamente distribuídas e ecologicamente atrativas. Essas fontes não poluem a atmosfera e não contribuem para o aumento da temperatura do planeta.

As características especiais das energias renováveis que as tornam atrativas são: **uso e produção descentralizada, envolvendo um grande número de produtores e consumidores e custo inicial relativamente mais alto comparado a sistemas convencionais, mas de baixo custo de manutenção**.

2.1.1 A importância da energia solar

Cada metro quadrado da superfície do sol emite cerca de 62,8 MW de energia eletromagnética, que são lançados no espaço. A origem desta energia está em um conjunto de reações termonucleares que ocorrem no núcleo do sol causando uma diminuição em sua massa da ordem de 4,25 milhões de toneladas em cada segundo. Embora esse dado seja avaliado como uma perda inimaginável, seriam necessários 147 bilhões de anos (a idade de nosso sistema solar é estimada em 8 bilhões de anos) de atividade solar, neste mesmo ritmo, para que a sua massa sofresse uma diminuição de um por cento (1%) **(BEZERRA, 2001)**. Para se ter uma idéia de tal potencial basta que se faça a seguinte análise **(SOUZA, 2002)**:

Considere-se que a Terra recebe do sol, no nível do solo, no máximo **1kW/m^2**, embora possa atingir maiores picos em algumas localidades. Excluídas as regiões Ártica e Antártica, ela recebe em média cerca de **3,6kWh/m^2.dia**.

As massas continentais, excluídas as regiões Ártica e Antártica, possuem uma área de cerca de **132,5 x 10^{12}m^2**. Portanto, a incidência solar sobre essas massas continentais é **4,77 x 10^8GWh/dia**. Logo, a incidência em um ano é de **1,74 X 10^{11}GWh**.

Considerando-se que o consumo energético anual atual corresponde a **1,5 x 10^8GWh**, 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. Considerando-se toda a área da Terra, a disponibilidade aumenta para **1,02 X 10^{13}GWh**.

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 X 10^{10}GWh**, por possuírem significativos potenciais solares e receberem energia solar em quase todo o ano, como acontece no nordeste brasileiro.

A radiação solar é atualmente usada para produzir potência através de duas tecnologias: fotovoltaica e térmica. A tecnologia fotovoltaica tem um grande potencial e parece ser um dos mais atrativos modos de obtenção de energia no futuro. Os sistemas fotovoltaicos são atualmente mais confiáveis e econômicos que muitas outras tecnologias energéticas por serem independentes, descentralizados e pelas alternativas de aplicabilidade, gerando uma gama de produtos para consumo.

Um sistema fotovoltaico pode atuar em rede ou de modo independente. São muito importantes para o desenvolvimento de países do terceiro mundo, pela escassez de fornecimento de energia elétrica principalmente em áreas rurais, onde a energia elétrica gerada pode ser usada de forma descentralizada.

Os métodos para a geração de potência térmica solar são essencialmente os mesmos das tecnologias convencionais, porém o combustível usado é a energia térmica. Ao invés do combustível fóssil, usa-se a radiação solar. A faixa de temperatura requerida para aplicações domésticas e comerciais pode ser coberta com as tecnologias disponíveis de conversão da energia solar em energia térmica.

Os sistemas térmicos solares para uso principalmente doméstico não necessitam de alta eficiência, porém para uso em aplicações industriais e comerciais já estão sendo desenvolvidos sistemas de alta performance. Tais sistemas permitem a obtenção de

temperaturas para pré-aquecer a água de alimentação de caldeiras, aquecer água e ar em processos industriais e produzir vapor para gerar potência.

2.2 Os coletores alternativos

Os coletores alternativos 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 quatro 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, a nível mundial e local, mostrando os resultados alcançados por várias de suas gerações e as análises que conduziram ao desenvolvimento do presente trabalho.

2.2.1 Os coletores alternativos no mundo

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

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

Em **1980**, **Bayazttoglu** e **Asgarpour** descreveram estudo para calcular o desempenho performance de coletores tubulares que usavam bulbos de vidro envolvendo tubos absorvedores, com as unidades aquecedoras evacuadas. **Herrick**, em **1982**, apresentou estudo sobre medidas ópticas de transmitância em um coletor solar composto por tubos de vidro cilíndricos. Em **1997**, **Tsilingiris** propôs um coletor solar baseado no mesmo princípio, porém incluindo um coletor fechado feito com um material isolante térmico e estrutura rígida.

Os aquecedores solares domésticos de água são largamente utilizados atualmente para a produção de energia térmica solar a baixas temperaturas. Estes tipos de coletores têm sido

objeto de numerosos estudos e pesquisas desde **1950**. **Willier** e **Hottel**, em **1958** e **Bliss**, em **1959**, estudaram pela primeira vez o desempenho térmico de coletores com tubos paralelos e suas conclusões serviram de base para muitas pesquisas posteriores.

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

O coletor em estudo foi ensaiado em regime de fluxo forçado com somente uma passagem do fluido no interior do coletor, como também para várias passagens, através do uso de um sistema de bombeamento de baixa vazão. Foi demonstrado que o melhor desempenho foi obtido com o coletor atravessado por uma única passagem.

O coletor que usava tubos absorvedores de PVC revelou-se mais viável e mais competitivo em relação ao coletor convencional.

O uso de um polímero absorvedor foi estudado por **Van Niekerk et al**., em **1996**, com o objetivo de avaliar o desempenho de coletores com tubos paralelos na África do Sul. A variação geométrica de parâmetros tais como o diâmetro dos tubos, o espaçamento entre tubos e as dimensões da caixa foram estudadas para a otimização do desempenho dos mesmos. **Van Niekerk et al**., concluíram que a melhor configuração foi obtida para um espaçamento entre tubos igual a zero. Isso demonstra que a configuração da placa plana do coletor é o parâmetro que mais afeta o seu desempenho.

Matrawy e **Farkas**, em **1997**, compararam um coletor com duas placas paralelas (TPPC), com, respectivamente, um coletor com tubos paralelos (PTC) e um coletor com tubos em serpentina (STC). Sob o mesmo ambiente e condições de desempenho, a eficiência do TPPC foi respectivamente 6,0 e 10% maior que o STC e PTC.

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

Cristofari, et al., propuseram em **2002**, estudar uma configuração de coletor que apresenta uma performance similar à proposta por **Hottel** e **Willier** em **1958**; **Willier**, em **1977**, **Bliss**, em **1959** e **Matrawy** e **Farkas**, em **1997**, mas que difere principalmente: por utilizar 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.

O uso de coletores com tubos para absorção de polipropileno e placas de absorção de polietileno de alta densidade é bastante enfocado pela literatura. Esses coletores são usados para aquecimento e climatização de piscinas **(GIL, 2001, CENSOLAR, 1999)**.

2.2.2 Desenvolvimento de coletores solares alternativos no LES/UFRN e no Brasil

Buscando formas de obtenção de um sistema de aquecimento a baixo custo, vem-se estudando há mais de 18 anos no âmbito do Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Norte sistemas alternativos para tornar viável o uso da energia solar para o fim considerado e torná-lo acessível a uma maior parcela da população. Baseado nos coletores Phillips, descrito por Cometa, no LTC (Low-Temperature Collector), mostrado por **Dickinson** e **Chereminisoff**, em **1980**, no tubular, estudado por **Bayazttoglu** e **Asgarpour**, em **1980** e nos alternativos mostrados por **Cabirol**, em **1978**, 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. A experiência adquirida com esses coletores serviu de base para a realização do presente trabalho

A Figura 2.1 mostra um sistema de aquecimento estudado por **Souza em 2002**, constituído por dois coletores alternativos com tubos absorvedores de PVC. Foi demonstrado que tal sistema é viável para aplicações residenciais e industriais, tendo como principal característica seu baixo custo. Estudou-se, também, as influências dos processos de degradação térmica e por UV inerentes a exposição dos tubos de PVC à radiação solar.

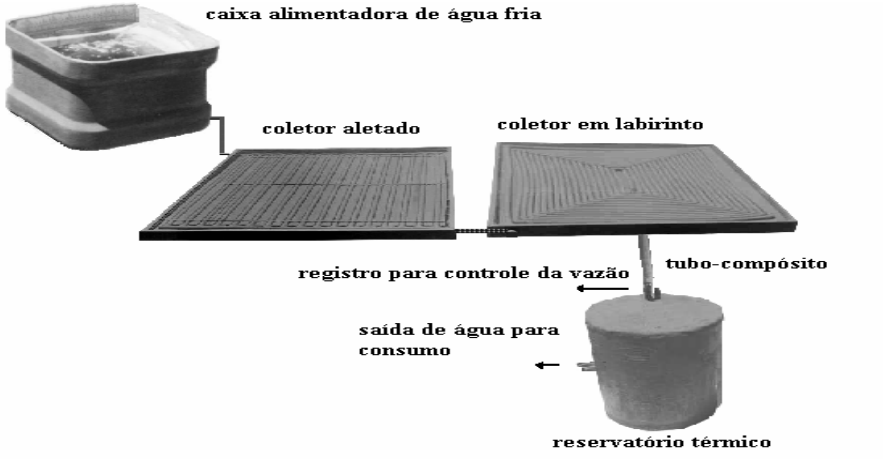

Figura 2.1 Sistema de aquecimento proposto.

Um 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 Aquecedor Solar de Baixo Custo - ASBC. O ASBC tem coletores similares aos usados em piscinas, não possuindo, portanto, cobertura transparente **(VARELLA, 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 2.2 mostra o sistema de aquecimento ASBC.

Figura 2.2 Sistema ASBC retirado de Varella (2004).

Baseado no conceito de autoconstrução, **Fantinelli (2002)** desenvolveu um coletor alternativo a baixo custo onde a placa de absorção da radiação solar é constituída por concreto, tubos de PVC, abetas de alumínio (embalagens de bebidas em alumínio) e poliestireno expandido.

Os tubos são envolvidos com abetas de alumínio que são fabricadas a partir de sucatas de recipientes de alumínio de refrigerantes e cervejas. Após a concretagem da placa, sua superfície é impermeabilizada e pintada com preto fosco. O reservatório térmico é uma caixa de água com isolamento de poliestireno expandido (isopor) e jornal.

O sistema funciona em termossifão (**VARELLA, 2004**). A Figura 2.3 mostra o coletor alternativo construído.

Figura 2.3 Coletor Alternativo proposto por Fantinelli.

Um 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 Coletor ASBC e Coletor PET em teste (www.sociedadedosol.com.br).

A seguir detalha-se na Tabela 2.1.os resultados dos testes realizados com esses dois coletores que se enquadram perfeitamente dentro do propósito do presente trabalho, qual seja, a construção de um coletor solar de baixo custo que contribua para a socialização do uso de coletores solares, para a obtenção de água quente destinada ao banho, entendendo a tecnologia como um bem da humanidade e não apenas de poucos privilegiados.

Tabela 2.1 Características dos coletores e do ensaio.

1 -	ÁREA DE CADA UM DOS COLETORES:	0.8 M²
2 -	Direção dos coletores:	Norte Geográfico
	Inclinação dos coletores:	30 graus
3 -	Dutos PVC marrom dos dois sistemas:	25 mm
4 -	Volume interno dos coletores:	Coletor de Garrafa PET 3 litros Coletor do ASBC 8 litros
5 -	Volume de água de cada uma das caixas:	70 litros
6 -	Caixas Usadas:	Polietileno 200 litros, tipo bombonas, azuis
7 -	Isolamento térmico:	Nenhum
8 -	Duração da experiência:	1 dia
9 -	Temperatura Ambiente máxima no dia:	31º C
10 -	Termômetro:	-10 a +110º C, de álcool da Incoterm
	10.1 - Forma de Medição:	Manual, logo após a vigorosa mistura da água de cada uma das duas bombonas.
	10.2 - Temperatura final esperada:	Temperatura máxima do dia mais 20º C.
11 -	Ventos:	Médios
12 -	Irradiação Solar:	Boa, mas com nuvens ocasionais.

Fonte: www.sociedadedosol.com.br

As medidas e respectivas curvas demonstram no decorrer do dia um diferencial de temperatura crescente entre sistemas, chegando a 4º C, entre 13:30 a 14:30 horas. Porém no final do dia útil, este diferencial se reduz a 2,5º C, muito provavelmente devido ao efeito estufa oferecido pelas garrafas PET.

Comparando os ganhos térmicos entre sistemas no final do dia, o do ASBC é 17,2% maior. É um valor considerável, mas que não reflete a realidade diante da falta do obrigatório isolamento nos dutos de retorno e nas próprias caixas usadas nestas medidas.

Admitindo a existência do isolamento e a (muito provável) temperatura final de 50º C, o ganho a favor do coletor ASBC cai para 10,2% permitindo afirmar que os dois sistemas são praticamente equivalentes. A Tabela 2.2 mostra os valores de temperatura medidos durante o teste feito com os dois coletores alternativos.

Tabela 2.2 Resultados do ensaio térmico realizado com os dois coletores.

Horários	Temperaturas em °C		
	ASBC	PET	Ambiente
10:30	23	23	26
11:00	25	23,5	26,5
11:30	29	26,5	28
12:00	31,5	28	29
12:30	33	30	29
13:00	35,5	32	30
13:30	37	33	30
14:00	38	34	31
14:30	39,5	35,5	31
15:00	40,5	37,5	31
15:30	40	37	31
16:00	40	37,5	30
16:30	40	37,5	30

Fonte: www.sociedadedosol.com.br

Os resultados do teste realizado conduzem a algumas conclusões, que são detalhadas a seguir.

Durabilidade:

A dúvida que fica é a da durabilidade da garrafa PET quando exposta à irradiação solar permanente. Segundo os fabricantes da matéria prima das garrafas, ela poderá se degradar num prazo de 4 a 6 anos, valor que consideramos muito bom quando comparados a materiais como o Polipropileno e Polietileno, que, sem aditivos, não duram mais do que poucos meses ao sol.

No caso do coletor ASBC, a durabilidade prevista ultrapassa os 10 anos, desde que haja uma (muito sugerida) repintura dos coletores de PVC a cada 4 anos. No caso do coletor PET, após o prazo de vida do material , suas garrafas deverão. ser substituídas. Em ambos os casos, operações de fácil concretização.

Custo:

Admitindo ausência de custo nas garrafas PET e caixas de leite, o custo do coletor que nos foi enviado é cerca de 13% menor que o do coletor de projeto ASBC. A diferença vem do uso dos tubos de PVC marrom de 32 mm no coletor ASBC.

Projetos didáticos:

Ambos os projetos tem um forte chamariz para uso em laboratórios e trabalhos escolares. O Coletor de garrafas PET e respectivas caixas de Tetra Pack oferecem um interesse adicional sob o prisma ambiental ao combinar geração de energia térmica a processos de reciclagem de materiais descartados pela sociedade (Fatores, que em conjunto, são simplesmente imbatíveis na aplicação escolar).

Tempo de montagem dos coletores:

Os dados estão ainda sendo levantados. Fica em aberto o tempo requerido para a coleta e lavagem das garrafas PET e das caixas Tetra Pack. Idem, para a compra de placas modulares de PVC. De qualquer maneira estes tempos não têm valor comercial face à autoconstrução destes componentes.

2.3 Os reservatórios térmicos

2.3.1 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 constituídos 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 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 40 m.

BOILER VERTICAL DE NÍVEL

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

Modelo AVN

Tambor interno em cobre ou aço inoxidável					Bitolas Hidrául.		
CAPACID.	DIÂM.	ALT	VOLTS	WATTS	ENTR.	SAÍDA	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/220 monof.	
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.

2.3.2 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 (2003) construiu e estudou um reservatório térmico alternativo para um sistema de aquecimento solar de água com as características de bom desempenho térmico, baixo custo, boa estética e peso reduzido. Os materiais utilizados para sua fabricação foram: duas folhas de eucatex formando os cilindros interno e externo; madeirit de 15mm para o fundo e tampa; mantas de fibra de vidro-E para recobrimento das superfícies interna e externa, como também do fundo e da tampa; isopor como isolante térmico colocado entre as superfícies interna e externa do tanque.

O compósito foi obtido através do processo de laminação manual, utilizando resina de poliéster. Seu volume corresponde a 250 litros. O armazenador construído encontra-se mostrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 Armazenador térmico alternativo construído em fibra de vidro.

Os resultados dos testes térmicos realizados mostraram a viabilidade de utilização do reservatório, alternativo, de custo muito inferior aos reservatórios convencionais disponíveis no mercado de cobre ou inox, com custo em volta de R$ 400,00, o que representa menos da metade dos valores cobrados por tais tanques convencionais.

O nível de perda térmica esteve muito próximo do parâmetro limite da literatura, cerca de 5°C de perda para um tempo de 24 horas, a um nível de temperatura de 45°C.

Souza (2004) construiu e testou um outro reservatório alternativo que consistia de material compósito envolvendo um tambor de polietileno de 200 litros, com espessura de isolamento de 50 mm. A eficiência térmica do tambor alternativo era próxima do apresentado anteriormente, porém apresentava um peso excessivo, fissuras no compósito.

2.4 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.

Sullivan, em **1999** e **Ragab**, em **2001**, demonstraram que as degradações térmicas e por UV fragilizam o material, porém a quantificação desses níveis de desgaste, associados às faixas de temperatura inerentes à condição de trabalho, não está acessível. Este trabalho procura demonstrar as mudanças nas propriedades ocasionadas pela submissão das amostras a níveis de temperatura e radiação solar global, por vários períodos de tempo. Essa fragilização poderia ser traduzida pela perda de massa ou através da perda de cloreto de hidrogênio e o conseqüente surgimento de ligações duplas. A reação de degradação do PVC pode ser descrita pela seqüência apresentada na Figura 2.7.

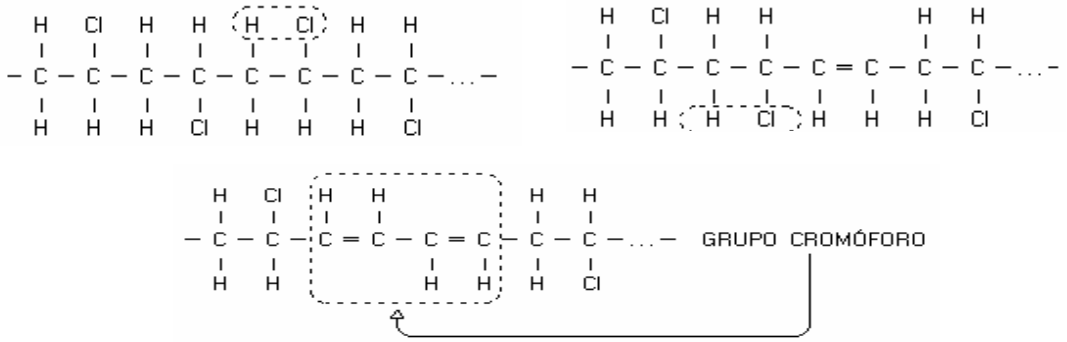

Figura 2.7 Reação de degradação do PVC.

2.5 Os materiais compósitos e características e propriedades do gesso e EPS (poliestireno expandido)

2.5.1 Os materiais compósitos

Materiais compósitos podem ser definidos como materiais formados de dois ou mais constituintes com distintas composições, estruturas e propriedades e que estão separados por uma interface. O objetivo principal em se produzir um compósito é de combinar diferentes

materiais para produzir um único dispositivo com propriedades superiores às dos componentes unitários.

Com os materiais compósitos é possível obter produtos com diferentes propriedades, como: leveza, ductilidade, materiais resistentes a altas temperaturas, materiais duros e resistentes ao choque.

Um material compósito é uma mistura de dois ou mais materiais que diferem em forma e composição química e são essencialmente insolúveis um no outro, e a maioria de produzir sinteticamente por combinar vários tipos de fibras com matrizes diferentes, aumentar a força, dureza, e outras propriedades. Os materiais compósitos produzem propriedades muitas vezes mais interessantes do que um único material **(PIAZZA, 2000).**

A maioria dos estudos de compósitos visa à obtenção de um material com propriedades mecânicas, elétricas e ópticas mais adequadas para seu fim que os materiais convencionais. No campo térmico tem-se priorizado a obtenção de materiais que resistam a bruscos gradientes de temperatura. No caso específico do presente trabalho, a busca é por um novo material que tenha um menor coeficiente de condutividade térmica para ser um bom isolante térmico e que também apresentam adequada resistência mecânica para propiciar seu manuseio e transporte **(MACHADO, 2003).**

2.5.2 O gesso

a. A história do gesso

O gesso é conhecido desde há muito tempo e, entre os materiais de construção cuja obtenção exige uma determinada transformação obrigando à intervenção do homem, ele é geralmente considerado como um dos mais antigos, a par da cal e do barro. É obtido aquecendo-se a pedra de gipso ou gipsita, um mineral abundante na natureza, reduzindo-a depois a pó.

Recentes descobertas arqueológicas revelaram que o emprego do gesso remonta a oito mil anos antes de Cristo (segundo escavações feitas na Síria e Turquia). Os rebocos em gesso e cal serviram de apoio para os frescos decorativos, na preparação do solo e mesmo na fabricação de recipientes.

Também se descobriram nas escavações de Jericó (6 mil anos antes de Cristo) vestígios do emprego de gesso em moldagem. É do conhecimento geral que a grande Pirâmide, atribuída a Quéops, faraó do Egito durante a 4ª Dinastia por volta do ano 2800 antes da nossa era, preserva um dos vestígios mais antigos do uso do gesso na construção: para a

execução de acordo com uma técnica ainda não totalmente compreendida, juntas de montagem com uma precisão fantástica entre os blocos, alguns dos quais com 16 toneladas que constituem o monumento.

No séc. XVIII, a utilização do gesso na construção generalizou-se a ponto de, no âmbito das construções existentes, ¾ dos hotéis e a totalidades dos edifícios do Poder e da população terem sido feitos em painéis de madeira tosca e rebocos de gesso – e no caso das construções novas, cerca de 95% eram feitas em gesso.

Nessa época, a fabricação do gesso ainda era feita de forma empírica e rudimentar. É assim que **Lavoisier**, em **1768**, apresenta à Academia de Ciências o primeiro estudo cientifico sobre os fenômenos que estão na origem da preparação do gesso.

No século seguinte, os trabalhos de diferentes autores e principalmente os de **VantHoff** e nomeadamente os de **Le Chatelier** vão permitir abordar uma explicação científica sobre a desidratação da gipsita. Foram seguramente estes trabalhos que suscitaram e estimularam os esforços que, no âmbito da fabricação do gesso e cujos meios teriam evoluído muito pouco ao longo dos tempos e permaneciam ainda muito rudimentares, fomentaram uma profunda transformação dos equipamentos. No entanto à luz da fabricação e dos meios que ela utiliza, foi só no século XX que, graças à evolução industrial, foram introduzidas as transformações mais profundas, as que levaram aos equipamentos atuais.

b. As propriedades do gesso

Encontrado praticamente em todo o mundo, o gesso ocorre no Brasil abundantemente em terrenos cretáceos de formação marinha, sobretudo nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Piauí e Pernambuco.

Gesso é um mineral composto fundamentalmente de sulfato de cálcio hidratado ($CaSO_4.2H_2O$) e do hemidrato obtido pela calcinação deste ($CaSO_4.½H_2O$). Cristaliza no sistema monoclínico, formando cristais de diferentes espessuras, habitualmente chamados de selenita.

O gesso pode ser encontrado ainda sob a forma de agregados granulares, quando recebe o nome de alabastro, ou em veios fibrosos, com o nome de espato-de-cetim, em virtude do brilho sedoso. A forma pulverulenta, não cristalizada, recebe o nome de gipsita. Em geral tem cor branca, mas impurezas diversas podem dar-lhe aspecto acinzentado, amarelado, rosado ou marrom **(NIELSEN, 1994).**

Quando se umedece o gesso com cerca de um terço de seu peso em água, forma-se uma massa plástica que endurece em cerca de dez minutos e sofre expansão, pelo que se utiliza na confecção de moldes com formas bem definidas. Usa-se gesso também em construção, para acabamento do reboco e do teto das habitações e, modernamente, na confecção de rebaixamentos e divisórias, juntamente com papelão.

O gesso entra também na composição do cimento portland, na proporção de dois a três por cento, como agente retardador de pegas. É ainda usado em aparelhos ortopédicos, em trabalhos de prótese dentária e outros campos em que se faz necessária à confecção de moldes e fôrmas especiais.

O gesso tem um coeficiente de condutibilidade térmica correspondente a 0,46W/m.°C, sendo, portanto, considerado um isolante térmico **(INCROPERA, 2003).**

Outros empregos do gesso são: moldes (cerâmica, fundição e dentário), imobilização (engessamento em humanos e animais) e também como adubo (gipsita).

Uma boa característica do gesso e seu baixo impacto ambiental, pois devido a sua baixa temperatura de calcinação (o cal, por exemplo, é calcinado à cerca de 800°C) implicando em um consumo de energia muito baixo, reduzindo o impacto ambiental do processo produtivo.

Durante a calcinação é liberada para a atmosfera grande quantidade de água, além dos resíduos do processo de combustão. Estas características fazem do gesso um dos aglomerantes menos agressivos ao ambiente.

2.5.3 O EPS (Isopor)

O EPS - poliestireno expandido é um plástico celular e rígido, que pode apresentar uma variedade de formas e aplicações. Apresenta-se como uma espuma moldada, constituída por um aglomerado de grânulos **(MANO 1999).**

Nas instalações dos produtores de isopor, a matéria prima é sujeita a um processo de transformação física, não alterando as suas propriedades químicas. Esta transformação processa-se em três etapas: a pré-expansão, o armazenamento intermediário, a moldagem.

Duas características do isopor têm fortalecido a sua presença no mercado consumidor, aonde vem obtendo crescente participação: a leveza e a capacidade de isolamento térmico, às quais ainda se associa o baixo custo.

É bastante utilizado na confecção de caixas térmicas para acondicionamento de alimentos e bebidas, e em construção civil.

a. As principais características do EPS

As principais características do isopor e que lhe concedem uma grande versatilidade de utilização, são (**SOUZA, 2002**):

Baixa condutibilidade térmica - a estrutura de células fechadas, cheias de ar (97% de seu volume), dificultam a passagem do calor o que confere ao isopor um grande poder isolante – K = 0,030W/m°C

Leveza - as densidades do isopor variam entre os 10 - 30 kg/m^3, permitindo uma redução substancial do peso das construções.

Resistência mecânica - apesar de muito leve, o isopor tem uma resistência mecânica elevada, que permite o seu emprego onde esta característica é necessária. Sua resistência à compressão normalmente varia de 7000 kgf/m² até 14000 kgf/m², maior que a resistência de muitos solos.

Baixa absorção de água - o isopor não é higroscópico. Mesmo quando imerso em água o isopor absorve apenas pequenas quantidades de água. Tal propriedade garante que o isopor mantenha as suas características térmicas e mecânicas mesmo sob a ação da umidade.

Fácil de manusear e colocar - o isopor é um material que se trabalha com as ferramentas habitualmente disponíveis, garantindo a sua adaptação perfeita à obra. O baixo peso do isopor facilita o manuseamento do mesmo em obra. Todas as operações de movimentação e colocação resultam significativamente encurtadas.

Econômico - tomando em conta os diversos parâmetros como as quebras, mão de obra, manuseamento, baixo peso, transporte, armazenagem, a embalagem em isopor resulta economicamente vantajosa.

b. Algumas propriedades do EPS (isopor)

b.1 Absorção de água

O EPS não é higroscópico. Quando imerso em água ele absorve apenas pequenas quantidades de água, devido à sua estrutura de células fechadas e ao fato de as paredes das células serem impermeáveis à água, a água fica retida nos poucos espaços entre as células. O que significa que o isopor volta a secar facilmente, sem perder qualquer das suas propriedades e que os valores de absorção diminuem com o aumento da massa volumétrica.

Esta propriedade e muito importante devido ao fato da água deteriorar a capacidade de isolamento de um material isolante térmico. No caso do isopor, devido a sua fraca absorção de água, este mantém grande parte de sua capacidade de isolamento. Verifica-se uma redução do

Coeficiente de Condutibilidade Térmica de 3 - 4%, para cada 1% de volume de água absorvido.

b.2 Propriedades térmicas do EPS

A propriedade mais importante do EPS é sua capacidade de resistir à passagem do calor. Isto se deve a sua estrutura celular, que é constituída por muitos milhões de células fechadas com diâmetros de alguns décimos de milímetros e com paredes de 1mm. Esta espuma é composta de aproximadamente por 2% de poliestireno e 98% de ar. Assim o fator decisivo para a boa capacidade de isolamento térmico o EPS é o de manter, permanentemente, uma grande quantidade de ar, quase imóvel, dentro das suas células.

A capacidade de isolamento térmico é expressa no Coeficiente de Condutibilidade Térmica (CCT), habitualmente medido em [W/m°C]. Um coeficiente menor denota uma capacidade de isolamento térmico superior. Note-se, que para obter um efeito isolante numa aplicação construtiva, para além do CCT o outro fator determinante é a espessura da camada isolante empregue.

O CCT do EPS depende principalmente da sua massa volumétrica, diminuindo com o aumento da massa volumétrica.

Para efeito de cálculo, o valor do CCT do EPS é de 0,04 [W/m°C]. Assim com um emprego de massa volumétrica apropriada, de matérias primas específicas, bem como a adaptação das condições de fabrico, é possível a obtenção de valores de CCT inferiores.

b.3 Propriedades mecânicas do EPS

As propriedades mecânicas mais importantes do EPS relacionam-se com as condições de manuseamento e aplicação. Estas são as resistências à compressão, flexão, tração e à fluência sob compressão.

Os valores da resistência estão relacionados principalmente com a massa volumétrica do EPS. De uma maneira geral, os valores aumentam de uma maneira linear com a massa volumétrica. Os valores da resistência estão relacionados principalmente com a massa volumétrica do EPS. De uma maneira geral, os valores aumentam de uma maneira linear com a massa volumétrica.

Na compressão, o EPS comporta-se de uma maneira elástica até a deformação atingir cerca 2% da espessura da placa. Nesta situação, uma vez retirada a força que provocava a deformação, a placa recupera a espessura original.

Aumentando a força de compressão, supera-se o limite de elasticidade e verifica-se uma deformação permanente de parte das células que, no entanto, não se rompem. Em aplicações de deformação permanente do EPS, deve-se escolher a massa volumétrica para que se obtenham valores de compressão inferiores a 1% a longo prazo.

2.5.4 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.

a. Generalidades

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 (www. institutodopvc.com.br):

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 e elétrico e acústico;
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.

b. Caracterização do PVC

Faremos a seguir uma caracterização do PVC, cujo desempenho está diretamente associado a uma série de importantes características, que podem ser distribuídas em três grandes grupos: as propriedades físicas, as propriedades químicas e as propriedades físico-químicas (**MANO, 1999, MANO, 2000, ALBUQUERQUE, 1999, ALBUQUERQUE, 2000, MODERN PLASTIC ENCYCLOPEDIA, 1996**).

b.1 As propriedades físicas

As propriedades físicas são aquelas que não estão relacionadas com qualquer modificação estrutural a nível molecular dos materiais. Dentre estas, incluem-se as propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e óticas. Essas características são avaliadas por métodos clássicos, na maioria das vezes empíricos, descritos nas normas de cada país, quando existem.

As normas brasileiras são elaboradas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), As normas internacionais estão a cargo da International Organization for Standardization (ISO). A caracterização dos produtos brasileiros é encontrada em geral, obedecendo às normas ASTM.

b.1.1 As propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas compreendem a totalidade das propriedades que determinam a resposta dos materiais às influências mecânicas externas; refletem-se pela capacidade desses materiais desenvolverem deformações reversíveis e irreversíveis, e resistirem à fratura.

b.1.2 As propriedades térmicas

As propriedades térmicas nos polímeros são observadas quando calor é fornecido ou removido do material.

Um material polimérico caracteriza-se por ser mau condutor de calor e sua capacidade de transferir calor, isto é, conduzir calor, é quantificada e espelhada pela condutividade e difusividade térmicas. A capacidade de armazenar calor é traduzida pelo calor específico. As alterações dimensionais, em função das mudanças de temperatura, são estimadas através da expansão térmica.

As modificações observadas nos materiais quando sujeitos as variações de temperatura são de fundamental importância e incluem as temperaturas de fusão cristalina, T_m, e de transição vítrea, T_g.

b.1.3 As propriedades elétricas

Os polímeros são maus condutores de eletricidade. A maioria das propriedades elétricas desse isolante é função da temperatura. Isto é muito importante na eletrônica avançada, que na maioria das vezes tem que operar a altas temperaturas.

As principais características elétricas dos materiais poliméricos são: rigidez dielétrica, resistividade, condutividade e constante dielétrica.

b.1.4 As propriedades óticas

As propriedades óticas dos polímeros podem fornecer dados sobre a estrutura e ordenação moleculares, como também a respeito da existência de tensões sob deformação.

As principais propriedades óticas dos materiais poliméricos são: transparência, índice de refração. Biorrefrigerância e fotoelasticidade. Dentre estas as mais apresentadas pela literatura são a transparência e o índice de refração. As duas outras são função do índice de refração.

b.1.5 Propriedades químicas

Dentre as propriedades químicas mais importantes dos materiais poliméricos estão a resistência à oxidação, ao calor, às radiações ultravioleta, à água, ácidos e bases, a solventes e a reagentes. A seguir, descrevem-se as propriedades químicas mais relacionadas com o estudo em tela.

A Tabela 2.3 mostra as principais propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, óticas e químicas do PVC. Essas propriedades demonstram a versatilidade, a durabilidade e a viabilidade do uso do PVC através do seu uso bastante difundido em várias aplicações de uso cotidiano da população.

Apesar das propriedades demonstrarem a característica do PVC como isolante térmico, este trabalho demonstra que é possível usá-lo como condutor de calor, principalmente em função de seu baixo custo. Pode-se utilizá-lo como elemento absorvedor, protegendo-o das degradações inerentes a sua exposição à radiação solar e ao calor.

Tabela 2.3. Principais propriedades do PVC.

Propriedades	**Valor**
Peso molecular(PM)	50.000-100.000
Critalinidade	5-15 %
Resistência à Tração(R_T)	40,7 – 51,7 MPa
Alongamento na Ruptura(% Al)	30 – 80 %
Módulo de Elasticidade(E)	2,4 – 4,1 GPa
Tensão de Escoamento(TE)	40,7 – 44,8 MPa
Resistência à Compressão(R_C)	57,5 MPa
Resistência à Flexão(R_F)	120 MPa
Dureza Shore(D)	69-85
Razão de Poisson (υ)	0,38
Coeficiente de dilatação térmica(C^{-1})	(60 a 80) x 10^6
Coeficiente de Expansão Térmica Linear(e_t)	0,9 - 1,8 x 10^{-4} (^{o} C)$^{-1}$
Temperatura de Fusão Cristalina(T_m)	280 ^{o} C
Temperatura de Transição Vítrea(T_g)	80 ^{o} C
Temperatura de Distorção ao Calor(HDT)	75 ^{o} C
Absorção de água em 24h (%)	0,04-0,40

Fonte: www. institutodopvc.com.br

c. A obtenção do PVC

O PVC é o único material plástico que não é 100% originário do petróleo. Contém 57% de cloro e 43% de petróleo, o que representa uma vantagem se analisarmos os seguintes dados: as reservas de petróleo estão limitadas em 120 bilhões de toneladas, comparadas a 528 bilhões de toneladas de carvão e 1 bilhão de toneladas de sal de pedra.

Dois recursos naturais – sal e petróleo – são à base da fabricação do PVC. A partir do sal, através do processo de eletrólise, obtém-se o cloro, soda cáustica e hidrogênio. A eletrólise é a reação química resultante da passagem de uma corrente elétrica por água salgada, salmoura. Assim se dá a obtenção do cloro, que representa 57% do PVC produzido.

O petróleo passa por um processo mais longo. O primeiro passo é uma destilação do óleo cru, obtendo-se a nafta leve. Esta pasta, então passa pelo processo de craqueamento catalítico (quebra de moléculas grandes em moléculas pequenas com a ação de catalisadores para a aceleração do processo), gerando-se o etileno. Tanto o cloro quanto o etileno estão na fase gasosa e eles reagem produzindo o DCE (dicloro etano)

A partir do DCE, obtém-se o MVC (mono cloreto de vinila), unidade básica do polímero. As moléculas de MVC são submetidas ao processo de polimerização, ou seja, elas vão se ligando e formando uma molécula muito maior conhecida como PVC (policloreto de vinila).

A resina de PVC é um pó muito fino de cor branca que, misturado com aditivos (plastificantes, estabilizantes à radiação ultravioleta, estabilizantes térmicos, pigmentos, modificadores de impacto e outros) origina o composto PVC.

Um composto de PVC tem os tipos e as quantidades de aditivos específicas e necessárias para atender as características finais de desempenho do produto em que será transformado. Sendo assim, tem-se um composto específico para tubos, outro para perfis de janela, um terceiro para mantas de impermeabilização, um quarto para mangueiras de pressão e, assim, para cada produto de PVC. O esquema de obtenção do PVC encontra-se descrito na Figura 2.8.

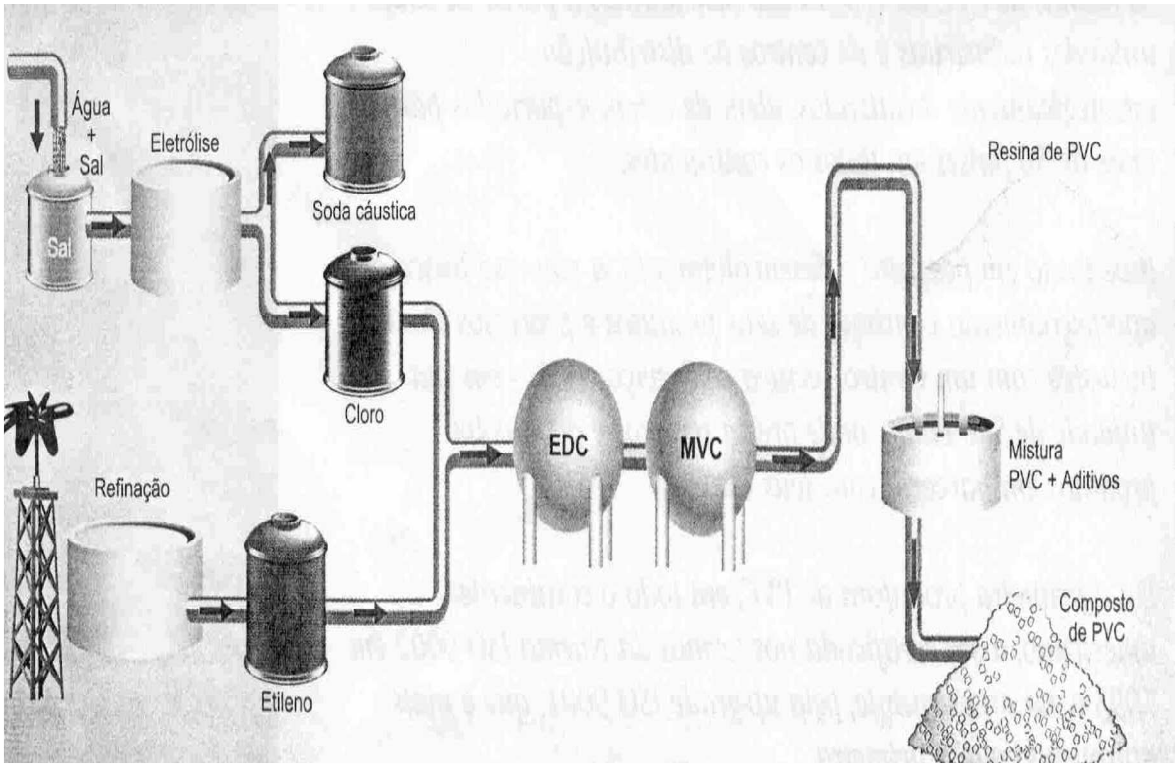

Figura 2.8 Esquema de obtenção do PVC (www.institutodopvc.com.br).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Materiais, Métodos e Equipamentos

O sistema de aquecimento considerado é composto por um coletor com grade absorvedora formada por tubos de PVC, em paralelo, e um reservatório térmico para armazenamento de água quente. A seguir são descritas as principais características do coletor e do armazenador térmico, mostrando seus processos de construção e montagem.

A grade absorvedora do coletor tem tubos, de entrada e saída de fluido, e é formada pela união de 12 conexões em T (tê) de PVC de ¾”, para cada tubo, onde estão conectados os 12 tubos absorvedores de mesmo material e diâmetro.

A caixa do coletor foi confeccionada em compósito de matriz cerâmica formado pela mistura de gesso, pó de poliestireno expandido e água, nas seguintes proporções, em volume: 1,0:1,0:0,3.

O coletor apresenta dimensões externas correspondentes a L = 2,10 m, B = 0,94 m e H = 0,17 m, com área interna correspondente a 1,6 m². É recoberto por uma lâmina de vidro plano transparente de espessura correspondente a 3 mm. É formado, portanto, por apenas três elementos, diferentemente dos coletores convencionais com cinco, quais sejam: caixa, grade absorvedora e vidro.

O processo de fabricação do coletor alternativo do sistema de aquecimento proposto seguiu as seguintes etapas:

1. Construção do molde;
2. Aplicação do desmoldante em todas as partes internas do molde;
3. Preparação do compósito com as seguintes proporções 1,0 G + 1,0 EPS + 0,3 A;
4. Colocação do compósito no espaço entre as laterais interna e externa e acima da cobertura da caixa interna;
5. Secagem da caixa por exposição direta à radiação solar;
6. Impermeabilização da caixa pela aplicação de uma mistura de cola para madeira, cimento e açúcar;
7. Abertura de dois furos na caixa para os tubos de entrada e saída de água;
8. Pintura da caixa e da estrutura metálica

Após a confecção da caixa partiu-se para a montagem da grade absorvedora do coletor que seguiu as etapas:

1. Corte dos tubos de PVC;

2. União das conexões em T utilizando pedaços de tubos de PVC de mesmo diâmetro através de cola especial para PVC;
3. Acoplamento dos tubos absorvedores nas conexões em T usando cola para PVC;
4. Teste de vedação da grade absorvedora;
5. Pintura da grade absorvedora;

O processo de montagem do coletor consistiu dos seguintes passos:

1. Colocação da grade absorvedora na caixa do coletor;
2. Colocação da cobertura transparente de vidro de 3 mm de espessura;
3. Montagem do coletor na estrutura metálica confeccionada em cantoneira, que tem inclinação correspondente a 15,5°S.

Os materiais necessários à construção do coletor em estudo foram: 2 sacos de gesso, 3 sacos de isopor. Utilizou-se também 24 tês de PVC de ¾” e 30 metros de tubo de PVC de ¾”. Seu peso final ficou em torno de 80 kg. Seu custo de fabricação ficou em torno de 100 reais. O produto usado para a impermeabilização da caixa do coletor foi uma mistura de cimento, cola branca, açúcar e a tinta utilizada para a sua pintura foi o esmalte sintético preto fosco.

O reservatório térmico alternativo proposto foi confeccionado a partir de um elemento base, um tambor de polietileno de 200 litros. O reservatório foi aberto em sua tampa superior e envolvendo o mesmo foi colocado um cilindro externo confeccionado em fibra de vidro com espessura em torno de 2 mm.

No cilindro de fibra foi rebitada uma estrutura confeccionada com tubos de PVC de ½” consistindo de dois anéis interligados por tubos retos, para conceder-lhe resistência. O fundo do reservatório foi construído em material compósito formado de gesso, EPS triturado e água e sua tampa foi construída em fibra de vidro. No espaço entre os dois elementos básicos, cilindro de fibra e tambor de polietileno, foi colocada uma camada de EPS triturado.

O processo de fabricação do reservatório alternativo 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. Confecção do cilindro de fibra de vidro que envolve o tambor de polietileno, utilizando molde de eucatex, através do processo hand-lay-up;
4. Confecção da estrutura do cilindro de fibra de vidro, usando tubos de PVC;
5. Confecção da tampa do reservatório utilizando molde de compensado.

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

1. Fixação da estrutura obtida no cilindro de fibra de vidro pelo uso de arrebites;
2. Confecção do fundo do tambor através da colocação do material compósito;
3. Abertura do furo para a passagem da tubulação do tambor de polietileno;
4. Colocação do tambor de polietileno no cilindro de fibra de vidro;
5. Colocação do EPS triturado no espaço entre os dois cilindros;
6. Colocação de material compósito no espaço entre os dois cilindros na parte superior dos mesmos;
7. Colocação da tampa do reservatório térmico alternativo.

O sistema de aquecimento proposto funciona em regime de termossifão, para um volume de água do reservatório de água quente correspondente a 200 litros e foi ensaiado para o diagnóstico de sua eficiência térmica, sendo levantados os seguintes parâmetros que o caracterizam e são necessários para a análise do seu desempenho térmico, como também a susceptibilidade dos tubos absorvedores atingirem o nível crítico para o início da degradação térmica dos tubos de PVC em torno de 60°C: temperatura de entrada e saída do fluido do coletor, temperaturas internas e externas do coletor, temperatura dos tubos absorvedores, temperatura da água contida no reservatório e radiação solar global. Foi também medido o tempo necessário para a uniformização da temperatura da massa fluídica no reservatório térmico de 200 litros.

As temperaturas de entrada e saída do fluido foram medidas através do uso de termopares cromel-alumel, conectados a um termômetro digital, no período entre 08:00 e 15:00 horas, em intervalos de 30 minutos; as temperaturas do coletor e tubos absorvedores foram medidas de 15 em 15 minutos entre 11:00 e 13:00 horas; a temperatura da massa fluídica foi medida após as sete horas de funcionamento. A radiação solar global foi medida com um radiômetro construído no LES/UFRN e calibrado no LES/UFPB, utilizando um Piranômetro padrão tipo Eppley.

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

A susceptibilidade à degradação térmica pode ser avaliada através dos níveis de temperatura alcançados pela superfície externa dos tubos absorvedores, que não devem alcançar 60°C, na qual se inicia esse processo degradativo.

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 50 litros de água quente do reservatório térmico, através de um registro localizado a 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 do encheu-se o reservatório térmico alternativo e o interligou-se a um coletor solar plano alternativo com superfície absorvedora formada por tubos de PVC e caixa de material compósito. 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 alternativo proposto para medir a temperatura da água, outro na superfície externa do mesmo para medir sua temperatura e outro para medir a temperatura ambiente. O teste consistiu em medir essas temperaturas, a cada hora, durante toda à noite para quantificar a queda de temperatura na massa de água contida no reservatório. As temperaturas foram medidas utilizando um termômetro digital.

O sistema de aquecimento alternativo encontra-se mostrado na Fig. 3.1.

Figura 3.1 Sistema solar de aquecimento proposto.

Apresenta-se a seguir as teorias e as equações necessárias à determinação dos parâmetros que traduzem o comportamento dos coletores e sistemas alternativos de aquecimento propostos, priorizando-se **o coeficiente global de perdas e o rendimento térmico (SOUZA, 2002, DUFFIE, 1991).**

3.2 Desenvolvimento teórico

a. Determinação dos parâmetros térmicos

Os parâmetros que melhor caracterizam a eficiência térmica de um coletor solar são **o rendimento térmico e o coeficiente global de perdas.**

a.1 Coeficiente global de perdas

A placa coletora após receber radiação se aquece, surgindo, em conseqüência, 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 quatro métodos distintos, quais sejam: Método da Temperatura Média de Placa, Método da Perda Térmica, Método das Trocas Térmicas e Método da Inversão de Fluxo.

Como o Método da Inversão Térmica requer um controle rígido de vários parâmetros, necessitando, por conseguinte, de um aparato tecnológico de grande sofisticação, resolveu-se determinar esse parâmetro a partir dos outros métodos, que a seguir são descritos.

a.1.1 Método da temperatura média de placa

Para determinar-se o Coeficiente Global de Perdas (U_{loss}) através desse método torna-se necessário o conhecimento do calor útil transferido ao fluido de trabalho (Q_u), da radiação solar global (I), dos parâmetros ópticos do coletor, absortividade da placa (α_p) e transmissividade do vidro (τ_v), da temperatura média da placa absorvedora (T_{pm}) e da temperatura ambiente (T_a). A equação (1) permite a determinação da grandeza pretendida

$$U_{loss} = \frac{(\tau_v . \alpha_p - \eta_t) I}{(T_{pm} - T_a)} \tag{3.1}$$

onde:

τ_v = transmissividade do vidro

α_p = absortividade da placa.

η_t = rendimento térmico, em %.

T_{pm} = temperatura média da placa absorvedora, em K.

T_a = temperatura ambiente, em K.

I = radiação solar global, em kW/m^2

a1.2 Método da perda térmica

Este método consiste na determinação do Coeficiente Global de Perda Térmica através do conhecimento dos parâmetros calor absorvido pelo coletor ($Q_{abs.}$), calor transferido ao fluido de trabalho (Q_u), temperatura média de placa (T_{pm}) 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), conforme as equações (3.2) a (3.5).

$$Q_{abs} = \tau_v.\alpha_p.\mathrm{I.A} \tag{3.2}$$

$$Q_u = \dot{m}.c_p.\Delta\mathrm{T} \tag{3.3}$$

$$Q_p = Q_{abs} - Q_u \tag{3.4}$$

$$U_{loss} = \frac{Q_p}{A.(T_{pm} - T_a)} \tag{3.5}$$

a.1.3 Método das trocas térmicas

Este método se caracteriza pela determinação do U_{loss} como função de todas as trocas térmicas que ocorrem no interior e para o exterior do sistema. Essas trocas sob a forma de convecção, condução e radiação, ocorrem pela cobertura, laterais e base do coletor sendo, portanto, o coeficiente pretendido determinado pela soma dos coeficientes do topo, laterais e fundo do coletor, conforme a equação 3.6.

$$U_{loss} = U_{topo} + U_{laterais} + U_{base} \tag{3.6}$$

a.1.3.1 Perdas pela cobertura

As perdas pela cobertura do coletor solar compreendem modos de transmissão de calor, do tipo convecção e radiação, entre a placa absorvedora e o ar atmosférico que envolve o sistema. O vidro torna-se opaco a radiação emitida pela placa absorvedora, reemitindo-a e refletindo-a de volta para a placa **(PALZ, 1995)**.

Para calcular as perdas pelo topo utilizando esse método adota-se as seguintes condições:

1. As temperaturas da placa absorvedora e da cobertura são uniformes em toda sua extensão;

2. Não há variação de energia na placa absorvedora e na cobertura, considerando-se, portanto, regime permanente;

3. Os fluxos de calor envolvidos são unidimensionais, havendo, portanto, propagação perpendicular às superfícies consideradas;

4. As perdas radiantes se dão para as camadas da atmosfera, consideradas um corpo negro a uma temperatura equivalente;

5. A cobertura de vidro é opaca a radiação infravermelha emitida pela chapa absorvedora;

6. Há um fluxo de calor unidimensional através do isolamento do fundo e laterais da caixa.

7. A Figura 3.2 mostra as trocas térmicas que ocorrem no interior do sistema e do mesmo para o meio que o envolve e o circuito térmico do coletor em estudo.

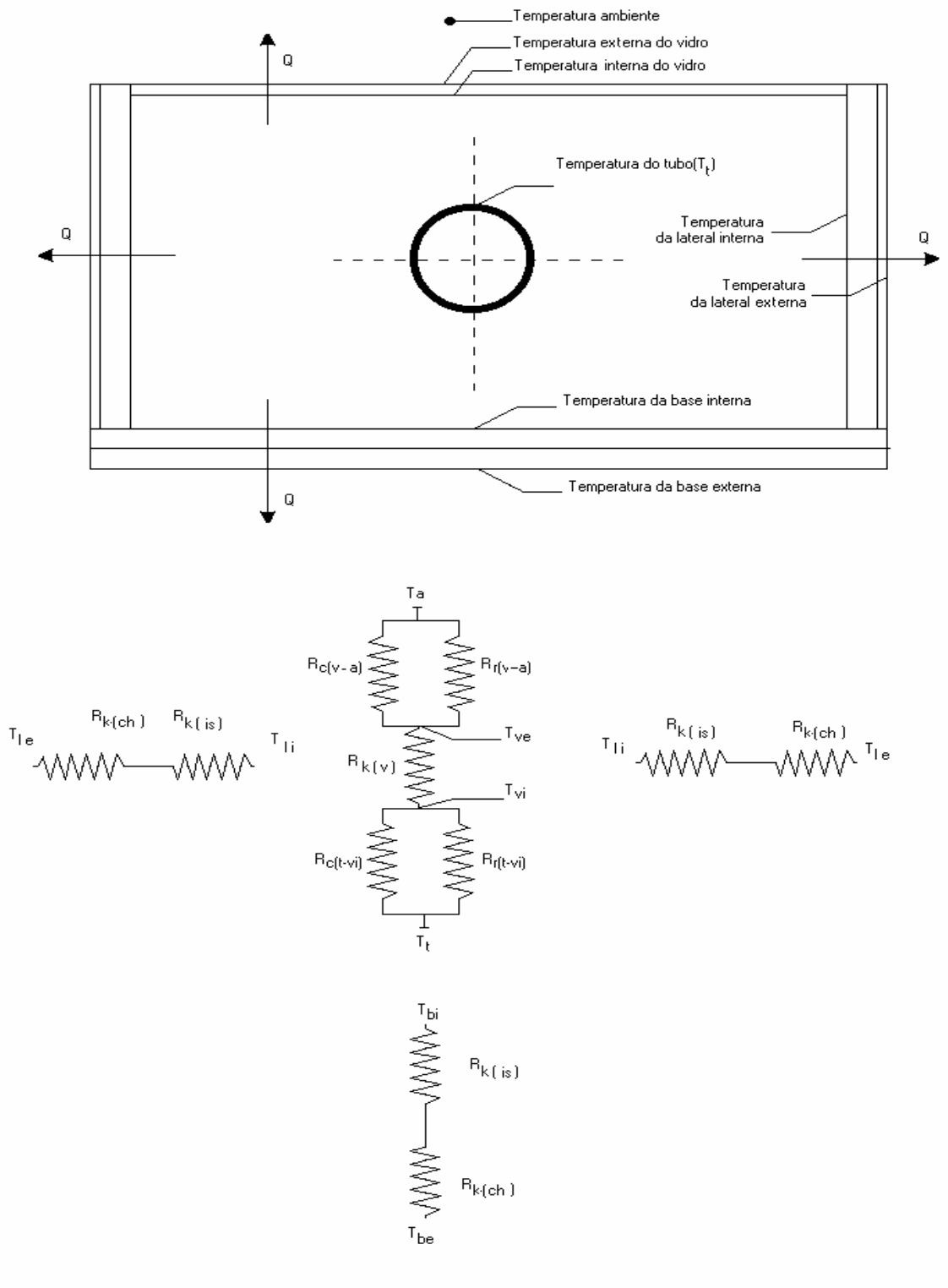

Figura 3.2. Circuitos térmicos em um coletor solar.

O coeficiente de perda pela cobertura (topo) é dado pela equação (3.7).

$$U_{topo} = \frac{1}{\Sigma R_{eq}} \tag{3.7}$$

Do circuito térmico da figura 3.2, tem-se que:

$$\Sigma R_{eq} = R_{eq(t-vi)} + R_{eq(vi-ve)} + R_{eq(ve-a)} \tag{3.8}$$

Logo,

$$U_{topo} = \frac{1}{(R_{eq(t-vi)} + R_{eq(vi-ve)} + R_{eq(ve-a)}} \tag{3.9}$$

Onde:

$$R_{eq(t-vi)} = \frac{1}{\frac{1}{R_{c(t-vi)}} + \frac{1}{R_{r(t-vi)}}} \tag{3.10}$$

$$R_{eq(vi-ve)} = R_{k(vi-ve)} \tag{3.11}$$

$$R_{eq(ve-a)} = \frac{1}{\frac{1}{R_{c(ve-a)}} + \frac{1}{R_{r(ve-a)}}} \tag{3.12}$$

Sendo que:

$\mathbf{R_{c(t-vi)}}$ = Resistência convectiva entre o tubo absorvedor e a superfície interna da cobertura, em (m^2.K/W).

$\mathbf{R_{r(t-vi)}}$ = Resistência radiativa entre o tubo absorvedor e a superfície interna da cobertura, em(m^2.K/W).

$\mathbf{R_{k(vi-ve)}}$ = Resistência condutiva entre as superfícies interna e externa da cobertura transparente, em (m^2.K/W).

$\mathbf{R_{c(ve-a)}}$ = Resistência convectiva entre a superfície externa da cobertura e o ar ambiente, em (m^2.K/W).

$\mathbf{R_{r(ve-a)}}$ = Resistência radiativa entre a superfície externa da cobertura e o ar ambiente, em (m^2.K/W).

Substituindo-se as equações (3.10), (3.11) e (3.12) em (3.9), tem-se a equação (3.13) dada por:

$$U_{topo} = \frac{1}{\frac{1}{h_{c(t-vi)} + h_{r(t-vi)}} + \frac{e_{vi}}{k_{vi}} + \frac{1}{h_{c(ve-a)} + h_{r(ve-a)}}} \tag{3.13}$$

Onde:

$h_{c(t - vi)}$ = coeficiente de transmissão de calor por convecção entre o tubo absorvedor e a superfície interna do vidro de cobertura, em W/m^2.K.

$h_{r(t - vi)}$ = coeficiente de transmissão de calor por radiação entre o tubo absorvedor e a superfície interna do vidro de cobertura em W/m^2.K.

e_{vi} = espessura do vidro, em mm.

K_{vi} = condutividade térmica do vidro, W/m^2.K.

$h_{c(ve - a)}$ = coeficiente de transmissão de calor por convecção entre a superfície externa do vidro e ao ar ambiente, em W/m^2.K.

$h_{r(ve - a)}$ = coeficiente de transmissão de calor por radiação entre a superfície externa do vidro e ao ar ambiente, em W/m^2.K.

O coeficiente de transmissão de calor por convecção entre a placa absorvedora e a superfície interna obedece ao mecanismo da convecção livre em espaço fechado. Determinar o coeficiente de transferência de calor associado à convecção livre em espaços fechados é matéria de numerosas pesquisas. Estudos desenvolvidos por Buchberg para a convecção livre em espaços fechados, especificamente dispositivos relacionados à energia solar, mais precisamente coletores solares, mostram que tal coeficiente convectivo pode ser calculado pela equação abaixo.

$$h_{c(t-vi)} = N_{u\delta} \cdot \frac{k_{ar}}{\delta} \tag{3.14}$$

Onde:

k_{ar} = condutividade térmica do ar, em W/m.K.

δ = espessura da camada de fluido, em mm.

$$N_{u\delta} = c.(R_a)^n \left(\frac{H}{\delta}\right)^m$$ = número de Nusselt.

H = comprimento da camada de fluido, em mm.

A constante **c** e os expoentes **n** e **m**, têm valores empíricos recomendados para a convecção livre, dentro do domínio do numero de Prandtl, para o ar na temperatura média do sistema. Esse número faz parte do número de Rayleigh, conforme a equação (3.15).

$$R_a = \frac{g.\beta(T_t - T_{vi}).\delta^3.P_r}{\nu^2} \tag{3.15}$$

Onde:

g = constante da aceleração da gravidade, em m/s^2.

β = coeficiente de dilatação térmica, K^{-1}.

ν = viscosidade cinemática, em m^2/s**.**

Pr = número de Prandtl.

O coeficiente de transmissão de calor por radiação entre a placa absorvedora e a superfície interna do vidro de cobertura é calculado conforme modelo apresentado por Duffie & Beckman, 1991.

$$h_{r(t-v)} = \frac{\sigma . \in_v . \left(Tt^4 - Tv^4\right)}{\left(T_t - T_v\right)} \tag{3.16}$$

Onde:

σ = constante de Stefan-Boltzman, em $W/m^2.K^4$

$\boldsymbol{\varepsilon_v}$ = emissividade da cobertura de vidro.

$\mathbf{T_t}$ = temperatura média dos tubos, em K.

$\mathbf{T_{vi}}$ = temperatura média da cobertura de vidro, em K.

O coeficiente de transferência de calor, por convecção, entre a superfície externa do vidro e o ar ambiente, pode segundo Duffie&Beckman(1991), ser determinado por:

$$h_{c(ve-a)} = 2{,}8 + 3.v_v \tag{3.17}$$

Esta equação é valida para velocidades de vento compreendidas entre 0 e 7 m/s. No local onde foram feitos os testes a velocidade média situava-se entre 2,0 e 3,0 m/s.

O coeficiente de troca térmica radiativa entre a superfície externa da cobertura e a abóbada celeste, conforme Duffie&Beckman,1991, é função das condições climáticas do local considerado podendo ser determinado através da equação (3.18).

$$h_{r(ve-a)} = 5{,}16.10^{-8} \frac{(T_{ve}{}^4 - Tsky^4)}{(T_{ve} - T_a)} \tag{3.18}$$

Onde:

T_{ve} = temperatura externa do vidro, em K.

T_{sky} = temperatura da abóbada celeste, em K.

T_a = temperatura ambiente, em K.

Sem incorrer em erros significativos, pode-se obter o valor de T_{sky}, a partir de T_a, através da equação (3.19).

$$T_{sky} = 0{,}0552 \ .T_a{}^{1,5} \tag{3.19}$$

a.1.3.2 Perdas pelas laterais e base do coletor

Uma maneira simplificada de se obter as perdas pelas laterais e pela base do coletor é considerar o fluxo de calor que sai do sistema por condução através do isolante e da caixa do coletor e calcular o coeficiente global de perdas de calor para esta situação, conforme as equações (3.20) e (3.21).

$$U_{laterais} = \frac{1}{R_{kc}+R_{kis}} \tag{3.20}$$

Onde:

R_{kc} = resistência condutiva do material da caixa do coletor, em m^2.K/W.

$R_{kis.}$ = resistência condutiva do isolante térmico, em m^2.K/W**.**

Ou,

$$U_{laterais} = \frac{1}{\frac{e_c}{k_c}+\frac{e_{is}}{k_{is}}} \tag{3.21}$$

Do mesmo modo obtém-se o valor das perdas térmicas pela base inferior, empregando-se a equação (3.22).

$$U_{base} = \frac{1}{\frac{e_{ch}}{k_{ch}}+\frac{e_{is}}{k_{is}}+\frac{e_{caixa}}{k_{caixa}}} \tag{3.22}$$

Onde:

$\mathbf{e_{ch}}$ **=** espessura da chapa, em mm.

$\mathbf{k_{ch}}$ **=** condutibilidade térmica da chapa, em W/m.K.

$\mathbf{e_{is}}$ **=** espessura do isolamento, em mm.

$\mathbf{k_{is}}$ **=** condutibilidade térmica do isolamento, em W/m.K.

$\mathbf{e_{caixa}}$ **=** espessura do perfil da caixa, em mm.

$\mathbf{k_{caixa}}$ = condutibilidade térmica do material da caixa, em W/m.K.

a.2 Determinação do calor perdido pelo coletor

A soma das quantidades de calor perdido por condução, convecção e radiação, pelo topo, laterais e fundo, resulta no calor total perdido pelo coletor para o meio ambiente. As equações abaixo determinam essas perdas.

$$Q_{p(topo)} = U_{topo}.\mathrm{A}_{topo}.(T_{pm} - T_a) \tag{3.23}$$

$$Q_{p(lat)} = U_{lat}.\mathrm{A}_{lat}.(T_{li} - T_{le}) \tag{3.24}$$

$$Q_{p(base)} = U_{base}.\mathrm{A}_{base}.(T_{bi} - T_{be}) \tag{3.25}$$

O calor perdido total será expresso por:

$$Q_{p(total)} = Q_{p(topo)} + Q_{p(lat)} + Q_{p(base)} \tag{3.26}$$

a.3 Determinação do rendimento térmico

$$\eta_t = \frac{Q_u}{\mathrm{A.I}} \tag{3.27}$$

$$Q_u = \dot{m}.c_p.\Delta T \tag{3.28}$$

Q_u = energia total útil transferida ao fluido de trabalho, em kW.

I = radiação solar global, em kW/m^2 .

A = área do coletor (área exposta à radiação solar), em m^2.

$\dot{m}$ = vazão mássica, em kg/s.

c_p = calor específico da água, em KJ/kg ^{o}C.

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

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão avaliados a seguir os resultados obtidos com o sistema de aquecimento alternativo e o reservatório térmico.

4.1 Sistema de aquecimento alternativo

As Tabelas a seguir mostram os dados medidos nos testes realizados para o levantamento de desempenho do coletor e sistema de aquecimento em estudo.

Os dados relativos ao primeiro, segundo, terceiro, quinto e sexto dias de ensaio correspondem ao sistema em funcionamento durante 7 horas, enquanto que para o quarto e sétimo dias o sistema já se encontrava em funcionamento por quatro e sete dias, respectivamente.

Tabela 4.1 Dados do primeiro dia de teste.

TEMPO (HORA)	$T_{ENTRADA}$ (°C)	$T_{SAÍDA}$ (°C)	ΔT (°C)	I (KW/m²)	η_t (%)
8:00 - 9:00	31	40	9	0,65	29
9:00-10:00	33	42	9	0,65	29
10:00-11:00	35	46	11	0,7	33
11:00-12:00	35	49	14	0,75	39
12:00-13:00	36	51	15	0,75	42
13:00-14:00	39	53	14	0,75	39
14:00-15:00	39	47	8	0,65	26
MÉDIA	**35,43**	**46,86**	**11,43**	**0,70**	**34**

Tabela 4.2 Dados do segundo dia de teste.

TEMPO (HORA)	$T_{ENTRADA}$ (°C)	$T_{SAÍDA}$ (°C)	ΔT (°C)	I (KW/m²)	η_t (%)
8:00 - 9:00	31	43	12	0,65	39
9:00-10:00	33	45	12	0,72	41
10:00-11:00	35	48	13	0,75	36
11:00-12:00	36	50	14	0,73	40
12:00-13:00	37	50	13	0,73	37
13:00-14:00	39	50	11	0,73	32
14:00-15:00	40	49	09	0,7	27
MÉDIA	**35,86**	**47,86**	**12,00**	**0,72**	**35**

Tabela 4.3 Dados do terceiro dia de teste.

TEMPO (HORA)	$T_{ENTRADA}$ (°C)	$T_{SAÍDA}$ (°C)	ΔT (°C)	I (KW/m²)	η_t (%)
8:00 - 9:00	31	41	10	0,63	33
9:00-10:00	32	44	12	0,7	36
10:00-11:00	34	46	13	0,7	36
11:00-12:00	35	48	13	0,75	36
12:00-13:00	36	48	12	0,75	34
13:00-14:00	37	48	11	0,7	33
14:00-15:00	39	49	9	0,68	32
MÉDIA	**34,86**	**46,29**	**11,43**	**0,70**	**34**

Tabela 4.4 Dados do quarto dia de teste.

TEMPO (HORA)	$T_{ENTRADA}$ (°C)	$T_{SAÍDA}$ (°C)	ΔT (°C)	I (KW/m²)	η_t (%)
8:00 - 9:00	35	45	10	0,65	32
9:00-10:00	39	47	8	0,72	23
10:00-11:00	41	52	11	0,75	31
11:00-12:00	42	53	11	0,75	31
12:00-13:00	42	52	10	0,75	28
13:00-14:00	42	51	9	0,7	27
14:00-15:00	43	51	8	0,65	26
MÉDIA	**40,57**	**50,14**	**9,57**	**0,71**	**28**

Tabela 4.5 Dados do quinto dia de teste.

TEMPO (HORA)	$T_{ENTRADA}$ (℃)	$T_{SAÍDA}$ (℃)	ΔT (℃)	I (KW/m²)	η_t (%)
8:00 - 9:00	30	41	11	0,65	36
9:00-10:00	32	44	12	0,7	36
10:00-11:00	34	47	13	0,73	37
11:00-12:00	36	48	12	0,75	34
12:00-13:00	38	49	11	0,75	31
13:00-14:00	40	49	9	0,7	27
14:00-15:00	41	49	8	0,65	26
MÉDIA	**35,86**	**46,71**	**10,86**	**0,70**	**32**

Tabela 4.6 Dados do sexto dia de teste.

TEMPO (HORA)	$T_{ENTRADA}$ (℃)	$T_{SAÍDA}$ (℃)	ΔT (℃)	I (KW/m²)	η_t (%)
8:00 - 9:00	30	40	10	0,65	32
9:00-10:00	32	45	13	0,7	39
10:00-11:00	34	49	15	0,75	42
11:00-12:00	36	51	15	0,8	39
12:00-13:00	38	51	13	0,78	35
13:00-14:00	40	51	11	0,7	33
14:00-15:00	42	50	8	0,65	26
MÉDIA	**36,00**	**48,14**	**12,14**	**0,72**	**35**

Tabela 4.7 Dados do sétimo dia de teste.

TEMPO (HORA)	$T_{ENTRADA}$ (°C)	$T_{SAÍDA}$ (°C)	ΔT (°C)	I (KW/m²)	η_t (%)
8:00 - 9:00	37	47	10	0,65	32
9:00-10:00	38	50	12	0,7	36
10:00-11:00	39	53	14	0,75	39
11:00-12:00	41	55	14	0,8	37
12:00-13:00	42	55	13	0,75	36
13:00-14:00	44	55	11	0,7	33
14:00-15:00	46	55	9	0,65	29
MÉDIA	**41,00**	**52,86**	**11,86**	**0,71**	**35**

Os dados da tabela mostram que os valores do gradiente de temperatura obtidos são significativos, principalmente se levarmos em conta que o coletor tem apenas 1,6m² de área de exposição à radiação solar incidente. As temperaturas de saída obtidas foram sempre superiores à temperatura ideal para o banho, entre 36 e 38°C.

Os valores de eficiência térmica foram compatíveis com os que apontam a literatura para coletores alternativos, inferiores a 50%, de valores menores que os relativos aos coletores convencionais disponíveis comercialmente, que possuem a lã de vidro como isolante térmico.

A temperatura ambiente media no local dos testes ficou em torno de 31°C e a radiação solar global media no período de realização dos testes esteve em torno de 700W/m², dentro da faixa média para o Nordeste brasileiro, entre 500 e 700 W/m².

Para ter-se uma análise comparativa entre os dias de ensaio, faz-se a seguir a Tabela 4.8 que mostra os valores médios obtidos para os cinco dias de testes onde o ensaio correspondeu ao 1° dia. Serão também apresentados gráficos que mostram o comportamento assumido por tais parâmetros.

Os valores relativos aos dias 27.02 (tabela 4.4) e 21.03 (tabela 4.7) correspondem a ensaios onde a água contida no reservatório circulou no coletor durante quatro e sete dias respectivamente, sem que houvesse retirada de água. Para esses dias percebe-se que as temperaturas de entrada e saída de água do coletor foram superiores as obtidas para apenas um dia de ensaio. Por esse fato a temperatura da massa líquida no tambor também atingiu valores mais elevados.

Tabela 4.8 Dados médios dos dias de testes realizados com o coletor alternativo.

DIA	$T_{ENTRADA}$ (°C)	$T_{SAÍDA}$ (°C)	ΔT (°C)	I (KW/m²)	η_t (%)
DIA 1	35,4	46,9	11,5	0,7	34
DIA 2	35,9	47,9	12	0,72	35
DIA 3	34,9	46,3	11,4	0,7	34
DIA 4	35,9	46,7	10,8	0,7	32
DIA 5	36	48,1	12,1	0,72	35
MÉDIA	**35,62**	**47,18**	**11,56**	**0,708**	**34**

Em relação aos valores percebe-se uma pequena variação entre os dias de ensaios realizados, para todos os parâmetros medidos. Em relação à temperatura de entrada a variação máxima ficou em torno de 2%. A temperatura de saída teve variação máxima em torno de 4%. O gradiente de temperatura teve a maior variação, em torno de 10%. No rendimento térmico a variação máxima correspondeu a 9%. A radiação solar teve variação máxima de 3%.

Essas diferenças podem ser explicadas pelas variações de intensidade de radiação solar global, em função das variadas condições solarimétricas, principalmente levando-se em conta que as leituras dos parâmetros foram realizadas de meia em meia hora. Seria importante que as leituras pudessem ser adquiridas com um intervalo menor de medição para uma melhor avaliação dos resultados obtidos. Isso, porém não representa qualquer fator negativo em relação ao uso do sistema em estudo, uma vez que as temperaturas obtidas estão muito acima das ideais de banho.

As Figuras 4.1, 4.2., 4.3. e 4.4. mostram o comportamento assumido pelos valores médios calculados dos parâmetros avaliados.

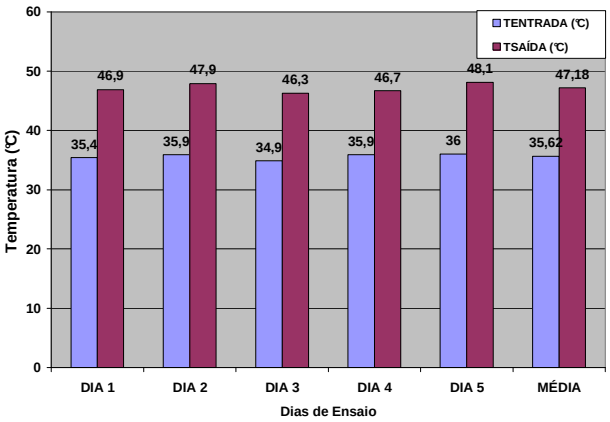

Figura 4.1 Comportamento assumido pelos valores médios das temperaturas de entrada e saída do coletor em estudo para os vários dias de testes.

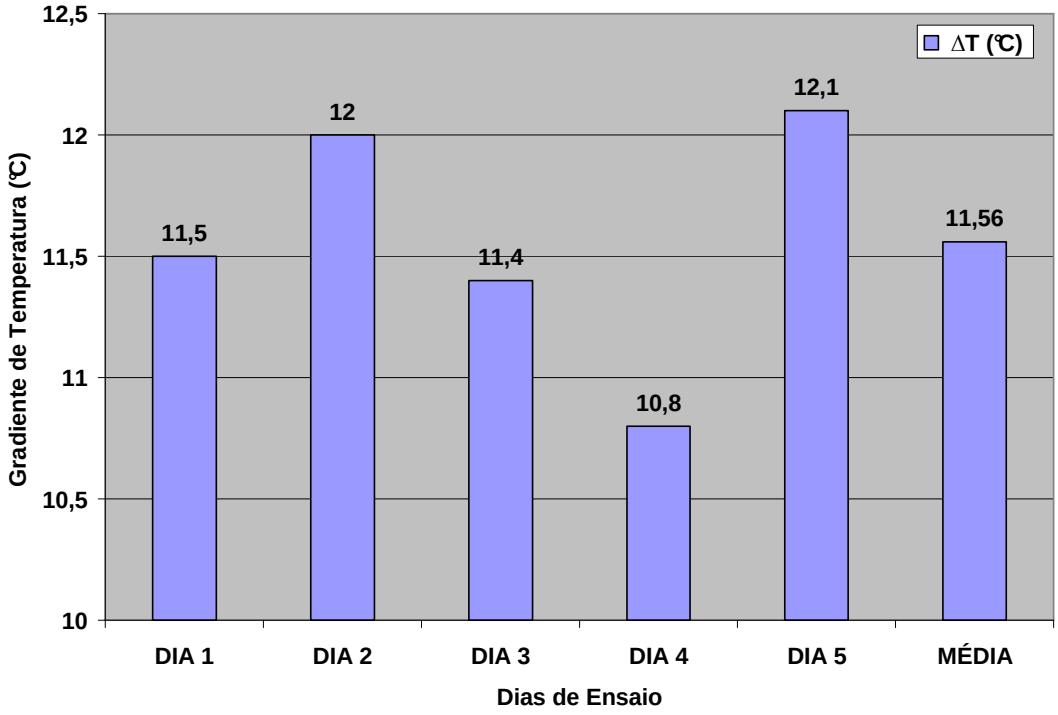

Figura 4.2 Comportamento assumido pelos valores médios do gradiente de temperatura obtido no coletor em estudo.

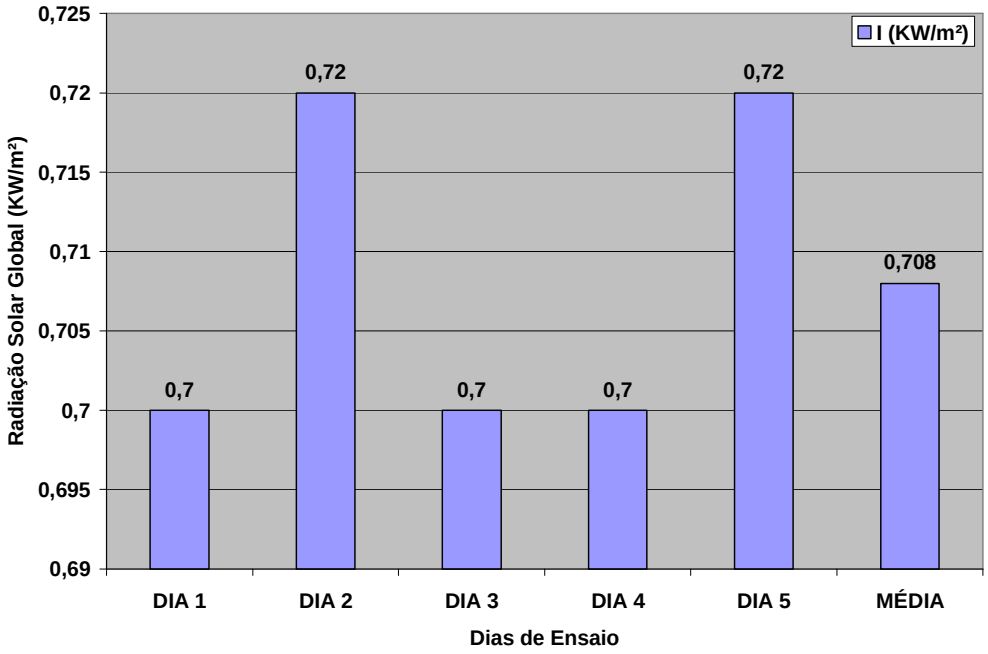

Figura 4.3 Comportamento assumido pelos valores médios da radiação solar global.

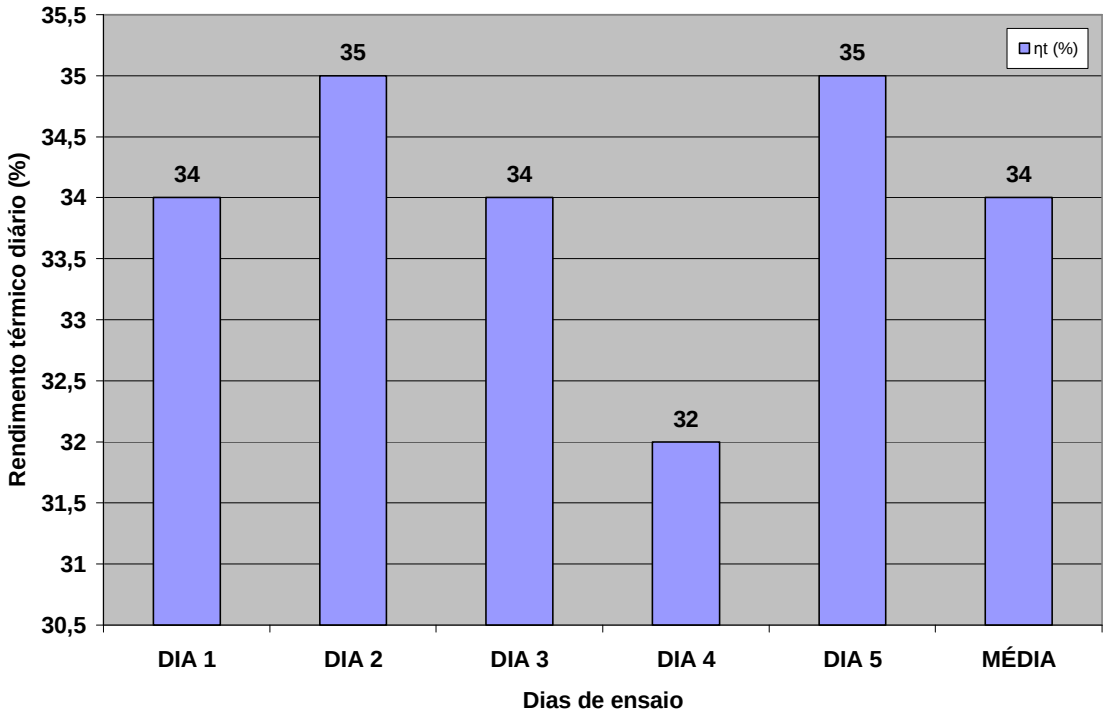

Figura 4.4 Comportamento assumido pelos valores médios do rendimento térmico diário.

Para avaliar a velocidade de aquecimento da água contida no reservatório térmico, mediu-se sua temperatura no fundo, a ¼, ½, ¾ e na parte de cima do reservatório térmico, após as sete horas de funcionamento, cujos valores encontram-se mostrados para um dia na Tabela 4.9. Esses dados são correspondentes a um tempo de funcionamento do sistema de um dia.

Tabela 4.9 Níveis de temperatura em vários pontos do reservatório térmico para ensaio com duração de um dia.

TEMPO (HORA)	**Tbaixo (°C)**	**T1/4 (°C)**	**Tmeio (°C)**	**T3/4 (°C)**	**Tcima (°C)**
8:00 - 9:00	30	30	30	30	31
9:00-10:00	31	31	31	35	37
10:00-11:00	32	33	34	36	39
11:00-12:00	32	34	36	38	42
12:00-13:00	34	36	40	40	45
13:00-14:00	39	38	43	45	47
14:00-15:00	40	42	44	47	47
FINAL DO DIA	**41,00**	**43,00**	**44,00**	**47,00**	**47,00**

Tabela 4.10 Níveis de temperatura em vários pontos do reservatório térmico para vários dias de ensaio.

DIA	Tbaixo (°C)	T1/4 (°C)	Tmeio (°C)	T3/4 (°C)	Tcima (°C)	Tempo Func.
DIA 1	42	44	45	48	48	7h
DIA 2	49	50	50	50	50	49h
DIA 3	44,00	46,00	48,00	49,00	49,00	28h
DIA 4	41,00	43,00	44,00	47,00	47,00	7h
DIA 5	41,00	44,00	47,00	47,00	48,00	7h
DIA 6	46,00	46,00	48,00	49,00	50,00	49h

Os valores de temperatura medidos mostram que a massa de água no reservatório térmico apresenta níveis de temperatura acima do ideal para banho, demonstrando que o sistema foi capaz de aquecer toda a água reservatório em apenas um dia de funcionamento. Isso é uma importante característica para um sistema solar de aquecimento de água.

Para avaliar comparativamente o comportamento assumido pelos valores de temperatura mostrados na Tabela 4.10, construiu-se o gráfico da Figura 4.5, mostrado a seguir, para um dia de funcionamento.

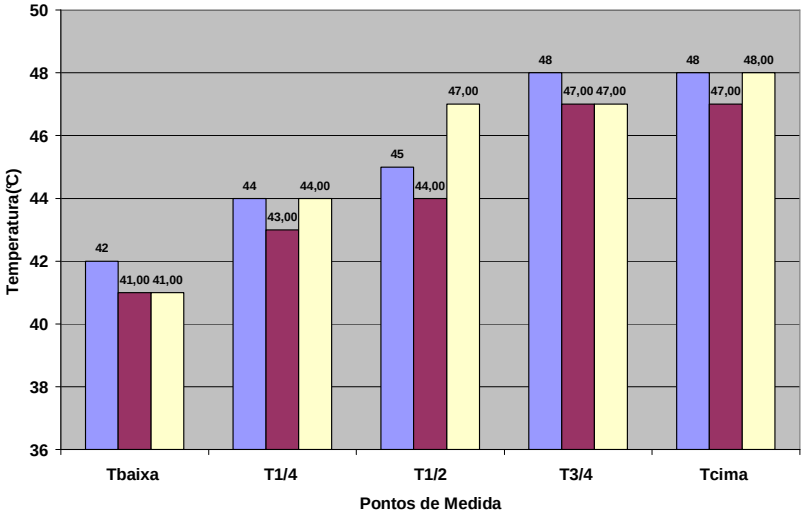

Figura 4.5 Comportamento assumido em níveis de temperatura em vários pontos do reservatório térmico.

O gráfico mostra que os valores de temperatura para os três dias avaliados estiveram muito próximos, mostrando um comportamento similar do sistema em consonância com os níveis de temperatura, praticamente constantes.

Para avaliar o sistema na condição real de funcionamento procedeu-se a simulação dos banhos através da retirada de ¼ de volume de água do reservatório, nos seguintes horários: 07:00h, 12:00h e 18:00h. Através de um registro colocado a ¾ do reservatório, a partir da base, retirava-se 50 litros de água quente e em seguida recolocava-se a mesma quantidade de água no reservatório. Os valores correspondentes aos níveis de temperatura, para duas seqüências de ensaios, antes e após cada retirada de água encontram-se mostrados na Tabela 4.11. A primeira retirada de água deu-se às 18:00h, ou seja, três horas após o término do ensaio do coletor.

Tabela 4.11 Dados de temperatura do ensaio de simulação dos banhos.

Dia	Tágua retirada (°C)	Tágua após recolocação (°C)	Hora
5/mar	47	43	18:00
6/mar	38	35	07:00
6/mar	44	40	12:00
6/mar	43	39	18:00
7/mar	35	31	07:00
7/mar	44	40	12:00
7/mar	45	41	18:00
8/mar	36	33	07:00
8/mar	43	38	12:00
8/mar	43	38	18:00
21/mar	48	44	18:00
22/mar	37	34	07:00
22/mar	48	40	12:00
22/mar	44	40	18:00
23/mar	36	33	07:00
23/mar	46	41	12:00
23/mar	45	41	18:00
24/mar	37	34	07:00
24/mar	42	38	12:00
24/mar	44	40	18:00

Os dados apresentados na Tabela 4.11 demonstram que o sistema tem autonomia para três dias de uso, proporcionando a obtenção de níveis de temperatura geralmente superiores aos níveis ideais para banho. Os níveis de radiação para tais dias de ensaios foram em torno 700W/m².

Para avaliar a perda térmica do coletor solar alternativo do sistema de aquecimento solar de água mediu-se os níveis de temperatura de parâmetros inerentes a esse processo, que se encontram mostrados em seus valores médios na Figura 4.6.

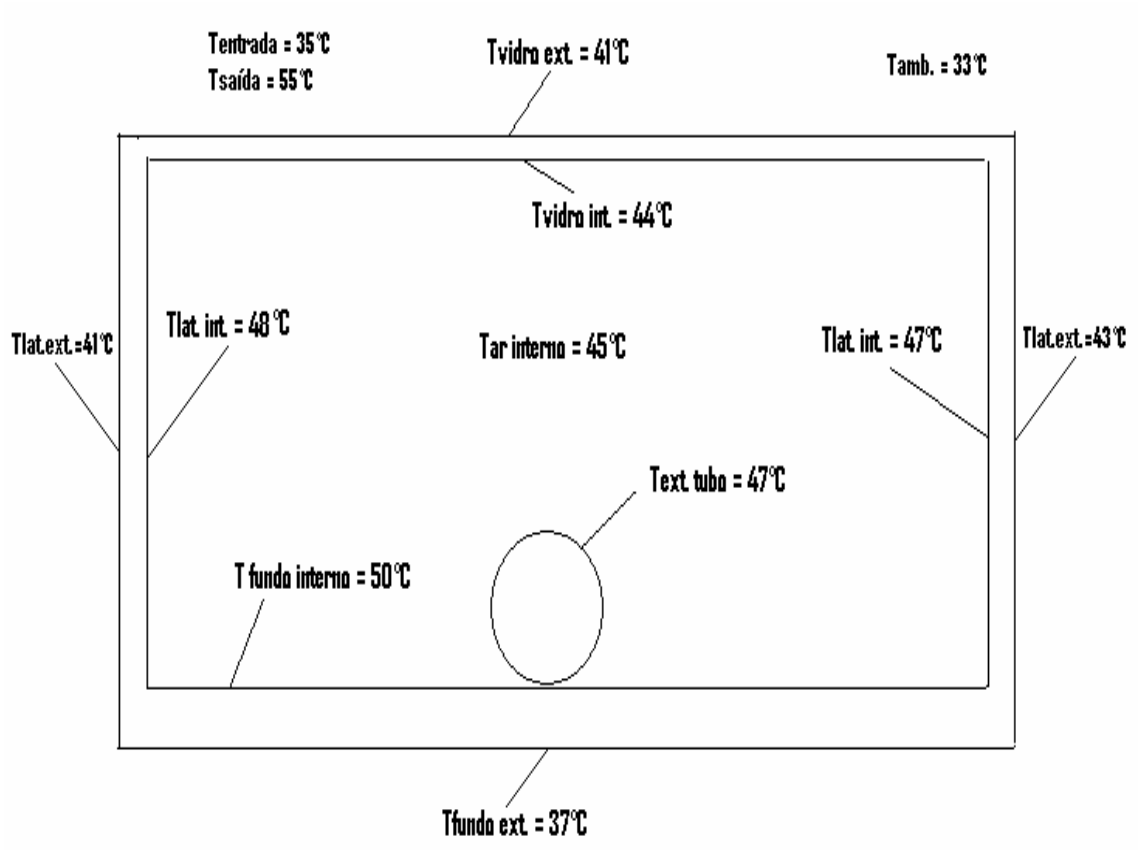

Figura 4.6 Parâmetros de perda térmica do coletor em estudo.

Utilizando os valores contidos na Figura 4.6 calculou-se o coeficiente global de perda térmica do coletor, obtendo-se o valor correspondente a 15 W/m².°C. Esse valor está acima do intervalo médio previsto para os coletores planos convencionais entre 6 e 12 W/m².°C, o que era esperado uma vez que se trata de um coletor alternativo, que não utiliza isolamento térmico de lã de vidro, usado pelos coletores comercialmente disponíveis, sendo o compósito o elemento que tem a dupla função de isolante e absorvedor.

No que diz respeito à temperatura da superfície externa dos tubos absorvedores de PVC seu valor médio esteve 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.

4.2 Reservatório térmico alternativo

Os resultados do teste para avaliar a eficiência térmica do reservatório térmico alternativo encontram-se apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 Resultados do teste realizado com o reservatório térmico alternativo proposto.

TEMPO (HORA)	Tágua (℃)	Tambiente (℃)	Treservatório (℃)
16:00	**45,0**	**27,0**	**29,0**
17:00	44,0	26,0	27,5
18:00	43,5	26,0	27,0
19:00	43,0	26,0	26,5
20:00	42,5	25,5	26,0
21:00	41,5	25,5	26,0
22:00	41,0	25,0	26,0
23:00	40,5	25,0	26,0
00:00	40,0	24,5	25,5
01:00	39,5	24,5	25,5
02:00	39,0	25,0	25,5
03:00	39,0	25,0	26,0
04:00	38,5	25,0	26,0
05:00	38,5	25,5	26,5
06:00	38,0	27,0	31,0
07:00	**37,5**	**28,0**	**35,0**
08:00	37,0	29,0	37,5
09:00	37,0	29,0	37,5
10:00	37,0	30,0	38,0
11:00	37,0	30,0	38,5
12:00	37,0	30,0	38,5
13:00	37,0	30,0	38,5
14:00	37,0	30,0	37,0
15:00	37,0	28,0	35,0
16:00	**36,5**	**27,0**	**32,0**

Os dados mostrados demonstram a boa eficiência térmica do reservatório térmico alternativo proposto. Houve uma queda de temperatura, durante 15 horas, do final da tarde e toda à noite, correspondente a 7,5°C e durante 24 horas igual a 8,5°C. Essa queda de temperatura está um pouco acima da apontada pela literatura para reservatórios térmicos

convencionais, de cobre ou inox, que apresentam valores em torno de 5°C para o nível de temperatura testado.

Para o nível mais critico 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, a perda foi pequena, 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.

Percebe-se que a temperatura da superfície externa do reservatório esteve bem próxima da temperatura ambiente durante toda à noite refletindo uma baixa perda térmica pela lateral do reservatório. A temperatura do reservatório só alcançou valores bem acima da temperatura ambiente para o período em que a o reservatório passou a ser aquecido pela radiação solar global absorvida pelo mesmo, uma vez que foi pintado com tinta preto fosco. Portanto, a perda mais significativa ocorreu pela parte inferior e/ou tampa do reservatório.

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.

Os Gráficos das Figuras 4.7 e 4.8, a seguir, mostram o comportamento assumido pelos valores de temperatura medidos quando da realização do ensaio.

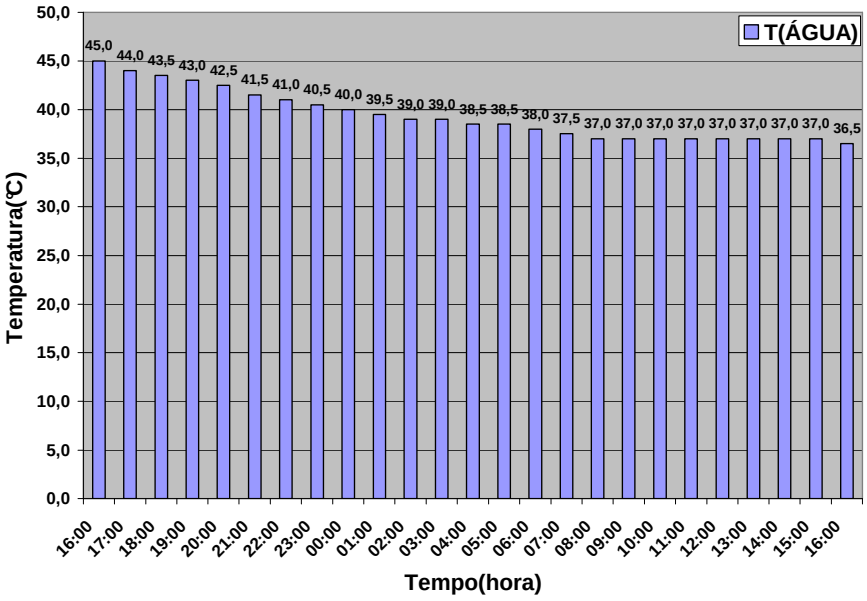

Figura 4.7 Queda de temperatura na água contida no reservatório proposto para avaliar sua perda térmica.

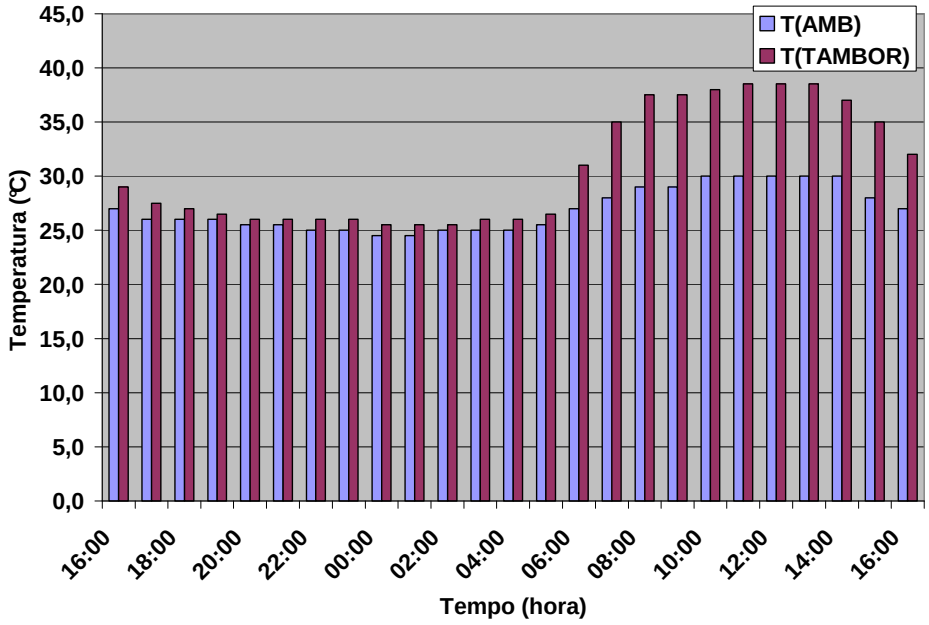

Figura 4.8 Temperaturas da superfície externa do reservatório e ambiente para avaliar perda térmica.

A Figura 4.9 mostra o reservatório térmico alternativo que compõe o sistema de aquecimento solar de água.

Figura 4.9 Reservatório térmico alternativo proposto.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com base nos resultados dos ensaios efetuados com o sistema de aquecimento durante o levantamento de desempenho térmico, pode-se apresentar as conclusões a seguir, como também possíveis sugestões para otimizações e efetivação de futuros trabalhos com coletores alternativos.

1. O sistema alternativo proposto apresenta viabilidades no campo térmico, de materiais e econômico. Seu custo de fabricação fica bem abaixo em relação aos coletores convencionais comercialmente disponíveis;

2. O reservatório térmico alternativo proposto é viável para ser utilizado como reservatório térmico em sistemas de aquecimento solar de água, apesar de ter uma perda térmica maior que os reservatórios convencionais;

3. O coletor alternativo mostrou-se resistente em relação às variações atmosféricas;

4. O impermeabilizante desenvolvido mostrou-se eficiente evitando a infiltração de água da chuva;

5. A principal característica do sistema de aquecimento proposto é sua alta taxa de aquecimento da massa de água. Toda a água contida no reservatório térmico foi aquecida acima da temperatura ideal de banho com apenas um dia de aquecimento;

6. Pode-se comprovar que o compósito utilizado para a confecção da caixa permitiu que o coletor pudesse ser composto por apenas três elementos, eliminando-se a chapa absorvedora e o isolante térmico, proporcionando uma diminuição do custo do coletor;

7. A nova forma de montagem da grade absorvedora, através do uso de conexões em T de PVC concedeu simplicidade para o seu processo de montagem, diminuindo bastante o trabalho, podendo ser montada com grande rapidez;

8. A cola especial para PVC utilizada na ligação das conexões em T e tubos absorvedores mostrou-se bastante eficiente, não produzindo vazamentos;

9. Apesar de apresentar perda térmica maior que os reservatórios térmicos convencionais, seu baixo custo e sua performance térmica conduzem-no a apresentar uma boa relação custo benefício;

10. O custo do reservatório térmico apresentado corresponde à cerca de 25% do relativo aos reservatórios convencionais para o mesmo volume;

11. Os processos de fabricação e montagem do reservatório térmico alternativo proposto são simples, podendo ser repassados tecnologicamente para pessoas de quaisquer níveis;

12. A temperatura dos tubos absorvedores no coletor alternativo esteve abaixo do nível crítico para início do processo degradativo térmico em torno de 60°C. No que diz respeito à degradação térmica tal efeito é amenizado pela tinta preto fosco que recobre os tubos absorvedores, que contém pigmentos pretos absorvedores de radiação ultravioleta;

13. A perda térmica do sistema de aquecimento esteve acima da apontada pela literatura, porém ficou em nível compatível com sistemas de aquecimento que utilizam coletores alternativos;

14. O custo de fabricação do sistema, inferior a R$1.000,00, representa uma vantagem importante em relação aos sistemas de aquecimento disponíveis comercialmente, sendo capaz de contribuir significativamente para socializar a utilização dos sistemas solares de aquecimento de água;

15. É preciso diagnosticar a perda térmica pela base e topo do reservatório térmico, uma vez que a perda pela superfície lateral foi insignificante;

16. A tampa do reservatório confeccionada em fibra de vidro precisa de um isolante térmico, que pode ser uma camada de EPS, em sanduíche;

17. É preciso estudar para um período bem maior de dias a eficiência do reservatório térmico proposto e sua resistência às intempéries;

18. É imprescindível um detalhamento maior da perda térmica utilizando um campo de temperaturas nas superfícies do reservatório para um diagnóstico mais apurado da perda térmica medida;

19. É imprescindível que o sistema seja testado por um período em torno de um ano para um diagnóstico mais apurado quanto a possibilidade de tornar-se um produto de mercado, capaz de competir e substituir os coletores convencionais;

20. O coletor construído apresentou alto peso, sendo necessário um estudo para a obtenção do compósito com uma menor densidade como forma de diminuição do peso do coletor, ou através da utilização do EPS como sanduíche dentro da estrutura do coletor. Esse problema não inviabiliza o uso desse tipo de coletor uma vez que instalado não se faz necessária a sua movimentação;

21. Para aumentar a autonomia do sistema e garantir a disponibilidade de água quente para um número maior de dias, um outro coletor similar poderia ser acrescentado ao sistema, podendo ser instalado em série ou em paralelo em relação ao já existente. Uma vez que o custo do coletor é baixo, essa opção não acarretaria em aumento considerável de custo total do sistema de aquecimento;

22. É imprescindível que se instale o sistema em um banheiro, com bóia de alimentação do reservatório térmico e ligação do coletor ao local de banho, com dupla tubulação de água fria e quente, para estudar o sistema de forma mais acurada. Faz-se necessário também a introdução de alguns acessórios, para uma melhor operacionalidade do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACETOZE, A. L; NUNES, L.R.; CUKIERMAN, J., ***Manual Trikem - Produtos de PVC utilizados na construção civil***, Editora Pini, São Paulo, 1996.

ALBUQUERQUE, J.A.C, ***O plástico na prática,*** Editora Sagra Luzzato, Porto Alegre 1999.

ALBUQUERQUE, J.A.C, ***Planeta plástico***, Editora Sagra Luzzato, Porto Alegre, 2000**.**

Artigos Técnicos sobre o PVC, institutodopvc. org.

BAYAZTTOGLU, Y; ASPARGOUR, S**.,** ***Performance Calculations of Tubular Cover Collectors***, *Solar Energy, 24, 105 - 109, 1980*.

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.

BLISS, R.W., ***The derivations of several plate efficiency factors useful in the design of flat plate solar heat collectors***, *Solar Energy, 3, 55, 1959*.

CABIROL, T; PELISSOU. A.; ROUX, D., ***El calentador solar de agua***, Compañia Editorial Continental, S.A., Barcelona, Espanha, 1978.

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

COMETA, E., ***Energia solar: utilização e empregos práticos, Editora*** Hemus, 127 p., São Paulo, 1978.

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

DICKINSON, W.C., CHEREMISINOFF, P.N., ***Solar Energy Technology Handbook, Part B***, Marcel Dekker, New York, 03-30, 1980.

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

Engineered Materials Handbook, V. 2, Engineering Plastics, ASM International, Metals Park, OH, 1988.

FANTINELLI, J. T., ***Tecnologia solar de interesse social e baixo custo para aquecimento de água na moradia***, Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da ÚNICAMP, Campinas - São Paulo, 2002.

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

HERRICK, C.S., ***Optical Transmittance Measurements on a Solar Collector of Cylindrical Glass Tubes***, Solar *Energy, 28, 5 -11, 1982.*

HOTTEL, H.C.; WILLIER, A., ***Evaluation of flat plate collector performance. In: Transactions of the Conference on the Use of Solar Energy***, 2, *University of Arizona Press, 174, 1958.*

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

JERIOSKI, R.J.; WENZIER, R.A.A., ***Polyvinyl and vinyl copolymers***, *Modern Plastics Encyclopedia, 108-112, New York, 1983.*

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.

MACHADO M., ***Materiais compósitos,*** Editora da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Cidade do Porto. 2003,

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

MANO, E. B.; MENDES, L.C., ***Introdução a polímeros***, 2ª Edição, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1999.

MANUAL TILETRON, ***Os plásticos***, São Paulo, 2000.

MARK, H.F.; BIKALES, N.M.; OVERBERGER, C.G.; MENGES, G., ***Encyclopedia of Polymer Science and Engineering - Engineering Plastics***, V. 6, John Wiley, New York, 1986.

MATRAWY, K.K.; FARKAS, I., ***Comparison study for three types of solar collectors for water heating***, *Energy Convers. Manage., 38, 861-869, 1997.*

Modern Plastics Encyclopedia, The McGraw-Hill, New York, NY, 1996.

NIELSEN, L.E., ***Mechanical Properties of Polymers and Composites***, second edition, Marcel Dekker, New York. 1994.

PIAZZA, F., ***Compósitos poliméricos***, Editora da Universidade Federal do Paraná, Curitiba - Pr 2000,

PVC E ECO – Balanço: uma nova consciência ambiental, Artigos Técnicos da ABIVINILA – Associação Brasileira das Indústrias de Cloreto de Polivinila – São Paulo, 1999.

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.

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.

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., ***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., 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 agua para aplicacôes residenciais utilizando materiais alternativos***, V CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Recife-Pe, 2006.

SOUZA, L.G.M., ***Viability of use of PVC tubes in solar collectors***, Rio 3 – World Climate & Energy Event, Rio de Janeiro, 2003.

SULLIVAN, F.R.; ELLEITHY, R.H.; ABU-ALI, A., ***Effect of thermal degradation on the impact properties of PVC compounds***, *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 5: (4), 200-204, 1999.

Trends in Renewable Energies, SolarAcess.com, Canadian Association for Renewable Energies, 2005-2007.

TSILINGIRIS, P.T., ***Design, analysis and performance of low-cost plastic film large solar water heating systems***, Solar Energy, 60 : (5), 245-256, 1997.

VAN NIEKERK, W.M.K; Du TOIT, C.G.; SCHEFFLER, T.B., ***Performance modeling of a parallel tube polymer absorber***, *Solar Energy, 58, 39-44, 1996*.

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.

WILLIER, A., ***Prediction of performance of solar collectors. In: Applications of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings***, ASHRAE, New York, 1977.

YACOV, T., ZEMEL, A., ***Long-term perspective on the development of solar energy***, *Solar Energy, 68: (5), 379-392, 2000.*

YAO, Q.; WILKIE, C.A., ***Thermal degradation of PVC in the presence of polystyrene***, *Journal Vinyl Additives Technological, 7: (1), 26-30, 2001*.

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