



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

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM SISTEMA DE
AQUECIMENTO SOLAR DE BAIXO CUSTO**

Alexandre Boleira Lopo

Orientador: Profº Drº Luis Guilherme Meira de Souza

Natal-RN

Fevereiro de 2010

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

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM SISTEMA DE
AQUECIMENTO SOLAR DE BAIXO CUSTO**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

Como parte dos requisitos para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

Alexandre Boleira Lopo

Orientador: Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza

Fevereiro de 2010
Natal - RN

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

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM SISTEMA DE
AQUECIMENTO SOLAR DE BAIXO CUSTO**

Alexandre Boleira Lopo

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

Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza - UFRN- orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza – UFRN

Prof. Dr. José Ubiragi de Lima Mendes – UFRN

Prof. Dr. Roberto Silva de Souza – IFRN

“A demanda de energia global será o dobro em 2025 e o triplo em 2050, em relação ao ano de 1985. A participação da energia renovável na demanda global saltará de 21%, basicamente hidrelétrica, para 54% em 2025, hidrelétrica, solar, eólica e biomassa”.

Ricardo Aldabó (2002, pg. 15)

Dedicatória:

Dedico este trabalho aos meus pais Manuel Lopo Ogando (in memoriam) e Dolores B. e Boleira, a meus irmãos Jesus (in memoriam), Dália, Francisco, Marissol, Samuel, Mariluz e Manuelita, aos meus filhos Alexandre, Diana, Marco Felipe, Paula e Júlio Victor e ao meu neto Alexandre.

AGRADECIMENTOS

À Deus, ser supremo, pelo ânimo, pela saúde mental, física e espiritual para a conclusão desta pesquisa.

Ao meu orientador Profº Drº Luiz Guilherme Meira de Souza pela confiança, ensinamento, amizade e simplicidade que sabiamente me orientou para a conclusão desta pesquisa e me proporcionou momentos relevantes de aprendizagem, além motivar para a conclusão deste trabalho, impulsionou-me a uma compreensão mais ampla de respeito aos estudantes e ao papel do educador.

Aos professores e colegas da Universidade Federal do Rio Grande do Norte pelo valioso apoio.

Aos Professores Drº José Ubiragi de Lima Mendes e Drº Roberto Silva de Souza pelos comentários, críticas e sugestões que ajudaram a melhorar este trabalho.

Ao Doutorando em Engenharia de Materiais da UFRN Reginaldo Dias e ao técnico do Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar da UFRN Aldo Paulino de Medeiros Júnior que colaboram de forma relevante na conclusão deste trabalho de investigação e experimentação.

Ao PPgEM/UFRN e CTPGP/IFBA nas pessoas de Rubens Maribondo do Nascimento e Núbia Moura Nogueira por desempenhar suas funções de forma competente.

A CAPES, UFRN e IFBA pela oportunidade desta capacitação.

À Universidade do Estado da Bahia, por ter me afastado das atividades docentes a fim de concluir a investigação no campus da UFRN.

À minha família, pelo apoio, em especial, à minha mãe Dolores Boleira e Boleira.

A todos que direta ou indireta contribuíram para conclusão deste trabalho.

RESUMO

Apresenta-se um coletor solar a ser utilizado em um sistema para aquecimento de água destinada ao banho, cujas principais características são o baixo custo e fáceis processos de fabricação e montagem. O sistema funciona em regime de convecção natural ou termosifão. A superfície absorvedora do coletor é formada por doze tubos de PVC de 25 mm de diâmetro externo ligados em paralelo através de conexões em T do mesmo material. Os tubos absorvedores foram recobertos por aletas confeccionadas com latas de alumínio recicladas. Foram estudadas oito configurações entre placa absorvedora, isolante térmico de placas de EPS e reservatórios térmicos de 150 e 200 litros. Determinou-se a configuração mais eficiente para o fim proposto. Foram avaliados parâmetros térmicos que comprovaram a viabilidade do sistema de aquecimento estudado.

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

ABSTRACT

It presents a solar collector to be used in a system for heating water for bathing, whose main characteristics are low cost and easy manufacturing and assembly. The system operates under natural convection or thermosiphon. The absorbing surface of the collector is formed by twelve PVC pipes of 25 mm outside diameter connected in parallel via connections in T of the same material. The tubes were covered with absorbing fins made with recycled aluminum cans. We studied eight settings between absorber plate, thermal insulating EPS boards and thermal reservoirs 150 and 200 liters. It was determined the most efficient configuration for the correct purpose. We evaluated thermal parameters that proved the viability of the heating system studied.

KEYWORDS: Solar Collector, Water Heating, Solar Energy, Recycling, Low Cost.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Apresentação do trabalho	17
1.2 Objetivos.....	22
1.2.1 Objetivo geral	22
1.2.2 Objetivos específicos	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Energias renováveis	23
2.2 Energia e radiação solar.....	26
2.3 Conceitos básicos aplicados a energia solar	28
2.4 Sistema de aquecimento solar (SAS) com coletores de placa plana	31
2.4.1 Coletores de placa plana.....	31
2.4.2 Sistemas de aquecimento solar (SAS).....	33
2.4.3 Normas dos SAS de uso comercial	35
2.4.4 Coletores solares no mundo.....	36
2.5 Propriedades físicas e degradação dos tubos absorvedores.....	41
2.5.1 O cloreto de polivinila (PVC) e o poliestireno expandido (EPS ou Isopor).....	42
2.5.2 Principais características do cloreto de polivinila (PVC).....	43
2.5.3. A degradação do cloreto de polivinila (PVC).....	44
2.5.4 Propriedades do poliestireno expandido (EPS ou Isopor).....	45
3. MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1 Processos de construção, montagem e de ensaio do sistema de aquecimento proposto	46
3.2 Desenvolvimento teórico	54
A. Determinação dos parâmetros térmicos.....	54
a.1 Coeficiente global de perdas.....	54
a.2 Determinação do rendimento térmico	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1 Resultados de parâmetros térmicos para determinação da eficiência térmica do coletor estudado.....	56

4.2	Determinação da perda térmica do coletor para a configuração VII	71
4.2	Perda térmica do reservatório térmico alternativo	72
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	74
5.1	Conclusões	74
5.2	Sugestões	75
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
7.	ANEXO	82

LISTAS DE FIGURAS

Figura 2.1. Fontes de energia alternativa renovável.....	24
Figura 2.2. Mapa da radiação solar global media anual típica (Wh/m ² . dia).....	27
Figura 2.3 Radiação solar global e suas componentes.....	28
Figura 2.4- Diagrama simbólico dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre.....	30
Figura 2.5. Coletor solar com seus principais componentes.....	31
Figura 2.6. Conversão da energia solar em calor.....	32
Figura 2.7. Esquemas típicos de ligação dos tubos absorvedores de coletores planos.....	32
Figura 2.8. Esquema básico de um sistema de aquecimento solar convencional por termosifão ou convecção natural.....	33
Figura 2.9. SAS comercial do fabricante Mondialle Solar, modelo BP -81.....	34
Figura 2.10. Esquema básico de SAS de circuito direto com bomba de circulação e SAS de circuito indireto.....	34
Figura 2.11. SAS de circuito indireto com seus componentes e controlador eletrônico de temperatura.....	35
Figura 2.12. Reação de degradação do PVC.....	44
Figura 3.1. União entre tubos e conexões de PVC.....	46
Figura 3.2. Grade absorvedora formada por 12 tubos de PVC de 25 mm.....	47
Figura 3.3. Etapas da construção das aletas com latas de alumínio.....	47
Figura 3.4. O reservatório térmico alternativo RT 200 em reforma.....	48
Figura 3.5. Reservatórios térmicos RT 150 e RT 200 do sistema de aquecimento solar estudado.....	49
Figura 3.6. Configurações estudadas, no sentido horário, VIII ou VII, VI ou V, IV ou III, II ou I, sem apresentação dos reservatórios térmicos RT 150 e RT 200.	50
Figura 3.7. Locais de medição da temperatura de entrada (Tec) e saída do coletor (Tsc).....	51
Figura 3.8 Pontos de medida de temperatura da água contida no reservatório.....	51
Figura 3.9. O medidor digital de temperatura utilizado nos testes.....	52
Figura 3.10. Pontos de medição de temperatura da grade absorvedora.....	52
Figura 3.11. Sistema solar alternativo de aquecimento de água em funcionamento na configuração III.....	53
Figura 3.12. O medidor de energia solar digital indicando 548,5 W/ m ²	53

Figura 4.1. Comportamento assumido pelos valores médios dos parâmetros estudados para todas as configurações em RT150 e RT200.....	61
Figura 4.2. Comportamento assumido pela temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico – Configuração I.....	62
Figura 4.3. Comportamento assumido pela temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico – Configuração III.....	62
Figura 4.4. Comportamento assumido pela temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico – Configuração VII.....	63
Figura 4.5. Comportamento assumido pela temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico – Configuração VII.	64
Figura 4.6. Comportamento assumido pela temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico – Configuração II.	64
Figura 4.7. Comportamento assumido pela temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico – Configuração IV.	65
Figura 4.8. Comportamento assumido pela temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico – Configuração VI.	66
Figura 4.9. Comportamento assumido pela temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico – Configuração VIII.	66
Figura 4.10. Comportamento assumido pela temperatura da água em vários pontos dos reservatórios RT 150 e RT 200 no final do ensaio.....	67
Figura 4.11. Comportamento assumido pela temperatura da água depois de misturada para as configurações estudadas a variação percentual entre a temperatura da água do fundo do reservatório (T_f) com a do topo ou em cima (T_c) no final do ensaio.....	68
Figura 4.12. Temperaturas em diversos pontos na superfície da grade absorvedora – CONFIGURAÇÃO I.....	69
Figura 4.13. Temperaturas em diversos pontos na superfície da grade absorvedora – CONFIGURAÇÃO III.	69
Figura 4.14. Temperaturas em diversos pontos na superfície da grade absorvedora – CONFIGURAÇÃO V.....	70
Figura 4.15. Temperaturas em diversos pontos na superfície da grade absorvedora – CONFIGURAÇÃO VII.....	70

LISTAS DE TABELAS

Tabela 2.1. Principais propriedades do PVC.....	43
Tabela 2.2. Principais propriedades do EPS.....	45
Tabela 4.1. Resultados médios gerais da Configuração I: sem aletas, sem EPS + RT 150.....	56
Tabela 4.2. Resultados médios gerais da Configuração III: sem aletas, com EPS+RT 150....	56.
Tabela 4.3. Resultados médios gerais da Configuração V: com aletas, sem EPS+RT 150.....	57
Tabela 4.4. Resultados médios gerais da Configuração VII: com aletas, com EPS+RT 150...	57
Tabela 4.5. Resultados médios gerais para todas as configurações estudadas para 150litros..	57
Tabela 4.6. Resultados médios gerais da Configuração II: sem aletas, sem EPS+RT 200.....	58
Tabela 4.7. Resultados médios gerais da Configuração IV: sem aletas, com EPS+RT 200.....	58
Tabela 4.8. Resultados médios gerais da Configuração VI: com aletas, sem EPS+RT 200.....	59
Tabela 4.9. Resultados médios gerais da Configuração VIII: com aletas, com EPS+RT 200.	59
Tabela 4.10. Valores médios obtidos para cada configuração estudada para RT150.....	59
Tabela 4.11. Resultados médios obtidos para todas as configurações estudadas para RT150 e RT200. s médios dos parâmetros estudados para todas as configurações RT150 e RT200....	60
Tabela 4.12. Resultados médios gerais da temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico- RT150 - Configuração I.....	61
Tabela 4.13. Resultados médios gerais da temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico- RT150 - Configuração III.	62
Tabela 4.14. Resultados médios gerais da temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico- RT150 - Configuração V.	63
Tabela 4.15. Resultados médios gerais da temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico- RT150 - Configuração VII.....	63
Tabela 4.16. Resultados médios gerais da temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico-RT150 – Configuração II.....	64
Tabela 4.17. Resultados médios gerais da temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico- RT150 – Configuração IV.....	65
Tabela 4.18. Resultados médios gerais da temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico- RT150 – Configuração VI.....	65
Tabela 4.19. Resultados médios gerais da temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico- RT150 – Configuração VIII.....	66

Tabela 4.20. Valores médios de temperatura da água aquecida em vários pontos do reservatório para as configurações estudadas com RT150 e RT200.	67
Tabela 4.21. Valores médios da temperatura média da grade absorvedora para as quatro configurações estudadas.	71
Tabela 4.22. Resultados do teste de perda térmica realizado com o RT150.....	72
Tabela 4.23. Custo dos materiais utilizados na montagem do coletor.....	73

SÍMBOLOS

- Alfabeto Latino

ΔT	Gradiente de temperatura entre entrada e saída do fluido	[°C]
\dot{m}	Vazão mássica	[kg/s]
A	Área do coletor (área exposta à radiação solar)	[m ²]
c_p	Calor específico da água em	[KJ/kg · K]
e_f	Espessura da placa de forro	[mm]
g	Constante da aceleração da gravidade	[m/s ²]
I	Radiação solar global	[KW/m ²]
k_{ar}	Condutibilidade térmica do ar	[W/m. K]
k_{forro}	Condutibilidade térmica da placa de forro	[W/m.K]
$P_{abs.}$	Potência absorvida pelo coletor	[W]
P_p	Potência perdida pelo coletor	[W]
P_u	Potência transferida ao fluido de trabalho	[W]
T_{amb}	Temperatura ambiente	[°C]
T_e	Temperatura média da superfície superior da placa absorvedora	[°C]
U_{loss}	Coefficiente global de perda térmica	[W/m ² .K]

Alfabeto grego

β	Coefficiente de dilatação térmica	[1/ K]
σ	Constante de Stefan-Boltzman (5,67 x 10 ⁻⁸).	[W/m ² . K ⁴]
ρ	Peso específico	[g/cm ³]
ν	Viscosidade cinemática	[m ² /s]
δ	Espessura da camada de fluido	[m]
η_t	Rendimento térmico do coletor e/ou sistema	[%]
ϵ_{placa}	Emissividade placa absorvedora	

1. INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do trabalho

O presente trabalho apresenta os processos de dimensionamento, construção, montagem e levantamento de desempenho de um coletor solar ou sistema de aquecimento solar alternativo de baixo custo utilizando tubos de PVC associados a chapas de alumínio obtidas de material reciclável como latas de refrigerantes e cervejas.

O coletor solar ou sistema de aquecimento solar alternativo de baixo custo é uma alternativa ecologicamente correta que não deve ser negligenciada, trata-se da utilização de fontes de energias alternativas, renováveis e limpas.

Energias alternativas são tipos de energia com grandes potenciais, ecologicamente corretas, que podem garantir um desenvolvimento sustentável para o homem. Esse é um conceito que traduz a importância dessas fontes, renováveis, limpas, e que podem trazer como diferencial a socialização da energia.

As fontes alternativas de energia elétrica podem ser classificadas em hídrica, térmica, nuclear, geotérmica, eólica, marés e fotovoltaica ou solar.

Em relação à energia elétrica, no Brasil a maior quantidade de produzida provém de usinas hidrelétricas, aproximadamente 70%, um fator positivo, pois a geração de energia por meio hídrico é considerada renovável e limpa. Em regiões rurais e mais distantes das hidrelétricas centrais, têm-se utilizado energia produzida em usinas termoelétricas e em pequena escala, a energia elétrica gerada da energia eólica. (MME, 2009)

Somando-se às importações, que essencialmente também são de origem renovável, pode-se afirmar que aproximadamente 80% da eletricidade no Brasil é originada de fontes renováveis – sem considerar que parte da geração térmica é originada de biomassa. Na média mundial, fontes renováveis correspondem a apenas 15,6% da geração de eletricidade. (MME, 2009)

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

A qualificação de alternativas está associada ao exaurir-se das fontes convencionais poluidoras que estão comprometendo a sobrevivência humana no planeta Terra. Portanto, para a continuidade da vida, é necessária a substituição de fontes convencionais poluidoras.

Sabe-se que a maioria das tecnologias e fontes energéticas usadas atualmente não são apropriadas ecologicamente e estão provocando sérios danos ao meio-ambiente, além de estarem se esgotando rapidamente, por não serem renováveis, como o petróleo.

Nesse contexto as fontes solar, eólica e de biomassa abundantes, amplamente distribuídas e ecologicamente atrativas surgem como principais opções na substituição gradativa das energias sujas, principalmente por não poluírem e não contribuírem para o aquecimento global, além de que as energias renováveis possuem características que as tornam atrativas como: uso e produção descentralizada, envolvendo um grande número de produtores e consumidores e baixo custo de manutenção, apesar do custo inicial relativamente mais alto comparado a sistemas convencionais.

Em relação à energia solar, **Bezerra** (2001) explica que cálculos efetuados por especialistas mostram que a energia solar incidente sobre um milésimo da superfície da terra com uma eficiência de apenas 1% representa oito vezes todo o consumo mundial de energia dos dias atuais, cerca de 12.000 TWh. Trata-se de uma energia que precisa ser mais explorada e utilizada pela humanidade.

Nas duas últimas décadas as energias alternativas estiveram no centro das discussões principalmente nos países mais desenvolvidos. Conscientes de que o planeta está em um processo de aquecimento global, busca-se encontrar formas alternativas de geração de energia, que não produzam males tão significativo como produzidos pelas fontes fósseis.

O aquecimento global é um dos sinais da natureza quanto a utilização massiva de fontes a base de petróleo e de seus derivados. O avanço das marés, a alteração do calendário das chuvas, a diminuição da espessura da camada de gelo nos pólos e aumento perceptível da temperatura ambiente em todas as partes do mundo, são marcas indeléveis desse fenômeno.

Se contrapondo ao uso de derivados do petróleo e carvão está ocorrendo uma maior participação das fontes renováveis nas matrizes energéticas de vários países. Várias nações desenvolvidas e até subdesenvolvidas tem optado pela implantação de sistemas de energias renováveis como forma de suprimento de energia. Países como os Estados Unidos, Espanha, Inglaterra, Alemanha, Portugal, Austrália, China, Índia, estão investindo e desenvolvendo tecnologia para substituírem os combustíveis fósseis por energias limpas.

O interesse pelas energias alternativas ocorre também em função da sua competitividade em relação aos combustíveis fósseis, estes tiveram aumentos sucessivos de preço, medidos pelo barril de petróleo. Na década de 1970 onde o preço do barril passou de U\$3.00 para U\$ 40.00 e na presente década onde o preço do barril superou a marca dos U\$ 150.00, retornando

a patamares de U\$ 50,00, preços que viabilizam e promovem uma maior utilização de energias renováveis.

As energias alternativas renováveis são limpas, passíveis de serem produzidas de forma centralizada, de potenciais quase infinitos, com diversas tecnologias de fabricação bastante simples e acessíveis a todos os países do mundo, disponíveis em todas as regiões da Terra e ambientalmente corretas, representa uma opção saudável para substituição das energias fósseis que tem causado tantos danos à vida no nosso planeta.

Essas características impulsionam a massificação do uso da energia solar. Países como o Brasil com potencial médio, na região nordeste, em torno de 600 W/m^2 , em oito horas de iluminação, apresentam potencial de utilização dessa forma de conversão energética extremamente significativa.

Nessa perspectiva, o Brasil é um país privilegiado em relação ao potencial solar disponível, e a região nordeste apresenta um potencial médio de até 900 W/m^2 para o período de 10 às 14h, chegando a picos em torno de 1150 W/m^2 (INPE-CRN, 2010). Esses potenciais colocam a região nordeste como uma região extremamente viável para a implantação de quaisquer instalações solares, para suas várias aplicações.

Ressalta-se que no nordeste brasileiro, por conta de sua posição geográfica em relação ao equador, é particularmente interessante o aproveitamento da energia solar. A radiância em solos nordestinos flutua no intervalo de 1.752 kWh/m^2 a 2.190 kWh/m^2 . Num comparativo rápido, a França recebe algo em torno de 1.000 kWh/m^2 a 1.500 kWh/m^2 , enquanto no deserto do Sahara verifica-se radiância por volta de 2.600 kWh/m^2 por ano (ALDABÓ, 2002).

Entretanto, o uso da energia solar é muito reduzido no Brasil, segundo o Balanço Energético Nacional de 2009, ano base 2008, do Ministério de Minas e Energia, apenas 3,4 % da oferta interna de energia provém de fontes renováveis como a solar e a eólica. O relatório mostra que 54,1% da oferta de energia é de natureza não renovável como petróleo e derivados, gás natural, carvão mineral e coque e urânio (U308) e que 45,9% correspondem a fontes renováveis como hidráulica, lenha e carvão vegetal e derivados de cana. (MME, 2009)

Para elevar esses percentuais, o uso do aquecimento solar de água, a geração indireta de energia elétrica através do uso de coletores solares e a conversão direta da energia solar em energia elétrica através do uso das células fotovoltaicas representam aplicações extremamente viáveis e suas utilizações têm crescido exponencialmente em todo o mundo, principalmente nos países mais desenvolvidos, fato que precisa acontecer no Brasil.

O aquecimento de água através por meio de coletores solares têm representado juntamente com as células fotovoltaicas, conversoras da energia solar em eletricidade, uma das aplicações mais viáveis de utilização, tanto residencial quanto industrial **(REIS, 2009)**.

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 h às 19 horas, correspondendo a 8,5 % da demanda nacional de energia neste horário **(VARELLA, 2004)**.

O relatório do Balanço Energético Nacional indica que o consumo de energia elétrica no Brasil foi 428.250 GWh, sendo que 95.585 GWh, foi direcionado para o setor residencial e desde, 17,3% ou 16.515 GWh foram utilizados pelo nordeste brasileiro. **(MME, 2009)**

Os dados apontam a importância da substituição da fonte térmica elétrica por fontes alternativas e renováveis como a fonte solar para a obtenção de água quente, principalmente visando à diminuição do consumo de energia elétrica convencional, inclusive em função do aumento de 5,2% no consumo desta modalidade de energia no setor residencial, devido ao aumento da renda da população e da ligação de domicílios que não eram atendidos pelas redes elétricas como mostra o Balanço Energético Nacional de 2009. **(MME, 2009)**

A pesquisa identificou os coletores solares, dispositivos utilizados para a produção de água quente através da utilização da energia solar, podem ser divididos em dois grupos: os convencionais e os alternativos. 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 confeccionadas na configuração em paralelo.

Os sistemas de aquecimento são geralmente constituídos por mais de um coletor, ligados geralmente em paralelo, trabalhando em regime de termosifão ou convecção natural, 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. Tais sistemas são de preço relativamente elevado, 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 reduzir o custo dos sistemas de aquecimento, vem-se estudando há mais de 15 anos no âmbito do Laboratório de Energia Solar da 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.

O presente trabalho apresenta um modelo de coletor solar com apenas dois elementos, tubos absorvedores de PVC ligados em paralelo através de conexões do mesmo material e isolante térmico para algumas configurações e até mesmo com o coletor sendo constituído apenas pela grade absorvedora.

Foram estudadas oito configurações do sistema de aquecimento de água, utilizando dois reservatórios de água de capacidades de 150 e 200 litros. As principais características do sistema de aquecimento solar de água estudado foram seu baixo custo e fáceis processos de fabricação e montagem. O isolante térmico utilizado foi o poliestireno expandido, ou EPS, chamado de isopor, em placa, que não oferece riscos a saúde de quem o manuseia, ao contrário da lâ de vidro tradicionalmente utilizada em sistemas convencionais de aquecimento solar de água.

Uma inovação na construção do coletor é a conexão dos tubos constituindo a grade absorvedora. Nos coletores convencionais os tubos de cobre de 1/2” em número de 6 a 8 por metro linear de largura estão soldados a tubulações de entrada e saída de 1” ou 1 1/2”. 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 3/4 ou 25 mm na grade absorvedora. Essa 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.

Outra inovação do coletor estudado foi o uso de aletas absorvedoras construídas com material reciclado oriundo de latas de cervejas e refrigerantes com o objetivo de aumentar a área de captação da radiação solar global.

Os reservatórios térmicos utilizados apresentam custo de fabricação inferior aos convencionais de cobre ou inox, de elevado preço, em torno de R\$ 1.500,00 para 200 litros. Têm como elemento base um tambor de polietileno de volume igual a 200 litros, utilizado para depósito de água e/ou lixo, de custo equivalente R\$ 50,00, revestido de um cilindro confeccionado em fibra de vidro. Tal reservatório tem custo em torno de 20% em relação aos reservatórios convencionais de mercado.

O sistema de aquecimento em estudo é destinado à obtenção de água quente para 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 1 traz a apresentação do trabalho, suas principais características e inovações e os objetivos gerais e específicos.

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. Apresenta também a metodologia experimental empregada.

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

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

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Estudar a viabilidade de utilização de um sistema solar de baixo custo destinado ao aquecimento de água para banho.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Projetar e construir o sistema de aquecimento solar utilizando tubos de PVC associados a chapas de alumínio obtidas de latas de refrigerantes e cervejas
2. Ensaiar o sistema para oito configurações;
3. Determinar parâmetros térmicos que espelhem a eficiência do sistema;
4. Demonstrar sua viabilidade para o fim proposto;
5. Comparar os resultados entre as configurações estudadas;
6. Avaliar os níveis de temperatura dos tubos que compõem a grade absorvedora do coletor para diagnosticar a susceptibilidade dos mesmos à degradação térmica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Energias renováveis

As fontes de energia renováveis são aquelas em que os recursos naturais utilizados são capazes de se regenerar, ou seja, são considerados inesgotáveis (**SOUZA, 2002**).

As fontes renováveis de energia em potencial, à disposição da humanidade, podem ser assim relacionadas: energia eólica, energia hidráulica, energia maremotriz, energia da biomassa, energia geotérmica e a energia solar (**BEZERRA, 2001**).

Existem ainda os combustíveis renováveis, que são aqueles que provêm de matéria-prima renovável para a natureza, como a cana-de-açúcar, utilizada para a fabricação do álcool e também de vários outros vegetais como a mamona e girassol utilizados para a fabricação do biodiesel ou outros óleos vegetais que podem ser usados diretamente em motores diesel com algumas adaptações.

A energia eólica existe como resultado dos movimentos das massas de ar decorrentes da ação da luz solar, gerando um fluxo detentor de considerável energia, chamada de vento.

A energia cinética do vento, ou eólica, pode ser transformada em energia mecânica e elétrica. Atualmente o Brasil possui uma capacidade instalada de geração eólica de 414.480 kW, dados de 2008, com um crescimento de 67,8% em relação a 2007. O estado do Brasil com maior capacidade instalada de geração eólica é o Rio Grande do Sul com 150.000 kW (**MME, 2009**).

A energia maremotriz é uma hidroelétrica que aproveita o movimento das marés para acionar turbinas acopladas a geradores elétricos.

As ondas do mar possuem energia cinética devido ao movimento da água e energia potencial devido à sua altura. Energia elétrica pode ser obtida se for utilizado o movimento oscilatório das ondas. O aproveitamento é feito nos dois sentidos: na maré alta a água enche o reservatório, passando através da turbina, e produzindo energia elétrica, na maré baixa a água esvazia o reservatório, passando novamente através da turbina, agora em sentido contrário ao do enchimento, e produzindo energia elétrica (**PAGLIARI, 2009**).

A desvantagem de se utilizar este processo na obtenção de energia é que o fornecimento não é contínuo e apresenta baixo rendimento. As centrais são equipadas com conjuntos de turbinas bolbo, totalmente imersas na água. A água é turbinada durante os dois sentidos da maré, sendo de grande vantagem a posição variável das pás para este efeito. No entanto existem problemas na utilização de centrais de energia das ondas, que requerem cuidados

especiais: as instalações não podem interferir com a navegação e têm que ser robustas para poder resistir às tempestades e suficientemente sensíveis para ser possível obter energia de ondas de amplitudes variáveis. O aproveitamento energético das marés é obtido através de um reservatório formado junto ao mar, através da construção de uma barragem, contendo uma turbina e um gerador (PAGLIARI, 2009).

Outra fonte renovável de energia é a biomassa, como o carvão vegetal e os biocombustíveis. As possibilidades oferecidas pela biomassa na produção de energia são inúmeras. A energia da biomassa pode ser obtida do aproveitamento dos rejeitos urbanos, florestais e agrícolas. O lixo doméstico e industrial é uma matéria prima por excelência para a produção da biomassa. A Figura 2.1 apresenta uma série de fontes de biomassa.

A plantação de biomassa pode proporcionar a energia do carvão vegetal, como dito, o qual é obtido por pirólise, podendo ainda servir de base para fontes outras de obtenção de energia como, por exemplo, a produção de álcool etílico, metílico, gases combustíveis, etc. A figura a seguir mostra a diversidade de opções para o uso da biomassa como fonte alternativa de energia e apresenta as demais fontes de energia renovável.

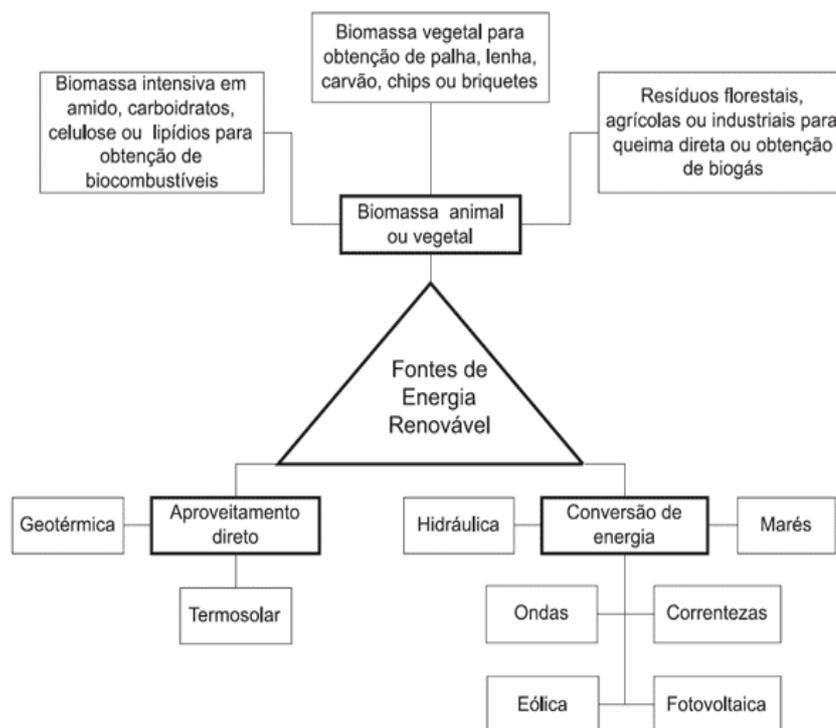


Figura 2.1. Fontes de energia renováveis.

Na Figura 2.1 apresenta-se também a energia geotérmica, ela provém das altas temperaturas nas camadas mais profundas da terra e podem proporcionar condições para gerar

vapor de água que poderá ser empregada no acionamento de turbinas acopladas a geradores elétricos para a produção de eletricidade. A eficiência das centrais de conversão de energia geotérmica em vapor é de 14%.

A Energia Hídrica ou hidráulica é a energia obtida a partir da energia potencial de uma massa de água e como mostra a Figura 2.1 precisa de conversão na sua forma para geração de energia elétrica. Ela se manifesta na natureza nos fluxos de água, como rios e lagos e pode ser aproveitada por meio de um desnível ou queda d'água. Pode ser convertida na forma de energia mecânica com a rotação de um eixo através de turbinas hidráulicas ou moinhos de água. As turbinas por sua vez podem ser usadas como acionamento de um equipamento industrial, como um compressor, ou de um gerador elétrico, com a finalidade de prover energia elétrica para uma rede de energia.

A maior usina hidrelétrica do Brasil é a de Itaipu, localizada em Foz de Iguaçu, no estado do Paraná. Possui uma capacidade de geração de 12.600 MW (MME, 2009).

Energia solar é aquela proveniente do Sol, energia térmica e luminosa. Esta energia é captada por painéis solares, formados por células fotovoltaicas, e transformada em energia elétrica ou mecânica. A energia solar também é utilizada, principalmente em residências, para o aquecimento da água.

A energia solar pode ser indireta ou diretamente utilizada. As energias da biomassa, eólica, maremotriz, a fotossíntese, o crescimento dos seres vivos e mesmo as fontes não renováveis são, em última análise, uma forma indireta de utilização de energia solar. De uma forma direta, a energia solar pode ser empregada na produção de calor, chamada na figura anterior de aproveitamento direto – termosolar. Para isso se utiliza de dispositivos conhecidos na tecnologia solar como coletores solares.

Entretanto, o uso da energia solar é muito reduzido no Brasil, segundo o Balanço Energético Nacional de 2009, ano base 2008, do Ministério de Minas e Energia, apenas 3,4 % da oferta interna de energia provém de fontes renováveis como a solar e a eólica. O relatório mostra que 54,1% da oferta de energia é de natureza não renovável como petróleo e derivados, gás natural, carvão mineral e coque e urânio (U308) e que 45,9% correspondem a fontes renováveis como hidráulica, lenha e carvão vegetal e derivados de cana (MME, 2009).

De uma forma direta, através de conversores, a energia solar pode gerar potência e energia elétrica por meio de dispositivos fotovoltaicos. Segundo Aldabó (2002) o valor típico utilizado para a radiação solar máxima é de 1 kW/m^2 , que é o valor de referência na fabricação dos painéis solares.

2.2. Energia e radiação solar

O sol é a estrela mais próxima de nosso planeta e também a mais estudada. Esta esfera de gás, que tem em seu núcleo reações termonucleares, com maior destaque para a fusão, converte 600 milhões de toneladas de hidrogênio em hélio por segundo (**GRIMM, 2007**).

A energia solar radiante incidente na camada mais externa da atmosfera é de 1.367W/m^2 , denominada constante solar. Este é um valor médio, pois varia com a distância da Terra em relação ao sol durante as diferentes estações do ano (**ALDABO, 2002**). Por conta disso, referir-se-á, agora, ao conceito de radiação solar.

A radiação solar é a fonte primária de todos os fenômenos atmosféricos e de processos físicos, químicos e biológicos observados em ecossistemas agrícolas, podendo ser aproveitada sob várias formas, tais como a captura pela biomassa, o aquecimento de ar e água para fins domésticos e industriais, fotoeletricidade para pequenos potenciais e fontes para ciclos termodinâmicos variados (**PEREIRA et al, 2002**).

Desta forma, o sol é responsável pelo fornecimento da energia consumida pela humanidade desde seus primórdios. A energia armazenada pelas plantas através da fotossíntese, as modernas hidrelétricas cujas represas são abastecidas graças ao ciclo das águas, os geradores eólicos alimentados pelos ventos que são produzidos pelas diferenças de temperatura da atmosfera, os combustíveis fósseis gerados a partir de resíduos orgânicos de tempos primitivos, são exemplos incontestáveis de nossa dependência energética do Sol.

Esta utilização da energia é considerada como uma forma de aproveitamento de forma indireta. De forma direta, a energia solar pode ser empregada na produção de calor, potência e energia elétrica, utilizando para isso dispositivos conhecidos como coletores solares (**ALDABÓ, 2002**).

Os países tropicais, devido a suas posições geográficas, possuem grande potencial energético, sendo, portanto, bastante favoráveis ao uso de equipamentos solares. O Brasil, como mostra a Figura nº 2.4, possui significativo potencial solar com disponibilidade equivalente a $1,13 \times 10^{10}$ GWh, em quase todo o ano, como acontece no nordeste (**QUEIROZ, 2005**).

Os maiores índices de radiação são observados na Região Nordeste, com destaque para o Vale do São Francisco, onde a média anual é de aproximadamente $6000\text{Wh/m}^2\text{dia}$. Os menores índices são observados no Litoral Sul-Sudeste, incluindo a Serra do Mar, e na Amazônia Ocidental, respectivamente. No Amapá e Leste do Pará, onde também se observam

índices inferiores à média nacional. É importante ressaltar que mesmo as regiões com menores índices de radiação apresentam grande potencial de aproveitamento energético (INPE, 2009).

A Figura 2.2 apresenta o mapa da radiação solar global media anual típica ($\text{Wh}/\text{m}^2/\text{dia}$) no Brasil. As partes mais claras indicam índices de radiação maior.

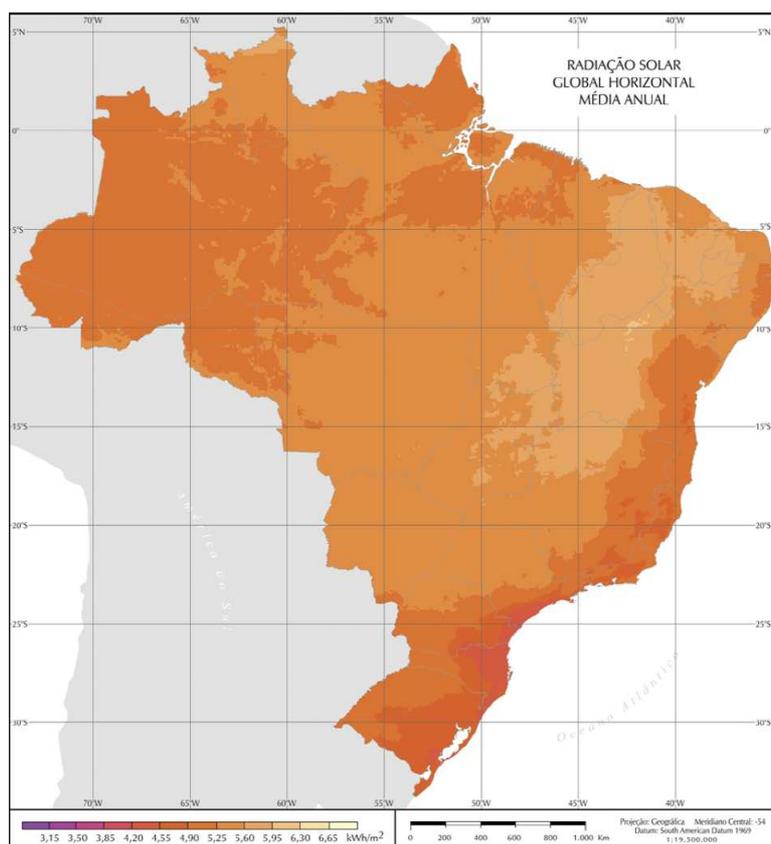


Figura 2.2. Mapa da radiação solar global media anual típica ($\text{Wh}/\text{m}^2/\text{dia}$) –

Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al, 2006).

Tratando-se de Natal, capital do Rio Grande do Norte, local de estudo, considera-se uma radiação solar global média entre $0,5$ a $0,7 \text{ kW}/\text{m}^2$, com nível de iluminação médio da ordem de oito horas por dia (BEZERRA, 2001). Essa radiação atinge valores máximos de $1,2 \text{ kW}/\text{m}^2$ no intervalo das 11 às 13h (INPE, 2009).

Desta forma, entre os processos de aproveitamento da energia solar, os mais usados atualmente são o aquecimento de água e a geração fotovoltaica de energia elétrica. No Brasil, o primeiro é mais encontrado nas regiões Sul e Sudeste, devido a características climáticas, e o segundo, nas regiões Norte e Nordeste, em comunidades isoladas da rede de energia elétrica (MELO, 2008).

2.3. Conceitos básicos aplicados a energia solar

A energia solar não é poluente. Ela pode ser utilizada de forma concentrada ou não, dependendo da maneira de como for captada, os níveis de temperatura obtidos podem variar desde a temperatura ambiente até alguns milhares de graus centígrados.

A potência da radiação solar que atinge a atmosfera terrestre é aproximadamente $1,7 \times 10^{14}$ kW, o que representa mais de 13 milhões de vezes a potência elétrica instalada da usina de Itaipu, a maior do mundo (NAZIAZENO, 2009).

A energia irradiada pelo sol, para a atmosfera terrestre é praticamente constante. Esta energia irradiada ou intensidade de radiação é descrita como a constante solar relativa a uma área de 1 m^2 . O valor médio da constante solar é $E_0 = 1,367 \text{ W/m}^2$ (GREENPRO, 2004).

A radiação solar tem diversas componentes: a radiação solar direta E_{dir} proveniente do sol, que atinge a terra sem qualquer mudança de direção e a radiação difusa E_{dif} , que chega aos olhos do observador através da difusão de moléculas de ar e partículas de pó. A radiação difusa inclui também a radiação refletida pela superfície terrestre. Na Figura 2.3 estão ilustrados os componentes da radiação solar.



Figura 2.3 Radiação solar global e suas componentes (GREENPRO, 2004).

A soma da radiação difusa e direta equivale à radiação solar global E_G .

$$E_G = E_{dir} + E_{dif} \quad (1)$$

Esta equação, caso não sejam referidas outras condições, refere-se à radiação sobre uma superfície horizontal (NAZIAZENO, 2009).

Quando o Sol se localiza verticalmente, acima de uma determinada localização, a radiação efetua o caminho mais curto através da atmosfera. Por outro lado, quando o Sol se encontra num ângulo mais baixo ou no horizonte a radiação percorre um caminho mais longo,

sofrendo a radiação solar uma maior absorção e difusão e estando disponível, portanto uma menor intensidade de radiação (NAZIAZENO, 2009).

A radiação solar constitui a principal força motriz para processos térmicos, dinâmicos e químicos em nosso planeta. A energia proveniente do Sol chega até a superfície propagando-se como energia radiante ou, simplesmente radiação. A principal característica de um campo de radiação é a radiância (ou intensidade de radiação). Essa grandeza se refere-se à quantidade de energia radiante num intervalo unitário de comprimento de onda que atravessa unidade de área tomada perpendicularmente à direção considerada, na unidade de tempo (MARTINS et al, 2004).

Conhecendo-se a radiância pode-se determinar outra grandeza muito importante no estudo da radiação atmosférica: a densidade de fluxo de radiação. Esta grandeza integrada, em todo espectro, representa a quantidade de energia radiante que passa através de um plano na unidade de tempo e de área. Para melhor compreensão dos termos empregados chama-se irradiância, a densidade de fluxo de radiação incidente sobre uma superfície, e emitância radiante, a densidade de fluxo de radiação emitido por uma superfície (MARTINS et al, 2004).

A densidade de fluxo de energia solar ou irradiância solar, E , que chega ao topo da atmosfera terrestre é expressa nas unidades de Wm^{-2} (razão da potência pela área). Um parâmetro usado para caracterizar a entrada de radiação solar é a constante solar, definida como a irradiância solar no topo da atmosfera (E_{∞}). Seu valor, aproximadamente 1367 Wm^{-2} , pode ser estimado dividindo-se a emitância total do Sol pela área de uma esfera cujo raio seja igual à distância média entre a Terra e o Sol (VIANELLO, 1991).

A irradiância solar que atinge o topo da atmosfera terrestre é variável ao longo do ano, em virtude dos efeitos astronômicos, principalmente aqueles ligados à órbita da Terra ao redor do Sol. Ademais, a intensidade de radiação emitida pelo Sol é função do comprimento de onda e de fenômenos que ocorrem na própria fonte de energia (manchas solares, erupções solares, variações de temperatura na atmosfera solar). Esses fenômenos estão agora sendo estudados sob um novo enfoque da ciência: a climatologia espacial (MARTINS et al, 2004).

A irradiância solar que incide na superfície da Terra dependerá de todos esses fatores, além de outros associados à interação da radiação eletromagnética com os constituintes da atmosfera da Terra. A transmissão da radiação solar na atmosfera é um processo complexo e de difícil descrição devido ao grande número de propriedades físicas da atmosfera que a influenciam.

A razão entre a irradiância solar na superfície terrestre e no topo da atmosfera é definida como transmitância atmosférica. Ao atravessar a atmosfera, a radiação eletromagnética é atenuada por processos de espalhamento e absorção causados pelas partículas denominados aerossóis e moléculas de gases atmosféricos. Os coeficientes de absorção e de espalhamento dependem do comprimento de onda da radiação e das espécies de gases e aerossóis presentes na atmosfera (**MARTINS et al, 2004**).

A Figura 2.4 apresenta um diagrama com os principais processos de interação da radiação solar e da radiação térmica na atmosfera. Trata-se de um esquema bastante simplificado dos processos envolvidos no balanço radiativo do planeta, onde apenas o efeito médio global de todos os processos está representado. O valor de cada componente pode variar significativamente de uma região para outra do planeta e de um período do ano para outro (**HARRISON et al, 1993**).

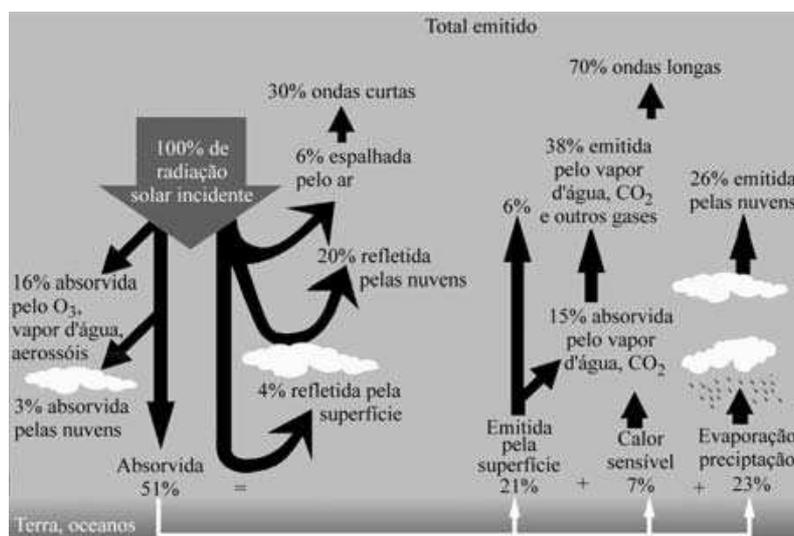


Figura 2.4- Diagrama simbólico dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre (**MARTINS et al, 2004**).

As nuvens, a superfície do planeta, os gases e partículas atmosféricas refletem cerca de 30% da radiação incidente no topo da atmosfera. Os 70% restantes são absorvidos produzindo aquecimento do sistema e causando evaporação de água (calor latente) ou convecção (calor sensível). A absorção da radiação solar é seletiva, sendo o vapor d'água, o ozônio (O₃) e o dióxido de carbono (CO₂) os principais agentes absorvedores (**MARTINS et al, 2004**).

A energia absorvida pelo sistema Terra-Atmosfera é reemitida na faixa do infravermelho do espectro de radiação eletromagnética sendo que 6% são provenientes da superfície e 64% têm origem em nuvens e constituintes atmosféricos (**MARTINS et al, 2004**).

2.4. Sistema de aquecimento solar (SAS) com coletores de placa plana.

2.4.1. Coletores de placa plana

O coletor solar é um tipo de trocador de calor que transforma energia solar em calor. O coletor diferencia-se em diversos aspectos dos trocadores de calor convencionais. Estes usualmente realizam uma troca entre dois fluidos com alta taxa de transferência de calor desprezando-se o fator radiação. O coletor solar converte a energia da fonte radiante, o sol, em calor para o fluído (ABOGDERAH, 1991).

A maioria dos coletores solares de placa-plana consiste de cinco componentes principais, (a) uma ou mais coberturas transparentes de vidro ou plástico; (b) uma placa absorvedora, normalmente metálica, de superfície preta, embora outros materiais possam ser utilizados; (c) Tubos, passagens ou canais integrados à placa absorvedora ou ligados a ela, os quais carregam água, ar ou outros fluídos; (d) isolamento térmico, o qual é colocado no fundo e nas laterais do coletor para minimizar perdas de calor, (e) uma caixa para suportar e proteger os componentes do ambiente (ABOGDERAH, 1991).

O coletor solar é o equipamento principal do SAS, sendo responsável pela absorção e transferência da radiação solar para um fluido de trabalho sob a forma de energia térmica. (SOUZA, 2002).

A Figura 2.5 apresenta um coletor solar convencional com seus principais componentes.

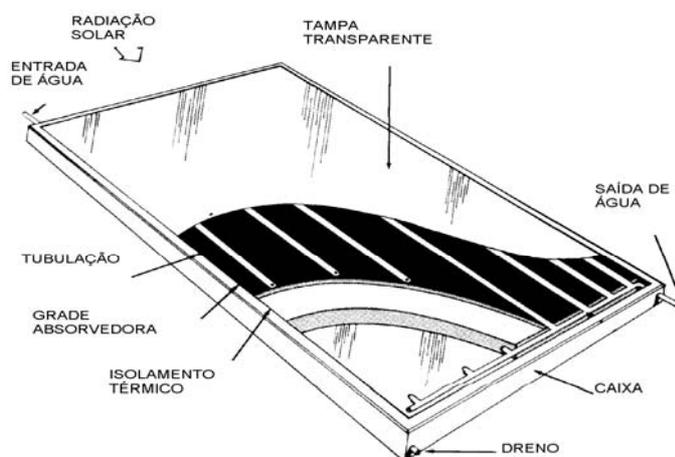


Figura 2.5. Coletor solar com seus principais componentes.
(DICKINSON, CHEREMISINOFF, 1980).

Na Figura 2.6 esta ilustrada o princípio de funcionamento do coletor plano que se baseia na absorção da radiação solar de ondas curtas pela chapa absorvedora, energia essa

transformada em calor, pelo efeito estufa, é aprisionada no interior do coletor e transferida ao fluido. A cobertura transparente serve tanto para evitar o efeito convectivo do ar ambiente quanto para impedir a saída da radiação infravermelha de ondas curtas, produzindo o efeito e proporcionando um aumento de eficiência da conversão (REIS, 2009).

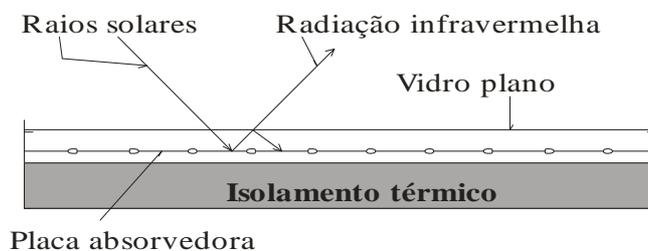


Figura 2.6. Conversão da energia solar em calor.

Os coletores solares podem ter seus tubos absorvedores ligados em paralelo, série ou ainda em uma configuração mista. Na ligação em paralelo tem-se uma maior velocidade do aquecimento da massa fluídica. Na ligação em série obtêm-se um temperatura final maior na saída do coletor. É comum também a associação de coletores para um aumento destas características (SOUZA, 2002).

A Figura 2.7 apresenta as configurações típicas de ligação dos tubos absorvedores de coletores planos.

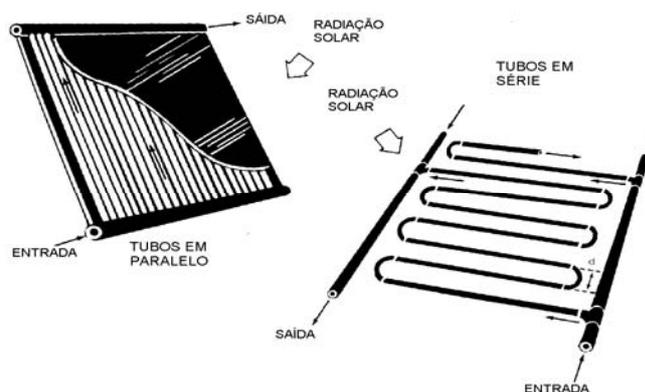


Figura 2.7. Esquemas típicos de ligação dos tubos absorvedores de coletores planos (DICKINSON, CHEREMISINOFF, 1980).

A eficiência de um coletor envolve um grande número de variáveis entre elas: materiais utilizados na fabricação, tipo de superfície absorvedora, intensidade da radiação solar, o número de coberturas transparentes, tipo e espessura do isolamento térmico, as temperaturas de trabalho, entre outras (SOUZA, 2002, REIS, 2009).

2.4.2. Sistemas de aquecimento solar (SAS).

Um sistema básico de aquecimento de água por energia solar é basicamente composto de coletores solares (placas) e reservatório térmico (Boiler). As placas coletoras são responsáveis pela absorção da radiação solar (SOUZA, 2002).

Os principais componentes de uma SAS (sistema de aquecimento solar) são indicados na Figura 2.8, são: Módulo ou caixa: geralmente de alumínio suporta e protege todos os componentes do coletor; Cobertura transparente: geralmente de vidro, permite a passagem da radiação e reduz a perda de calor para o meio; Tubulação: geralmente de cobre, são tubos interconectados através dos quais o fluido circula dentro e fora do coletor; Placa de absorção: é responsável pela absorção e transferência de energia solar para o fluido de trabalho; Reservatório térmico: para acúmulo de água quente. Feito geralmente construído em aço inoxidável ou cobre; Reservatório de água fria: para alimentar o coletor e também a residência (ALDABÓ, 2002).

Na Figura 2.8, são apresentados os componentes principais de um SAS convencional por convecção natural ou termosifão.

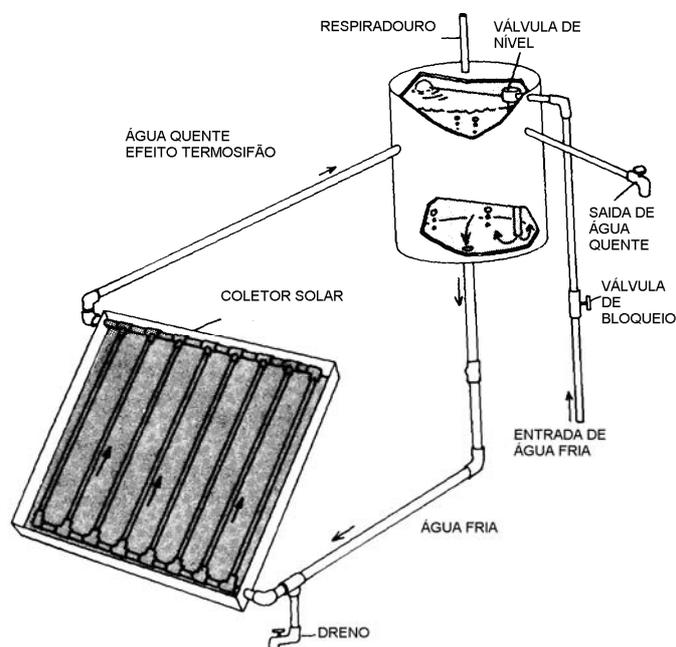


Figura 2.8. Esquema básico de um sistema de aquecimento solar convencional por termosifão ou convecção natural. (DICKINSON, CHEREMISINOFF, 1980).

Os SAS de fabricação comercial para uso residencial funcionam basicamente por convecção natural ou termosifão. A Figura 2.9 apresenta um SAS do fabricante Mondialle Solar, modelo BP-81, com volume de 81 litros e potência elétrica para resistência auxiliar de 4.000W.



Figura 2.9. SAS comercial do fabricante Mondialle Solar, modelo BP-81.

O sistema básico de aquecimento de água por energia solar pode ser classificado como circuito direto ou indireto. Quando o fluido a ser utilizado é aquecido diretamente pelo coletor tem-se um circuito direto. Na Figura 2.9 retrata-se um sistema com circuito direto que tem seu fluxo determinado por convecção natural ou termosifão (**DICKINSON, CHEREMISINOFF, 1980**).

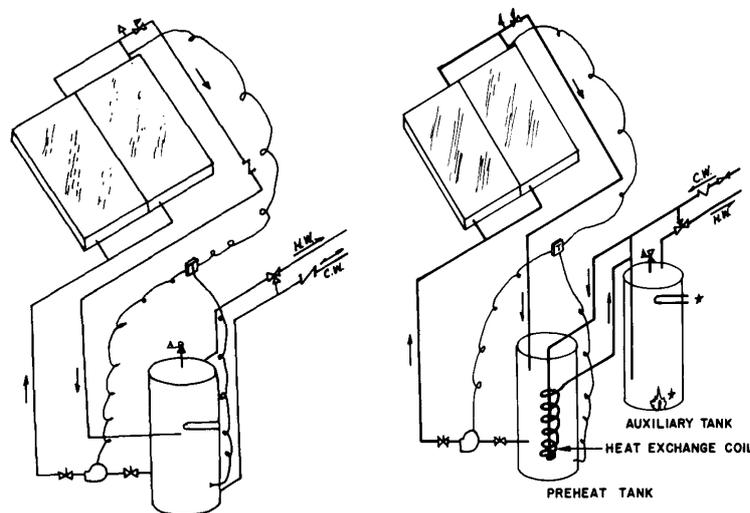


Figura 2.10. Esquema básico de SAS de circuito direto com bomba de circulação e SAS de circuito indireto. (**DICKINSON, CHEREMISINOFF, 1980**).

A Figura 2.10 apresenta um SAS com circuito direto com fluxo determinado por uma bomba de circulação. A mesma figura, lado direito, apresenta um SAS classificado como circuito indireto por utilizar um fluido captador e um trocador de calor para realizar a transferência de calor a um segundo fluido utilizado diretamente para consumo.

Os principais elementos dos SAS de circuito indireto são o coletor solar, bomba de circulação, trocador de calor, tanque de dilatação, válvula limitadora de fluxo, válvula controladora, válvula de segurança, tubulação de cobre com conexões, conexões de enchimento e drenagem, isolamento e desaerador (**DICKINSON, CHEREMISINOFF, 1980**).

A Figura 2.11 apresenta um SAS de circuito indireto de uso educacional, com os componentes listados no parágrafo anterior, fabricado na Hungria, país do leste europeu, de fabricante SOLART-SYSTEM LTD, instalado no Instituto Federal de Educação Tecnológica da Bahia – Campus Barreiras, com sistema de controle de temperatura eletrônico.



Figura 2.11. SAS de circuito indireto com seus componentes e controlador eletrônico de temperatura.

2.4.3. Normas dos SAS de uso comercial.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) apresenta as normas referentes aos coletores comerciais e planos: **NBR-7198** - Projeto e instalação água quente predial; **NBR-10184** - Coletores – desempenho; Reservatórios – desempenho; **NBR-10185** - Sistemas de aquecimento solar de água em circuito direto Projeto e Instalação (substitui a NBR-12269 para execução de instalações de sistemas de aquecimento solar).

A **NBR 10184** descreve como os coletores solares devem ser capazes de operar nas faixas de pressão, temperatura e demais condições especificadas em projeto, incluindo resistência de exposição direta à radiação solar.

O sistema de armazenamento dos coletores, seus reservatórios térmicos devem estar conforme a **NBR 10185** que explica que os sistemas de armazenamento devem ser capazes de operar nas faixas de pressão, temperatura e demais condições especificadas em projeto, incluindo resistência de exposição direta à radiação solar (se aplicável).

A Norma **NBR-15569** estabelece os requisitos para o sistema de aquecimento solar (SAS), considerando aspectos de concepção, dimensionamento, arranjo hidráulico, especificação de componentes, instalação e manutenção, onde o fluido de transporte é a água.

Esta Norma se aplica a SAS compostos por coletores solares planos, com ou sem reservatórios térmicos, e com eventual sistema de aquecimento auxiliar, sendo aplicável aos sistemas onde a circulação de água nos coletores solares se faz por termosifão ou por circulação natural e não é aplicável ao aquecimento de água de piscinas e nem a sistemas de aquecimento solar em circuito indireto.

2.4.4. Os coletores solares 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.

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**).

Os aquecedores solares domésticos de água (SDHW-Solar Domestic Hot Water) 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.

A seguir far-se-á uma breve discussão sobre a história deste tipo de coletor, em nível mundial e local, mostrando os resultados alcançados por várias de suas gerações e as análises que conduziram ao desenvolvimento do presente trabalho.

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, trabalhou com um coletor alternativo com grade absorvedora formada por múltiplos tubos de alumínio, comprovando a competitividade dos mesmos em relação aos coletores convencionais. Tais coletores foram ensaiados em regime de fluxo forçado. 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.

Matrawy e Farkas, em 1997, compararam um coletor com duas placas paralelas (TPPC), 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 6,0 e 10% maior que o STC e PTC, respectivamente.

Saglietti et al, (1997) estudou sistema de seis unidades coletoras para aquecimento de água, feitas com tubos pretos de polietileno extrudado de 12,7 mm de diâmetro, dispostos geometricamente na forma espiral. Sendo um projeto de baixo custo, o sistema não recebeu cobertura transparente, ao contrário dos coletores tradicionais. Uma comparação entre os custos dos coletores de polietileno e comercial mostra que o coletor proposto pode ser uma alternativa viável, com valor 1/10 do coletor tradicional, além de ser de fácil instalação e manutenção. Os resultados práticos obtidos foram satisfatórios, recomendando-se sua utilização, principalmente, no meio rural e entre famílias de baixa renda.

CIETEC/SP (Centro Incubador de Empresas Tecnológicas) em 1999 desenvolveu o chamado “Aquecedor Solar de Baixo Custo” – ASBC. Este coletor não possui cobertura. Este sistema para uma família de quatro pessoas é formado três placas coletoras de 0,91 m² de PVC interligadas e pintadas de preto e por um reservatório de volume igual a 170 litros. Cada placa coletora é composta por um perfil modular de forro de PVC, com tubos de PVC acoplados as suas extremidades. Funciona em regime de termo-sifão. Os resultados obtidos nos testes foram satisfatórios em comparação com outros coletores alternativos.

Cristofari et al (2002) propuseram estudar um novo material para a caixa do coletor, que se caracteriza por ter baixa condutividade térmica, maior resistência à corrosão, baixo

peso e menor custo; Neste trabalho utilizou-se uma nova metodologia de cálculo onde a capacidade calorífica de vários componentes é levada em conta, permitindo uma simulação dinâmica do comportamento do sistema.

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

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

Souza (2005) estudou um coletor alternativo constituído por apenas três elementos: caixa, grade absorvedora e vidro. A caixa foi confeccionada em material compósito e a grade absorvedora era composta de múltiplos tubos de PVC ligados em paralelo, utilizando uma configuração que permitia a diminuição do espaço entre os tubos. Os resultados obtidos para o rendimento térmico e o baixo custo dos materiais alternativos mostraram a viabilidade deste coletor proposto.

Souza (2006) estudou um sistema de aquecimento alternativo de baixo custo composto por um coletor solar alternativo e um reservatório térmico alternativo. O coletor tinha grade absorvedora de PVC e o reservatório foi confeccionado a partir de um tambor de polietileno de 200 litros, utilizado para armazenamento de água e/ou lixo, revestido por material compósito a base de gesso, EPS triturado e água. Sendo os resultados obtidos satisfatórios.

Souza e Costa (2007) estudaram um sistema de aquecimento alternativo constituído por um coletor com grade absorvedora de tubos de PVC ligados em paralelo através de tês de PVC de mesmo diâmetro e um reservatório térmico alternativo construído a partir de um tambor de polietileno revestido por um cilindro confeccionado em fibra de vidro. Demonstrou-se a viabilidade térmica e de materiais do sistema estudado.

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

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

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

Souza (2008) construiu um sistema de aquecimento de água solar trabalhando em regime de termosifão, constituído por dois coletores alternativos e um reservatório armazenador de água também alternativo. Os coletores foram construídos a partir da utilização de garrafas PET, latas de cerveja e refrigerantes de tubos de PVC de ½” e os reservatórios térmicos a partir de um tambor de polietileno de 250 litros, revestido por um cilindro de fibra de vidro, tendo EPS triturado entre as duas superfícies. Mostrou-se que tal sistema de aquecimento alternativo proposto pode ser usado para aquecimento de água apresentando bons resultados.

Souza (2009) estudou um sistema de aquecimento solar de água usando um coletor construído com telhas de fibrocimento e grade absorvedora formada por tubos de PVC ligados em paralelo. Foram experimentadas duas configurações: com e sem cobertura transparente. A cobertura transparente foi construída a partir da utilização de garrafas Pets. Demonstrou-se que a configuração com cobertura transparente era a mais eficiente. A principal característica do sistema estudado é seu baixo custo.

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

Krenzinger (2008), **Pozzebon** (2008) apresentaram um software de simulação de aquecimento de água, *Termosim*, suas interfaces gráficas e discussões sobre os modelos matemáticos aplicados nos seus componentes, apresentando-o como ferramenta importante

nas análises de comportamento térmico dos sistemas de aquecimento de água por energia solar. Os modelos matemáticos do coletor solar e balanço térmico do tanque foram validados com o confronto dos resultados experimentais de **Siqueira** (2003).

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

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

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

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

O uso de coletores com tubos para absorção de polipropileno e placas de absorção de polietileno de alta densidade é bastante focado pela literatura. Esses coletores são usados para aquecimento e climatização de piscinas (**SOUZA, 2007**).

Reis (2009) estudou um sistema para aquecimento de água destinada ao banho cujos resultados foram satisfatórios. O sistema tinha como principal característica seu baixo custo. O coletor consistia de cinco placas de forro de PVC de 10 mm de espessura, 200 mm de largura e 1400 mm de comprimento com área correspondente a 1,40 m². As placas foram ligadas pelas extremidades em paralelo a tubos de PVC de Ø40 mm e de Ø32 mm. As placas

de um lado foram revestidas com chapas de alumínio provenientes de material reciclável (latas de alumínio), com o intuito de aumentar a temperatura da placa absorvedora. O sistema funcionou em regime de termosifão e foi testado para duas configurações: as placas sem revestimento e revestidas com o material alumínio.

Souza (2009) estudou um sistema de aquecimento solar de água usando um coletor construído com telhas de fibrocimento e grade absorvedora formada por tubos de PVC ligados em paralelo. Foram experimentadas duas configurações: com e sem cobertura transparente. A cobertura transparente foi construída a partir da utilização de garrafas PET. Demonstrou-se que a configuração com cobertura transparente era a mais eficiente. A principal característica do sistema estudado é seu baixo custo.

Abreu (2009) estudou um coletor alternativo de cobertura transparente plana de 3,0 mm de espessura; a chapa absorvedora é uma chapa de alumínio de 0,5 mm ondulada com oito aletas; a grade absorvedora é formada por oito tubos de PVC com diâmetro externo de 20 mm, ligados em paralelo através de joelhos e conexões em “t” do mesmo material e mesmo diâmetro e isolante térmico composto de raspa de pneu, com caixa do coletor construída em compensado de 15 mm de espessura que apresentou resultado satisfatório para banho de famílias composta de quatro pessoas.

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.

2.5. Propriedades físicas e degradação dos tubos absorvedores.

Sabe-se que o coletor solar em estudo teve sua grade absorvedora construída com tubos de PVC, e pesquisas apontam que seus 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.

Quando se opta pelo uso do plástico, como elemento absorvedor e condutor, tem-se que investigar os efeitos das degradações térmica 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 (SANTOS, 2008).

No caso do tubo de PVC, essa degradação é mais crítica para níveis de temperatura acima de 250°C, embora a degradação térmica se inicie para temperaturas acima de 60°C, alcançando limite crítico para temperaturas acima de 75°C, onde começa o seu processo de deflexão (SANTOS, 2008).

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, aproximadamente 57%, criando condições para torná-lo bom absorvedor térmico, sem conduzi-lo ao nível de degradação térmico e podendo também eliminar a degradação por ultravioleta (UV) através da utilização de uma grade absorvedora protegida da radiação.

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

2.5.1. O cloreto de polivinila (PVC) e o poliestireno expandido (EPS ou Isopor).

O Coletor solar em estudo teve sua grade absorvedora construída com tubos de PVC, sendo assim apresentam-se suas características físico-químicas.

O cloreto de polivinila (PVC) é um componente da família vinila. Seu valor comercial resulta de várias características que podem ser traduzidas em duas palavras, versatilidade e durabilidade.

Sua versatilidade se traduz pela utilização de seus produtos para as 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 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.

2.5.2. Principais características do cloreto de polivinila (PVC).

Algumas 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.

A Tabela 2.1 mostra as principais propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, óticas e químicas do PVC (SANTOS, 2008).

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 2.1. Principais propriedades do PVC.

Propriedades	Valor
Peso molecular (PM)	50.000-100.000
Peso específico (ρ)	1,4 g/cm ³
Resistência à Tração (R_T)	40,7 – 51,7 MPa
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
Coefficiente de dilatação térmica (C^{-1})	(60 a 80) x 10 ⁶
Coefficiente de Expansão Térmica Linear (e_l)	0,9 - 1,8 x 10 ⁻⁴ ($^{\circ}C$) ⁻¹
Temperatura de Distorção ao Calor (HDT)	75 $^{\circ}C$
Índice de Refração (I_R)	1,57
Absorção de água em 24h (%)	0,04-0,40

Fonte: YAO, WILKIE (2001).

As propriedades listadas na tabela acima tornam o PVC: (a). Leve o que facilita seu manuseio e aplicação; (b). Resistente a ação de fungos, bactérias, insetos e roedores; (c). Resistente à maioria dos reagentes químicos; (d) Bom isolante térmico, elétrico e acústico; condutibilidade térmica (0,15 a 0,21 W/m.K); (e) Sólido e resistente a choques; (f). Impermeável a gases e líquidos; e (g) Resistente às intempéries como a sol, chuva, vento e atmosferas salinas (YAO, WILKIE, 2001).

2.5.3. A degradação do cloreto de polivinila (PVC).

O coletor em estudo, além da placa absorvedora de PVC, como já descrito, utiliza também tubulação de água de PVC. Os resultados obtidos, nos ensaios, demonstraram uma boa eficiência térmica deste tipo de coletor tornando possível a obtenção de água quente para banho. Porém, para torná-los atraentes aos consumidores é necessário que apresente uma boa vida útil, tornando-os assim competitivos comercialmente.

Isso significa ter durabilidade em relação à degradação devido ao calor, radiação ultravioletas, ou ainda, radiação gama, efeitos esses que já são de certa forma, minimizados com adição de estabilizantes. Souza (2002) estudou os processos de degradação inerentes ao uso de tubos absorvedores de PVC em coletores solares.

Os tubos de PVC não são transparentes, pois alguns aditivos são adicionados para conferir maior resistência e durabilidade a estes. O PVC é um polímero linear, o que o faz ser um termoplástico (aqueles que podem ser amolecidos pelo calor quantas vezes quisermos e, ao resfriarem, voltam a apresentar as mesmas propriedades iniciais).

O processo de degradação no PVC sem aditivos é revelado normalmente pela mudança de coloração para amarelo, até o marrom escuro. Esse processo é conhecido como desidrocloração e a figura nº 2,12 apresenta-o de forma simplificada (SOUZA, 2002).

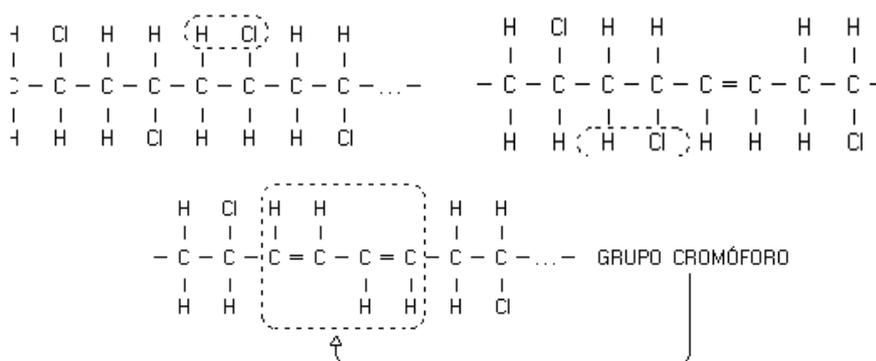


Figura 2.12. Reação de degradação do PVC

É amplamente aceito que a desidrocloração envolve uma reação progressiva entre átomos de cloro e hidrogênio vizinhos ao longo da cadeia polimérica, sendo formada uma ligação dupla entre os átomos de carbono nas posições em que os dois átomos estavam originalmente ligados; forma-se assim uma estrutura de cloro alílico com o próximo átomo de cloro da cadeia polimérica, átomo de cloro este altamente ativado, que dá prosseguimento ao processo de degradação (SOUZA, 2002).

2.5.4. Propriedades do poliestireno expandido (EPS ou Isopor)

O EPS foi utilizado como isolante térmico no coletor solar estudado, em função disso apresentam suas características.

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).

Dois características do EPS são apresentadas na Tabela 2.2 que 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.

Tabela 2.2. Principais propriedades do EPS.

Propriedades	Valor
Condutibilidade térmica(K)	0,030 a 0,040 W/m°C
Peso específico (ρ)	10 - 30 kg/m ³

Fonte: **Incropera** (2003)

O EPS é bastante utilizado na confecção de caixas térmicas para acondicionamento de alimentos e bebidas devido a sua estrutura de células fechadas cheias de ar, aproximadamente de 97% de seu volume, dificultando passagem do calor (SOUZA, 2002).

Na construção civil é muito utilizado devido a sua leveza reduzindo substancialmente o peso das construções.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

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 formados pela união de 12 conexões em T (tê) de PVC de 25 mm, para cada tubo, onde estão conectados os 12 tubos absorvedores de mesmo material e diâmetro.

O sistema de aquecimento solar de água estudado é formado por um coletor solar plano e um reservatório térmico montados em oito tipos de configurações que serão apresentadas a seguir.

3.1. Processos de construção, montagem e ensaio do sistema de aquecimento de água proposto.

O coletor apresenta as seguintes dimensões: largura: 0,80 m e comprimento de 1,89 m; com área correspondente a 1,52 m².

O processo de fabricação e montagem do coletor solar alternativo correspondeu às seguintes etapas: (1) Corte dos tubos de PVC utilizando serra; (2) Lixamento dos terminais dos tubos e das conexões de ligação; (3) União entre tubos e conexões utilizando cola de PVC; (4) Corte das latas para a obtenção das chapas de alumínio utilizando tesoura; (5) Confecção das aletas através de processo de moldagem manual; (6) Fixação das aletas aos tubos de PVC utilizando arame; (7) Pintura dos tubos, aletas e conexões com tinta preta fosca; (8) Corte das placas de EPS e colocação das mesmas embaixo dos tubos

A seguir são apresentadas as etapas de montagem do coletor

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



Figura 3.1. União entre tubos e conexões de PVC.

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

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

4. Pintura com tinta preto fosco da grade absorvedora formada por tubos PVC;



Figura 3.2. Grade absorvedora formada por 12 tubos de PVC de 25 mm.

5. As aletas foram construídas com material reciclável de latas de alumínio.

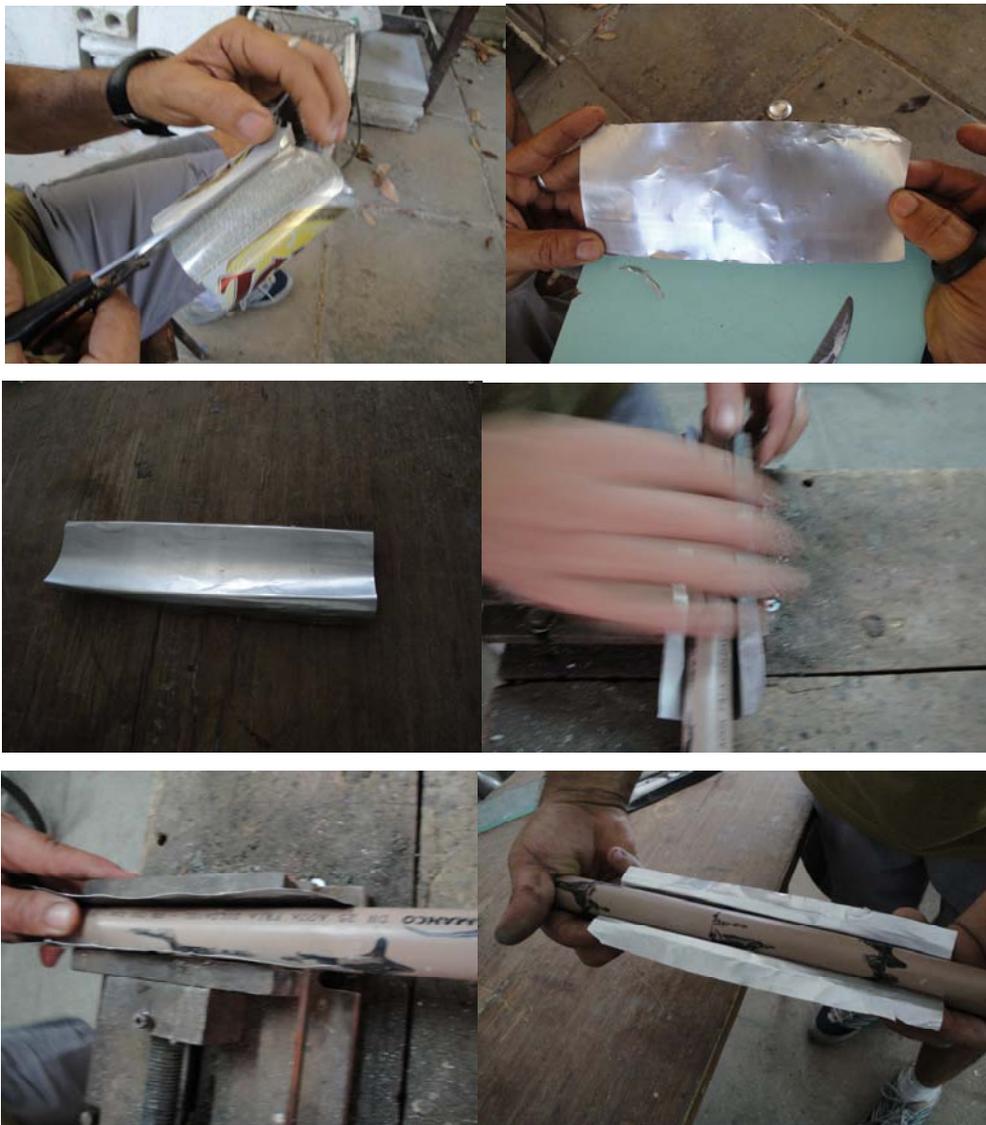


Figura 3.3. Etapas da construção das aletas com latas de alumínio.

O processo de construção das aletas consistiu do corte das latas e dobradura de acordo com o diâmetro dos tubos e fixação, em seguida ocorreu a pintura das aletas e conexões com tinta preto fosco, a fixação das aletas aos tubos de PVC utilizando arame e o corte das placas de EPS e colocação das mesmas embaixo dos tubos conforme configuração, conforme é apresentado na Figura 3.3

Após a conclusão dessas etapas o coletor foi colocado em um suporte com um determinado ângulo para maior aproveitamento da radiação solar global, 10° maior que a latitude do lugar conforme orienta **Bezerra** (2001) e a **CENSOLAR** (1999). A inclinação em relação à horizontal dada ao coletor foi de $15,5^\circ$ S, isso em função da latitude do local, no caso de Natal, no Rio Grande do Norte, que é de $5,5^\circ$ S.

Em seguida o coletor solar em estudo foi conectado ao reservatório de armazenamento de água através de mangueira e conexões de PVC

Os reservatórios térmicos alternativos **RT 150** e **RT 200**, de volumes correspondentes a 150 e 200 litros, respectivamente, foram confeccionados a partir de um tambor de polietileno de 200 litros e passaram por uma reforma a fim de melhorar o isolamento térmico e reduzir vazamentos.



Figura 3.4. O reservatório térmico alternativo RT 200 em reforma.

O tambor foi aberto em sua tampa superior e foi colocado no interior de um tambor confeccionado em fibra de vidro com espessura em torno de 5,0 mm. As tampas dos reservatórios foram construídas em fibra de vidro como mostrou a figura 3.4. No espaço entre os dois elementos básicos, cilindro de fibra e tambor de polietileno foi colocado uma camada de EPS triturado (SANTOS, 2008).

Os reservatórios térmicos **RT200** e **RT 150** encontram-se mostrados na Figura 3.5.



Figura 3.5. Reservatórios térmicos RT 150 e RT 200 do sistema de aquecimento solar estudado.

O sistema de aquecimento solar de água construído foi ensaiado para alguns tipos de configurações, durante três dias por configuração, para dois volumes do tanque armazenador, com três configurações estudadas.

- A) **CONFIGURAÇÃO I:** grade absorvedora sem aletas e sem base de EPS + reservatório de 150 litros (RT150);
- B) **CONFIGURAÇÃO II:** grade absorvedora sem aletas e sem base de EPS + reservatório de 200 litros (RT200);
- C) **CONFIGURAÇÃO III:** grade absorvedora sem aletas e com base de EPS + reservatório de 150 litros (RT150);
- D) **CONFIGURAÇÃO IV:** grade absorvedora sem aletas e com base de EPS + reservatório de 200 litros (RT200);
- E) **CONFIGURAÇÃO V:** grade absorvedora com aletas e sem base de EPS + reservatório de 150 litros (RT150);
- F) **CONFIGURAÇÃO VI:** grade absorvedora com aletas e sem base de EPS + reservatório de 200 litros (RT200);
- G) **CONFIGURAÇÃO VII:** grade absorvedora com aletas e com base de EPS + reservatório de 150 litros (RT150);
- H) **CONFIGURAÇÃO VIII:** grade absorvedora com aletas e com base de EPS + reservatório de 200 litros (RT200);

As configurações apresentadas, sem a apresentação dos reservatórios RT 150 e RT 200 encontram-se mostrados na figura 3.6.



Figura 3.6. Configurações estudadas, no sentido horário, VIII ou VII, VI ou V, IV ou III, II ou I, sem apresentação dos reservatórios térmicos RT 150 e RT 200.

O sistema de aquecimento proposto funciona em regime de convecção natural ou termosifão para volumes de água de 150 e 200 litros e foi ensaiado para a determinação de sua eficiência térmica, sendo medidos parâmetros que o caracterizam e são necessários para a análise do seu desempenho térmico.

Foram medidas as temperaturas de entrada (T_{es}) e saída (T_{sc}) do fluido do coletor, as temperaturas da superfície externa dos tubos em vários pontos e a temperatura da água contida no reservatório e radiação solar global.

A Figura 3.7 mostra os pontos de medição da temperatura de entrada (tec) e saída do coletor (Tsc) em ensaio da configuração V.



Figura 3.7. Locais de medição da temperatura de entrada (Tec) e saída do coletor (Tsc).

Na Figura 3.8 são indicados os pontos de medida de temperatura da água contida no reservatório, sendo a temperatura da água no fundo do reservatório representada por T_f , a temperatura na altura de $1/4$ representada por $T_{1/4}$, a temperatura da água no meio do reservatório representada por $T_{1/2}$, a temperatura na altura de $3/4$ representada por $T_{3/4}$ e T_c representando a temperatura na água na parte de cima do reservatório.

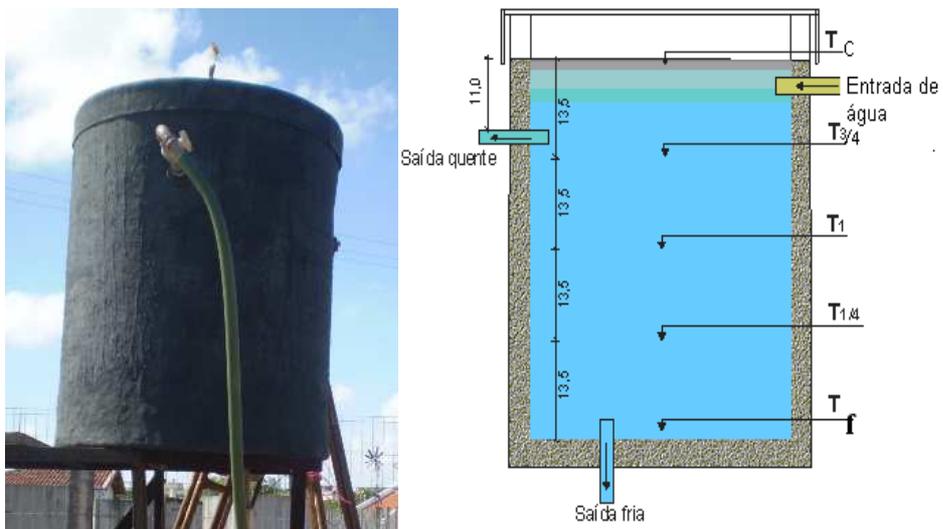


Figura 3.8 Pontos de medida de temperatura da água contida no reservatório.

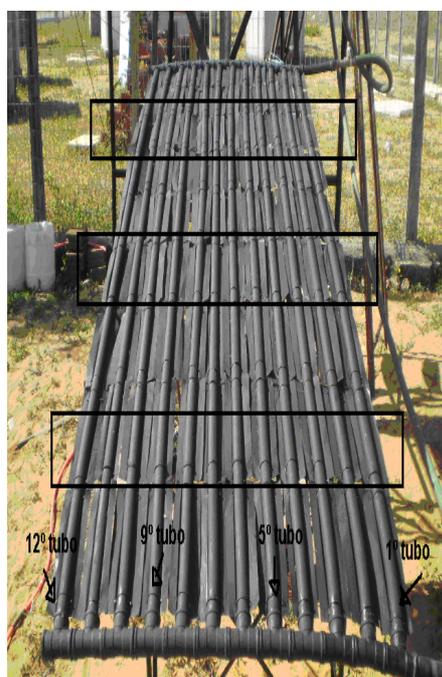
Foi utilizado na medição de temperatura o termômetro digital do fabricante INSTRUTHERM, modelo TH-060, os dados técnicos desse instrumento podem ser verificados no anexo A. O instrumento é apresentado na Figura 3.9.



Figura 3.9. O medidor digital de temperatura utilizado nos testes.

As temperaturas de entrada e saída do fluido foram medidas entre 8 e 15 horas, a cada de 30 minutos, desta forma a temperatura final da água aquecida foi medida após as sete horas de funcionamento.

Avaliou-se, também, a susceptibilidade dos tubos de PVC, de atingirem o nível crítico para o início da degradação térmica em torno de 60 °C, para isso as temperaturas das aletas e tubos absorvedores e ambiente foram medidas entre 11 e 13 horas, período de radiação máxima e constante, em vários pontos da grade do coletor, indicados com **X**, obedecendo-se a seqüência apresentada na Figura 3.10.



	12º tubo	9º tubo	5º tubo	1º tubo	médias
tubo	X	X	X	X	
aleta	X	X	X	X	
tubo	X	X	X	X	
aleta	X	X	X	X	
tubo	X	X	X	X	
aleta	X	X	X	X	

Figura 3.10. Pontos de medição de temperatura da grade absorvedora.

As medições das temperaturas da grade absorvedora permitiram a avaliação da perda máxima apresentada pelo coletor.

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

O sistema de aquecimento alternativo proposto, na configuração III, encontra-se mostrado na Figura 3.11.



Figura 3.11. Sistema solar alternativo de aquecimento de água em funcionamento na configuração III.

Os dados sobre a radiação solar foram obtidos no site do INPE-CRN, Instituto Nacional de Pesquisas Aplicadas - Centro Regional do Nordeste (www.crn2.inpe.br), localizado no interior da UFRN, próximo à área onde foi instalado o coletor solar em estudo.

Além dos dados sobre radiação solar obtidos no INPE utilizou-se o medidor de energia solar digital e portátil do fabricante INSTRUTHERM, modelo MES-100, para essa finalidade. Os dados técnicos desse instrumento podem ser verificados no anexo B.

O medidor de energia solar digital utilizado na medição de radiação solar é apresentado na Figura 3.12.



Figura 3.12. O medidor de energia solar digital indicando 548,5 W/ m².

Para testar a eficiência térmica do reservatório alternativo encheu-se o mesmo e o interligou ao coletor proposto. Após um dia de funcionamento do sistema de aquecimento, às 15 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 do tipo K, 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 a noite para quantificar a queda de temperatura na massa de água contida no reservatório.

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, a potência perdida e o coeficiente global de perdas.**

a.1. Coeficiente global de perdas

A placa coletora após receber radiação se aquece, surgindo, em consequência, um gradiente de temperatura entre a mesma e o ar ambiente, fazendo com que parte da energia captada flua da placa absorvedora e a atmosfera, que se constitui nas perdas térmicas do coletor por condução, convecção e radiação pelo topo, base e laterais do coletor solar.

O parâmetro que engloba todas essas perdas é o Coeficiente Global de Perdas (U_{loss}) medido W/m^2K , que pode ser determinado por quatro métodos distintos, quais sejam: Método da temperatura média da placa, Método da Perda Térmica, Método das Trocas Térmicas e Método da Inversão de Fluxo (**DUFFIE&BECKMAN, 1991**). Escolheu-se o método da perda térmica em função de sua simplicidade e boa acuracidade. O procedimento de cálculo utilizado encontra-se descrito a seguir.

Este método consiste na determinação do Coeficiente Global de Perda Térmica através do conhecimento dos parâmetros potência absorvida pelo coletor ($P_{\text{abs.}}$), potência transferida ao fluido de trabalho (P_u), temperatura média de placa (T_{mp}) e temperatura ambiente (T_a), da área do coletor (A), da vazão mássica (m), do calor específico do fluido (c_p) e da diferença de temperatura do fluido obtida no sistema (ΔT), conforme as equações (3.2) a (3.5).

$$P_{abs} = \alpha_p \cdot I \cdot A \quad (3.2)$$

$$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.3)$$

$$P_p = P_{abs} - P_u \quad (3.4)$$

$$U_{loss} = \frac{P_p}{A \cdot (T_{mp} - T_a)} \quad (3.5)$$

a.2. Determinação do rendimento térmico

O rendimento térmico do coletor em estudo pode ser determinado através do conhecimento da potência transferida ao fluido de trabalho, da energia incidente no coletor solar e da sua área.

$$\eta_t = \frac{P_u}{A \cdot I} \quad (3.19)$$

$$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.20)$$

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

I = radiação solar global, em kW/m².

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

\dot{m} = vazão mássica, em kg/s.

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

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

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Neste capítulo serão avaliados os resultados dos ensaios realizados para as oito configurações estudadas. Serão analisadas também as perdas térmicas dos coletores e reservatórios alternativos construídos no LMHES da UFRN.

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

As Tabelas a seguir mostram os resultados médios gerais do coletor obtidos para os três dias de ensaios com RT150 para as configurações estudadas e o comportamento assumido pelos principais parâmetros medidos e calculados.

Tabela 4.1. Resultados médios gerais – Configuração I - SEM ALETAS + SEM EPS + RT 150.

TEMPO (HORA)	Tec (°C)	Tsc (°C)	ΔT (°C)	I (W/m ²)	η (%)
08 - 09	27,0	34,0	7,0	680	18,3
09 - 10	28,0	36,1	8,1	790	18,4
10 - 11	27,6	38,5	10,9	840	21,8
11 - 12	27,7	39,0	11,3	905	21,3
12 - 13	28,0	39,2	11,2	1002	20,0
13 - 14	29,7	38,0	8,3	903	16,2
14 - 15	30,5	36,3	5,8	660	13,3
Média	28,4	37,3	8,9	826	18,5

Tabela 4.2. Resultados médios gerais – Configuração III - SEM ALETAS + COM EPS + RT 150.

TEMPO (HORA)	Tec (°C)	Tsc (°C)	ΔT (°C)	I (W/m ²)	η (%)
08 - 09	28,9	36,3	7,5	560	24,1
09 - 10	29,9	40,6	10,7	850	21,5
10 - 11	29,7	39,6	9,9	915	18,6
11 - 12	28,5	38,9	10,4	710	26,2
12 - 13	29,1	38,3	9,2	920	17,5
13 - 14	29,7	42,4	12,6	950	23,5
14 - 15	30,5	39,0	8,5	710	20,2
Média	29,5	39,3	9,8	802	21,4

Tabela 4.3. Resultados médios gerais – Configuração V - COM ALETAS + SEM EPS + RT 150.

TEMPO (HORA)	Tec (°C)	Tsc (°C)	ΔT (°C)	I (W/m ²)	η (%)
08 - 09	28,8	37,1	8,3	575	23,5
09 - 10	29,8	39,2	9,4	729	22,8
10 - 11	30,5	40,7	10,2	951	17,3
11 - 12	31,2	42,0	10,8	1045	18,4
12 - 13	30,5	42,4	11,9	1006	20,2
13 - 14	33,3	42,6	9,3	863	17,6
14 - 15	36,5	41,2	4,7	681	11,4
Média	31,5	40,7	9,2	836	18,6

Tabela 4.4. Resultados médios gerais – Configuração VII - COM ALETAS + COM EPS + RT 150.

TEMPO (HORA)	Tec (°C)	Tsc (°C)	ΔT (°C)	I (W/m ²)	η (%)
08 - 09	28,5	41,0	12,5	670	31,7
09 - 10	29,1	43,0	13,9	880	26,9
10 - 11	29,4	42,4	13,0	980	22,6
11 - 12	30,6	43,4	12,8	1020	21,3
12 - 13	32,1	44,1	12,0	990	20,6
13 - 14	34,9	45,7	10,8	880	20,9
14 - 15	36,3	43,8	7,5	690	18,5
Média	31,6	42,9	11,4	860	22,4

A Tabela 4.5 apresenta os valores médios obtidos para cada configuração estudada para um volume do reservatório térmico de 150 litros.

Tabela 4.5. Resultados médios gerais para todas as configurações estudadas para 150 litros.

Nº	TIPO DE CONFIGURAÇÃO	ΔT (°C)	I (W/m ²)	η (%)
I	SEM ALETAS + SEM EPS + RT 150	8,9	826	18,5
III	SEM ALETAS + COM EPS + RT 150	9,8	802	21,4
V	COM ALETAS + SEM EPS + RT 150	9,2	836	18,6
VII	COM ALETAS + COM EPS + RT150	11,4	860	22,4

Percebe-se que a configuração mais eficiente foi a VII – COM ALETAS E COM EPS, como já se esperava. A influência da introdução das aletas é menor que a colocação da grade absorvedora sobre placas de EPS. A configuração com menor eficiência foi a I – SEM ALETAS E SEM EPS.

As radiações globais médias estiveram bem próximas do fim de constância desejado, para uma melhor avaliação comparativa entre as configurações e vazões estudadas, com variação máxima de 7,5%.

As Tabelas a seguir mostram os resultados médios gerais do coletor obtidos para os três dias de ensaios com RT 200 para as configurações estudadas e o comportamento assumido pelos principais parâmetros medidos e calculados.

4.6. Tabela Resultados médios gerais – Configuração II - SEM ALETAS + SEM EPS + RT 200.

TEMPO (HORA)	Tec (°C)	Tsc (°C)	ΔT (°C)	I (W/m ²)	η (%)
08 - 09	28,8	36,9	8,2	603	31,2
09 - 10	28,7	37,9	9,2	797	26,5
10 - 11	29,3	39,2	9,9	937	24,2
11 - 12	31,0	39,5	8,5	1001	19,6
12 - 13	31,1	39,5	8,4	933	20,8
13 - 14	31,3	39,0	7,7	806	21,8
14 - 15	32,3	37,9	5,6	636	20,1
Média	30,2	37,9	7,7	816	21,6

Tabela 4.7. Resultados médios gerais – Configuração IV - SEM ALETAS + COM EPS + RT 200.

TEMPO (HORA)	Tec (°C)	Tsc (°C)	ΔT (°C)	I (W/m ²)	η (%)
08 - 09	28,0	36,1	8,3	593	31,2
09 - 10	29,1	37,4	8,7	821	23,4
10 - 11	29,2	39,7	9,9	907	23,7
11 - 12	29,8	40,1	10,8	922	25,7
12 - 13	30,5	41,3	10,7	909	25,7
13 - 14	31,1	41,1	7,9	859	21,0
14 - 15	33,0	39,4	7,2	658	22,1
Média			9,1	810	24,5

Tabela 4.8. Resultados médios gerais – Configuração VI - COM ALETAS + SEM EPS + RT 200.

TEMPO (HORA)	Tec (°C)	Tsc (°C)	ΔT (°C)	I (W/m ²)	η (%)
08 - 09	29,3	40,2	10,9	707	35,5
09 - 10	30,1	41,5	11,4	876	29,9
10 - 11	31,1	41,7	10,6	1035	23,6
11 - 12	32,0	41,8	9,8	1024	22,0
12 - 13	33,2	42,3	9,1	931	22,5
13 - 14	34,4	41,1	6,7	833	18,5
14 - 15	35,0	41,0	6,0	682	20,2
Média	31,8	40,7	8,9	870	23,5

Tabela 4.9. Resultados médios gerais – Configuração VIII - COM ALETAS + COM EPS + RT 200.

TEMPO (HORA)	Tec (°C)	Tsc (°C)	ΔT (°C)	I (W/m ²)	η (%)
08 - 09	29,5	38,8	9,1	697	29,8
09 - 10	29,7	40,3	10,5	860	28,1
10 - 11	30,2	40,7	11,5	951	27,9
11 - 12	31,1	40,7	9,6	1033	21,5
12 - 13	32,1	40,6	10,5	943	25,7
13 - 14	32,8	40,4	7,5	766	22,5
14 - 15	33,6	39,6	6,0	605	23,0
Média	30,9	40,2	9,3	836	25,3

A Tabela 4.10 apresenta os valores médios obtidos para cada configuração estudada para um volume do reservatório térmico de 150 litros.

Tabela 4.10. Resultados médios gerais para as configurações com o reservatório RT 200.

Nº	TIPO DE CONFIGURAÇÃO	ΔT (°C)	I (W/m ²)	η (%)
II	SEM ALETAS + SEM EPS + RT 200	7,7	816	21,6
IV	SEM ALETAS + COM EPS + RT 200	9,1	810	24,5
VI	COM ALETAS + SEM EPS + RT 200	8,9	870	23,5
VIII	COM ALETAS + COM EPS + RT 200	9,3	836	25,3

A configuração VIII – COM ALETAS E COM EPS é a mais eficiente termicamente em função do gradiente de temperatura gerado no fluido, 9,3° repetindo-se o mesmo comportamento para a vazão estudada no reservatório de 200 litros. Novamente a influência da introdução das aletas é menor que a colocação da grade absorvedora sobre placas de EPS.

A configuração I – SEM ALETAS E SEM EPS teve a menor eficiência. Esse fato também era esperado em função da redução da área absorvedora e das perdas em função da ausência de isolamento térmica.

As radiações globais médias estiveram bem próximas do fim de constância desejado, para uma melhor avaliação comparativa entre as configurações e vazões estudadas, com variação máxima de 7,4%.

A Tabela 4.11 apresenta os resultados médios obtidos para todas as configurações estudadas para RT150 e RT200.

Tabela 4.11. Resultados médios obtidos para todas as configurações estudadas para RT 150 e RT 200.

Nº	TIPO DE CONFIGURAÇÃO	ΔT (°C)	I (W/m ²)	η (%)
I	Coletor sem aletas + sem EPS + RT-150	8,9	826	18,5
II	Coletor sem aletas + sem EPS + RT-200	7,7	816	21,6
III	Coletor sem aletas + com EPS + RT-150	9,8	802	21,4
IV	Coletor sem aletas + com EPS + RT-200	9,1	810	24,5
V	Coletor com aletas + sem EPS + RT-150	9,2	836	18,6
VI	Coletor com aletas + sem EPS + RT-200	8,9	870	23,5
VII	Coletor com aletas + com EPS + RT-150	11,4	860	22,4
VIII	Coletor com aletas + com EPS + RT-200	9,3	836	25,3

No que concerne a diferença de temperatura obtida no coletor a configuração mais eficiente foi a VII – COM ALETAS E COM EPS. Porém em relação ao rendimento térmico as configurações IV - SEM ALETAS + com EPS + RT-200 e VII - COM ALETAS + COM EPS + RT-200 foram as mais viáveis. Isso pode ser explicado pelo aumento na vazão correspondente a 33,4%.

No que diz respeito à radiação solar global a variação máxima observada esteve em torno de 8,8%, portanto a constância pretendida esteve próxima de ser alcançada.

A eficiência média do coletor para todas as configurações ficou abaixo da maioria dos coletores alternativos, com eficiência térmica em torno de 30 a 35%. Já se tinha ciência que a mesma era de significativa magnitude uma vez que o coletor não tem cobertura transparente

para minimizar as trocas convectivas e radiativas com o meio ambiente e não está contido em uma caixa com isolamento no fundo e laterais.

O gráfico da Figura 4.1 apresenta o comportamento assumido pelos valores médios dos parâmetros estudados para todas as configurações em RT150 e RT200.

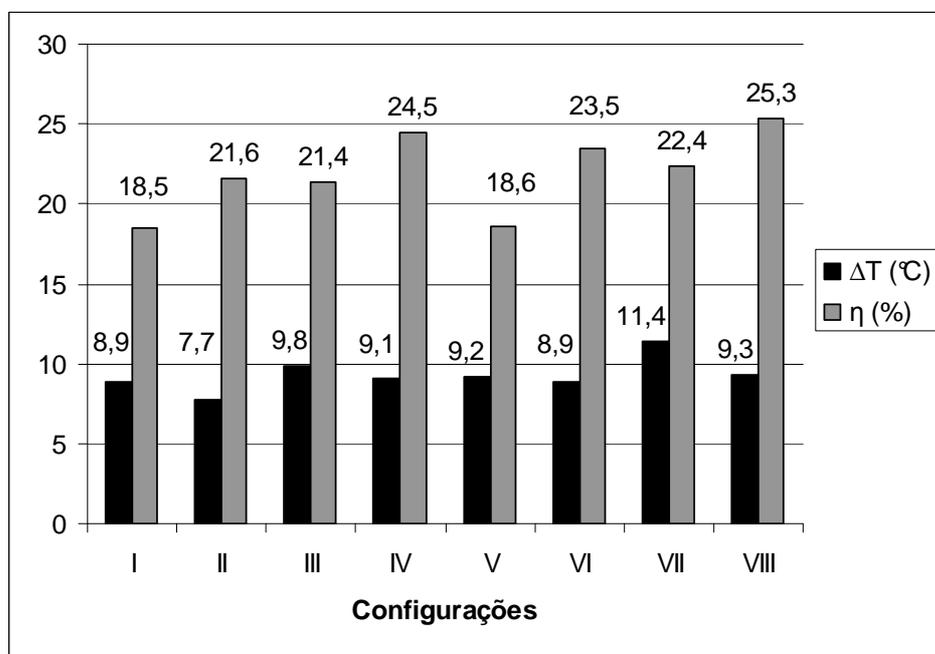


Figura 4.1. Comportamento assumido pelos valores médios dos parâmetros estudados para todas as configurações em RT150 e RT200.

As Tabelas e gráficos das Figuras a seguir mostram os resultados médios gerais e o comportamento assumido pela temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico-RT150 obtidos para as configurações estudadas.

Tabela 4.12. Resultados médios gerais da temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico- RT150 - **Configuração I.**

HORA	T_f	$T_{1/4}$	$T_{1/2}$	$T_{3/4}$	T_c
08 a 09	25,9	26,0	26,3	27,1	31,0
09 a 10	26,1	26,2	26,7	29,8	32,6
10 a 11	26,1	26,2	26,9	31,5	34,0
11 a 12	26,4	26,5	28,3	33,6	36,0
12 a 13	27,5	28,4	31,6	36,8	37,9
13 a 14	30,5	31,0	35,4	38,5	38,9
14 a 15	32,0	32,5	37,3	38,7	38,9
Temperatura da água depois de misturada					37,1

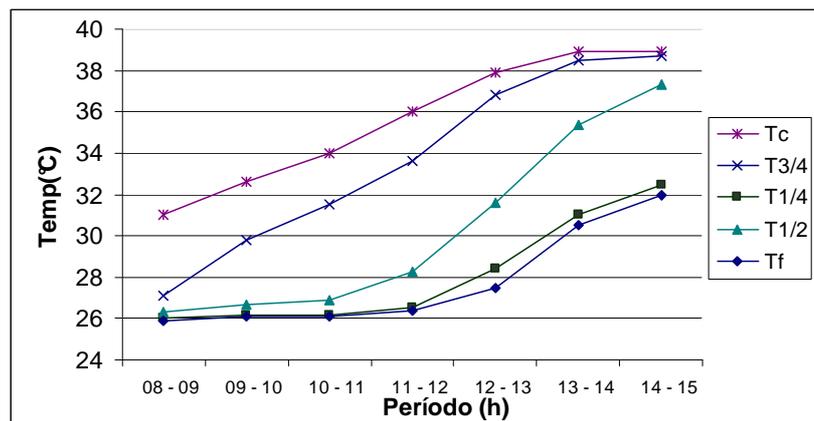


Figura 4.2. Comportamento assumido pela temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico – Configuração I.

Tabela 4.13. Resultados médios gerais da temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico - RT150 - Configuração III.

HORA	T _f	T _{1/4}	T _{1/2}	T _{3/4}	T _c
08 a 09	27,5	27,7	28,1	28,4	30,2
09 a 10	27,6	27,8	28,0	29,5	33,7
10 a 11	28,5	28,9	29,2	33,0	37,5
11 a 12	29,9	30,2	30,7	35,9	38,0
12 a 13	30,6	30,8	32,0	36,6	38,4
13 a 14	31,4	31,7	34,2	38,0	39,3
14 a 15	32,4	33,1	36,4	38,9	39,3
Temperatura da água depois de misturada					38,5

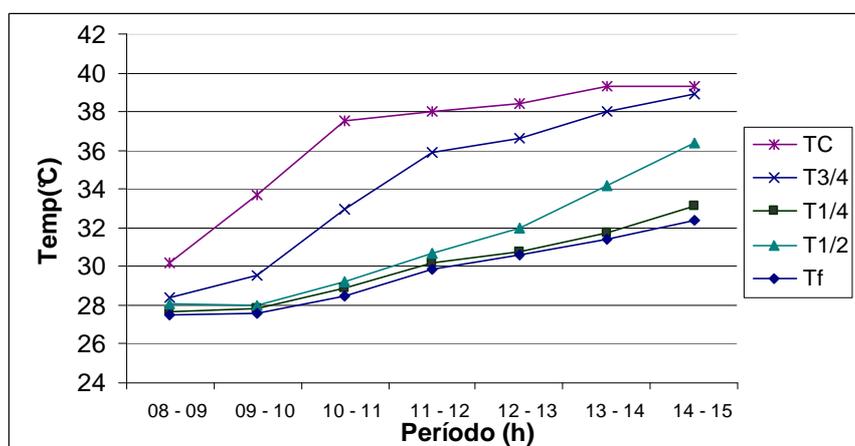


Figura 4.3. Comportamento assumido pela temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico – Configuração III.

Tabela 4.14. Resultados médios gerais da temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico - RT150 - **Configuração V.**

HORA	T _f	T _{1/4}	T _{1/2}	T _{3/4}	T _c
08 a 09	27,6	28,2	28,7	29,8	32,5
09 a 10	28,4	28,8	30,0	34,5	36,3
10 a 11	28,7	29,7	33,6	37,2	37,9
11 a 12	29,8	32,8	36,6	38,3	38,5
12 a 13	31,2	36,0	38,0	38,9	39,2
13 a 14	32,8	37,2	38,4	39,7	40,1
14 a 15	35,7	38,5	39,6	40,3	40,6
Temperatura da água depois de misturada					40,1

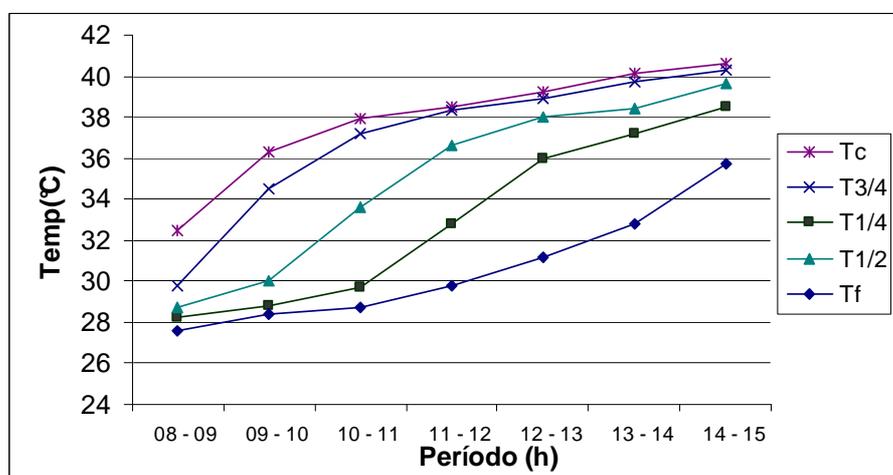


Figura 4.4. Comportamento assumido pela temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico – Configuração VII.

Tabela 4.15. Resultados médios gerais da temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico - RT150 - **Configuração VII.**

HORA	T _f	T _{1/4}	T _{1/2}	T _{3/4}	T _c
08 a 09	27,6	27,8	28,7	31,1	40,3
09 a 10	28,2	28,4	29,9	35,4	40,8
10 a 11	28,5	28,9	33,6	38,0	40,7
11 a 12	29,4	32,3	38,3	40,0	41,6
12 a 13	30,8	37,2	39,1	40,4	42,2
13 a 14	34,8	39,7	40,6	41,8	43,7
14 a 15	37,9	40,7	41,8	42,8	43
Temperatura da água depois de misturada					41,5

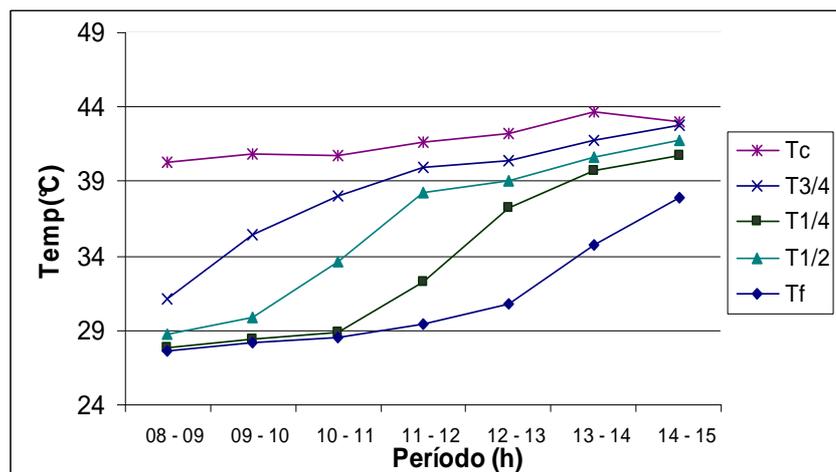


Figura 4.5. Comportamento assumido pela temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico – Configuração VII.

As Tabelas a seguir mostram os resultados médios gerais e o comportamento assumido pela temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico- RT200 obtidos para as configurações estudadas.

Tabela 4.16. Resultados médios gerais da temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico - RT150 – Configuração II.

HORA	T _f	T _{1/4}	T _{1/2}	T _{3/4}	T _c
08 a 09	27,4	27,6	28,4	28,9	32,5
09 a 10	27,6	28,1	29,4	31,1	33,8
10 a 11	28,3	29,1	30,6	33,4	34,8
11 a 12	30,2	30,1	32,3	34,6	35,2
12 a 13	30,0	31,5	34,3	35,4	35,6
13 a 14	31,0	32,8	35,4	35,6	35,9
14 a 15	32,0	34,3	35,7	36,2	36,5
Temperatura da água depois de misturada					36,0

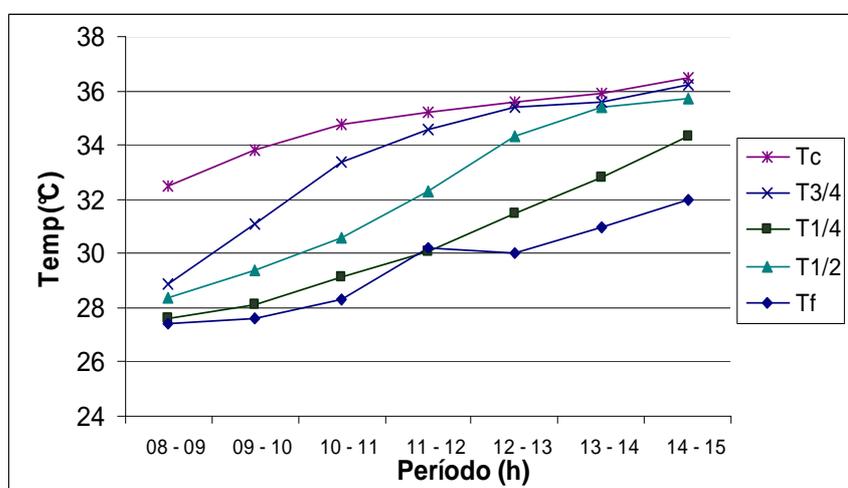


Figura 4.6. Comportamento assumido pela temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico – Configuração II.

Tabela 4.17. Resultados médios gerais da temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico - RT150 – **Configuração IV.**

HORA	T _f	T _{1/4}	T _{1/2}	T _{3/4}	T _c
08 a 09	27,0	27,5	28,1	30,5	32,4
09 a 10	27,4	27,8	29,4	32,5	34,4
10 a 11	27,9	28,4	30,9	33,9	35,5
11 a 12	28,8	30,1	33,7	35,5	36,7
12 a 13	29,9	32,4	35,3	36,2	37,2
13 a 14	31,6	35,2	36,7	37,2	37,7
14 a 15	33,5	36,7	37,5	37,9	38,1
Temperatura da água depois de misturada					37,1

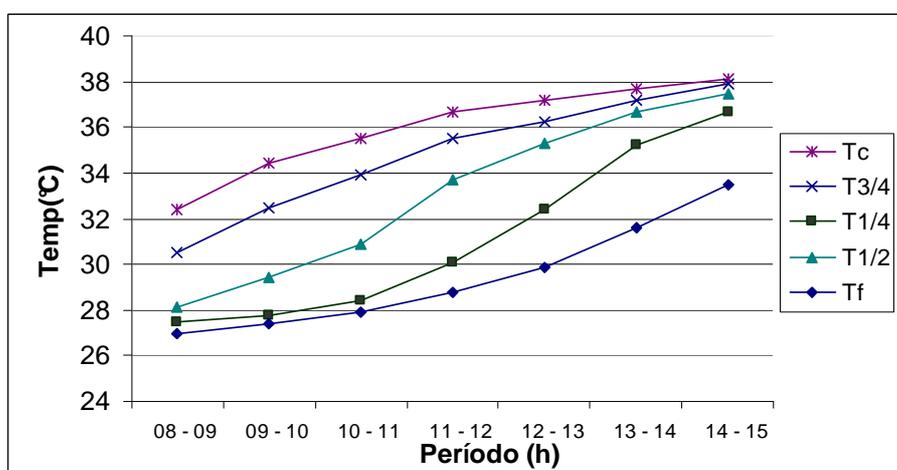


Figura 4.7. Comportamento assumido pela temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico – Configuração IV.

Tabela 4.18. Resultados médios gerais da temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico - RT150 – **Configuração VI.**

HORA	T _f	T _{1/4}	T _{1/2}	T _{3/4}	T _c
08 a 09	27,1	27,7	27,8	30,8	34,8
09 a 10	28,4	29,2	31,1	34,5	37,8
10 a 11	28,5	30,5	33,4	36,4	38,7
11 a 12	29,3	33,0	35,8	38,5	39,7
12 a 13	30,8	34,8	37,4	39,5	40,0
13 a 14	32,1	35,5	37,5	39,4	39,8
14 a 15	33,2	36,2	38,2	39,3	39,9
Temperatura da água depois de misturada					38,1

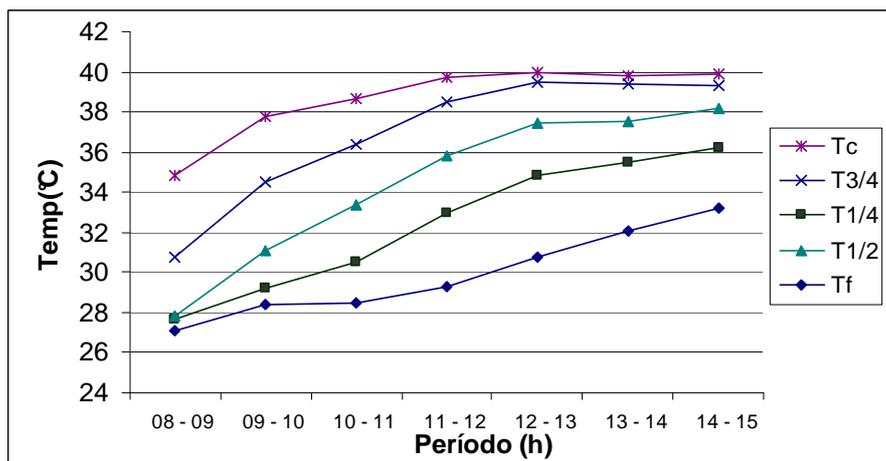


Figura 4.8. Comportamento assumido pela temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico – Configuração VI.

Tabela 4.19. Resultados médios gerais da temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico - RT150 – **Configuração VIII.**

HORA	T _f	T _{1/4}	T _{1/2}	T _{3/4}	T _c
08 a 09	27,4	27,7	28,4	30,1	33,9
09 a 10	27,6	28,2	29	32,8	36,9
10 a 11	27,7	29,2	32,2	36,6	38,6
11 a 12	29,1	32	36,6	39	40
12 a 13	30,1	34,7	38,3	39,4	39,8
13 a 14	31,2	36,2	38,7	39,2	39,4
14 a 15	33,6	37,7	39	39,4	39,8
Temperatura da água depois de misturada					38,9

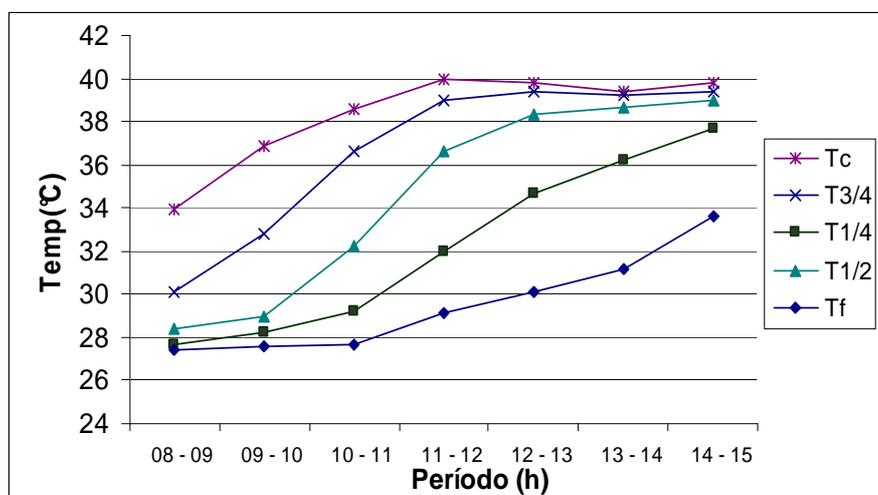


Figura 4.9. Comportamento assumido pela temperatura da água em vários pontos do reservatório térmico – Configuração VIII.

A Tabela 4.20 apresenta os valores médios da temperatura em vários pontos no interior do RT150.

Tabela 4.20. Valores médios de temperatura da água aquecida em vários pontos do reservatório para as configurações estudadas com RT150 e RT200.

Tipo	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
T_f	32,0	32	32,4	33,5	35,7	33,2	37,9	33,6
T_{1/4}	32,5	34,3	33,1	36,7	38,5	36,2	40,7	37,7
T_{1/2}	37,3	35,7	36,4	37,5	39,6	38,2	41,8	39
T_{3/4}	38,7	36,2	38,9	37,9	40,3	39,3	42,8	39,4
T_c	38,9	36,5	39,3	38,1	40,6	39,9	43	39,8
T_{mistura}	37,1	36,0	38,5	37,1	40,1	38,1	41,5	38,9
ΔT(%)	21,5	14,1	21,3	13,7	13,7	20,2	13,5	18,4

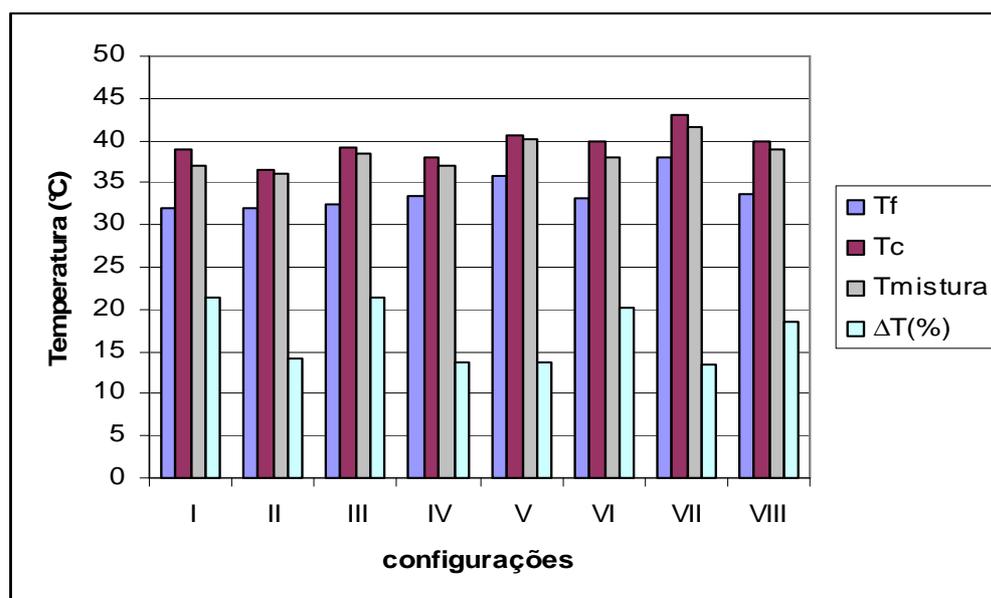


Figura 4.10. Comportamento assumido pela temperatura da água em vários pontos dos reservatórios RT 150 e RT 200 no final do ensaio.

A Figura 4.11 apresenta os valores finais da temperatura da mistura da água para todas as configurações e a variação percentual entre a temperatura de cima e do fundo do reservatório no final do ensaio às 15h.

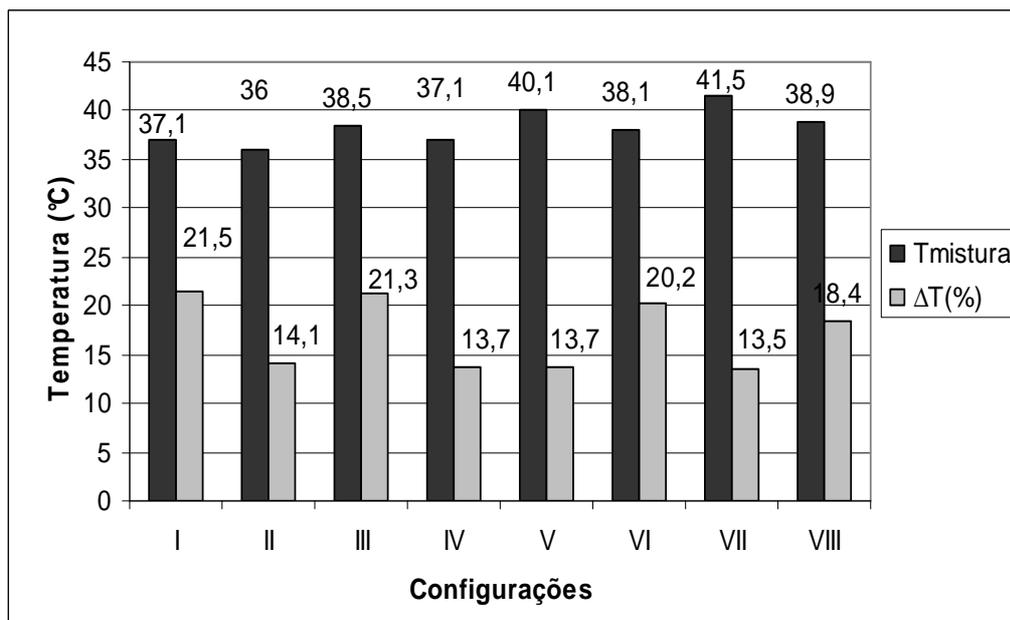


Figura 4.11. Comportamento assumido pela temperatura da água depois de misturada para as configurações estudadas a variação percentual entre a temperatura da água do fundo do reservatório (T_f) com a do topo ou em cima (T_c) no final do ensaio.

As configurações estudadas proporcionaram o aquecimento da água no reservatório térmico em nível propício para banho, igual ou acima de $36,0^{\circ}\text{C}$. A configuração VII - COM ALETAS E EPS + RT150 teve a vazão correspondente a 21,42 litros/hora.

No gráfico da Figura 4.11 identifica-se que a configuração II teve a maior a variação percentual (21,5%) entre as temperaturas da água da parte de cima e do fundo do reservatório com a conclusão do ensaio. O dado indica a falta de uniformidade da temperatura, em função da mais alta vazão proporcionada pelo reservatório de 200 litros.

Identifica-se que a configuração VII atingiu a maior temperatura de mistura, equivalente a $41,5^{\circ}\text{C}$, e teve a menor variação percentual (13,5%) entre T_c e T_f , o que indica uma maior uniformidade de temperatura no reservatório de 150 litros.

No que diz respeito à uniformidade de temperatura no reservatório térmico, condição importante para um sistema de aquecimento de água a variação ficou na faixa de 13,5 a 21,5%.

As temperaturas da superfície externa superior da placa absorvedora foram medidas para a determinação da temperatura média da placa absorvedora e a sua susceptibilidade à degradação térmica.

As Figuras a seguir mostram os valores de temperatura medidos nas aletas e tubos absorvedores para as configurações estudadas para RT150.

	12°	9°	5°	1°	
					médias
tubo	39	39	38	37,4	38,4
tubo	38,0	37,5	36,9	36,5	37,2
tubo	33,5	33,8	33,0	33,1	33,3

T_m=36,3°C

Horario: 11h30
T ambiente: 32,5 °C

Figura 4.12. Temperaturas em diversos pontos na superfície da grade absorvedora – CONFIGURAÇÃO I

	12°	9°	5°	1°	
					médias
tubo	38,3	37,1	36,8	36,2	37,1
tubo	37,2	36,8	36,6	35,8	36,6
tubo	35,2	35,1	34,6	34,5	34,9

T_m=36,2°C

Horário: 11h30
T ambiente: 32 °C

Figura 4.13. Temperaturas em diversos pontos na superfície da grade absorvedora – CONFIGURAÇÃO III.

	12°	9°	5°	1°	
					médias
tubo	37,6	37,4	38,2	37,1	37,6
aleta	39	39,3	38,9	38,7	39,0
tubo	36,6	35,5	36,8	36	36,2
aleta	37	36,5	37,3	37	37,0
tubo	34,7	34,8	35	35,3	35,0
aleta	35	35,5	36,3	36,1	35,7

Tm = 36,7°C

Horario: 11h30
T ambiente: 34°C

Figura 4.14. Temperaturas em diversos pontos na superfície da grade absorvedora – CONFIGURAÇÃO V.

	12°	9°	5°	1°	
					médias
tubo	37,5	37,5	37,2	37,4	37,4
aleta	40,5	42	40,7	41,1	41,1
tubo	35,9	36	36	36	35,9
aleta	38,5	40	38	37,2	38,4
tubo	34,3	34,3	34,3	34,3	34,3
aleta	36,5	37,7	39	39,2	38,1

Tm=37,6°C

Horario: 11h30
T ambiente: 31,5 °C

Figura 4.15. Temperaturas em diversos pontos na superfície da grade absorvedora – CONFIGURAÇÃO VII.

A Tabela 4.21 apresenta os valores médios da temperatura média da grade absorvedora para as quatro configurações estudadas.

Tabela 4.21. Valores médios da temperatura média da grade absorvedora para as quatro configurações estudadas.

TIPO DE CONFIGURAÇÃO	TEMPERATURA MÉDIA DA GRADE (°C)
I	36,3
III	36,2
V	36,7
VII	37,6

Os níveis de temperatura da superfície superior da grade absorvedora do coletor solar exposta à radiação solar estiveram muito distantes do nível crítico para início da degradação térmica, em torno de 60°C.

4.2. Determinação da perda térmica do coletor para a configuração VII.

Foi utilizado o método da potência perdida, que foi calculado seguindo-se o procedimento abaixo descrito, a partir dos parâmetros térmicos medidos durante os testes realizados.

Foram determinadas as potências absorvida e transmitida pelo coletor ao fluido de trabalho e através desses dois parâmetros calculou-se a potência perdida pelo coletor, e em seguida o coeficiente global de perda térmica.

Escolheu-se a configuração mais eficiente e que deve ser recomendada como a configuração mais viável para o sistema de aquecimento estudado.

$$P_{abs} = \alpha_p \cdot A \cdot I = 0,81,52 \cdot 900 = 1094,4 \text{ W}$$

$$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = 24,9 \cdot 13 = 323,7 \text{ W}$$

$$P_p = P_{abs} - P_u = 1094,4 - 323,7 = 770,7 \text{ W}$$

$$U_{loss} = \frac{P_p}{A \cdot (T_{mp} - T_a)} = \frac{770,7}{1,52 \cdot (310,6 - 304,5)} = 83,12 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Percebe-se que o coeficiente global de perda térmica é elevadíssimo e muito superior em relação aos coletores convencionais de mercado, com U_{loss} entre 6,0 e 12,0 W/m².K

(SOUZA, 2002), o que era esperado, uma vez que o mesmo não possui cobertura transparente e foi utilizado um isolante térmico com apenas 20 mm de espessura. A troca convectiva com o ambiente é muito significativa, contribuindo para uma perda térmica elevadíssima.

4.3. Perda térmica do reservatório térmico alternativo

Os resultados do teste para avaliar a eficiência térmica do reservatório térmico alternativo encontram-se apresentados na Tabela 4.22 (SANTOS, 2008).

Tabela 4.22. Resultados do teste de perda térmica realizado com o RT150.

TEMPO (HORA)	Tágua (°C)	Tambiente (°C)	Treserv. cima (°C)	Treserv. meio (°C)	Treserv. baixo (°C)
16:00	45,3	27,0	28,0	28,3	28,5
18:00	45,0	26,0	27,0	27,5	28
20:00	44,2	25,5	25,1	25,6	26,2
22:00	43,5	25,0	25,1	25,6	25,6
00:00	42,9	25,0	25,1	25,2	25,6
02:00	42,5	24,9	24,9	25,5	25,6
04:00	41,8	25,0	25,0	25,4	25,5
06:00	40,9	27,7	28,0	30,4	28,7
07:00	40,6	28,4	28,8	29,6	28,4
09:00	40,1	31,8	36,0	36,8	32,3
11:00	40,1	31,9	38,5	35,5	33,7
13:00	40,1	32,0	38,0	36,0	34,5
15:00	40,8	31,4	37,0	35,0	34,0
16:00	40,7	30,0	35,0	33,0	32,0

O reservatório térmico utilizado apresentou significativa eficiência térmica. Houve uma queda de temperatura, durante as 24 horas, correspondente a 4,7°C Essa queda de temperatura está um dentro da média 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. 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 a 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 isoftálica.

Para a construção do coletor estudado os principais materiais utilizados foram: tubos de PVC de ½”; latas de alumínio de material reciclado; tês de ½” e cola PVC e outros. O custo de fabricação do coletor ficou em R\$ 77,00 e encontra-se discriminado na Tabela 4.23.

Tabela 4.23. Custo dos materiais utilizados na montagem do coletor.

MATERIAL	UNID.	QUANT.	CUSTO UNIT. (R\$)	CUSTO TOTAL (R\$)
Tubo de PVC Ø25,4mm	m	18	2,00	36,00
Tês de PVC Ø20mm	m	24	0,50	12,00
Tinta esmalte preto fosco	ml	500	10,00	10,00
Adesivo plástico	unid.	1,0	3,00	5,00
Isolante térmico (EPS)	unid.	3,0	5,00	15,00
Reduções PVC	unid	2,0	1,00	2,00
			TOTAL	77,00

Em relação ao reservatório térmico de 150 e 200 litros, o custo de fabricação de cada um ficou em torno de R\$ 250,00 (SANTOS, 2008).

O custo total do sistema de aquecimento de água alternativo foi de R\$ 327,00 ou U\$ 178,10 (cotação 31/01/2010). Não foram computados os custos de mão-de-obra.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

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

5.1. CONCLUSÕES

1. O sistema solar de aquecimento demonstrou-se viável para o aquecimento residencial de água destinada ao banho, para uma família de quatro pessoas. Para a obtenção de uma autonomia superior a um banho diário é necessária a colocação de outro módulo de coletor em série ou paralelo, o que não representa um custo adicional significativo uma vez que o custo de fabricação do coletor é reduzido se comparado a outros coletores convencionais ou até mesmo alternativos utilizados para o fim proposto

2. O sistema mostrou-se de fácil fabricação e montagem, apresentando baixo peso e facilidade no manuseio do coletor e todas as configurações testadas mostraram-se viáveis para o fim proposto, de obtenção de água quente destinada ao banho em nível correspondente a no mínimo 36°C;

3. A configuração VII – COM ALETA E EPS + RT150 foi a mais termicamente viável para o fim proposto, pois foi a que obteve um maior gradiente de temperatura no coletor e um maior nível de temperatura de mistura no reservatório térmico;

4. A configuração IV foi a mais economicamente viável, pois dispensa custos de mão de obra para a colocação das aletas nos tubos absorvedores.

5. O sistema de aquecimento testado apresenta baixa relação custo benefício, podendo contribuir sensivelmente para a socialização do uso da água aquecida para banho através da energia solar;

6. Os reservatórios térmicos alternativos mostraram-se viáveis para serem utilizados em sistemas de aquecimento, por apresentarem um nível de perda térmica próximo aos reservatórios convencionais e um baixo custo;

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

8. A perda térmica do coletor estudado é muito superior a relativa aos coletores convencionais, e até mesmo em relação a outros coletores alternativos, porém ressalte-se que o coletor proposto não apresenta cobertura transparente que diminui significativamente as trocas térmicas entre o coletor e o ambiente;

9. O isolante térmico colocado na superfície inferior da placa absorvedora mostrou-se eficiente, mas é preciso estudar uma maneira de não deixá-lo exposto ao ambiente para minimizar seu processo degradativo sem alterar as características básicas do coletor, baixo custo e fáceis processos de fabricação e montagem;

10. O coletor proposto é a mais simples configuração para um sistema de aquecimento solar de água, podendo ser facilmente confeccionado por usuários de quaisquer níveis culturais.

5.2 SUGESTÕES

1. A instalação do sistema em um banheiro, com bóia de alimentação do reservatório térmico e ligação do coletor ao ponto de banho, para estudar o sistema de forma mais acurada. Faz-se necessário também a introdução de alguns acessórios (registros, bóias, válvulas de retenção) para uma melhor operacionalidade do sistema;

2. Realização de testes por um período mais longo para verificar a sua durabilidade e resistência às intempéries;

3. A instalação do coletor em uma caixa de material isolante de baixo custo para reduzir a sua significativa perda térmica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Rivaldo Ferreira, **Estudo Térmico de um Sistema Solar de Aquecimento de Água Residencial para duas Configurações de Superfície Absorvedora**, 2009. 71 f. 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.

ABOGDERAH, Almabrouk Mansor. **Análise teórica, numérica e experimental de um coletor solar com tubos de calor**. 1991. 111f. Dissertação de mestrado. Faculdade de engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia térmica e de fluidos. Unicamp, Campinas, SP

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.

Climate Change - **A Threat to Global Development Enquete Commission "Protecting the Earth's Atmosphere"** of the German Bundestag, Economica Verlag, Bonn, 1992, 235 pp .

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.

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

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

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.

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 UNICAMP, Campinas - São Paulo, 2002.

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

FONSECA Felfli. Felix. **Melhoramento das características energéticas de resíduos de biomassa através da torrefação**. Dissertação de mestrado. Unicamp. Campinas, 1999

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

GRIMM, Alice Marlene. **Notas de Aulas de Meteorologia Básica**. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Física, 1999. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/index.html>>. Acesso em 20 julho 2009.

GREENPRO. **Energia fotovoltaica –Manual sobre tecnologias, projetos e instalação**, 2004.

GOLDEMBERG, J. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. EDUSP, São Paulo, 1998.

HARRISON, E.F. MINNIS, P. BARKSTROM,B.R. GIBSON, G.G. **Radiation Budget at the Top of Atmosphere**, edited by R.J. Gurney, J.L. Foster, and C.L. Parkinson, Atlas of Satellite Observations Related to Global Change (Cambridge University Press, San Diego, 1993) p. 19-38.

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.

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

JAVIER. F.F.R. **Evaluación de La performance de diferentes colectores solares de placa plana usando um simulador solar, construídos com materiales no convencionales**. XIV

Congreso Ibérico y IX Congreso Iberoamericano de Energia Solar, Vigo, Galicia , España, 2008.

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

LEITE, P. R. Logística Reversa - Meio Ambiente e Competitividade, São Paulo : Prentice Hall, 2003. 246p.

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

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

MARTINS. Fernando R. PEREIRA, Enio Bueno. ECHER, Mariza P. de Souza. **Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geostacionário – o Projeto Swera**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 26, n. 2, p. 145 - 159, 2004.

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

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

MELO. Aroldo de Vieira, **Projeto, Construção e Análise de Desempenho de um Forno Solar Alternativo Tipo Caixa a Baixo Custo**, 2008. 67f. 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.

NETO, J.H.M., et al. **Análise técnica e econômica de coletores solares de baixo custo e convencionais utilizados para aquecimento de água de banho**, CEBENS – ISES –CLA. II

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

NAZIAZENO, Ronaldo Nascimento, **Projeto, Construção, Calibração e Análise de piranômetro de abixo custo, baseado no modelo Kimball-Hobbs**, 2009. 75f. 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.

QUEIROZ, W.F, **Construção de um fogão solar à concentração para cozimento direto e indireto**, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN – Natal/RN, 2005.

PEREIRA, André Belmont et al. **Estimativa da radiação solar global diária em função do potencial de energia solar na superfície do solo**. Scientia Agricola, v.59, n.2, p.211-216, abr/jun. 2002.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI,L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

POZZEBON, F., KRENZINGER. A. . **Desenvolvimento de um programa de simulação computacional para análise de sistemas térmicos de aquecimento de água**, CEBENS – ISES –CLA. II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Latino-Americana da ISES, Florianópolis/SC - 2008.

PAGLIARI, Patrick Cenci. **Energia do Mar**. Disponível em <<http://energiarenovavel.org/index.php/Energia-do-Mar>>. Acesso em 03 de setembro, 2009.

RAGAB, A.R.; ALAWI, H., **Weathering effects on the fracture properties of polyvinyl pipes**, Journal of Testing and Evaluation, 9: (1), 44-49, 200.1

REIS, Edmilson Pedreira dos, **Análise do Desempenho Térmico de um Sistema de Aquecimento Solar utilizando coletor com Superfície Absorvedora em Chapas de Forro de PVC**, 2009. 85 f. 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.

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.

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

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

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

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

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

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

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

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

SOUZA, L.G.M., Gomes, U.U., **Viabilidades térmica, econômica e de materiais da utilização de tubos de PVC como elementos absorvedores em coletores de um sistema de aquecimento de água por energia solar**, Tese de Doutorado do Programa de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, UFRN, 2002.

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

SOUZA, José Ribeiro de. **Projeto, Construção e Levantamento de Desempenho de um Concentrador Solar Cilindro Parabólico com Mecanismo Automático de Rastreamento Solar**. 2008 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.

SIQUEIRA, Antonio M. de Oliveira. **Desenvolvimento de um programa de simulação de sistemas de aquecimento solar para água**. 2003 Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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.

TIBA, C. et al., **Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres**. Editora Universitária da UFPe, Recife, 2000.

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

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.

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

7. ANEXO.

A. Dados técnicos do termômetro digital INSTRUTHERM - modelo TH-060.

- Display de cristal líquido (LCD) de 3 1/2 dígitos com relógio de tempo real
- Medição: 2 canais de entrada (T1, T2,), Temperatura diferencial (T1-T2)
- Escalas: Tipo K: - 200 a 1370°C / - 328 a 2.498°F Tipo J: - 200 a 400°C / - 328 a 752°F
- Precisão: (0.5% + 1.0°C) de - 200 a -50°C , (0.1% + 0.8°C) de 0 a 200°C, (0.2% + 2.0°C) de 200 a 1.370°C e (0.3% + 1.0°C) de - 50 a 0°C
- Resolução: - 200 a +200°C (0.1°C) / 200 a 1370°C (1.0°C)
- Proteção de entrada: 60 VDC / 24 Vrms
- Interface serial: RS-232
- Memória: Máx., mín. e média
- Capacidade de armazenamento: 15.000 dados
- Temperatura de operação: 0 a 40°C
- Umidade de operação: Máx. 80% RH
- Alimentação: 1 bateria de 9V
- Dimensões / Peso: 135 × 72 × 31 mm / 235g
- Fabricado de acordo com as normas: EN-55022 / 1994 (classe B), IEC-801-2 / 1994 e ESD (1984)
- Fornecido: Estojo, bateria, software, cabo RS-232 e manual de instruções

B. Dados técnicos do Medidor de Energia Solar digital INSTRUTHERM- modelo TH-060.

- Display de 3 ½ dígitos (indicação máxima de 1999)
- Medição de energia solar
- Ampla escala espectral
- Escala: 2000 W/m², 634Btu/(ft² x h)
- Resolução: 1W/m², 1Btu/(ft² x h)
- Precisão: Tipicamente ± 10W/m² / ± 3 Btu [(ft² x h)] ou ± 5% , o que for maior na luz solar; Erro induzido adicional de temperatura de ± 0,38W/m² / °C [± 0,12 Btu / (ft² x h) / °C] a 25°C
- Seleção entre as unidades W/m² ou Btu/(ft² x h)
- Seleção entre as unidades W/m² ou Btu/(ft² x h)
- Foto-célula especial
- Função de memória de valor máximo, mínimo e médio
- Memória de dados: 99 posições
- Tempo de amostragem: Aprox. 0,4 segundo
- Temperatura e umidade de operação: 0 °C a 50 °C abaixo 80% RH
- Temperatura e umidade de armazenamento:-10 °C a 60 °C abaixo de 70% RH
- Função Data-hold
- Alimentação: 4 pilhas AAA de 1,5V
- Dimensões: 111 (C) x 64 (L) x 34 (A) mm
- Peso: Aprox. 165g