



**PPGEM**

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

**FABRICAÇÃO E ESTUDO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA  
UTILIZANDO COLETOR SOLAR DE GRADE ABSORVEDORA FORMADA COM  
TUBOS PVC NA CONFIGURAÇÃO SÉRIE-PARALELO**

**EDINESIO JALES DA SILVA**

**ORIENTADOR: PROF. DR. LUIZ GUILHERME MEIRA DE SOUZA**

**Natal/RN - Julho / 2016**

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

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**FABRICAÇÃO E ESTUDO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA  
UTILIZANDO COLETOR SOLAR DE GRADE ABSORVEDORA FORMADA COM  
TUBOS PVC NA CONFIGURAÇÃO SÉRIE-PARALELO**

**EDINESIO JALES DA SILVA**

Defesa de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**Orientador: Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza**

**Natal/RN - Julho / 2016**

Catálogo da Publicação na Fonte  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Sistema de Bibliotecas Biblioteca Central Zila  
Mamede / Setor de Informação e Referência

Silva, Edinesio Jales da.

Fabricação e estudo de um sistema de aquecimento de água utilizando coletor solar de grade absorvedora formada com tubos pvc na configuração série-paralelo / Edinesio Jales da Silva. - Natal, RN, 2016.

101 f. : il.

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

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Energia solar - Dissertação. 2. Sistema de aquecimento solar - Dissertação. 3. Grade absorvedora mista - Dissertação. I. Souza, Luiz Guilherme Meira de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.472

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

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, sendo aprovada em sua forma final.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza

**Banca Examinadora**

---

Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza – UFRN

---

Prof. Dr. Marcos Silva de Aquino – UFRN

---

Prof. Dr. Marcelo de Souza Marques – IFRN

---

Prof. Dr. Natanaelyfle Randemberg Gomes dos Santos – Faculdade M. de Nassau/RN

Natal/RN - Julho / 2016

*“Educar é colher com sabedoria  
e colher com paciência”*

Augusto Cury

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela força, coragem, por estar comigo, principalmente nos momentos mais difíceis da minha vida, sempre iluminando e guiando meus passos.

Não poderia deixar de dar um agradecimento especial ao meu orientador e Professor, Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza, pela oportunidade e ensinamentos transmitidos através de suas experiências e seus conhecimentos na área, por acreditar no meu esforço e sendo paciente durante toda minha trajetória. Meu muito obrigado e toda minha gratidão.

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

Ao secretário do PPGEM/UFRN Luiz pelo apoio dedicados no decorrer do Mestrado.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRN, por proporcionarem conhecimentos para o aprimoramento dos alunos.

Agradecer ao funcionário do laboratório, Aldo Paulino, pelo profissionalismo e toda colaboração dada.

Aos colegas de Pós-Graduação da UFRN, por estarem sempre presentes e ajudando uns aos outros.

Quero agradecer a todos os meus familiares pelo apoio e incentivo, especialmente, aos meus pais Damião Atanásio (in memoriam) e Maria José da Silva, e aos meus irmãos. Serei eternamente grato a vocês que sempre acreditaram em mim.

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

## RESUMO

O aquecimento de água solar é uma das principais aplicações dessa fonte energética, pois já se comprovou que o uso de aquecedores solares pode trazer economia significativa para a matriz energética pela não utilização de chuveiros elétricos, grandes consumidores de energia. Dentro desse contexto foi estudado um sistema de aquecimento solar de água para banho, composto por um coletor solar com tubos absorvedores de PVC e reservatório térmico fabricado a partir de um tambor de polietileno de 200 litros. Os tubos absorvedores foram unidos por conexões em T e joelhos de PVC, e a configuração da grade absorvedora formada foi em série/paralelo, para proporcionar uma maior capacidade de aquecimento, aumentando-se a temperatura da água circulante. O reservatório térmico constituído do tambor de polietileno foi revestido por chapas de aço galvanizado e entre as duas superfícies foram aplicadas espuma de poliuretano, um material de excelente resistência térmica. O sistema de aquecimento proposto tinha como principais características o baixo custo e simples processos de fabricação e montagem. Serão apresentados os processos de fabricação e montagem do coletor e do reservatório térmico alternativo, e resultados de testes que demonstrarão a viabilidade do sistema de aquecimento proposto para promover o aquecimento de água para banho para uma família de quatro pessoas. Demonstrou-se que o coletor solar proposto teve capacidade de promover o aquecimento da massa de água do reservatório térmico alternativo a uma temperatura média de 50°C, em um único dia de aquecimento, bem superior à de banho, entre 36 – 38°C, e que o sistema de aquecimento tinha autonomia de quatro banhos para um único dia de teste. A perda térmica do coletor solar estudado esteve muito acima da relativa aos coletores solares convencionais de mercado, mas não inviabilizou a utilização do coletor solar proposto para utilizações residenciais. O sistema de aquecimento solar alternativo estudado teve custo correspondente a 40% do convencional de mercado, comprovando-se sua viabilidade econômica.

**Palavras-chaves:** Energia solar, sistema de aquecimento solar, grade absorvedora mista, coletor e reservatório alternativos, baixo custo.

## ABSTRACT

Solar water heating is one of the main applications of this energy source, because it has already proved that the use of solar heaters can bring significant cost savings to the energy matrix by use of electric showers, large consumers of energy. Within that context was studied a solar water heating system for bath, consisting of a solar collector with pipes and PVC thermal reservoir absorbers made from a polyethylene drum 200 liters. Absorbing tubes were joined by T-connections and knees of PVC, and setting the grid formed absorber was in series/parallel, to provide greater heating capacity, increasing the temperature of the circulating water. The thermal reservoir composed of polyethylene drum was coated on galvanized steel sheets and between the two surfaces have been applied polyurethane foam, a material of excellent thermal resistance. The proposed heating system had as main features the low cost and simple processes of manufacture and Assembly. Will be presented the processes of manufacture and Assembly of the collector and the heat reservoir, and results of tests that will demonstrate the feasibility of the proposed heating system to promote the heating of water for a shower for a family of four. It was demonstrated that the proposed solar collector had ability to promote pasta water heating thermal tank alternate an average temperature of 50° C, in a single day, well higher than the bathroom, between 36-38° C, and the heating system had autonomy of four baths for a single day of testing. The solar collector heat loss studied was very above on the conventional market solar collectors, but not impeded the use of solar collector proposed for residential uses. The solar heating system alternative studied had cost corresponding to 40% of the conventional market, its economic viability.

**Keywords:** solar Energy, solar heating system, grid, joint absorber collector and alternative reservoir, low cost.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1	Apresentação do trabalho .....	14
1.2	Objetivos .....	18
1.2.1	Objetivo geral .....	18
1.2.2	Objetivos específicos.....	18
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
2.1.	A importância da energia solar.....	19
2.2	Sistema de aquecimento solar (SAS) com coletores de placa plana .....	19
2.2.1.	Coletores de placa plana.....	19
2.2.2.	Sistemas de aquecimento solar (SAS). .....	21
2.3.	O cloreto de polivinila (PVC) .....	23
2.3.1.	Generalidades .....	23
2.3.2.	As principais características do PVC .....	24
2.4.	Poliestireno Expandido (EPS - Isopor) .....	25
2.5.	Espuma Rígida de Poliuretano Derivado do Petróleo .....	25
2.6.	Os reservatórios térmicos .....	27
2.6.1.	Convencionais.....	27
2.6.2.	Alternativos.....	28
2.7.	A importância da análise e quantificação da degradação.....	28
2.8.	Estados da arte dos Coletores Solares .....	28
2.8.1.	Os coletores solares alternativos .....	31
2.8.2.	Coletores solares no LMHES/UFRN.....	32
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>52</b>
3.1.	Processos de fabricação, montagem e de ensaio do sistema de aquecimento Solar alternativo proposto.. .....	52
3.1.1.	Processos de Fabricação e montagem do Coletor Solar Alternativo (CSA).....	52
3.1.2.	Processos de fabricação e montagem do Reservatório Térmico Alternativo (RTA). .....	56
3.1.3.	Processo de Ensaio do Sistema de Aquecimento Solar Alternativo Proposto.....	62

3.2.	Determinação dos parâmetros térmicos .....	64
3.2.1.	Coeficiente global de perdas ( $U_{\text{loss}}$ ).....	65
3.2.2.	Determinação do rendimento térmico ( $\eta_t$ ) .....	65
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>67</b>
4.1.	Parâmetros térmicos para determinação da eficiência térmica do sistema de aquecimento solar alternativo (SASA).....	67
4.1.1.	Parâmetros térmicos para determinação da eficiência térmica do CSA no primeiro dia de ensaio .....	67
4.1.2.	Parâmetros térmicos para determinação da eficiência térmica do CSA no segundo dia de ensaio.....	70
4.1.3.	Parâmetros térmicos para determinação da eficiência térmica do CSA no terceiro dia de ensaio.....	73
4.1.4.	Parâmetros térmicos para determinação da eficiência térmica do CSA no quarto dia de ensaio.....	76
4.1.5.	Parâmetros térmicos para determinação da eficiência térmica do CSA no quinto dia de ensaio.....	79
4.1.6.	Médias gerais obtidos para os cinco dias de ensaios para coletor solar alternativo.....	82
4.2.	Determinação do $U_{\text{loss}}$ , das taxas de energia absorvidas e perdidas pelo coletor e do rendimento térmico do coletor.....	88
4.3.	Perda térmica do reservatório térmico alternativo. ....	90
4.4.	Custo para fabricação e montagem do CSA e do RTA proposto.....	92
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b> .....	<b>94</b>
5.1.	Conclusões.....	94
5.2.	Sugestões .....	95
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>96</b>

## LISTAS DE FIGURAS

FIGURA 01.	Coletor solar com seus principais componentes.....	20
FIGURA 02.	Esquemas típicos de ligação dos tubos absorvedores de coletores planos..	21
FIGURA 03.	Esquema básico de um sistema de aquecimento solar convencional por termosifão ou convecção natural. ....	22
FIGURA 04.	SAS comercial do fabricante Mondialle Solar, modelo BP-81.....	22
FIGURA 05.	Esquema básico de SAS de circuito direto com bomba de circulação e SAS de circuito indireto. ....	23
FIGURA 06.	Boilers convencionais disponíveis no mercado.....	27
FIGURA 07.	Primeiro coletor solar fabricado no LMHES / UFRN.....	32
FIGURA 08.	Coletor e sistema de aquecimento estudados.. ....	35
FIGURA 09.	Coletor solar utilizando carcaças de lâmpadas fluorescentes estudado.....	33
FIGURA 10.	Coletor e sistema de aquecimento estudados visando conforto térmico.. ...	34
FIGURA 11.	Coletor e sistema de aquecimento estudados... ..	35
FIGURA 12.	Dois tipos de coletores solares propostos estudados comparativamente.....	35
FIGURA 13.	Tipos de coletores solares e os sistemas de aquecimento estudados.....	36
FIGURA 14.	Tipos de coletores solares e o sistema de aquecimento estudados.....	37
FIGURA 15.	Coletor solar com apenas três elementos estudado por Souza. ....	39
FIGURA 16.	Sistema de aquecimento solar composto por dois coletores em série... ..	38
FIGURA 17.	Sistema de aquecimento de piscina composto por dois coletores em série.....	38
FIGURA 18.	Sistema de aquecimento proposto por Souza e estudado por Costa.....	39
FIGURA 19.	Coletores fabricados com garrafas PETs e o sistema de aquecimento solar de água estudado.....	40
FIGURA 20.	Configuração da grade absorvedora mista e o sistema de aquecimento proposto.....	41
FIGURA 21.	Sistema de aquecimento solar com coletor de placas de PVC para forro de ambientes.....	43
FIGURA 22.	Configurações das grades absorvedoras e o sistema de aquecimento solar de água proposto.....	42
FIGURA 23.	Sistema de aquecimento com grade absorvedora formada por tubos de PVC ligados em paralelo.....	43

FIGURA 24.	Coletor solar com cobertura transparente de plástico transparente retirados de garrafas PETs.....	43
FIGURA 25.	Sistema de aquecimento com coletor solar fabricado com tubos de PEAD e telhas de fibrocimento....	44
FIGURA 26.	Sistema de aquecimento solar de água com coletor solar fabricado com placa de policarbonato....	45
FIGURA 27.	Sistema de aquecimento solar de água com coletor solar fabricado com garrafas PETs e tubos de PVC.....	46
FIGURA 28.	Sistema de aquecimento de piscina proposto por Souza e estudado por Gonçalves....	46
FIGURA 29.	Coletor solar com grade absorvedora mista e o coletor solar proposto.....	47
FIGURA 30.	Configuração da grade absorvedora formada por inúmeros tubos de PVC e o sistema de aquecimento em teste..	48
FIGURA 31.	Sistema solar de aquecimento de água em teste.....	49
FIGURA 32.	Sistema de aquecimento solar de água fabricado em teste.....	50
FIGURA 33.	Coletor e o sistema de aquecimento propostos.....	51
FIGURA 34.	Marcação na chapa de aço galvanizado para conformação e posterior fabricação da caixa do coletor...	52
FIGURA 35.	Caixa do coletor fabricada em chapa galvanizada.....	53
FIGURA 36.	Aplicação do isolamento térmico no coletor solar e da chapa absorvedora.....	53
FIGURA 37.	Caixa do coletor pronta para receber a grade absorvedora.....	54
FIGURA 38.	Grade absorvedora mista do coletor.....	54
FIGURA 39.	Coletor todo pintado..	55
FIGURA 40.	Coletor solar de grade absorvedora mista com tubos absorvedores de PVC pronto para ensaio.....	55
FIGURA 41.	Tambor de polietileno de 200 litros – elemento base do reservatório térmico.....	56
FIGURA 42.	Tambor com conexões.....	57
FIGURA 43.	Tambor metálico fabricado para revestir o elemento base do RTA.....	57
FIGURA 44.	Obtenção do isolamento térmico do RTA.....	58
FIGURA 45.	Tambor de revestimento do RTA já pintado.....	58
FIGURA 46.	Fixação da borracha de vedação para tampa do RTA.....	59

FIGURA 47.	Acessórios do RTA instalados.....	59
FIGURA 48.	Tampa do RTA fabricada em fibra de vidro.....	60
FIGURA 49.	Haste para medição das temperaturas em vários níveis do RTA..	60
FIGURA 50.	Dispositivo para medição das temperaturas do RTA já instalado.....	61
FIGURA 51.	Reservatório térmico alternativo do sistema de aquecimento solar de água pronto para ensaio... ..	61
FIGURA 52.	Sistema de aquecimento solar alternativo (SASA) pronto para ensaio.....	62
FIGURA 53.	Termopares tipo K e termômetro digital .....	63
FIGURA 54.	Foto do aparelho que fornece dados meteorológicos....	63
FIGURA 55.	Foto do aparelho que fornece dados meteorológicos.....	64
FIGURA 56.	Comportamento dos parâmetros do primeiro dia de ensaio do Coletor Solar Alternativo....	68
FIGURA 57.	Comportamento da variação de temperatura ( $\Delta T$ ) média do primeiro dia de ensaio....	68
FIGURA 58.	Comportamento da radiação solar global (I) média do primeiro dia de ensaio... ..	69
FIGURA 59.	Comportamento da eficiência térmica ( $\eta$ ) média do primeiro dia de ensaio.....	69
FIGURA 60.	Comportamento dos parâmetros do segundo dia de ensaio do Coletor Solar Alternativo.....	71
FIGURA 61.	Comportamento da variação de temperatura ( $\Delta T$ ) média do segundo dia de ensaio....	71
FIGURA 62.	Comportamento da radiação solar global (I) média do segundo dia de ensaio.....	72
FIGURA 63.	Comportamento da eficiência térmica ( $\eta$ ) média do segundo dia de ensaio.....	72
FIGURA 64.	Comportamento dos parâmetros do terceiro dia de ensaio do Coletor Solar Alternativo.....	74
FIGURA 65.	Comportamento da variação de temperatura ( $\Delta T$ ) média do terceiro dia de ensaio.....	74
FIGURA 66.	Comportamento da radiação solar global (I) média do terceiro dia de ensaio.....	75

FIGURA 67.	Comportamento da eficiência térmica ( $\eta_t$ ) média do terceiro dia de ensaio.....	75
FIGURA 68.	Comportamento dos parâmetros do quarto dia de ensaio do Coletor Solar Alternativo.....	77
FIGURA 69.	Comportamento da variação de temperatura ( $\Delta T$ ) média do quarto dia de ensaio.....	77
FIGURA 70.	Comportamento da radiação solar global (I) média do quarto dia de ensaio.....	78
FIGURA 71.	Comportamento da eficiência térmica ( $\eta_t$ ) média do quarto dia de ensaio.....	78
FIGURA 72.	Comportamento dos parâmetros do quinto dia de ensaio do Coletor Solar Alternativo.....	80
FIGURA 73.	Comportamento da variação de temperatura ( $\Delta T$ ) média do quinto dia de ensaio... ..	80
FIGURA 74.	Comportamento da radiação solar global (I) média do quinto dia de ensaio.....	81
FIGURA 75.	Comportamento da eficiência térmica ( $\eta_t$ ) média do quinto dia de ensaio.....	81
FIGURA 76.	Comportamento da variação de temperatura ( $\Delta T$ ) média dos cinco dias de ensaios....	83
FIGURA 77.	Comportamento da radiação solar global (I) média dos cinco dias de ensaios.....	83
FIGURA 78.	Comportamento da eficiência térmica ( $\eta_t$ ) média dos cinco dias de ensaios.....	84
FIGURA 79.	Média dos níveis de temperatura dentro reservatório às 15:00 horas.....	86
FIGURA 80.	Média geral dos níveis de temperatura dentro reservatório às 15:00 horas após a mistura.....	86
FIGURA 81.	Comportamento dos parâmetros da simulação dos banhos para os cinco dias de ensaio.....	88
FIGURA 82.	Perda percentual de temperatura na massa de água a cada quatro horas, para um período de vinte e quatro horas de ensaio com o RTA. ....	91

## LISTAS DE TABELAS

TABELA 01.	As principais propriedades do PVC. ....	24
TABELA 02.	Principais propriedades do EPS.....	25
TABELA 03.	Resultados da média do primeiro dia de ensaio do Coletor Solar Alternativo.....	67
TABELA 04.	Resultados da média do segundo dia de ensaio do Coletor Solar Alternativo.....	70
TABELA 05.	Resultados da média do terceiro dia de ensaio do Coletor Solar Alternativo.....	73
TABELA 06.	Resultados da média do quarto dia de ensaio do Coletor Solar Alternativo.....	76
TABELA 07.	Resultados da média do quinto dia de ensaio do Coletor Solar Alternativo.....	79
TABELA 08.	Resultados médios gerais.. ....	82
TABELA 09.	Níveis de temperatura média e geral em vários pontos do reservatório térmico no final de cada dia de ensaio.....	85
TABELA 10.	Níveis de temperatura média geral em vários pontos do reservatório térmico para cada dia de ensaio.....	85
TABELA 11.	Resultados dos testes de simulação dos banhos para os cinco dias de ensaio.....	87
TABELA 12.	Resultados do teste realizado com o reservatório térmico alternativo proposto.. ....	90
TABELA 13.	Perda percentual de temperatura na massa de água a cada quatro horas, para um período de vinte e quatro horas de ensaio com o RTA.....	91
TABELA 14.	Custo dos materiais utilizados na montagem do coletor solar alternativo..	92
TABELA 15.	Custo dos materiais utilizados na montagem do reservatório térmico alternativo.....	93

## LISTAS DE SÍMBOLOS

$Q_{abs}$  = Taxa de energia absorvida pela conjunto absorvedor (placa e tubos), em kW.

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

$Q_p$  = Taxa de energia perdida do coletor, em kW.

$I$  = Radiação solar global, em kW/m<sup>2</sup>.

$A$  = Área do coletor (área exposta à radiação solar), em m<sup>2</sup>.

$\dot{m}$  = Vazão mássica, em kg/s.

$c_p$  = Calor específico da água, em KJ/kg °K.

$\Delta T$  = Gradiente de temperatura entre entrada e saída do fluido, em K.

$\alpha_p$  = Absortividade da placa (85%)

$\tau_v$  = Transmissividade do vidro (85%)

$U_{loss}$  = Coeficiente global de perda térmica, em W/m<sup>2</sup>.K

$\eta_t$  = Rendimento térmico do coletor, em %

$E$  = Energia Consumida (KWh)

$P$  = Potência (KW)

$T$  = Tempo (h)

$V_T$  = Valor Total (R\$)

$V_{Energ}$  = Valor do kWh (R\$)

SAS = Sistema de aquecimento solar

SASA = Sistema de aquecimento solar alternativo

PVC = O cloreto de polivinila

EPS = Poliestireno Expandido

CSA = Coletor Solar Alternativo

RTA = Reservatório térmico alternativo

PET = Politereftalato de etileno

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Apresentação do trabalho**

Nos últimos anos, vários países começaram a olhar mais intensamente por fontes renováveis de energias para compor a matriz energética nacional. Uma fonte interessante de energia é a energia solar, que pode ser aplicada, principalmente, para produzir eletricidade e aquecimento de água.

O Brasil tem um potencial de energia solar médio de aproximadamente  $700\text{W}/\text{m}^2$ , podendo alcançar picos de até  $1200\text{W}/\text{m}^2$ . Esse imenso potencial solar é extremamente importante para ser utilizado como alternativa energética, aliviando a matriz de qualquer país que tenha como prioridade a saúde ambiental do planeta, portanto, tem que ter seu uso massificado por todas as nações da terra. Conforme banco de dados da estação solarimétrica do LMHES/UFRN.

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

Os sistemas de aquecimento de água residencial ainda usam a resistência elétrica para promover a elevação de temperatura da água, aumentando-a em  $10^\circ\text{C}$  com um gasto energético de até 5 KWh (LORENZETTI, 2016). Um gasto energético altíssimo para um pequeno aumento na temperatura da água necessária para banho. A eletricidade usada nesses chuveiros nem sempre é de uma fonte de energia limpa. Os coletores solares são uma alternativa para o aquecimento da água de banho.

Embora tão viável para promover o aquecimento de água para banho, tecnologia amplamente dominada e massificada na literatura solar, seu uso ainda é incipiente quando comparado aos países desenvolvidos que já utilizam massivamente o aquecimento solar de água. Países como a Espanha já entregam residências aos inquilinos com sistemas de aquecimento solar de água já instalados.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2016), o sistema de aquecimento por chuveiro elétrico ainda está presente em aproximadamente 73% dos lares brasileiros.

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) 45% do consumo de energia elétrica no Brasil é direcionado para o setor de edificações, sendo 80,0% correspondente a empresas e

residências e 20% a administração pública, com cifras alcançando 13,8% do Produto Interno Bruto do país (TOMÉ, 2014).

Segundo TOMÉ (2014), o setor residencial responde por 23% do consumo nacional de energia e o consumo do chuveiro elétrico é o segundo maior em uma residência, correspondendo a 25%, perdendo apenas para o refrigerador/freezer que corresponde a 30 %. Sua utilização atinge o horário de pico das 18:00 às 19:00 horas, correspondendo a 8,5 % da demanda nacional de energia neste horário. Em casos extremos, a sobrecarga causada nos horários de pico para o equipamento de aquecimento de água pode até causar interrupções na distribuição de energia elétrica.

Estes dados apontam a importância das energias alternativas para o aquecimento de água destinada ao banho em substituição aos chuveiros elétricos para propiciar a diminuição do consumo de energia elétrica, trazendo alívio à matriz energética brasileira.

Os dados do Balanço Energético Nacional de 2014 mostram que um terço da energia gerada em Itaipu é usado para conduzir chuveiros elétricos em horários de pico, enquanto o Brasil tem energia solar disponível para aquecer água em quase todos os dias do ano, principalmente na região nordeste.

Todos estes dados mostram a importância de substituir fonte convencional de energia elétrica pela fonte renovável de geração de energia elétrica a partir da energia solar para promover o aquecimento de água residencial para banho. Essa substituição poderia trazer um alívio significativo à matriz energética brasileira, acarretando no uso mais racional da energia elétrica gerada por termoelétricas e hidrelétricas.

Preocupado com a situação econômica das famílias brasileiras que têm renda entre um e três salários mínimos, e que têm gasto significativo com a utilização do chuveiro elétrico resolveu-se estudar um sistema solar de aquecimento de água alternativo, visando à redução do gasto doméstico com energia elétrica.

Numa experiência de sucesso, implementada pelo governo de Minas Gerais através do Programa Lares Habitação Populares (PLHP), comprovou-se uma redução do consumo de energia elétrica entre 30% e 40%. Esse é o percentual aproximado da economia que a instalação do aquecedor solar proporciona a uma família de quatro pessoas, dois adultos e duas crianças, moradora de um conjunto habitacional do PLHP (GOMES, 2010).

Em dinheiro, a economia mensal pode chegar a até R\$ 60,00, e a família beneficiada pode usar esta economia em outras despesas domésticas, melhorando a sua qualidade de vida

na alimentação, compra de material escolar, vestuário, no pagamento da prestação da casa e até na aquisição de aparelhos eletroeletrônicos.

O chuveiro elétrico é responsável por cerca de 25 % do consumo de energia elétrica de uma residência (COSERN, 2016).

Hoje, a maioria dos chuveiros é fabricada com potência média de aproximadamente 5.500W para a chave no inverno ou quente, e de aproximadamente 3.850W para a chave no verão ou morno (LORENZETTI, 2016).

Isso quer dizer que um chuveiro elétrico consome cerca de 5500 ou 3850 joules de energia elétrica por segundo. Logo, conclui-se que quanto mais tempo o chuveiro permanece, mais se gasta energia elétrica.

Considere-se uma família com quatro pessoas onde cada uma toma dois banhos por dia, levando em média 5 minutos com o chuveiro ligado por banho. Chega-se à conclusão que esta família mantém o chuveiro ligado cerca de 40 minutos por dia. No final de um mês isso representa 1200 minutos ou 20 horas. Acompanhe abaixo os cálculos do consumo de energia elétrica do chuveiro elétrico dessa família (GOMES, 2010).

Para realização dos cálculos da energia e valor gasto da energia consumida foram utilizadas as equações a seguir.

$$E = P \cdot T \quad (1)$$

$$V_T = E \cdot V_{\text{Energ}} \quad (2)$$

Onde:

E = Energia Consumida (KWh)

P = Potência (KW)

T = Tempo (h)

$V_T$  = Valor Total (R\$)

$V_{\text{Energ}}$  = Valor do kWh (R\$)

Cálculo da energia consumida por mês com a chave do chuveiro elétrico no inverno ou quente:

$$E = P \cdot T$$

$$E = 5,5 \cdot 20$$

$$E = 110\text{kWh/mês}$$

Cálculo do valor em reais (R\$) correspondente a esse consumo:

Considerando que essa família mora em Parnamirim/RN, no bairro de Nova Parnamirim, que se enquadra no perfil de baixa renda, onde a COSERN cobra cerca de R\$ 0,53 por kWh de energia consumida tem-se:

$$V_T = E \cdot V_{\text{Energ}}$$

$$V_T = 110 \cdot 0.53$$

$$V_T = 58,30 / \text{mês}$$

Cálculo da energia consumida por mês com a chave no verão ou morno:

$$E = P \cdot T$$

$$E = 3,85 \cdot 20$$

$$E = 77\text{kWh/mês}$$

Cálculo do valor em reais (R\$) correspondente a esse consumo:

Considerando que essa família mora em Parnamirim/RN, no bairro de Nova Parnamirim, que se enquadra no perfil de baixa renda, onde a COSERN cobra cerca de R\$ 0,53 por kWh de energia consumida tem-se:

$$V_T = E \cdot V_{\text{Energ}}$$

$$V_T = 77 \cdot 0.53$$

$$V_T = 40,81 / \text{mês}$$

Se essa família instalasse um aquecedor solar em sua residência, conseguiria economizar, na média, por ano, cerca de 70% da energia elétrica consumida pelo chuveiro, visto que há períodos chuvosos e nublados nos quais não se tem aquecimento adequado por radiação solar e, nesses casos, necessita-se de uma complementação através da utilização de um sistema convencional como, por exemplo, o próprio chuveiro elétrico, conforme GOMES (2010).

Fazendo-se uma conta simples, se chegará à conclusão de que, em cinco anos, está família economizará, em média, cerca de R\$ 2.440,00 para serem gastos com outros bens, melhorando a qualidade de vida da família, além de contribuir para o desenvolvimento sustentável do planeta. Aparentemente, é uma economia pequena se pensar-se individualmente, mas ao se massificar o uso desses sistemas, contribuirá-se significativamente para a qualidade de vida das futuras gerações.

Buscando-se formas para baratear o custo dos sistemas de aquecimento, vem-se estudando há mais de 30 anos no âmbito do Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (LMHES/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.

Esse trabalho apresenta o estudo de viabilidade térmica de um sistema de aquecimento solar compostos por um coletor solar e um reservatório térmico, ambos alternativos. As principais características desse sistema são os simples processos de fabricação e montagem e o baixo custo.

O coletor solar alternativo tem tubulação composta por tubos absorvedores do cloreto de polivinila (PVC) na configuração em série-paralelo e o reservatório térmico alternativo foi fabricado a partir de um tambor de polietileno destinado ao armazenamento de água.

Serão apresentados resultados de testes realizados com o sistema de aquecimento para obter 200 litros de água quente por dia, para suprir as necessidades de uma família de quatro pessoas.

A principal inovação do trabalho foi o estudo de um coletor com grade absorvedora na configuração mista, visando a obtenção de níveis de temperatura mais significativos que os proporcionados pelos coletores solares com grade absorvedora na configuração em paralelo.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Demonstrar a viabilidade de utilização de um sistema solar de aquecimento alternativo destinado ao aquecimento de água para atender uma residência familiar de quatro pessoas.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

1. Projetar um sistema de aquecimento solar alternativo de baixo custo;
2. Fabricar o coletor solar alternativo;
3. Fabricar o reservatório térmico alternativo;
4. Ensaiar o sistema solar de aquecimento de água fabricado;
6. Determinar a perda térmica do coletor solar e do boiler fabricado;
7. Demonstrar a viabilidade econômica do sistema de aquecimento solar alternativo proposto.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. A importância da energia solar**

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.

Estes coletores têm a seu favor o fato de produzirem uma “energia limpa”, de baixo impacto ambiental e não lançarem resíduos prejudiciais ao meio ambiente, durante sua operação. Além disso, a crescente demanda mundial de energia, o progressivo esgotamento das fontes de energia não-renováveis e o problema ambiental que se apresenta como uma questão cada vez mais importante para o futuro da humanidade coloca a energia solar como uma alternativa promissora e que seguramente já ocupa um lugar de destaque.

### **2.2. Sistema de aquecimento solar (SAS) com coletores de placa plana**

#### **2.2.1. 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 fluido (LOPO, 2010).

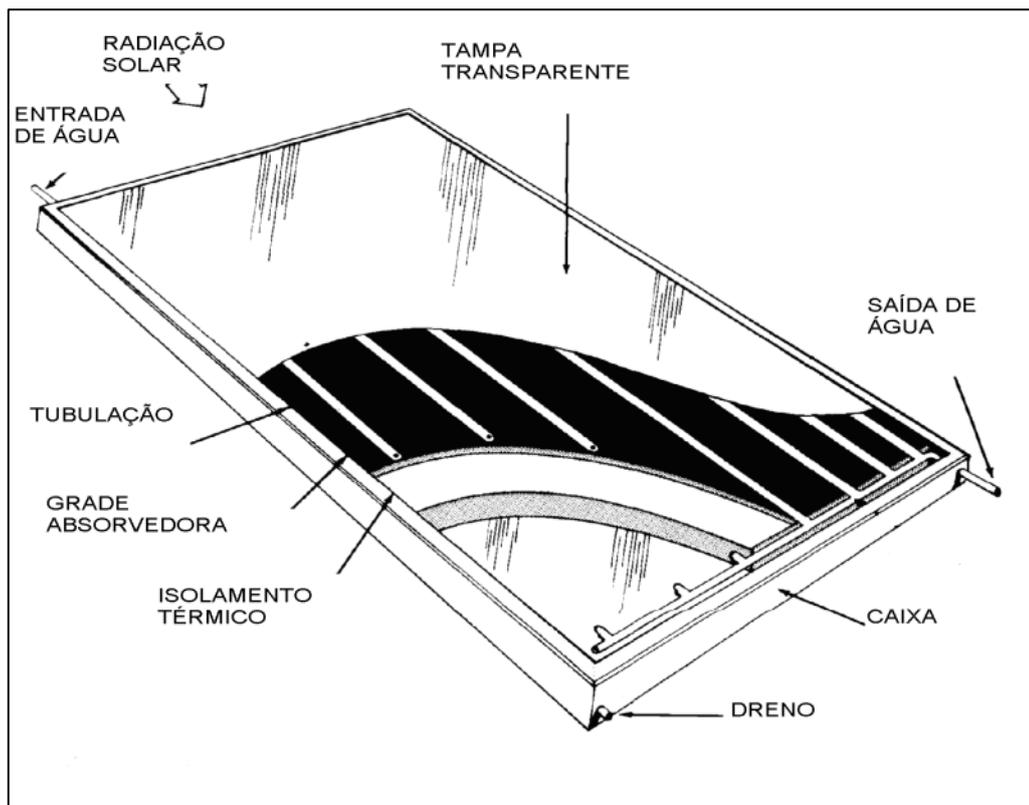
A maioria dos coletores solares de placa-plana consiste de cinco componentes principais, (a) uma ou mais cobertura transparente de vidro ou plástico; (b) uma placa absorvedora, normalmente metálica, de superfície preta, embora outros materiais possam ser utilizados; (c) Tubos, passagens ou canais integrados 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.

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.

A Figura 01 apresenta um coletor solar convencional com seus principais componentes (LOPO, 2010).

**Figura 01.** Coletor solar com seus principais componentes.

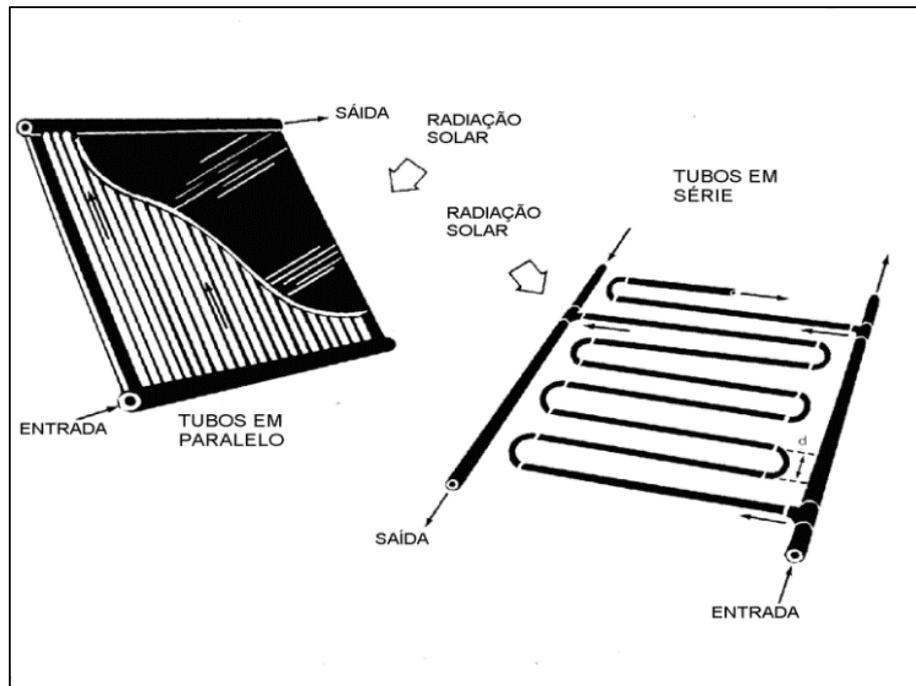


Fonte: Lopo, 2010

Segundo SODRÉ (2010), 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 uma temperatura final maior na saída do coletor. É comum também a associação de coletores para um aumento destas características.

A Figura 02 apresenta as configurações típicas de ligação dos tubos absorvedores de coletores planos (LOPO, 2010).

**Figura 02.** Esquemas típicos de ligação dos tubos absorvedores de coletores planos.



Fonte: Lopo, 2010

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 (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

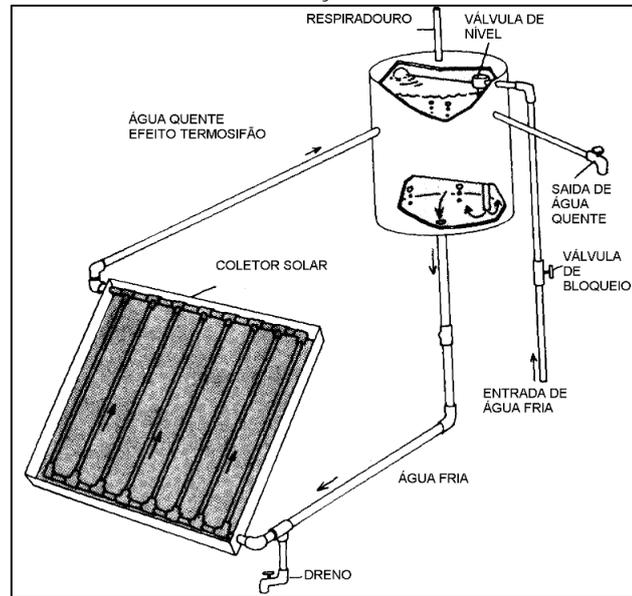
### 2.2.2. Sistemas de aquecimento solar (SAS)

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.

Os principais componentes de uma SAS (sistema de aquecimento solar) 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 (GOMES, 2010).

Na Figura 03, são apresentados os componentes principais de um SAS convencional por convecção natural ou termosifão (LOPO, 2010).

**Figura 03.** Esquema básico de um sistema de aquecimento solar convencional por termosifão ou convecção natural



Fonte: Lopo, 2010

Os SAS de fabricação comercial para uso residencial funcionam basicamente por convecção natural ou termosifão. A Figura 04 apresenta um SAS do fabricante Mondialle Solar, modelo BP-81, com volume de 81 litros e potência elétrica para resistência auxiliar de 4.000W (MONDIALLE SOLAR, 2016).

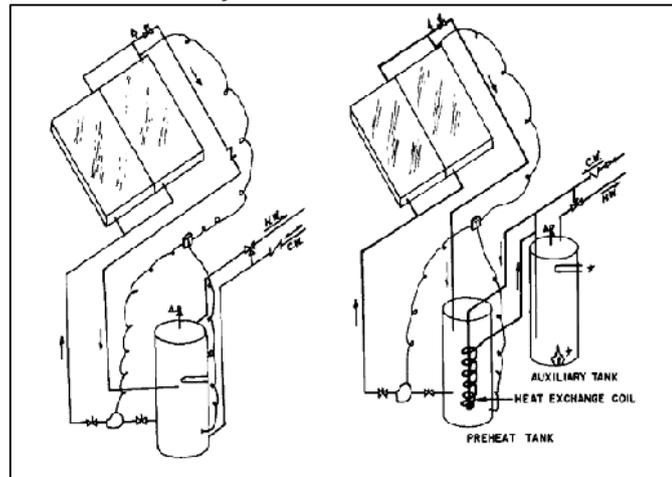
**Figura 04.** SAS comercial do fabricante Mondialle Solar, modeloBP-81.



Fonte: Mondialle Solar, 2016

Segundo LOPO (2010), 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 05 retrata-se um sistema com circuito direto que tem seu fluxo determinado por convecção natural ou termosifão,

**Figura 05.** Esquema básico de SAS de circuito direto com bomba de circulação e SAS de circuito indireto.



Fonte: Lopo, 2010

A Figura 05 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 (LOPO, 2010).

## 2.3. O cloreto de polivinila (PVC)

### 2.3.1. Generalidades

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

Sua durabilidade está associada ao fato de que os componentes utilizados na construção civil têm vida útil superior a 20 anos e, em alguns casos 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.

### 2.3.2. As principais características do 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 01 mostra as principais propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, óticas e químicas do PVC (INSTITUTO DO PVC, 2016).

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.

**Tabela 01.** As principais propriedades do PVC.

<b>Propriedades</b>	<b>Valor</b>
Peso molecular (PM)	50.000-100.000
Peso específico ( $\rho$ )	1,4 g/cm <sup>3</sup>
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 <sup>6</sup>
Coefficiente de Expansão Térmica Linear	0,9 - 1,8 x 10 <sup>-4</sup> (°C) <sup>-1</sup>
Temperatura de Distorção ao Calor	75 °C
Índice de Refração ( $I_R$ )	1,57
Absorção de água em 24h (%)	0,04-0,40

## 2.4. Poliestireno Expandido (EPS - Isopor)

O poliestireno expandido (EPS) 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.

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

É bastante utilizado na confecção de caixas térmicas para acondicionamento de alimentos e bebidas devido a sua estrutura de células fechadas cheias de ar (97% de seu volume) dificultando passagem do calor.

Na construção civil é muito utilizado devido a sua leveza reduzindo substancialmente o peso das construções. A Tabela 02 apresenta as principais características do EPS (LIMA, 2016).

<b>Tabela 02.</b> Principais propriedades do EPS.	
<b>Propriedades</b>	<b>Valor</b>
Condutibilidade térmica(K)	0,030 a 0,040 W/m°C
Peso específico ( $\rho$ )	10 - 30 kg/m <sup>3</sup>

## 2.5. Espuma Rígida de Poliuretano Derivado do Petróleo

De acordo com Oliveira (2010), as propriedades térmicas e acústicas dos poliuretanos estão relacionadas a sua microestrutura. As espumas rígidas possuem uma microestrutura com células fechadas, que confinam o ar em seu interior, enquanto os poliuretanos flexíveis são compostos de células abertas que permitem o fluxo de ar entre seus poros.

As espumas rígidas possuem estrutura rígida altamente reticulada e com células fechadas, responsável pelas suas propriedades mecânicas. E, além disso, a condutividade térmica do gás (ar) retido nestas células fechadas e o fator preponderante nas propriedades isolantes da espuma, visto que o ar é reconhecido como um excelente isolante térmico (KIPPER, 2008).

As características mais importantes para todos os materiais altamente porosos são a resistência à compressão e a condutividade térmica. Estes materiais porosos incluem as espumas, as quais são influenciadas pela estrutura/ morfologia de poros resultando na sua baixa densidade. Geralmente, materiais com elevada porosidade e pequena estrutura de poro celular regular apresentam as melhores características para obter espumas (VLADIMIROV, 2011).

Segundo Vilar (2007) a baixa condutividade térmica das espumas rígidas de poliuretano resulta da sua baixa densidade e da sua estrutura de células pequenas e fechadas, cheias como agentes de expansão auxiliares (AEAS) como os CFC's, CO<sub>2</sub>, HCFC's, pentanos, etc. A condutividade térmica final de uma espuma, fator k, é determinada em função das contribuições devidas à: convecção, radiação, condutividade térmica do gás e do polímero, e densidade da espuma.

A espuma rígida de poliuretano é formada pelo corpo polimérico e gás contido nas células formadas por este polímero. A transferência de calor ocorre através de quatro formas: condução através do gás, condução através de polímero, radiação e convecção (GALVÃO, 2014). As contribuições de convecção e radiação podem ser desprezadas por serem pequenas, no entanto, quando a massa específica da espuma é menor que 30 kg/m<sup>3</sup>, a contribuição por radiação deve ser levada em conta, devido às paredes das células serem muito finas. A estrutura das células tem grande influência, e a contribuição da radiação diminui com o aumento de número de células por unidade de volume e a diminuição do fator k. A redução do tamanho das células é uma forma de diminuir o fator de k. Já a natureza química do PU tem pouca influência na condutividade térmica (VILAR, 2007).

A condutividade torna-se mais significativa em massas específicas maiores, elevando-se, assim, o fator k. Na faixa de massas específicas das espumas utilizadas em isolamento térmico (30 a 60 kg/m<sup>3</sup>), a transmissão de calor através da fase sólida é cerca de 30 %, e já a condutividade térmica do gás contribui com cerca de 40 % do total do fator k (GALVÃO, 2014).

Nas espumas rígidas, o teor de células fechadas afeta diversas propriedades físicas importantes como a condutividade térmica, permeabilidade ao vapor d'água e absorção de água. O teor de células fechadas é determinado pelo volume de ar deslocado por uma espuma de dimensões conhecidas. O teor de células fechadas é proporcional ao deslocamento do ar contido na amostra de teste, e calculado pela Lei de Boyle-Mariotte (VILAR, 2007).

## 2.6. Os reservatórios térmicos

### 2.6.1. Convencionais

Os reservatórios térmicos convencionalmente utilizados em sistemas solares de aquecimento, chamados boiler, são geralmente fabricados em aço inoxidável, cobre ou aço carbono, para volumes de até 15 mil litros. Podem ser horizontais ou verticais, sendo constituídas por duas superfícies cilíndricas, uma interna e outra externa, tendo entre as mesmas, um isolamento térmico, geralmente a lã de vidro. A Figura 06 mostra os reservatórios térmicos convencionais, com detalhes construtivos (ASTROSOL, 2016).

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

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

**Figura 06.** Boilers convencionais disponíveis no mercado.

BOILER VERTICAL DE NÍVEL



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

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

BOILER HORIZONTAL



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

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

Pressão máxima de trabalho

Baixa pressão: Cobre (2mca); Inox (5mca)/ Alta pressão: 40mca

### **2.6.2. Alternativos**

Os reservatórios térmicos alternativos estão muito pouco presentes na literatura, sendo geralmente confeccionados em plástico rígido ou em fibra de vidro. Por ser o elemento constituinte de um sistema de aquecimento solar de água de maior custo (alcançando valores em torno de R\$ 2200,00 para um volume de 200 litros, que é o mais utilizado nas instalações residenciais de pequeno porte) são imprescindíveis as pesquisas que utilizem materiais alternativos para a diminuição do seu custo (HELIOTEK, 2016).

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

### **2.7. A importância da análise e quantificação da degradação**

Para que este tipo de coletor possa ser competitivo em termos de mercado, é necessário um estudo mais profundo acerca das degradações relativas ao tempo de vida deste referido protótipo.

O combate às degradações pode ser feito através da adição de estabilizantes e colorantes, criando condições para torná-lo bom absorvedor térmico, sem conduzi-lo ao nível de degradação térmico e podendo também eliminar a degradação por radiação ultravioleta (UV) através da utilização de uma grade absorvedora protegida pela tinta preta fosco.

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

### **2.8. Estados da arte dos Coletores Solares**

A seguir, apresentam-se alguns estudos mostrados pela literatura solar para aquecimento de água, publicados em eventos e jornais científicos.

Arno, K. et al, (2012) realizou o estudo onde defendia que para melhor utilização dos coletores solares para aquecimento de água é necessário conhecer suas potencialidades, o que pode ser feito através de testes de eficiência térmica que determinem suas características de

operação. Enfatizaram que para a realização desses testes, são necessárias instalações que possibilitem ensaios dos modelos de coletores existentes no mercado, e que atendam às normas vigentes para os devidos ensaios. Discorreram sobre o projeto e construção de uma instalação para testes de coletores com base na norma vigente no Brasil, a NBR 15747-2. O trabalho descreveu o desenvolvimento desta bancada e de sua instrumentação para um sistema de testes e de comparações de coletores solares para aquecimento de água. Além disso foi apresentado o resultado de um ensaio de eficiência térmica para um coletor de tubos a vácuo.

Arno, K. et al, (2012) apresentou um estudo com base nas atuais tecnologias de aquecimento de água utilizando energia solar, defendendo a importância de realizar estudos comparativos entre estas, principalmente no ambiente doméstico, relacionando o tipo de coletor, o seu custo e o local de aplicação. Cada modelo de coletor tinha uma relação custo-benefício diferente em cada região. Para cada região havia um tipo de coletor que trazia melhor relação de desempenho ao usuário. Também foi realizado um cálculo, estabelecido pelos procedimentos do INMETRO, para estimar a produção mensal específica de energia do coletor ensaiado (PMEe). Este valor é utilizado por este órgão como parâmetro para classificação de coletores solares. Nesta avaliação observou-se que o coletor ensaiado teve uma classificação C em uma escala de A a E.

Cardoso, L.C., et al, (2012) realizou um estudo abordando a aplicação da energia solar térmica para aquecimento de água, onde defenderam que seria uma solução técnica e economicamente viável permitindo a redução do consumo de energia elétrica no setor residencial e comercial brasileiro. Ressaltaram que cada vez seria necessário o domínio de metodologias que permitam quantificar a energia térmica útil produzida pelos coletores solares e determinar a sua eficiência na geração de água quente. Como uma forma de contribuir para esta meta, este trabalho desenvolveu uma análise comparativa da produção mensal de energia térmica nos coletores solares em condições reais de uso. A partir de dados experimentais e teóricos, diferentes modelos foram aplicados para a determinação da produção mensal de energia. A metodologia do trabalho consistiu em monitorar um sistema de aquecimento solar residencial em funcionamento e, a partir dos dados obtidos, calcular e comparar a produção de energia térmica útil dos coletores solares baseando-se no balanço energético e no Método das Perdas. Além disso, como a radiação solar global incidente no plano do coletor solar foi monitorada, o seu valor também foi comparado ao modelo teórico. A aplicação mostrou bons resultados em grande parte dos casos, mas apresentou algumas inconveniências em determinadas situações.

Moreira, J.V.N, et al, (2016) apresentou uma análise teórica de um coletor solar de placa plana. O objetivo era investigar a influência do ângulo de inclinação no desempenho térmico do equipamento. O software EES (Equation Engine - Ring Solver) foi utilizado para simular um ano de operação para uma dada localidade. O modelo matemático desenvolvido foi referenciado em Duffie e Beckman (2013). Os resultados mostraram que o ângulo ótimo de inclinação, isto é, o ângulo que produz a maior eficiência média anual é aproximadamente igual a latitude do local. Este resultado corrobora com a literatura, na qual é indicado o ângulo de inclinação que produz a maior radiação incidente anual. No entanto, os resultados da simulação para os meses de inverno obtiveram valores diferentes de ângulos ótimos de inclinação em termos de eficiência e de radiação incidente, sugerindo que outras variáveis sazonais têm influência direta no desempenho térmico de um coletor solar de placa plana.

Joshi, S. V. et al, (2005) publicou artigo na Solar Energy apresentaram uma revisão dos padrões de teste de coletores solares planos em regime de termosifão. A base teórica, a técnica de estimação de parâmetros e o procedimento de testes para cada padrão foi revisado e comparado. Três padrões relativos somente a sistemas solares foram aliados experimentalmente em detalhe. Extensos estudos foram realizados sob uma ampla gama de condições meteorológicas e operacionais. Dois sistemas de aquecimento disponíveis comercialmente, com dois tipos de coletores, foram testados. Os dois sistemas de aquecimento solar de água em termosifão foram ensaiados ao mesmo tempo, sob idênticas condições solarimétricas. Os parâmetros característicos de cada sistema foram obtidos com base em cada procedimento padrão. Um estudo de sensibilidade também foi realizado para examinar o efeito de erros de medição dos valores dos parâmetros estimados a partir de padrões diferentes.

Kalogirou S. et al, (2009) publicou artigo na Solar Energy destacando os benefícios ambientais proporcionados pela utilização de aquecedores solares e estudos de viabilidade térmica, econômica e de proteção ambiental proporcionados por sistemas de aquecimento solar de água em regime de termosifão. O sistema testado visava satisfazer a maioria das necessidades de água quente de uma família de quatro pessoas. Os resultados apresentados mostraram que 79% da necessidade de água quente da família era coberto com energia solar. Além disso, o sistema investigado apresentou características financeiras positivas e muito promissoras, com tempo de retorno de 2,7 anos. Foi demonstrado que através da utilização de energia solar quantidades consideráveis de gases poluentes são evitadas. No que diz respeito ao ciclo de vida dos sistemas, a energia gasta para a fabricação e instalação de sistemas

solares cerca de treze meses, enquanto que o tempo de retorno em relação às emissões produzidas a partir da energia incorporada necessária para a fabricação e instalação dos sistemas varia de alguns meses a 3,2 anos de acordo com o combustível e o poluente considerado. Concluiu que os sistemas de aquecimento de água solar em termosifão solar de água oferecem proteção significativa para o ambiente e deve ser empregada sempre que possíveis a fim de alcançar um futuro sustentável.

### **2.8.1 Os coletores solares alternativos**

O estudo de coletores solares tem sido massificado nas últimas décadas, gerando tecnologia de fabricação de coletores capazes de aquecer água com significativa eficiência, viabilizando a utilização desse protótipo solar para promover o aquecimento de água, principalmente para uso residencial.

Vários países do mundo já utilizam coletores solares nas suas residências, e em alguns deles, todas as residências recém construídas já trazem o aquecimento solar através de coletores, geralmente planos, como acessório instalado.

Alguns exemplos de coletores alternativos podem ser encontrados na literatura solar para aquecimento de água, dentre os quais destacam-se os coletores fabricados e estudados por Van Niekerk et al (1996), Saglietti et al, (1997), Cristofari et al (2002), Fasulo et al (2008), pelo Centro Incubador de Empresas Tecnológicas (1999), pela Sociedade do Sol (2004). Tais coletores têm como principal característica o a utilização de tubos absorvedores de plástico e simples processos de fabricação e montagem, inseridos na linha de tecnologia social (REIS, 2009).

No Brasil ainda não se tem uma massificação proporcional ao imenso potencial solar disponível, mas o crescimento de sua utilização é inegável, e os números comprovam esse crescimento que se configurará a cada ano.

No âmbito do Laboratório de Maquinas Hidráulica e Energia Solar (LMHES) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) a história dos coletores solares alternativos, assim definidos para caracterizar seus baixos custos de fabricação, para viabilizá-los para habitações de pessoas com baixo poder aquisitivo, já tem mais de trinta anos, tendo-se já estudado inúmeros coletores solares fabricados com vários materiais e com grades absorvedoras como o tubos de PVC, cobre, alumínio, PEAD e placas de PVC e Policarbonato, dentre outras, em diferentes configurações.

A seguir apresenta-se a história dos coletores solares alternativos no Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar da UFRN, iniciada em 1986, objetos de estudo de Trabalhos Técnicos Científicos, quatorze Dissertações de Mestrado e uma Tese de Doutorado (acervo científico do LMHES/UFRN).

### 2.8.2 Coletores solares no LMHES/UFRN

O primeiro coletor fabricado por Souza foi em 1986, utilizando uma placa retirada de uma sucata geladeira convencional, com caixa de madeira, isolamento de fibra de vidro e cobertura de vidro plano transparente de 3,0mm. A Figura 07 mostra o sistema de aquecimento em teste.

**Figura 07.** Primeiro coletor solar fabricado no LMHES/UFRN.



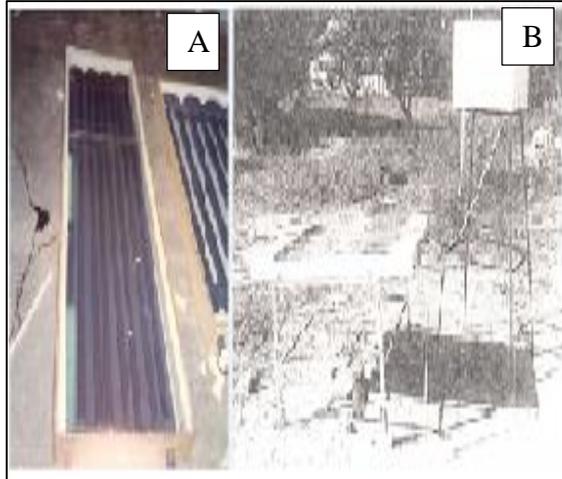
Fonte: Souza, 1986

Em 1990 deu-se início a fabricação de uma série de coletores que utilizavam carcaças de lâmpadas fluorescentes contendo tubos absorvedores de cobre pintados de preto fosco.

Essas gerações de coletores foram objetos de Dissertações de Mestrado do PPGEM apresentadas por Aquino, Rivera, Júnior, Lourenço entre outros, descritas a seguir.

Aquino em 1993 estudou um sistema de aquecimento solar alternativo constituído por três coletores com tubos absorvedores de cobre colocados no interior de carcaças de lâmpadas fluorescentes. Os coletores de 0,4 m<sup>2</sup> foram ligados em série e funcionavam em regime de fluxo contínuo com apenas uma passagem do fluido de trabalho no interior dos coletores. A Figura 08 mostra o Coletor (A) e sistema de aquecimento estudados (B).

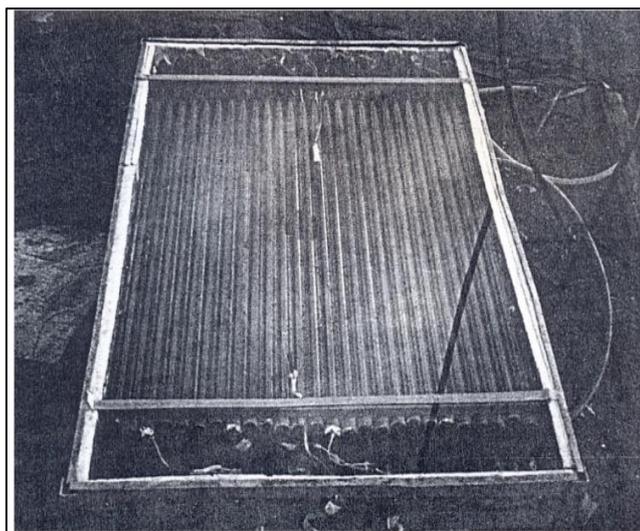
**Figura 08.** Coletor e sistema de aquecimento estudados



Fonte: Aquino, 1993

Rivera em 1994 estudou um sistema de aquecimento solar funcionando em regime de fluxo contínuo constituído por um coletor solar alternativo com 26 tubos absorvedores ligados em série. Envolvendo os tubos absorvedores de PVC de  $\frac{3}{4}$ " carcaças de lâmpadas fluorescentes que passaram pelos processos de corte e limpeza. O sistema foi testado para seis níveis de vazão e mostrou-se viável para o fim proposto. A Figura 09 mostra o coletor solar estudado.

**Figura 09.** Coletor solar utilizando carcaças de lâmpadas fluorescentes estudado.

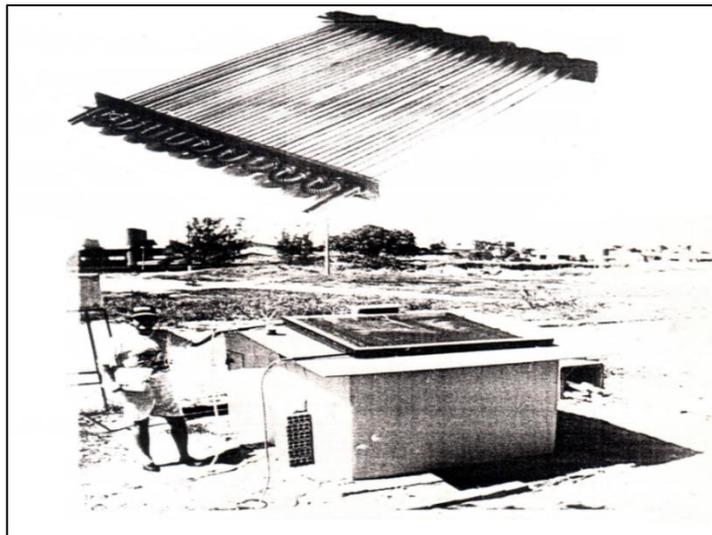


Fonte: Rivera, 1994

Junior em 95, estudou um coletor solar alternativo composto por 26 unidades de aquecimento com tubos absorvedores de cobre de  $\frac{3}{4}$ " amassados para a obtenção de uma maior área de captação e troca térmica. O sistema de aquecimento composto pelo coletor e tanque de armazenamento funcionava em regime de circulação forçada e foi testado para cinco níveis de vazão.

Hurtado em 95, desenvolveu e ensaiou um sistema mista misto de aquecimento e resfriamento de ambientes utilizando um coletor solar alternativo. O coletor foi montado na cobertura de um modelo reduzido de habitação com a função de direcionar os fluxos de ar, frio e quente, para ventilar ou aquecer seu espaço interno. O coletor funcionava em regime de fluxo forçado e era composto por 20 unidades de aquecimento ligadas em série tinha como superfície absorvedora tubos de PVC de  $\frac{3}{4}$ ". Foram testados quatro níveis de vazão. A Figura 10 mostra o coletor e sistemas de aquecimento solar estudados.

**Figura 10.** Coletor e sistema de aquecimento estudados visando conforto térmico.



Fonte: Hurtado, 95

Lourenço em 1997 construiu e testou um coletor solar alternativo constituído por 20 unidades de aquecimento com tubos absorvedores de alumínio de 1", ligados em série. O sistema de aquecimento formado pelo coletor e reservatório térmico foi testado em regime de convecção forçada com apenas uma passagem do fluido de trabalho no interior do coletor e com várias passagens através do uso de uma bomba de pequena potência e baixa vazão. Demonstrou que o sistema funcionando com apenas uma passagem da água no interior do

coletor era mais eficiente. A Figura 11 mostra o coletor e sistema de aquecimento estudados em termosifão e com circulação forçada.

**Figura 11.** Coletor e sistema de aquecimento estudados.



Fonte: Lourenço. 1997

Bezerra, em 1999, estudou a diferença de eficiência entre dois coletores solares com tubos absorvedores de cobre com diferentes diâmetros:  $\frac{1}{2}$ " e  $\frac{3}{4}$ ". O regime de funcionamento foi o de fluxo contínuo para três níveis de vazão. Estudou também o desempenho de um sistema de aquecimento formado pelos dois coletores em série e reservatório de armazenamento de água quente. Foi demonstrado que o coletor com tubos absorvedores de  $\frac{3}{4}$ " mostrou-se mais eficiente. A Figura 12 mostra os dois coletores solares propostos.

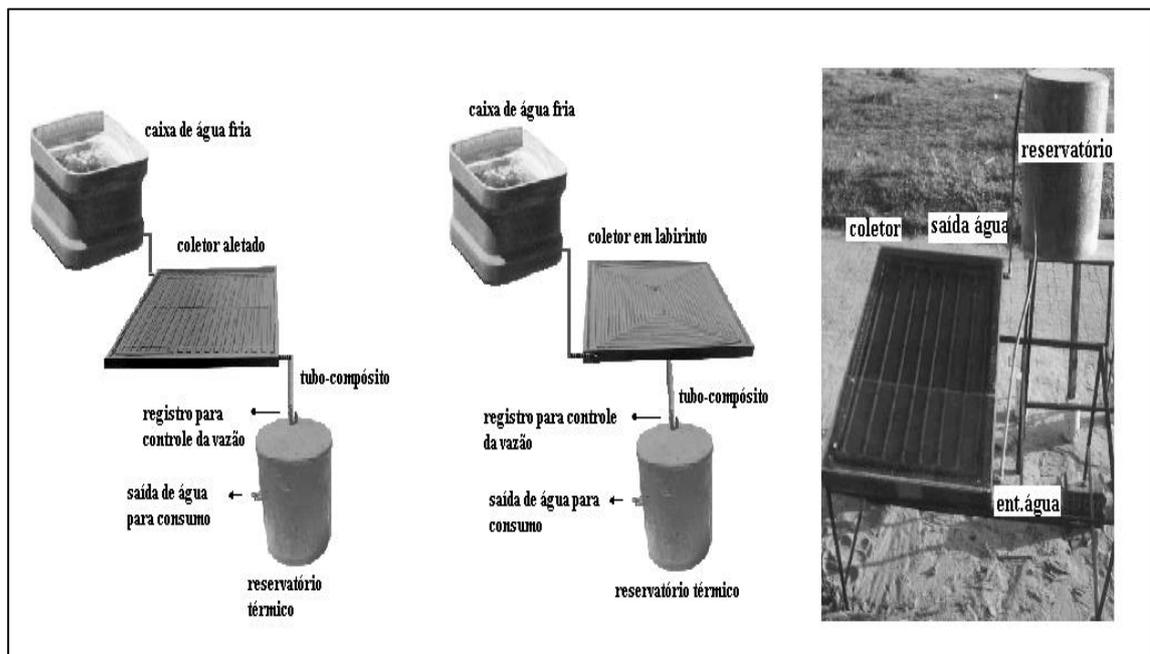
**Figura 12.** Dois tipos de coletores solares propostos estudados comparativamente.



Fonte: Bezerra, 1999

Souza (2002) apresentou um sistema alternativo para aquecimento de água por energia solar, composto por dois coletores em série, uma caixa alimentadora de água fria, um reservatório térmico para armazenamento de água quente e tubos para a condução da água aquecida. Os coletores utilizam serpentinas absorvedoras compostas por tubos de PVC. Seu regime de trabalho era o de fluxo contínuo, sem a utilização de sistema de bombeamento, com apenas uma passagem do fluido de trabalho. Estudou-se, também, as degradações inerentes à exposição de tubos de PVC aos efeitos térmicos e à radiação ultravioleta. Demonstrou-se a viabilidade de utilização do sistema de aquecimento que se caracteriza pelo baixo custo e facilidade de montagem e manutenção. A Figura 13 mostra os três tipos de coletores solares e os sistemas de aquecimento estudados.

**Figura 13.** Tipos de coletores solares e os sistemas de aquecimento estudados.



Fonte: Souza em 2002

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 Figura 14 mostra os dois tipos de coletores solares e o sistema de aquecimento estudados.

**Figura 14.** Tipos de coletores solares e o sistema de aquecimento estudados.



Fonte: Souza, 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 do coletor proposto. A Figura 15 mostra o coletor solar com apenas três elementos constituintes propostos por Souza.

**Figura 15.** Coletor solar com apenas três elementos estudado por Souza.



Fonte: Souza, 2005

Souza (2006) no COBEM 2007 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. O sistema de aquecimento também foi testado com dois coletores em série. A Figura 16 mostra os coletores em série formando o sistema de aquecimento.

**Figura 16.** Sistema de aquecimento solar composto por dois coletores em série.



Fonte: Souza (2006) no COBEM 2007

Souza (2007) no COBEM 2007 apresentou um sistema de aquecimento alternativo para piscina constituído por dois coletores com grade absorvedora com tubos de PVC em série. Utilizou-se um reservatório de 500 litros simulando uma piscina. A vazão utilizada foi de 100 l/h. Demonstrou-se a viabilidade térmica do sistema proposto. A Figura 17 mostra os coletores em série formando o sistema de aquecimento.

**Figura 17.** Sistema de aquecimento de piscina composto por dois coletores em série.



Fonte: Souza (2006) no COBEM 2007

Costa em 2007 apresentou estudo sobre um sistema de aquecimento solar de água para aplicações residenciais constituído por um coletor solar alternativo e um reservatório térmico. O coletor foi composto por apenas três elementos: caixa armazenadora construída em material compósito a base de gesso cimento e EPS triturado, tubulação absorvedora de PVC de ¾” ligados em paralelo através de conexões em Tê de mesmo material e vidro de cobertura. O reservatório térmico também alternativo foi construído a partir de um tambor de polietileno de 200 litros utilizado para armazenamento de água ou lixo, foi recoberto por um cilindro confeccionado em fibra de vidro. O sistema funcionava em regime de termosifão. Foram demonstradas as viabilidades térmica e econômica dos sistema proposto. A Figura 18 mostra o sistema de aquecimento estudado por Costa.

**Figura 18.** Sistema de aquecimento proposto por Souza e estudado por Costa.



Fonte: Costa em 2007

Santos em 2008 apresentou no Conem 2008 um sistema de aquecimento de água solar, trabalhando em regime de termosifão, constituído por um ou dois coletores, coletores alternativos e um reservatório armazenador de água também alternativo. Os coletores foram construídos com garrafas PETS, latas de cervejas e refrigerantes e tubos de PVC de ½” e os reservatórios térmicos a partir de um tambor de polietileno utilizado para armazenamento de água e lixo colocado no interior de cilindro em fibra de vidro, tendo isopor triturado entre as

duas superfícies. Demonstrou-se que tal sistema de aquecimento alternativo, apresenta viabilidades térmica e econômica para o aquecimento de água para baixas temperaturas. A Figura 19 mostra os coletores fabricados com garrafas PETs e o sistema de aquecimento solar de água estudado.

**Figura 19.** Coletores fabricados com garrafas PETs e o sistema de aquecimento solar de água estudado.



Fonte: Santos, 2008

Souza et. al. apresentaram no Conem 2008 um sistema de aquecimento solar de água residencial que tinha como principal característica uma grade absorvedora mista formada por tubos de PVC ligados em série e paralelo, com a finalidade de aumentar o nível de temperatura gerado pelo coletor. O sistema de aquecimento era de fácil construção e montagem e apresentava baixo custo, fatores importantes para a sua socialização. A Figura 20 mostra a configuração da grade absorvedora mista e o sistema de aquecimento solar de água proposto.

**Figura 20.** Configuração da grade absorvedora mista e o sistema de aquecimento proposto.



Fonte: Souza, 2008

Reis em 2009 estudou um coletor de um sistema para aquecimento de água destinada ao banho, cuja principal característica era seu baixo custo. O coletor era formado por cinco placas de forro PVC de 10 mm de espessura, com área de 1,40 m<sup>2</sup>. As placas de um lado foram revestidas com chapas de alumínio provenientes de latinha de refrigerantes e cervejas abertas, com o intuito de aumentar a temperatura da placa absorvedora. O sistema funcionou em regime de termosifão. O reservatório térmico do sistema de aquecimento foi construído a partir de um reservatório de polietileno para armazenamento de água. Foram demonstradas as viabilidades térmica, econômica e de materiais do coletor proposto. A Figura 21 mostra o sistema de aquecimento solar.

**Figura 21.** Sistema de aquecimento solar com coletor de placas de PVC para forro de ambientes.



Fonte: Reis, 2009

Abreu em 2009 estudou um coletor solar de um sistema para aquecimento de água destinado ao banho. A superfície absorvedora do coletor era formada por uma chapa de alumínio com oito aletas onde se alojam tubos de PVC. A área de captação da radiação solar correspondia a 1,3 m<sup>2</sup>. O sistema funcionava em regime de termosifão e o conjunto absorvedor do coletor foi testado para duas configurações: com os tubos voltados para cima, expostos diretamente à incidência dos raios solares e voltados para baixo, trocando calor com a chapa por condução. Determinou-se que a configuração mais eficiente era com os tubos voltados para cima. A Figura 22 mostra as configurações das grades absorvedoras e o sistema de aquecimento solar de água proposto.

**Figura 22.** Configurações das grades absorvedoras e o sistema de aquecimento solar de água proposto.



Fonte: Abreu, 2009

Lopo em 2010 apresentou um estudo sobre um coletor solar de um sistema para aquecimento de água destinada ao banho de 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. A Figura 23 mostra o sistema de aquecimento com grade absorvedora formada por tubos de PVC ligados em paralelo.

**Figura 23.** Sistema de aquecimento com grade absorvedora formada por tubos de PVC ligados em paralelo.



Fonte: Lopo, 2010

Gomes em 2010 estudou um sistema alternativo para aquecimento de água fabricado a partir de duas telhas de fibrocimento com suas concavidades preenchidas com tubos de PVC conectados em paralelo, formando uma grade absorvedora. Não se usou cobertura de vidro, optou-se pela cobertura com plástico retirados de garrafas PETs. Demonstrou-se a viabilidade térmica do sistema de aquecimento proposto. A Figura 24 mostra o coletor solar do sistema de aquecimento com cobertura transparente de plástico, retirado de garrafas PETS.

**Figura 24.** Coletor solar com cobertura transparente de plástico transparente retirados de garrafas PETs.



Fonte: Gomes, 2010

Gomes em 2010 estudou um sistema alternativo para aquecimento de água utilizando um coletor com grade absorvedora composta por tubos de PEAD ligados em paralelo. Demonstrou que o sistema apresenta viabilidades térmica e econômica e fáceis processos de construção e montagem, podendo ter tecnologia repassada para comunidades carentes, socializando o uso de uma energia ambientalmente correta. A Figura 25 mostra o sistema de aquecimento com coletor solar fabricado com tubos de PEAD e telhas de fibrocimento.

**Figura 25.** Sistema de aquecimento com coletor solar fabricado com tubos de PEAD em telhas de fibrocimento.



Fonte: Gomes, 2010

Sodré em 2010 testou um sistema solar para aquecimento de água para fins residenciais com a superfície absorvedora do coletor formada por uma placa de policarbonato. A placa de policarbonato tinha 06 mm de espessura e área de 1,575 m<sup>2</sup>. A placa foi ligada pelas extremidades em paralelo a tubos de PVC de Ø 32mm. O sistema funcionava em regime de termosifão e foi testado para duas configurações: placa absorvedora com e sem isolamento de EPS de 30 mm de espessura na superfície inferior para minimizar as perdas térmicas pela parte de baixo. Ambas as configurações mostraram-se viáveis para o fim proposto, porém a

com isolamento mostrou-se mais eficiente. A Figura 26 mostra o sistema de aquecimento com coletor solar fabricado com placa de policarbonato.

**Figura 26.** Sistema de aquecimento solar de água com coletor solar fabricado com placa de policarbonato.



Fonte: Sodré, 2010

Félix em 2010 estudou um sistema solar para desinfecção de água, de baixo custo, utilizando materiais descartáveis como garrafas de politereftalato de etileno (PET). O coletor solar foi fabricado com tubos de PVC e garrafas PETS para promover a desinfecção de água contaminada por coliformes fecais. A planta piloto experimental mostrou-se viável para promover a desinfecção de água através do uso da energia solar. A água, após o tratamento, encontrava-se de acordo com os limites estabelecidos pela legislação brasileira para água tratada, mantendo um desempenho favorável na desinfecção e índices aceitáveis do recrescimento bacteriano. A Figura 27 mostra o sistema para desinfecção de água com coletor solar que utiliza garrafas PETS e tubos de PVC.

**Figura 27.** Sistema de aquecimento solar de água com coletor solar fabricado com garrafas PETs em tubos de PVC.



Fonte: Félix, 2010

Gonçalves em 2010 estudou a viabilidade técnica e econômica de um sistema de aquecimento solar constituído por dois coletores espirais com serpentina absorvedora de tubos flexíveis de polietileno com extensão de 100 metros. O sistema funcionou em regime de fluxo forçado para uma vazão de 100 litros/hora. Utilizou um coletor com cobertura de vidro e outro sem cobertura e demonstrou que o com cobertura foi mais eficiente para o fim proposto, aquecimento solar para piscinas. A Figura 28 mostra o sistema de aquecimento de piscina proposto por Souza e estudado por Gonçalves.

**Figura 28.** Sistema de aquecimento de piscina proposto por Souza e estudado por Gonçalves.



Fonte: Gonçalves, 2010

Silva em 2011 estudou um coletor solar a ser utilizado em um sistema para aquecimento de água destinada ao banho, cujas principais características eram o baixo custo e fáceis processos de fabricação e montagem. O sistema funcionava em regime de convecção natural ou termosifão. A superfície absorvedora do coletor era formada por vinte e sete tubos de PVC de 25 mm de diâmetro externo ligados em série-paralelo através de conexões em T do mesmo material. Foram estudadas algumas configurações entre placa absorvedora, isolante térmico de placas de EPS e reservatório térmico de 150 litros. Determinou-se a viabilidade de funcionamento em termosifão do coletor com grade absorvedora mista, e qual das configurações era a mais eficiente para o fim proposto. A Figura 29 mostra a grade absorvedora mista e o coletor solar fabricado.

**Figura 29.** Coletor solar com grade absorvedora mista e o coletor solar proposto.

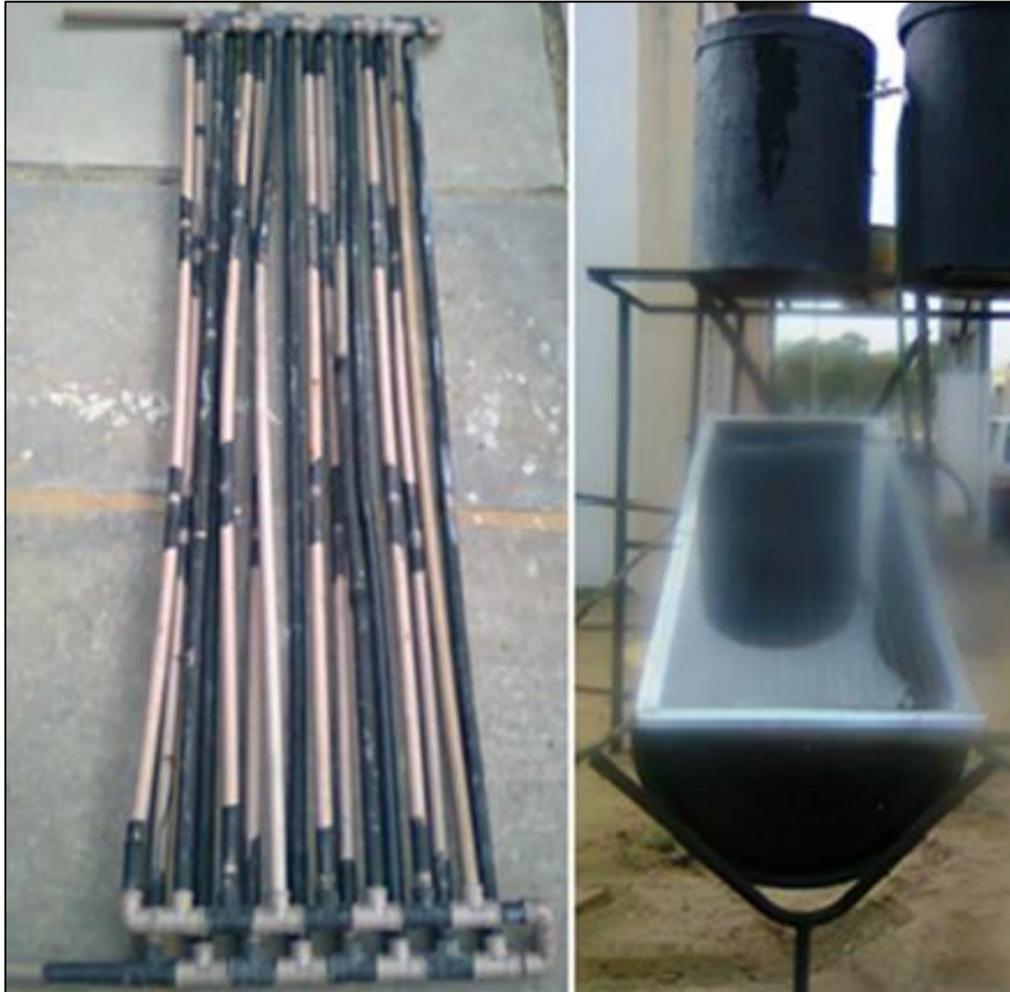


Fonte: Silva, 2011

Rainier Santos Cunha em 2011 estudou um coletor solar alternativo de baixo custo e fácil construção, destinado ao aquecimento de água para aplicações residências. Tinha como principal característica a utilização de tambores de polietileno de alta densidade (PEAD), que normalmente são utilizados para depósito de lixo, como recinto para aquecimento de uma superfície absorvedora formada por tubos de PVC. A superfície absorvedora era formada por dezesseis tubos de PVC ligados em paralelo através de conexões em T do mesmo material. O

regime de funcionamento do sistema é o de termosifão, com volume aquecido de 150 litros. Os resultados dos testes demonstraram a viabilidade térmica do sistema. A Figura 30 mostra a configuração da grade absorvedora formada por inúmeros tubos de PVC e o sistema de aquecimento em teste.

**Figura 30.** Configuração da grade absorvedora formada por inúmeros tubos de PVC e o sistema de aquecimento em teste.



Fonte: Rainier Santos Cunha, 2011

Souza, et all. (2012) no CONEM - São Luis, apresentou um estudo sobre um coletor de baixo custo que utilizava uma telha ondulada e tubulações em PVC alojadas nas cavas da telha. A ligação entre os tubos para a formação da grade absorvedora do coletor era feita com conexões em T (TÊS) de PVC O sistema funcionava em regime de termosifão. Demonstrou-se a viabilidade do coletor para o fim proposto. A Figura 31 mostra o coletor solar fabricado com uma telha de fibrocimento e tubos absorvedores de PVC.

**Figura 31.** Sistema solar de aquecimento de água em teste.



Fonte: Souza, 2012

Junior Em 2014 estudou um sistema de aquecimento de água através do uso da energia solar fabricado a partir da utilização de telhas ecológicas. A água circulava através de tubos de PVC de ½” dispostos entre as ondulações da telha inseridas numa caixa de madeira e interligados com conexões em T do mesmo material e diâmetro. O reservatório para o armazenamento da água quente também foi confeccionado com materiais alternativos bem mais viáveis que os de cobre ou inox e o coletor trabalha em regime de termossifão que tem como principal característica o baixo custo. Demonstrou-se a viabilidade do sistema de aquecimento proposto para promover o aquecimento de água. A Figura 32 mostra o sistema de aquecimento solar de água fabricado a partir da utilização de telha ecológica, tubos de PVC, EPS, madeira e vidro para uma residência.

**Figura 32.** Sistema de aquecimento solar de água fabricado em teste.



Fonte: Junior, 2014

Negócio (2015) estudo sobre um sistema de aquecimento solar de água formado por um coletor solar com tubos absorvedores de PVC com grade mista e um reservatório térmico de caixa de EPS de 150 litros. O coletor solar trabalhava em regime de termosifão. Apresentaram os processos de fabricação e montagem do sistema de aquecimento solar para promover o aquecimento de água para uma família de quatro pessoas. Estudaram o sistema para duas configurações: coletor com uma cobertura de vidro e coletor com dois vidros de cobertura. Demonstraram a viabilidade de utilização do sistema proposto para as duas configurações testadas. A Figura 33 mostra o coletor e o sistema de aquecimento propostos.

**Figura 33.** Coletor e o sistema de aquecimento propostos.



Fonte: Negócio, 2015

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O coletor solar alternativo misto (série-paralelo) do sistema de aquecimento tinha caixa fechada em chapa de aço galvanizado; isolante térmico de EPS; grade absorvedora mista (série-paralelo) com tubos de PVC; chapa absorvedora de alumínio e cobertura de vidro plano transparente; com área de 1,85 m<sup>2</sup>.

O reservatório térmico do sistema de aquecimento era também alternativo, e de custo bem inferior ao dos reservatórios térmicos dos sistemas de aquecimento solares de mercado.

As principais características do sistema de aquecimento solar proposto era seu baixo custo e processos de fabricação e montagem.

#### 3.1. Processos de fabricação, montagem e de ensaio do sistema de aquecimento Solar alternativo proposto

##### 3.1.1. Processos de fabricação e montagem do coletor solar alternativo (CSA)

Os processos de fabricação e montagem do coletor solar misto alternativo compreendem as seguintes etapas.

- a. Marcação na chapa em aço galvanizado para conformação que foi adquirida através de doação (Fig. 34);

**Figura 34.** Marcação na chapa de aço galvanizado para conformação e posterior fabricação da caixa do coletor.



- b. Fabricação da caixa do coletor com chapa de aço galvanizado (Fig. 35);

**Figura 35.** Caixa do coletor fabricada em chapa galvanizada.



- c. Aplicação do isolamento térmico de placas de EPS de 30mm e da chapa absorvedora de alumínio do coletor no coletor do coletor solar alternativo (Fig. 36);

**Figura 36.** Aplicação do isolamento térmico no coletor solar e da chapa absorvedora.



- d. Acabamento da caixa do coletor solar alternativo (Fig. 37);

**Figura 37.** Caixa do coletor pronta para receber a grade absorvedora.



- e. Grade absorvedora mista do coletor com 34 tubos PVC de 20mm de diâmetro externo - foram utilizados 21 tê e 46 joelhos do mesmo material, unidos com cola de PVC especial, tendo na grade absorvedora 17 tubos paralelos e 17 tubos em série (Fig. 38);

**Figura 38.** Grade absorvedora mista do coletor.



- f. Grade absorvedora na caixa do coletor, fixada na chapa absorvedora de alumínio por abraçadeiras, com pintura do conjunto chapa-tubos com tinta esmalte preto fosco (Fig. 39);

**Figura 39.** Coletor todo pintado



- g. Colocação da cobertura transparente de vidro plano de 3mm de espessura utilizando cola de silicone (Fig. 40).

**Figura 40.** Coletor solar de grade absorvedora mista com tubos absorvedores de PVC pronto para ensaio.



### 3.1.2. Processos de fabricação e montagem do Reservatório Térmico Alternativo (RTA)

O reservatório térmico alternativo com volume de 200 litros foi fabricado a partir de tambor de polietileno de 200 litros, utilizado geralmente para armazenamento de água ou lixo, adquirido através de doação, mostrado na Figura 41.

**Figura 41.** Tambor de polietileno de 200 litros – elemento base do reservatório térmico.

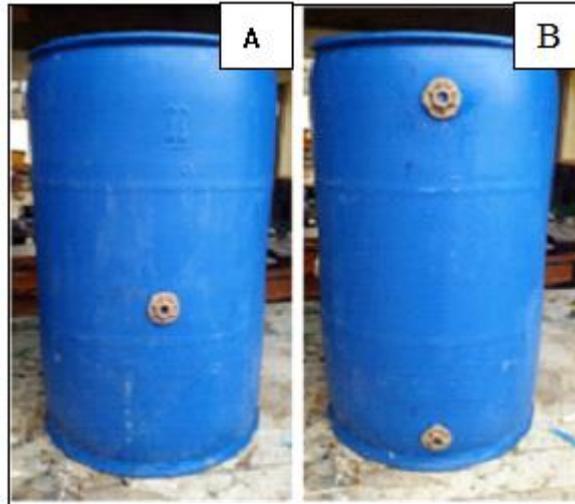


Os processos de fabricação e montagem do reservatório térmico alternativo foram constituídos pelas seguintes etapas:

- a. Colocação das conexões de PVC para a retirada de água para consumo e entrada/saída de água no reservatório proveniente do (s) coletor (es) e para entrada de água de alimentação do sistema, proveniente da caixa d'água. Os furos no tambor de

polietileno foram feitos com uma furadeira e uma serra copo de 20mm. A Figura 42 mostra as conexões para linha de serviço (A), linha de fluxo destinado ao coletor (B).

**Figura 42.** Tambor com conexões.



- b. Confeção de um tambor em chapa de aço galvanizado para revestimento do elemento base do reservatório térmico. A Figura 43 mostra o tambor metálico fabricado para revestir o elemento base do RTA.

**Figura 43.** Tambor metálico fabricado para revestir o elemento base do RTA.



- c. Colocação do tambor de polietileno no tambor metálico e aplicação de poliuretano expandido na espessura de 50mm no fundo e entre os dois cilindros (aço e polietileno), para constituir-se no isolamento térmico do RTA. A Figura 44 mostra a obtenção do isolamento térmico do RTA.

**Figura 44.** Colocação do isolamento térmico do RTA.



- d. Pintura do RTA - O reservatório foi pintado com tintas esmalte sintético preto fosco e cinza. A Figura 45 mostra o tambor de revestimento do RTA já pintado.

**Figura 45.** Tambor de revestimento do RTA já pintado.



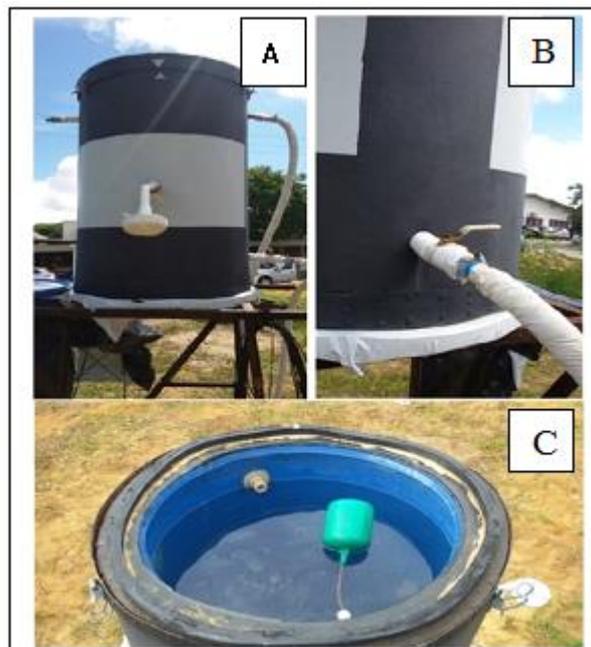
- e. Colocação de uma borracha de vedação para garantir uma maior vedação entre o tambor e a tampa, fixada com cola de contato. A Figura 46 mostra a borracha de vedação já colada.

**Figura 46.** Fixação da borracha de vedação para tampa do RTA.



- f. Instalação dos acessórios do RTA - chuveiro, registro para liberação da água e bóia de nível. A Figura 47 mostra os acessórios instalados, chuveiro (A), registro de serviço (B) e Boia (C).

**Figura 47.** Acessórios do RTA instalados:



- g. Fabricação da tampa do RTA - a tampa do RTA foi fabricada em fibra de vidro tendo como isolante térmico o poliuretano na espessura de 20mm e pintada na cor preto fosco. Foi instalado uma tranca, dispositivo de segurança, para as operações de abrir/fechar o RTA. A Figura 48 mostra a tampa do RTA fabricada.

**Figura 48.** Tampa do RTA fabricada em fibra de vidro.



- h. Fabricação de uma haste para obtenção das medidas de temperatura em vários pontos do RTA, utilizando-se um tubo de cobre, onde foram instalados sete termopares tipo K. A Figura 49 mostra o dispositivo produzido.

**Figura 49.** Haste para medição das temperaturas em vários níveis do RTA.



- i. Acoplamento entre o dispositivo para medição das temperaturas e a tampa do RTA. A Figura 50 mostra o dispositivo para medição das temperaturas no RTA já instalado.

**Figura 50.** Dispositivo para medição das temperaturas do RTA já instalado.



- l. A Figura 51 mostra o reservatório térmico alternativo do sistema de aquecimento solar de água fabricado e montado pronto para ensaio.

**Figura 51.** Reservatório térmico alternativo do sistema de aquecimento solar de água pronto para ensaio.



A Figura 52 mostra o sistema de aquecimento solar alternativo (SASA) proposto constituído pelo CSA e RTA, pronto para o ensaio.

**Figura 52.** Sistema de aquecimento solar alternativo (SASA) pronto para ensaio.



### **3.1.3. Processo de ensaio do sistema de aquecimento solar alternativo proposto**

O sistema de aquecimento solar estudado funcionava em regime de termossifão, para um volume de água do reservatório quente de 200 litros. Foram ensaiados para o diagnóstico de sua eficiência térmica, sendo levantados os parâmetros que os caracterizavam e necessários para a análise do seu desempenho térmico (LOPO, 2010; DUFFIE & BECKMAN, 2013).

Foram medidas as temperaturas de entrada e saída do fluido do coletor, as temperaturas internas e externas do coletor, a temperatura da água contida no reservatório em vários pontos e a radiação solar global (REIS, 2009; GOMES, 2010).

As temperaturas de entrada e saída do fluido no coletor e foram medidas no período entre 08:00 e 15:00 horas, em intervalos de 30 minutos; as temperaturas da água contida no reservatório em seis pontos, seguiu o mesmo procedimento adotado anteriormente e as

temperaturas do interna do coletor foram medidas de 15 em 15 minutos entre 8:00 e 15:00 horas. Todas essas leituras foram medidas com termopares tipo K acoplados a um termômetro digital, como mostra na Figura 53.

**Figura 53.** Termopares tipo K e termômetro digital.



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

Os dados ambientais foram colhidos numa central meteorológica Davis, que possibilita a visualização dos seus dados com o programa WeatherLink 5.9.3, que registraram vários valores de dados meteorológicos em função da hora, a partir de um dispositivo fixado em cima do laboratório como mostra a Figura 54 como temperatura ambiente, velocidade do vento, direção do vento, radiação solar global, etc.

**Figura 54.** Foto do aparelho que fornece dados meteorológicos.



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

Os banhos foram simulados às, 15:00, 19:00, 22:00 e 6:00 horas, retirando-se 40 litros de água quente do reservatório térmico, através do registro do chuveiro localizado a 1/2 de sua altura, a partir de sua base. Ressalte-se que a simulação dos banhos deu-se numa condição mais crítica do que condição real, sem a mistura da água quente do reservatório com a água fria proveniente da rede (SOUZA, 2012).

A capacidade de isolamento térmico do RTA foi testada durante 24 horas. Foram medidas a cada hora as temperaturas da água no interior do RTA em três pontos, utilizando-se termopares tipo K acoplados a um termômetro digital, e as temperaturas externas do RTA em 14 pontos, 12 nas laterais, um na tampa e um no fundo foram medidas com um pirômetro marca HIGHMED modelo HM-88C, mostrado na Figura 55.

**Figura 55.** Pirômetro utilizado nas medições



Apresentam-se, a seguir, as teorias e as equações necessárias à determinação dos parâmetros que traduziam o comportamento do coletor e sistema alternativo de aquecimento proposto, priorizando-se o coeficiente global de perdas e o rendimento térmico (NEGÓCIO, 2012).

### **3.2. 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.

### 3.2.1. Coeficiente global de perdas ( $U_{loss}$ )

A placa coletora após receber radiação se aquece, surgindo, em consequência, um gradiente de temperatura entre a mesma e o ar ambiente, fazendo com que parte da energia captada flua do coletor para a atmosfera, que se constitui nas perdas térmicas do coletor. O parâmetro que engloba todas essas perdas é o Coeficiente Global de Perdas ( $U_{loss}$ ), que pode ser determinado por três métodos distintos, quais sejam: Método da Perda Térmica, Método das Trocas Térmicas e Método da Inversão de Fluxo (DUFFIE&BECKMAN, 2013).

Como o Método da Inversão Térmica requer um controle rígido de vários parâmetros, necessitando, por conseguinte, de um aparato tecnológico de grande sofisticação, resolveu-se determinar esse parâmetro a partir do método da perda térmica, descrito a seguir.

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

Para a determinação do rendimento térmico adotou-se uma vazão mássica média de circulação em termosifão correspondente a 8,1 kg/h, conforme estudo de TREIS (1991).

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

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

$$Q_p = Q_{abs} - Q_u \quad (3.4)$$

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

### 3.2.2. Determinação do rendimento térmico ( $\eta_t$ ).

$$Q_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.15)$$

$$\eta_t = \frac{Q_u}{A.I} \quad (3.16)$$

Onde:

$Q_{abs}$  = taxa de energia absorvida pela conjunto absorvedor (placa e tubos), em kW.

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

$Q_p$  = taxa de energia perdida do coletor, em kW.

$I$  = radiação solar global, em kW/m<sup>2</sup>.

$A$  = área do coletor (área exposta à radiação solar), em m<sup>2</sup>.

$\dot{m}$  = vazão mássica, em kg/s.

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

$\Delta T$  = gradiente de temperatura entre entrada e saída do fluido, em K.

$\alpha_p$  = absortividade da placa (85%)

$\tau_v$  = transmissividade do vidro (85%)

$U_{loss}$  = Coeficiente global de perda térmica, em W/m<sup>2</sup>.K

$\eta_t$  = Rendimento térmico do coletor, em %

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo foram avaliados os resultados dos ensaios realizados para o levantamento do desempenho do coletor e do sistema de aquecimento solar propostos. Foram analisadas também as perdas térmicas do coletor e reservatório térmico alternativos fabricados no LMHES da UFRN.

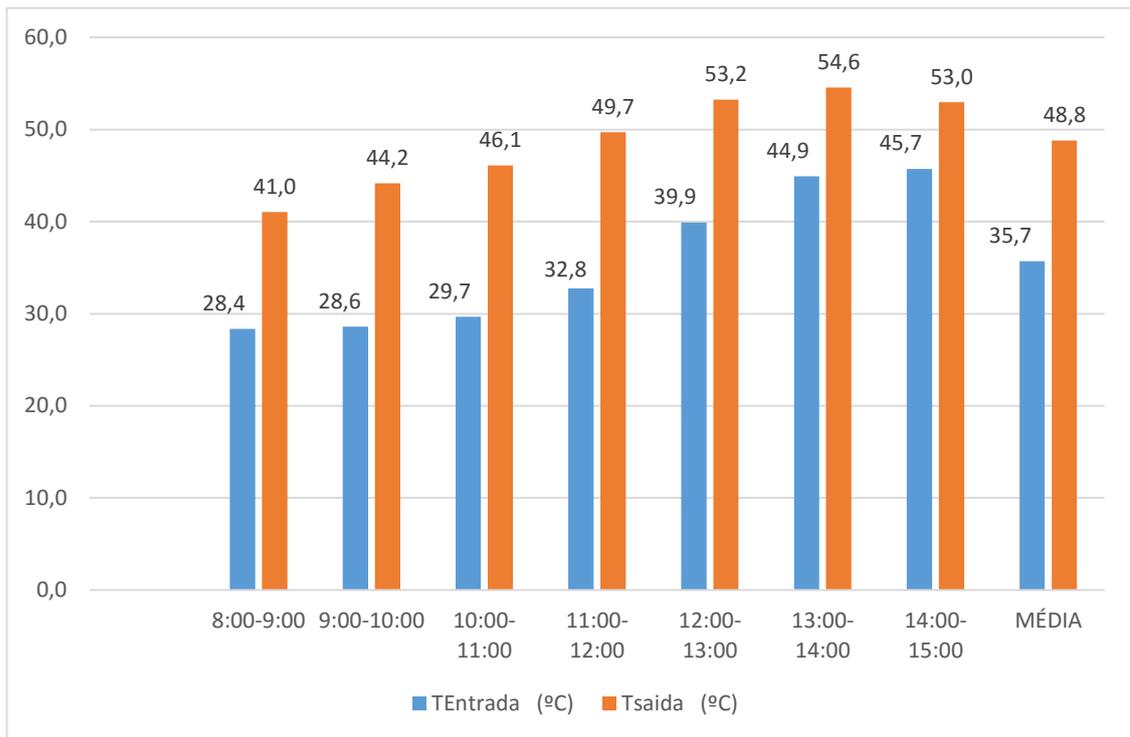
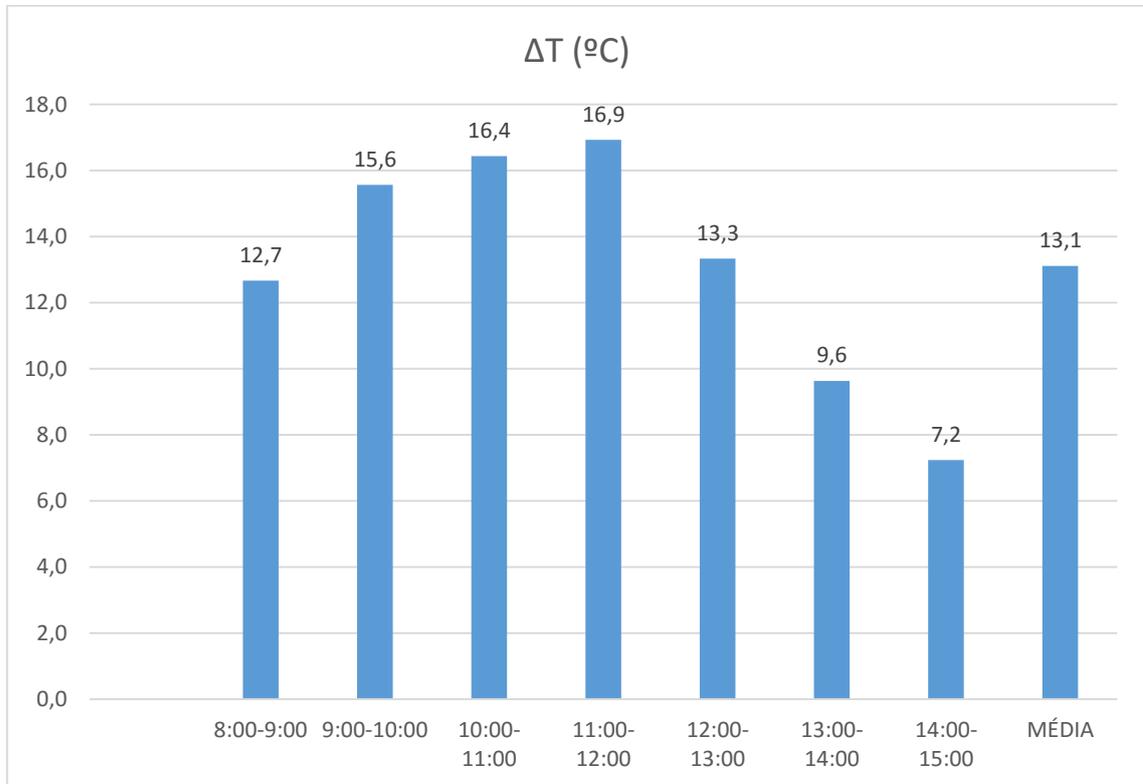
### 4.1. Resultados de parâmetros térmicos para determinação da eficiência térmica do sistema de aquecimento solar alternativo (SASA)

As Tabelas 03 a 07 apresentam os valores médios dos parâmetros medidos nos testes realizados com o SASA de aquecimento por dia. Os gráficos das Figs. 56 a 75 mostram o comportamento assumido por cada parâmetro diário analisado.

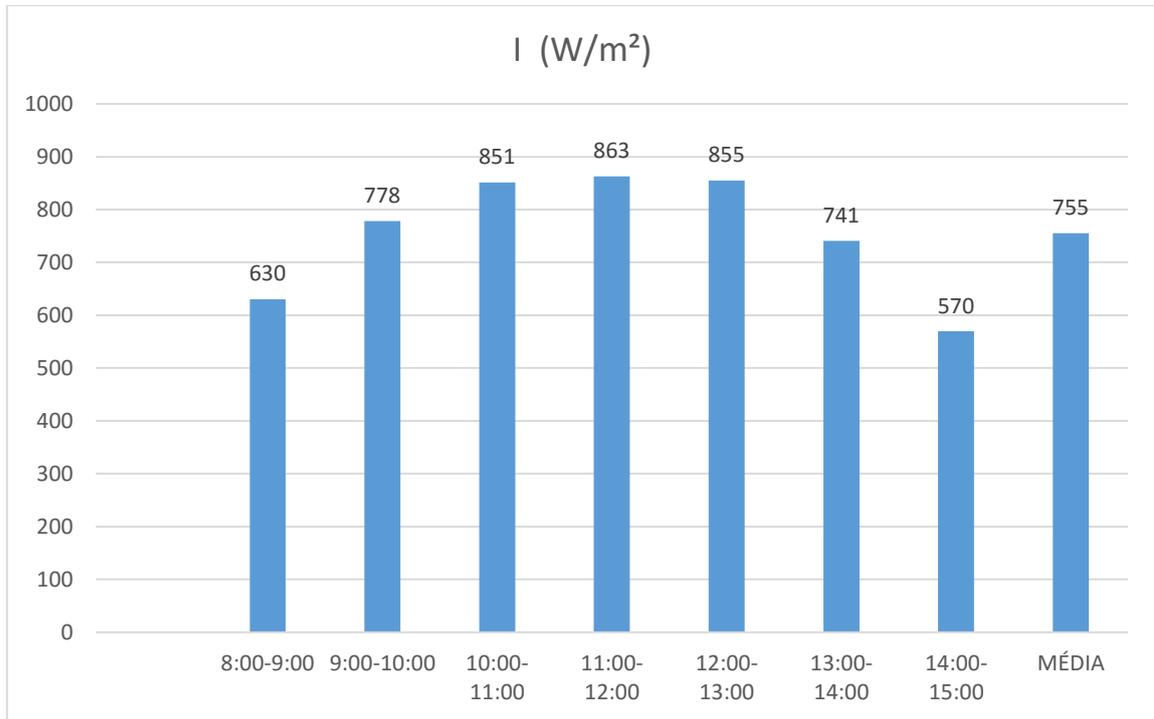
#### 4.1.1. Resultados de parâmetros térmicos para determinação da eficiência térmica do coletor solar alternativo no primeiro dia de ensaio

**Tabela 03.** Resultados da média do primeiro dia de ensaio do Coletor Solar Alternativo.

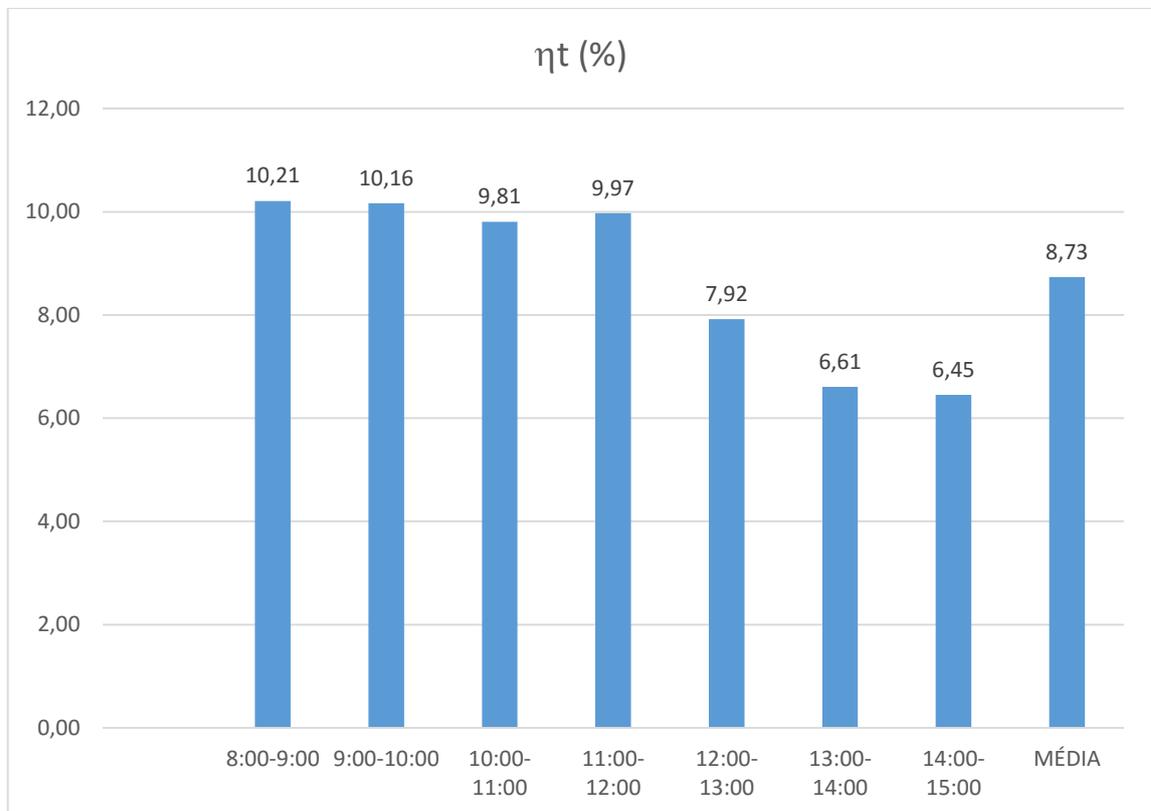
<b>TEMPO (Horas)</b>	<b>T<sub>Entrada</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>Saida</sub> (°C)</b>	<b>ΔT (°C)</b>	<b>I (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>η<sub>t</sub> (%)</b>
8:00 - 9:00	28,4	41,0	12,7	630	10,21
9:00 -10:00	28,6	44,2	15,6	778	10,16
10:00 -11:00	29,7	46,1	16,4	851	9,81
11:00 -12:00	32,8	49,7	16,9	863	9,97
12:00 -13:00	39,9	53,2	13,3	855	7,92
13:00 -14:00	44,9	54,6	9,6	741	6,61
14:00 -15:00	45,7	53,0	7,2	570	6,45
<b>MÉDIA</b>	<b>35,7</b>	<b>48,8</b>	<b>13,1</b>	<b>755</b>	<b>8,73</b>

**Figura 56.** Comportamento dos parâmetros do primeiro dia de ensaio do Coletor Solar Alternativo**Figura 57.** Comportamento da variação de temperatura ( $\Delta T$ ) média do primeiro dia de ensaio.

**Figura 58.** Comportamento da radiação solar global (I) média do primeiro dia de ensaio.



**Figura 59.** Comportamento da eficiência térmica ( $\eta_t$ ) média do primeiro dia de ensaio.



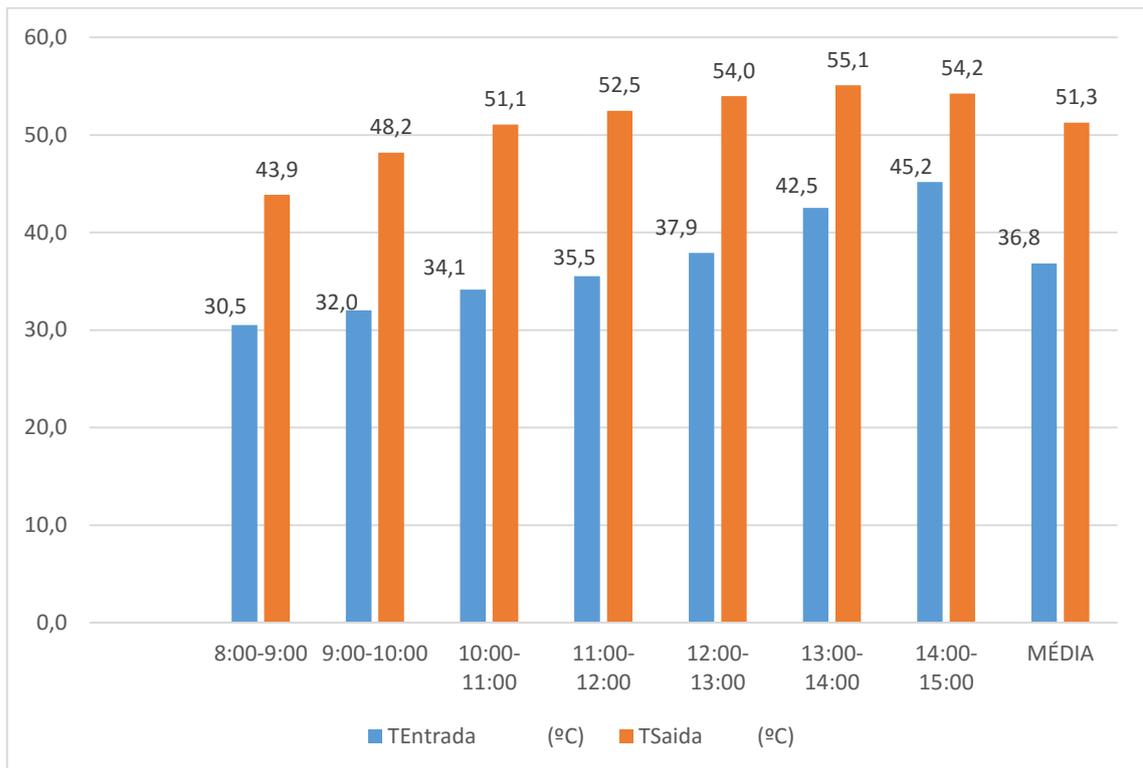
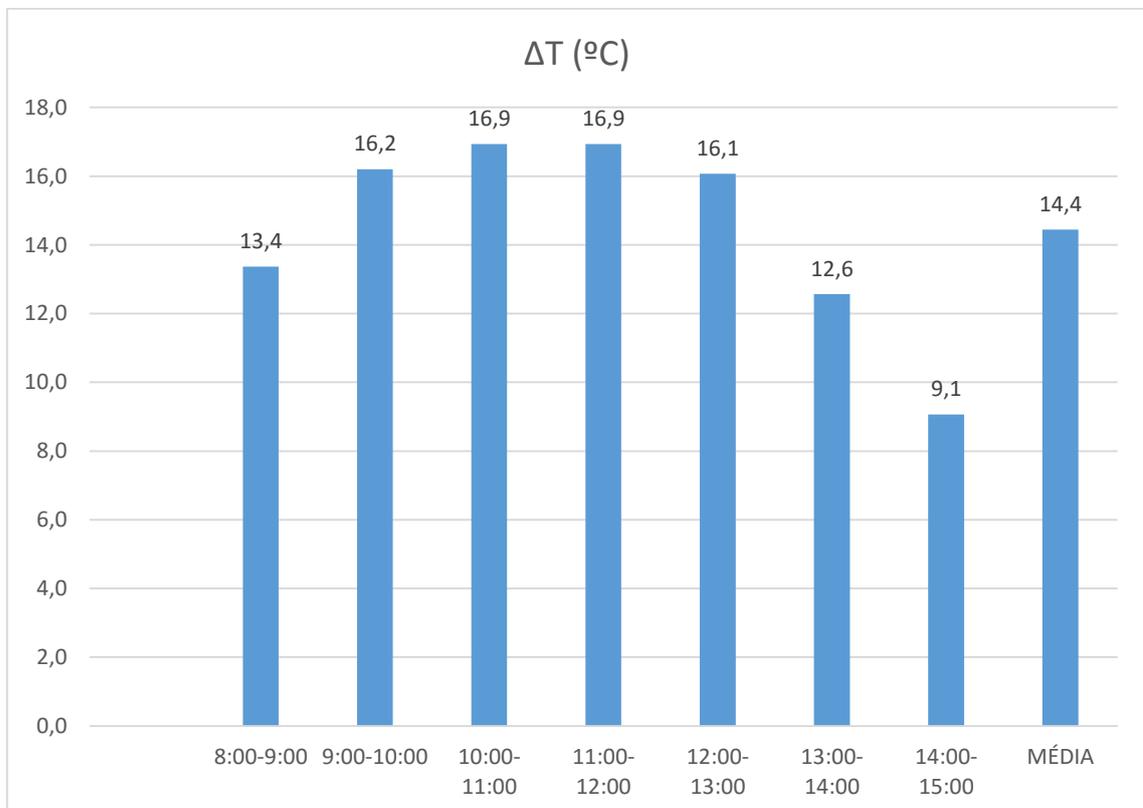
A eficiência máxima deste dia ficou em torno de 10,2 %, compatível com a eficiência de outros coletores solares alternativos já fabricados e estudados no LMHES (LOPO, 2010), sempre muito abaixo que a eficiência de coletores solares convencionais de mercado, em torno de 60%. Ressalta-se que o procedimento adotado para a determinação do rendimento térmico do coletor não é realizado para regime de termossifão, e sim, regime de fluxo forçado, com vazão mássica igual a 0,02 kg/s, produzindo rendimento térmico em torno de 60 % para os coletores solares convencionais de mercado.

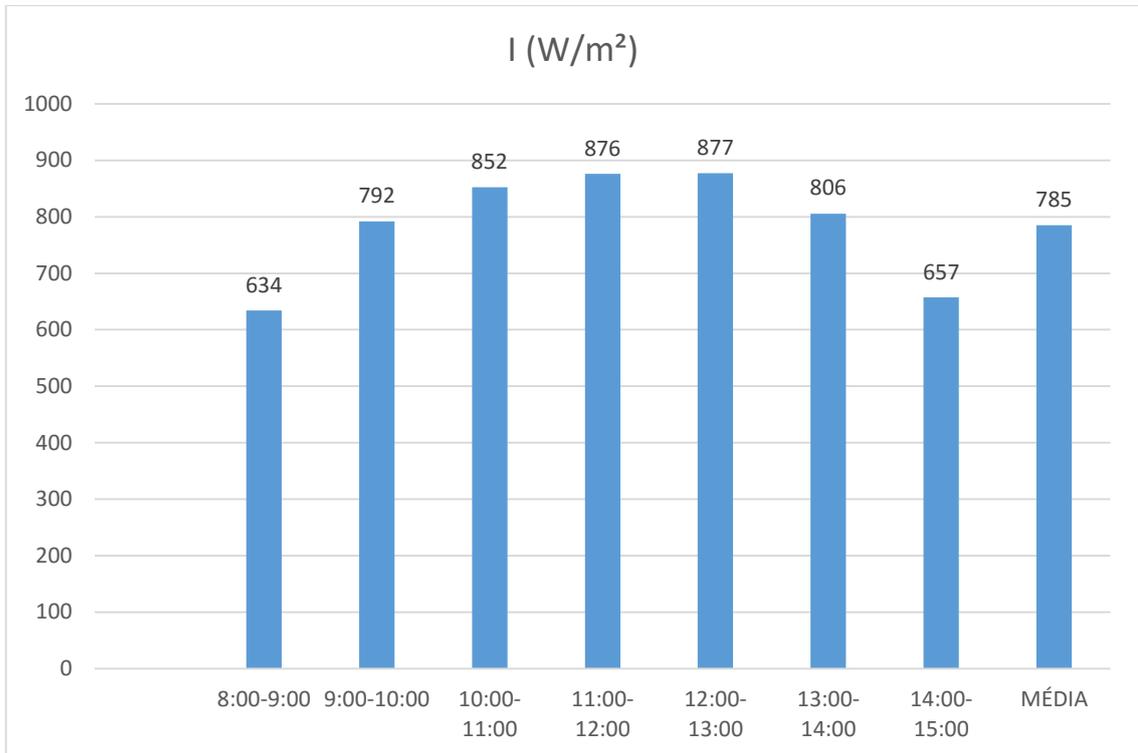
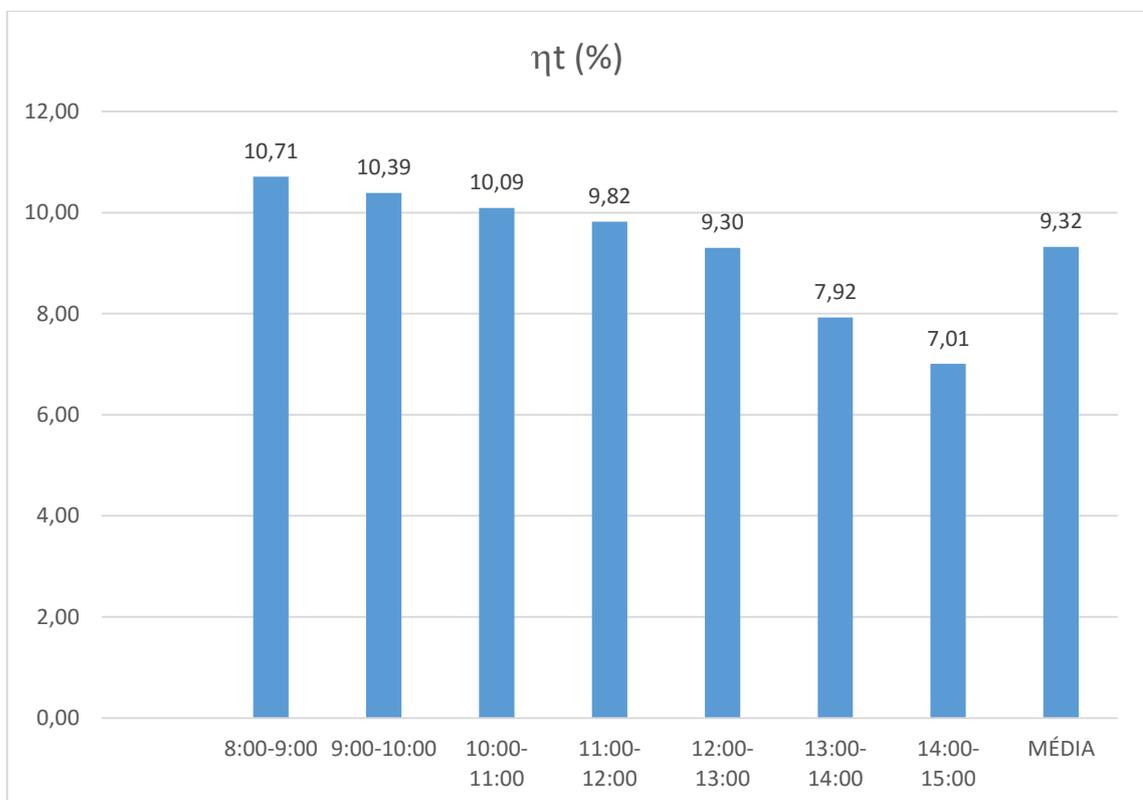
A diferença de temperatura máxima na água gerada pelo coletor foi de 16,9°C, para o intervalo de 11 as 12 horas, sob excelentes condições solarimétricas, com média de radiação solar global de 863W/m<sup>2</sup>.

Ao final do dia de ensaio, as 15 horas, a temperatura no fundo do tambor correspondia a 45,7°C, muito acima da temperatura desejada para banho, o que demonstrava a capacidade do coletor solar em aquecer todo o volume de água contido no reservatório térmico do SASA.

#### 4.1.2. Resultados de parâmetros térmicos para determinação da eficiência térmica do coletor solar alternativo no segundo dia de ensaio

<b>Tabela 04.</b> Resultados da média do segundo dia de ensaio do Coletor Solar Alternativo.					
<b>TEMPO (Horas)</b>	<b>T<sub>Entrada</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>Saida</sub> (°C)</b>	<b>ΔT (°C)</b>	<b>I (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>η<sub>t</sub> (%)</b>
8:00 - 9:00	30,5	43,9	13,4	634	10,71
9:00 -10:00	32,0	48,2	16,2	792	10,39
10:00 -11:00	34,1	51,1	16,8	852	10,09
11:00 -12:00	35,5	52,5	16,9	876	9,82
12:00 -13:00	37,9	54,0	16,1	877	9,30
13:00 -14:00	42,5	55,1	12,6	806	7,92
14:00 -15:00	45,2	54,2	9,1	657	7,01
<b>MÉDIA</b>	<b>36,8</b>	<b>51,3</b>	<b>14,4</b>	<b>785</b>	<b>9,32</b>

**Figura 60.** Comportamento dos parâmetros do segundo dia de ensaio do Coletor Solar Alternativo.**Figura 61.** Comportamento da variação de temperatura ( $\Delta T$ ) média do segundo dia de ensaio.

**Figura 62.** Comportamento da radiação solar global (I) média do segundo dia de ensaio.**Figura 63.** Comportamento da eficiência térmica ( $\eta_t$ ) média do segundo dia de ensaio.

A eficiência média deste dia do coletor ficou em torno de 9,4 %, e a máxima em torno de 10,8%, ambas muito inferiores às eficiências características de coletores convencionais de mercado. Essa inferioridade na eficiência é causada pela maior perda térmica dos coletores alternativos, que possuem isolamento térmico menos eficiente que os tradicionalmente utilizados, lã de vidro, lã de rocha e espuma de poliuretano e pela baixa condutividade dos tubos de PVC que não conseguem transferir o calor neles armazenado para o fluido de trabalho.

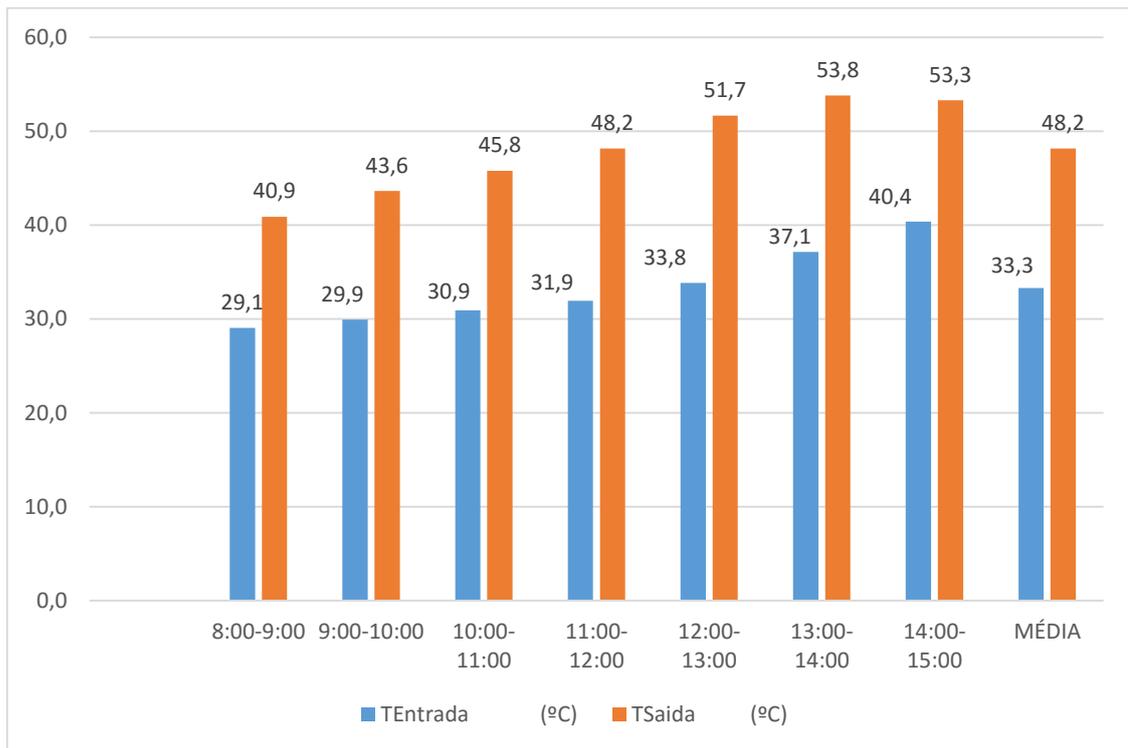
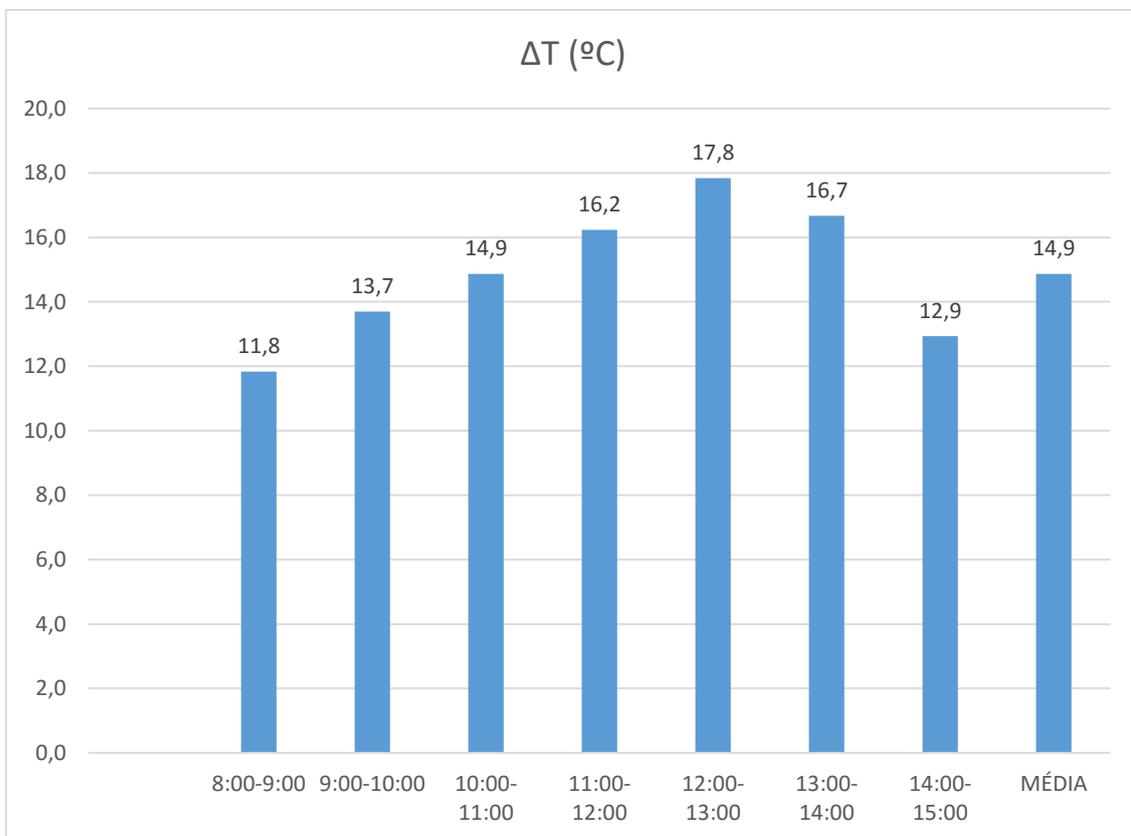
A diferença de temperatura máxima na água gerada pelo coletor foi de 16,9°C, para o intervalo de 11 as 12 horas, sob excelentes condições solarimétricas, com média de radiação solar global de 876W/m<sup>2</sup>. A diferença de temperatura média na água gerada pelo coletor foi de 14,9°C, para uma radiação solar global média do dia de ensaio de 785W/m<sup>2</sup>.

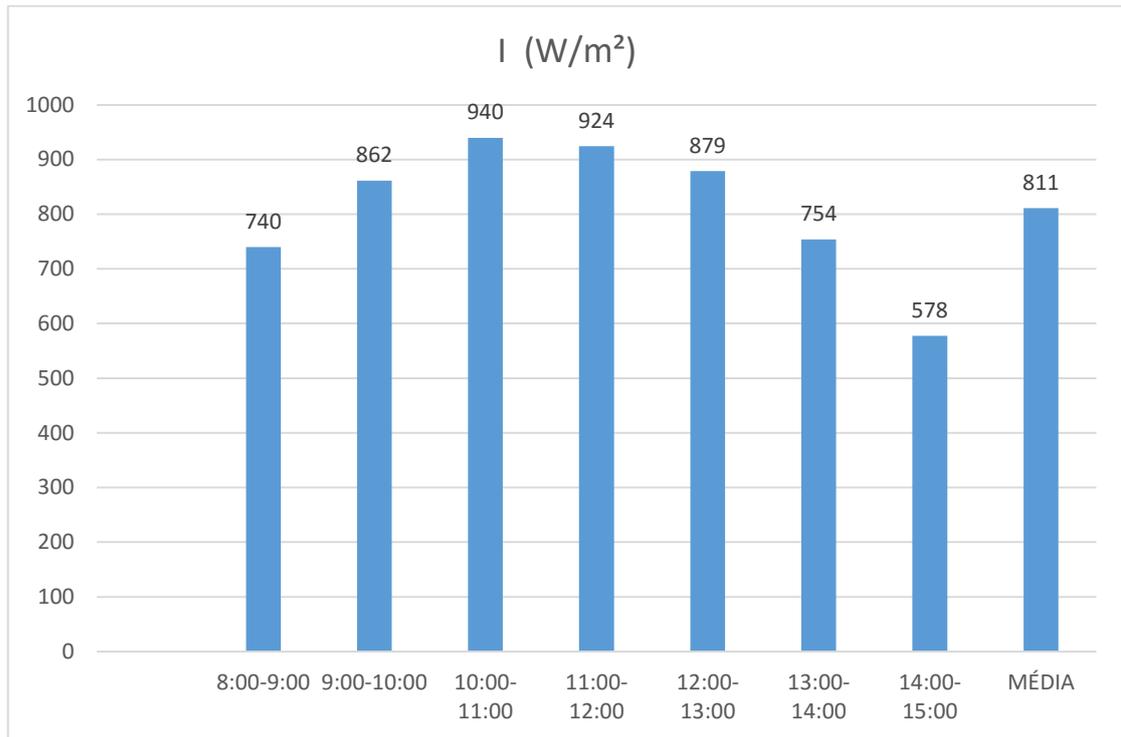
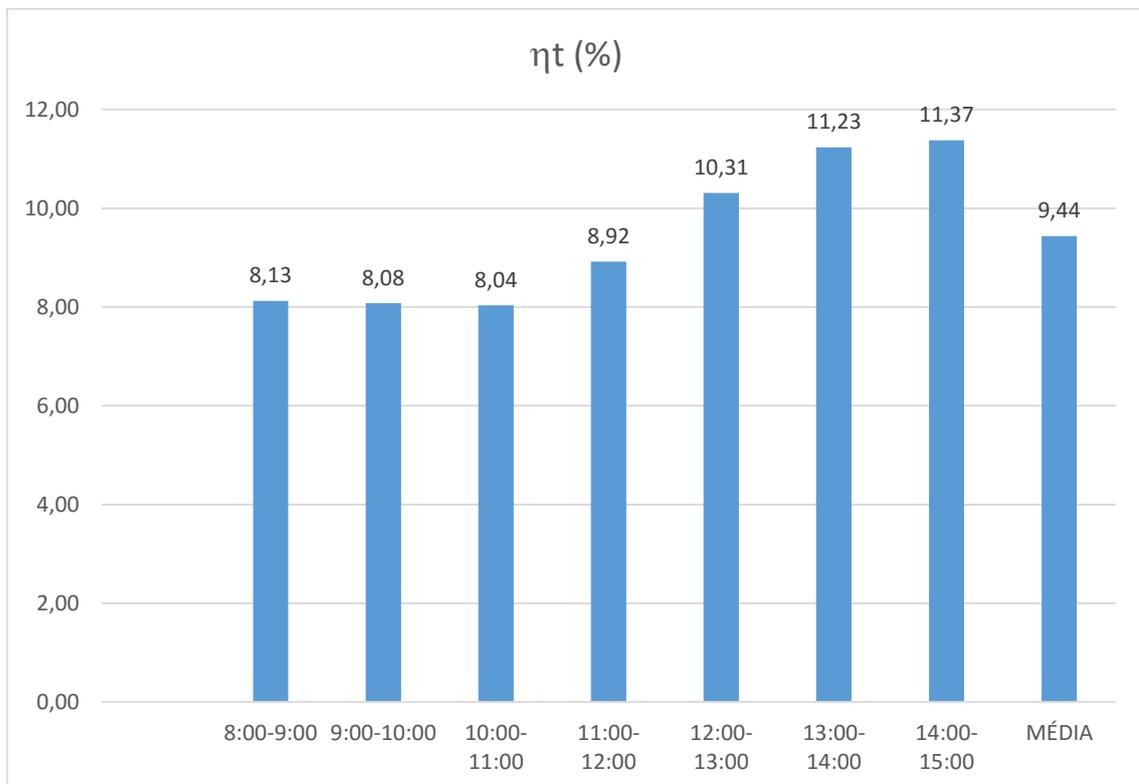
Ao final do dia de ensaio, as 15 horas, a temperatura no fundo do tambor correspondia a 45,2°C, muito acima da temperatura ideal de banho, o que demonstrava a capacidade do coletor solar em aquecer todo o volume de água contido no reservatório térmico do SASA

#### 4.1.3. Resultados de parâmetros térmicos para determinação da eficiência térmica do coletor solar alternativo no terceiro dia de ensaio

A Tabela 5 apresenta os resultados do terceiro dia de ensaio do coletor solar alternativo estudado.

<b>Tabela 05.</b> Resultados da média do terceiro dia de ensaio do Coletor Solar Alternativo.					
<b>TEMPO (Horas)</b>	<b>T<sub>Entrada</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>Saida</sub> (°C)</b>	<b>ΔT (°C)</b>	<b>I (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>η<sub>t</sub> (%)</b>
8:00 - 9:00	29,1	40,9	11,8	740	8,13
9:00 -10:00	29,9	43,6	13,7	862	8,08
10:00 -11:00	30,9	45,8	14,9	940	8,04
11:00 -12:00	31,9	48,2	16,2	924	8,92
12:00 -13:00	33,8	51,7	17,8	879	10,31
13:00 -14:00	37,1	53,8	16,7	754	11,23
14:00 -15:00	40,4	53,3	12,9	578	11,37
<b>MÉDIA</b>	<b>33,3</b>	<b>48,2</b>	<b>14,9</b>	<b>811</b>	<b>9,44</b>

**Figura 64.** Comportamento dos parâmetros do terceiro dia de ensaio do Coletor Solar Alternativo.**Figura 65.** Comportamento da variação de temperatura ( $\Delta T$ ) média do terceiro dia de ensaio.

**Figura 66.** Comportamento da radiação solar global (I) média do terceiro dia de ensaio.**Figura 67.** Comportamento da eficiência térmica ( $\eta_t$ ) média do terceiro dia de ensaio.

O comportamento desse dia foi o mesmo verificado para os outros dois dias já analisados. A eficiência máxima foi um pouco maior, em torno de 11,4 %, e a média também maior em torno de 9,44%.

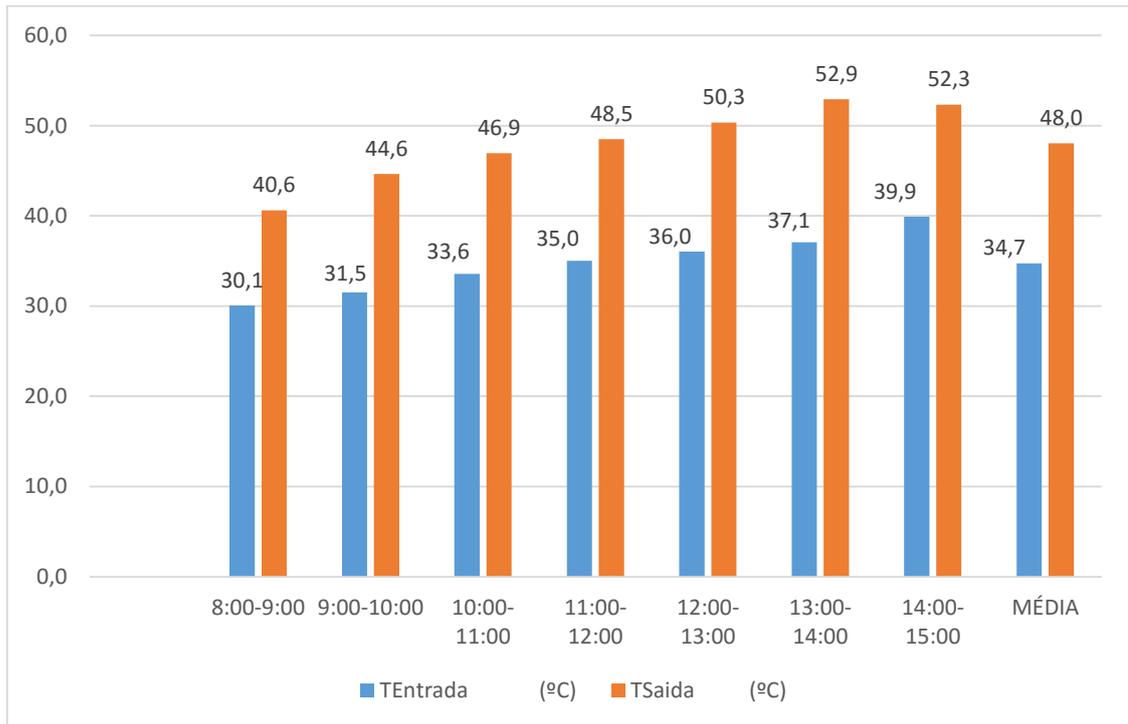
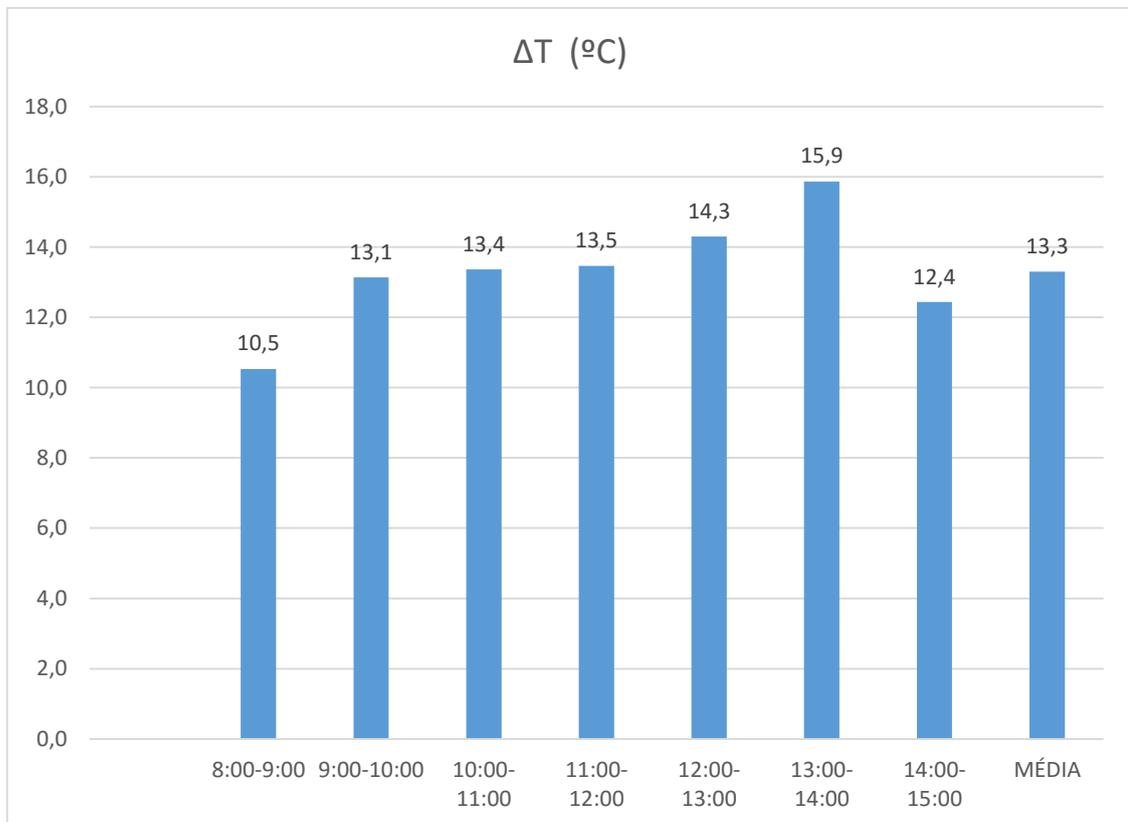
A diferença de temperatura máxima na água foi de 17,8°C, para o intervalo de 12 as 13 horas, sob excelentes condições solarimétricas, com média de radiação solar global de 879W/m<sup>2</sup> para este mesmo horário, e a diferença de temperatura média na água gerada pelo coletor foi de 14,9°C, para uma radiação solar global média do dia de ensaio de 811 W/m<sup>2</sup>. As diferenças de temperatura foram superiores a as alcançadas nos dias anteriormente testados.

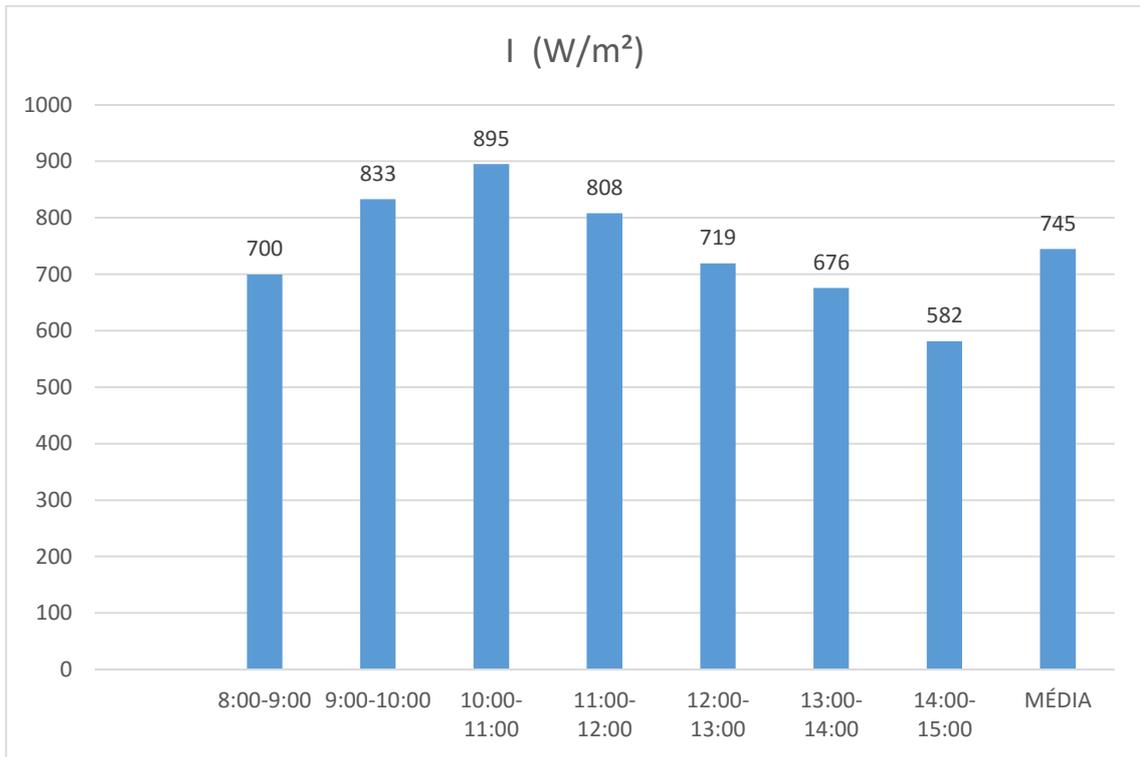
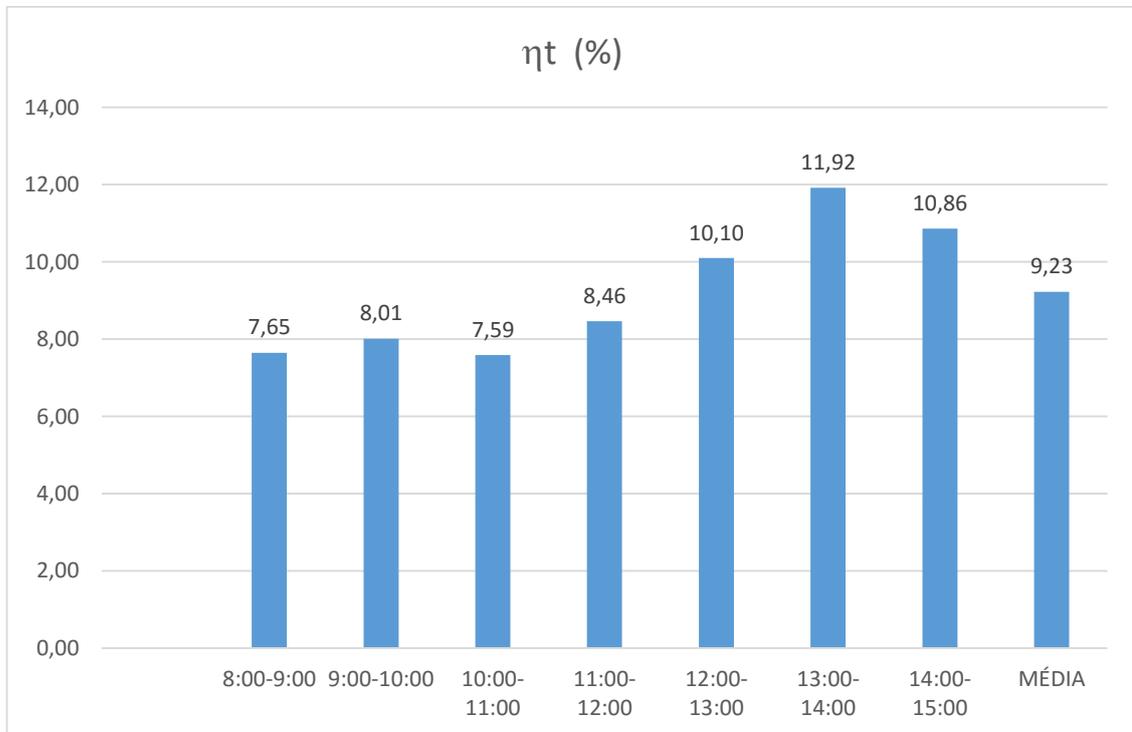
Mais uma vez ao final do dia de ensaio a temperatura no fundo do tambor correspondia a 40,4°C, acima da temperatura ideal de banho, o que demonstrava a capacidade do coletor solar em aquecer todo o volume de água contido no reservatório térmico do SASA.

#### 4.1.4. Resultados de parâmetros térmicos para determinação da eficiência térmica do coletor solar alternativo no quarto dia de ensaio

**Tabela 06.** Resultados da média do quanto dia de ensaio do Coletor Solar Alternativo.

<b>TEMPO (Horas)</b>	<b>T<sub>Entrada</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>Saida</sub> (°C)</b>	<b>ΔT (°C)</b>	<b>I (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>η<sub>t</sub> (%)</b>
8:00 - 9:00	30,1	40,6	10,5	700	7,65
9:00 -10:00	31,5	44,6	13,1	833	8,01
10:00 -11:00	33,6	46,9	13,4	895	7,59
11:00 -12:00	35,0	48,5	13,5	808	8,46
12:00 -13:00	36,0	50,3	14,3	719	10,10
13:00 -14:00	37,1	52,9	15,9	676	11,92
14:00 -15:00	39,9	52,3	12,4	582	10,86
<b>MÉDIA</b>	<b>34,7</b>	<b>48,0</b>	<b>13,3</b>	<b>745</b>	<b>9,23</b>

**Figura 68.** Comportamento dos parâmetros do quarto dia de ensaio do Coletor Solar Alternativo.**Figura 69.** Comportamento da variação de temperatura ( $\Delta T$ ) média do quarto dia de ensaio.

**Figura 70.** Comportamento da radiação solar global (I) média do quarto dia de ensaio.**Figura 71.** Comportamento da eficiência térmica ( $\eta_t$ ) média do quarto dia de ensaio.

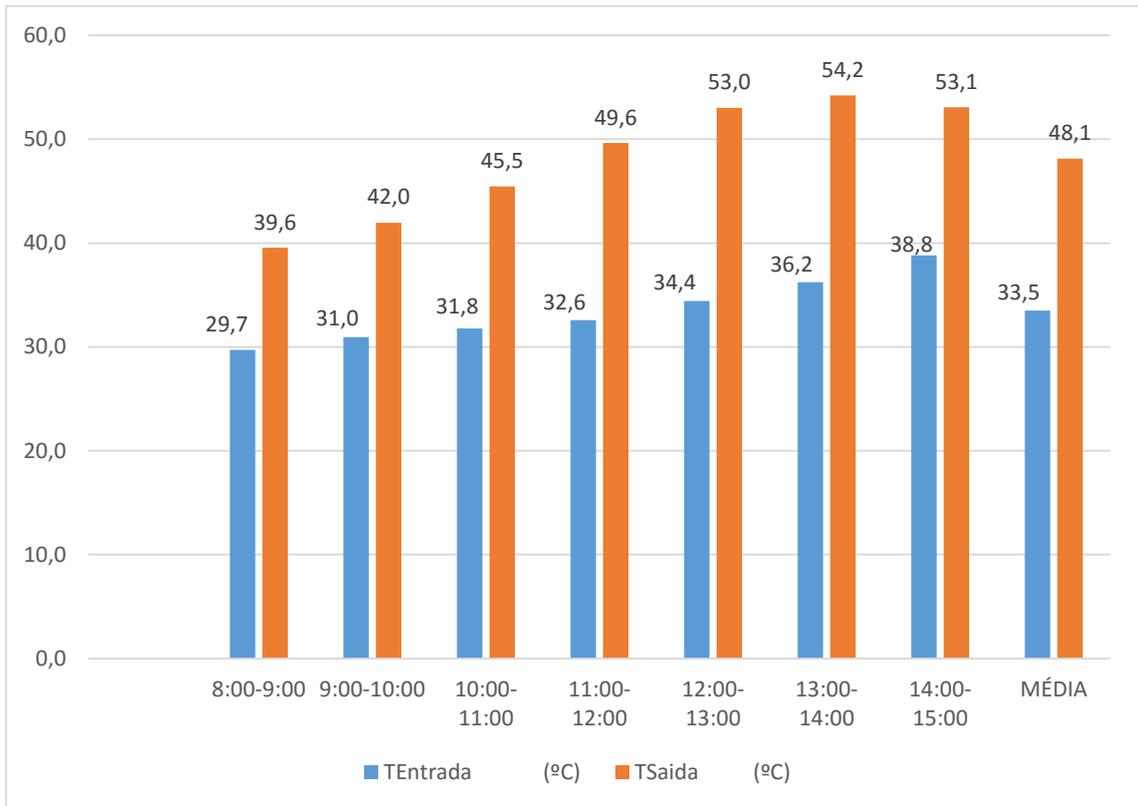
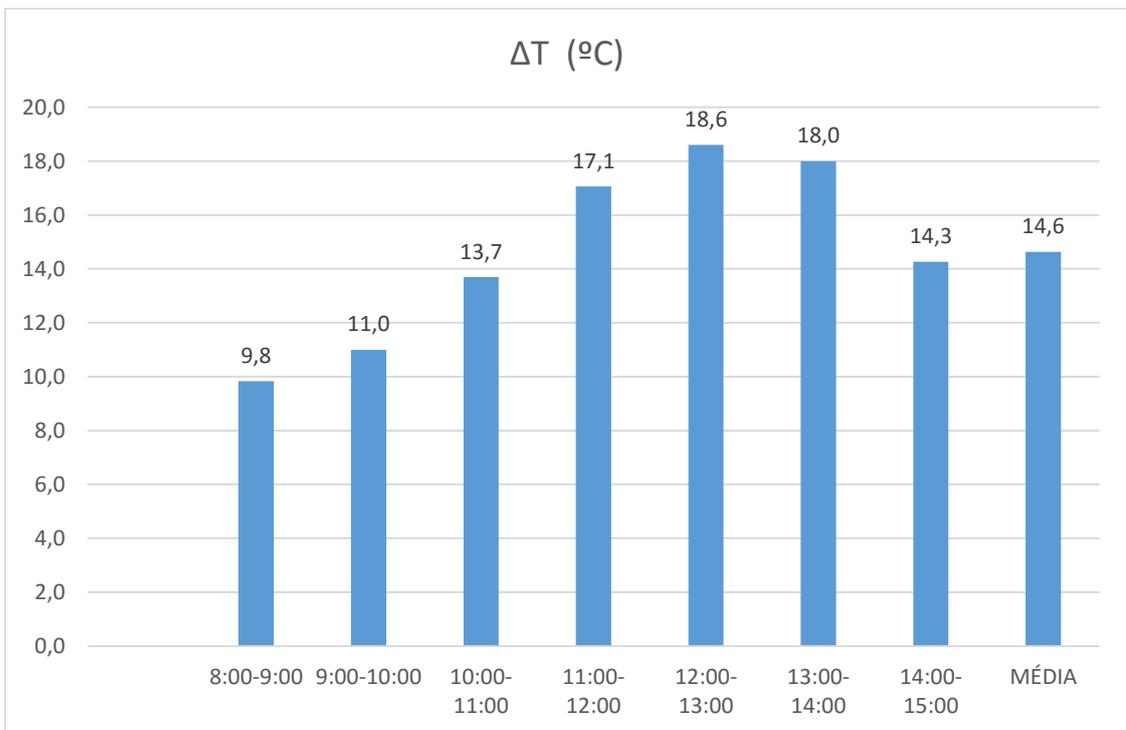
O comportamento desse dia foi o praticamente o mesmo verificado para os outros três dias já analisados. A eficiência máxima foi a maior já alcançada, em torno de 11,3%, e a média em torno de 9,3%.

As diferenças de temperatura foram inferiores as alcançadas nos outros três dias de ensaio, registrando-se uma diferença de temperatura máxima na água de 15,9°C, para o intervalo de 13 as 14 horas, sob boas condições solarimétricas, com média de radiação solar global de 679 W/m<sup>2</sup> e a diferença de temperatura média na água gerada pelo coletor foi de 13,3°C, para uma radiação solar global média do dia de ensaio de 745 W/m<sup>2</sup>.

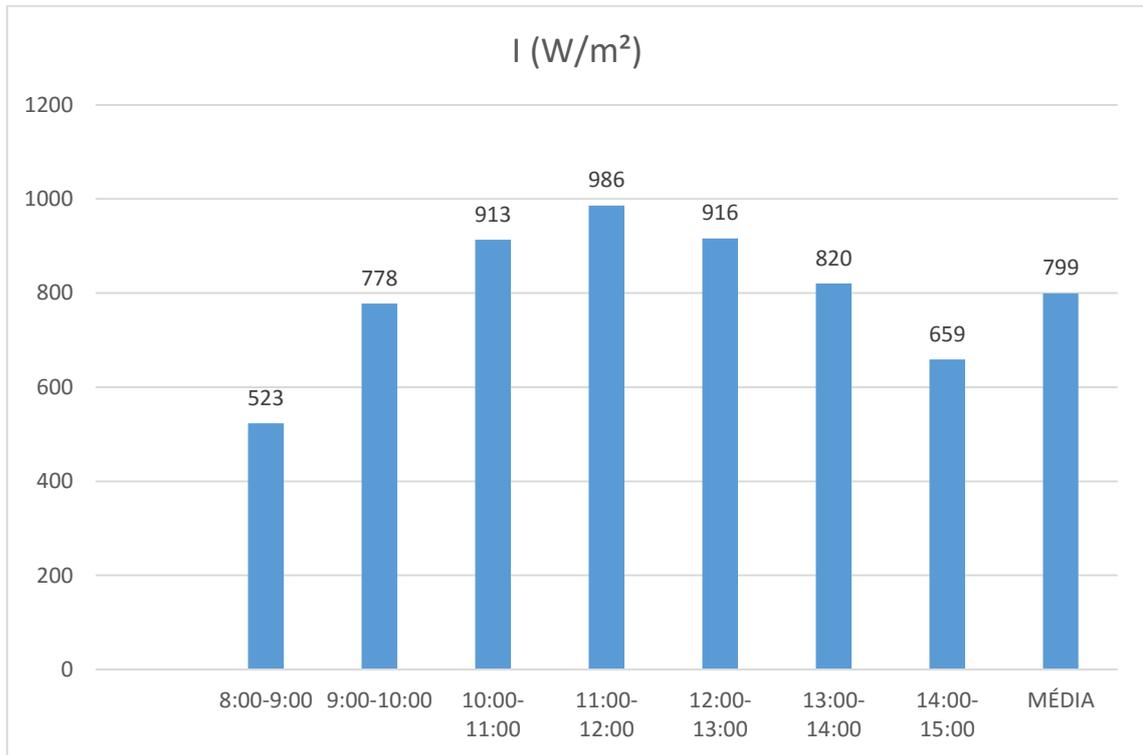
Mais uma vez ao final do dia de ensaio a temperatura no fundo do tambor correspondia a 39,9°C, acima da temperatura ideal de banho, o que demonstrava a capacidade do coletor solar em aquecer todo o volume de água contido no reservatório térmico do SASA.

#### 4.1.5. Resultados de parâmetros térmicos para determinação da eficiência térmica do coletor solar alternativo no quinto dia de ensaio

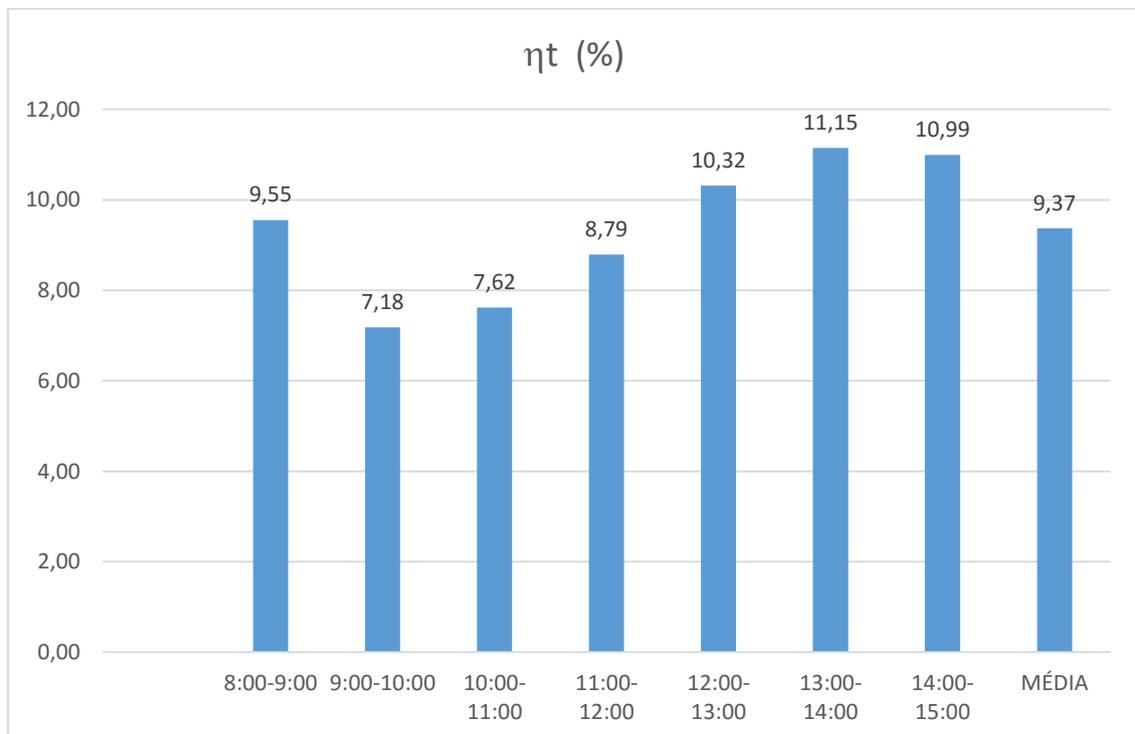
<b>Tabela 07.</b> Resultados da média do quinto dia de ensaio do Coletor Solar Alternativo.					
<b>TEMPO (Horas)</b>	<b>T<sub>Entrada</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>Saida</sub> (°C)</b>	<b>ΔT (°C)</b>	<b>I (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>η<sub>t</sub> (%)</b>
8:00 - 9:00	29,7	39,6	9,8	523	9,55
9:00 -10:00	31,0	42,0	11,0	778	7,18
10:00 -11:00	31,8	45,5	13,7	913	7,62
11:00 -12:00	32,6	49,6	17,1	986	8,79
12:00 -13:00	34,4	53,0	18,6	916	10,32
13:00 -14:00	36,2	54,2	18,0	820	11,15
14:00 -15:00	38,8	53,1	14,3	659	10,99
<b>MÉDIA</b>	<b>33,5</b>	<b>48,1</b>	<b>14,6</b>	<b>799</b>	<b>9,37</b>

**Figura 72.** Comportamento dos parâmetros do quinto dia de ensaio do Coletor Solar Alternativo.**Figura 73.** Comportamento da variação de temperatura ( $\Delta T$ ) média do quinto dia de ensaio.

**Figura 74.** Comportamento da radiação solar global (I) média do quinto dia de ensaio.



**Figura 75.** Comportamento da eficiência térmica ( $\eta_t$ ) média do quinto dia de ensaio.



O comportamento desse dia foi idêntico aos verificado para os outros quatro dias já analisados. A eficiência máxima foi de 11,2% e a média foi praticamente a mesma do terceiro dia, em torno de 9,4%.

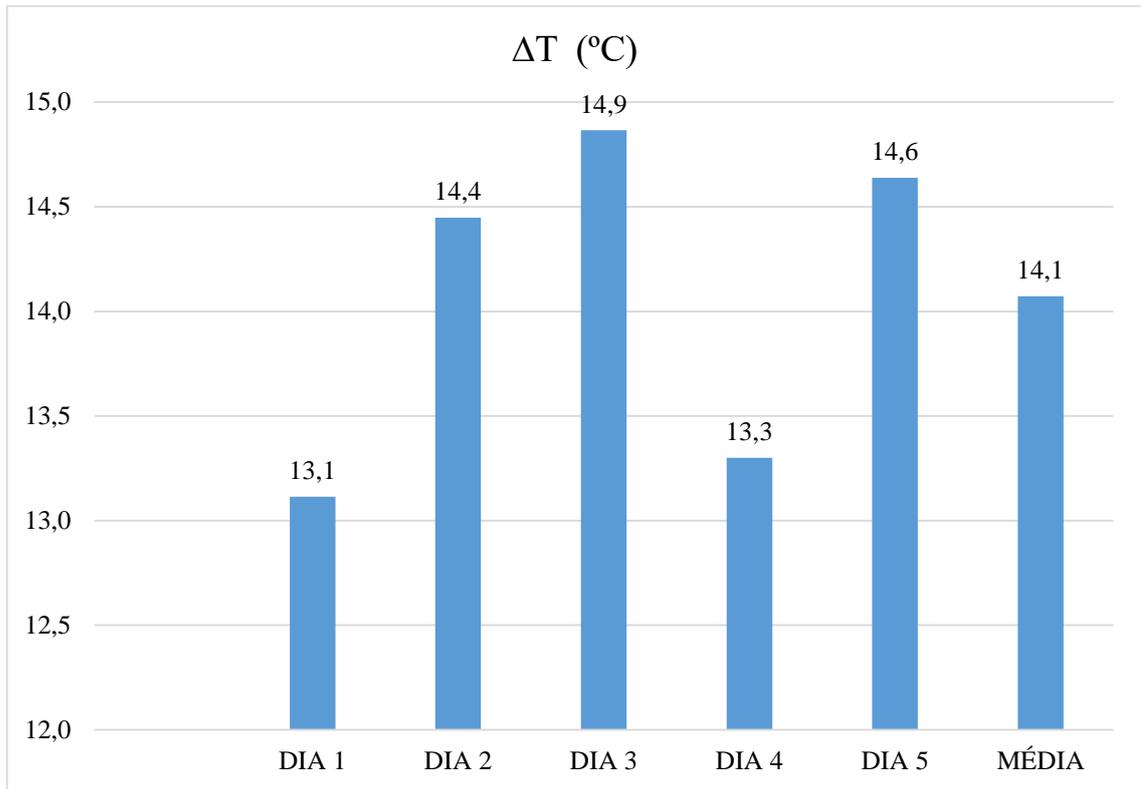
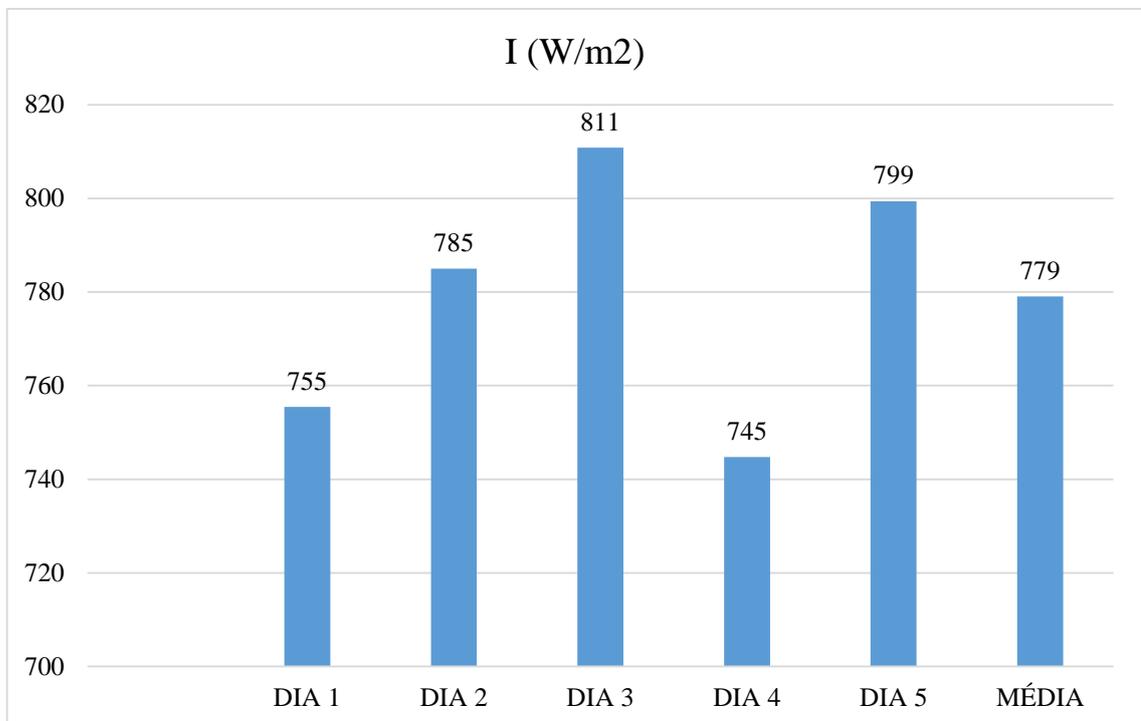
Para esse dia foi alcançada a máxima diferença de temperatura média horária correspondente a 18,6°C, no intervalo de 12 as 13 horas, sob excelentes condições solarimétricas, com média de radiação solar global de 916 W/m<sup>2</sup> e a diferença de temperatura média na água gerada pelo coletor foi de 14,6°C, muito próxima ao dia de melhor resultado, o terceiro, para uma radiação solar global média do dia de ensaio de 799 W/m<sup>2</sup>.

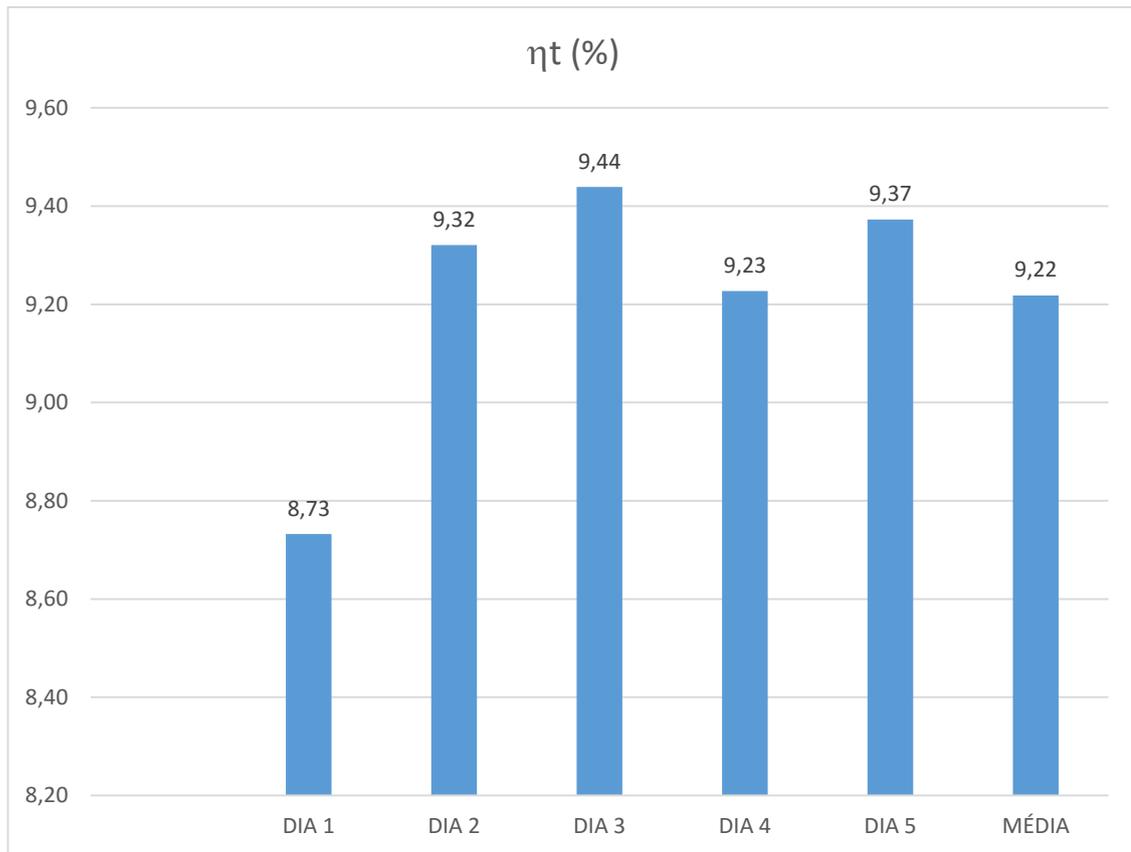
Observou-se o mesmo comportamento em relação a capacidade de aquecimento de toda a massa de água contida no RTA, alcançando-se 38,8°C no fundo do tambor, acima da temperatura ideal de banho, entre 36 a 38°C.

#### 4.1.6. Resultados das médias gerais obtidos para os cinco dias de ensaios para coletor solar alternativo

A Tabela 08 mostra as médias gerais dos resultados obtidos para os cinco dias de ensaios para coletor solar alternativo, e os gráficos das Figs. 76, 77 e 78 mostram o comportamento assumido por cada parâmetro analisado.

<b>Tabela 08.</b> Resultados médios gerais.			
<b>DIAS DE ENSAIO</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>	<b>I (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\eta_t</math> (%)</b>
DIA 1	13,1	755	8,73
DIA 2	14,4	785	9,32
DIA 3	14,9	811	9,44
DIA 4	13,3	745	9,23
DIA 5	14,6	799	9,37
<b>MÉDIA</b>	<b>14,1</b>	<b>779</b>	<b>9,22</b>

**Figura 76.** Comportamento da variação de temperatura ( $\Delta T$ ) média dos cinco dias de ensaios.**Figura 77.** Comportamento da radiação solar global (I) média dos cinco dias de ensaios.

**Figura 78.** Comportamento da eficiência térmica ( $\eta_t$ ) média dos cinco dias de ensaios.

Os dados das tabelas mostraram que a temperatura média de saída do coletor sempre esteve acima dos 48°C, sendo a maior média horária registrada de 51,3°C. A temperatura de entrada no coletor, no início dos testes, sempre esteve, praticamente igual à temperatura ambiente.

A eficiência média do coletor nesta configuração ficou em torno de 9,22%, ficando entre a média da maioria dos coletores solares alternativos já fabricados e estudados no LMHES.

A média da radiação solar global para todos os dias ensaiados esteve em torno de 779 W/m<sup>2</sup>, com picos de radiação solar global média de 1056 W/m<sup>2</sup>. Foram escolhidos dias de baixa ou ausência de nebulosidade para a caracterização de condições solarimétricas próximas para todos os dias de ensaio.

A Tabela 09 mostra o comportamento dos resultados da temperatura média geral em vários pontos do reservatório térmico alternativo ao final do ensaio após as 7 horas.

**Tabela 09.** Níveis de temperatura média e geral em vários pontos do reservatório térmico no final de cada dia de ensaio.

<b>DIAS DE ENSAIO</b>	<b>T<sub>Fundo</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>1/4</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>1/2</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>3/4</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>Superior</sub> (°C)</b>	<b>T Média Geral (°C)</b>
DIA 1	45,2	48,3	51,9	53,2	54,0	50,5
DIA 2	45,5	49,4	51,6	53,0	53,1	50,5
DIA 3	41,5	48,7	49,8	50,5	51,8	48,5
DIA 4	41,8	48,4	50,0	50,5	52,6	48,7
DIA 5	40,1	45,9	49,1	50,1	52,9	47,6
<b>MÉDIA</b>	<b>42,8</b>	<b>48,1</b>	<b>50,5</b>	<b>51,5</b>	<b>52,9</b>	<b>49,2</b>

A viabilidade do sistema de aquecimento ficou evidenciada pela obtenção de níveis de temperatura de T<sub>Fundo</sub> bem acima da temperatura ideal para banho, em torno de 38°C em todos os dias ensaiados.

Isso significa que o coletor foi capaz de aquecer toda a massa de água contida no reservatório em um único dia de funcionamento, mesmo tendo uma eficiência térmica bem mais baixa em relação aos coletores convencionais, de eficiência em torno de 60%, para os mais eficientes em nível comercial.

Teoricamente a temperatura média da água contida no tambor para todos os dias ensaiados estaria em torno de 50°C, bem acima da temperatura exigida para o banho. Foi também avaliada a temperatura da mistura da água após as sete horas de ensaio, obtendo-se as temperaturas apresentadas na Tabela 10.

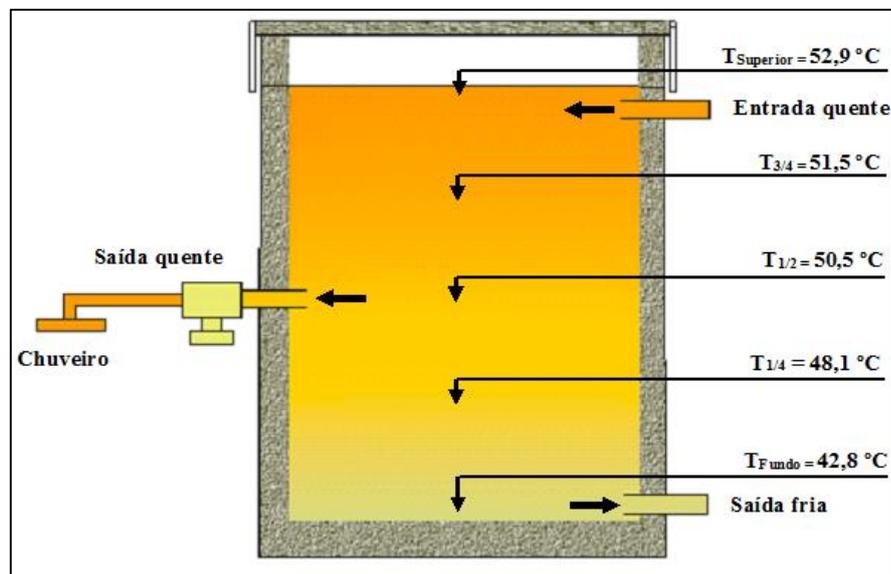
**Tabela 10** – Níveis de temperatura média geral em vários pontos do reservatório térmico para cada dia de ensaio

<b>DIAS DE ENSAIO</b>	<b>T<sub>Mistura</sub> (°C)</b>
DIA 1	51,0
DIA 2	50,6
DIA 3	48,9
DIA 4	50,1
DIA 5	47,8
<b>MÉDIA</b>	<b>49,7</b>

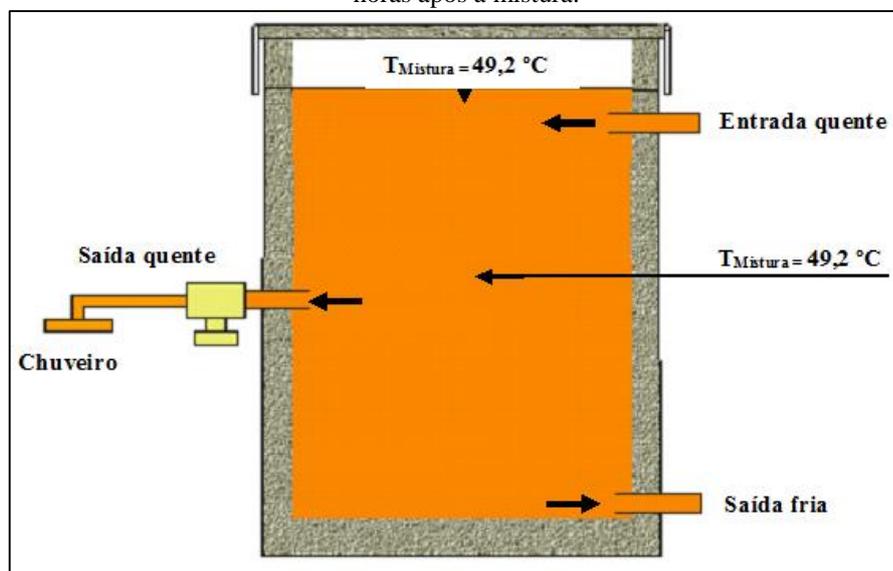
A temperatura média medida na água contida no reservatório térmico alternativo, para os cinco dias testados, sob boas condições solarimétricas, foi praticamente igual a média calculada para os pontos medidos, demonstrando a coerência entre os resultados calculados e medidos no fluido de trabalho do sistema de aquecimento solar alternativo proposto.

A Figura 79 mostra uma representação do reservatório térmico utilizado, com os níveis médios de temperatura nos vários pontos medidos, para os cinco dias de ensaio com essa configuração, após as sete horas de funcionamento. A Figura 80 mostra a temperatura da água no RTA após as 15 horas.

**Figura 79.** Média dos níveis de temperatura dentro reservatório às 15:00 horas.



**Figura 80.** Média geral dos níveis de temperatura dentro reservatório às 15:00 horas após a mistura.



No que diz respeito aos níveis de temperatura medidos em vários pontos do reservatório térmico, percebeu-se que estiveram acima do nível médio exigido para o banho, em torno de 36°C.

A diferença entre o nível de temperatura mais elevado, na parte de superior do reservatório e o menor, na parte de baixa, correspondeu a 10,1%, o que demonstra que quase toda água contida no tambor esteve perto da uniformidade pretendida.

Percentualmente tem-se que a temperatura média da água no ponto inferior do tambor correspondeu a 82,1% em relação temperatura da parte superior do tambor. Se analisar-se a temperatura do ponto médio do reservatório, de onde sai a tomada para banho, tem-se uma relação correspondente a 95,5%.

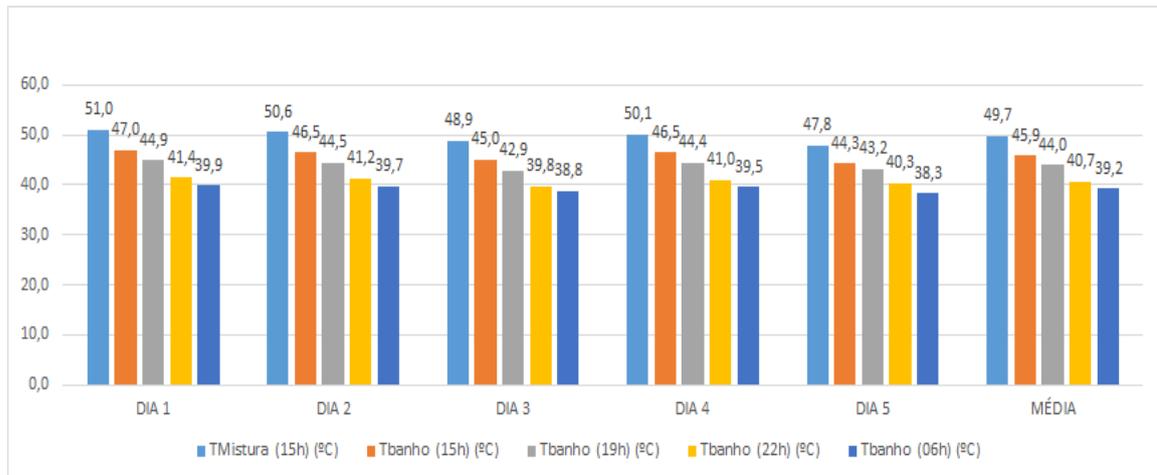
Ressalte-se que esses bons resultados aconteceram para apenas um dia de funcionamento, sob boas condições solarimétricas.

Para avaliar o sistema na sua condição real de funcionamento, procedeu-se à simulação de banhos através da retirada de certo volume de água quente nos seguintes horários: 15:00h, 19:00 h e 22:00 h. e 06:00 h, para os cinco dias de ensaio, utilizando-se um registro com um chuveiro colocado a 1/2 do reservatório a partir da base.

Retirava-se 40 litros de água e em seguida colocava-se a mesma quantidade de água no reservatório, medindo-se a temperatura média da mistura. A Tabela 11 mostra os dados medidos durante os testes de simulação de banho e o gráfico da Fig. 81 o comportamento assumido pelo parâmetro avaliado.

<b>Tabela 11.</b> Resultados dos testes de simulação dos banhos para os cinco dias de ensaio.					
<b>DIAS DE ENSAIO</b>	<b>T<sub>Mistura</sub> (15h) (°C)</b>	<b>T<sub>Banho</sub> (15h) (°C)</b>	<b>T<sub>Banho</sub> (19h) (°C)</b>	<b>T<sub>Banho</sub> (22h) (°C)</b>	<b>T<sub>Banho</sub> (06h) (°C)</b>
DIA 1	51,0	47,0	44,9	41,4	39,9
DIA 2	50,6	46,5	44,5	41,2	39,7
DIA 3	48,9	45,0	42,9	39,8	38,8
DIA 4	50,1	46,5	44,4	41,0	39,5
DIA 5	47,8	44,3	43,2	40,3	38,3
<b>MÉDIA</b>	<b>49,7</b>	<b>45,9</b>	<b>44,0</b>	<b>40,7</b>	<b>39,2</b>

**Figura 81.** Comportamento dos parâmetros da simulação dos banhos para os cinco dias de ensaio.



Para todos os dias ensaiados as temperaturas da mistura permitiram o uso d'água quente para quatro banhos. O último banho, realizado no dia seguinte, aconteceu 15 horas após o final do processo de aquecimento da água.

O nível de temperatura da mistura para o dia de pior desempenho esteve em 2,3 °C acima da temperatura ideal para banho e para o melhor resultado em torno de 4 °C, o que evidenciou o bom desempenho do sistema de aquecimento e sua consequente viabilidade de utilização, uma vez que propiciou o aquecimento da massa d'água contida no reservatório térmico alternativo em um único dia de aquecimento.

Ressalte-se que o volume de 40 litros retirado correspondia a uma temperatura acima da temperatura ideal para banho, principalmente para os dois primeiros banhos. Consequentemente a retirada de água quente seria menor uma vez que não se poderia tomar banho nessa temperatura de água retirada. Ter-se-ia que usar dupla tubulação no banheiro, água quente e água fria, para proceder-se a mistura e ter-se água na temperatura ideal de banho. Isso diminuiria a retirada de água quente do RTA, melhorando a autonomia do sistema de aquecimento solar de água proposto.

#### **4.2. Determinação do Uloss, das taxas de energia absorvidas e perdas pelo coletor e do rendimento térmico do coletor**

O balanço de energia do coletor solar alternativo deu-se após os resultados dos os cinco dias de ensaios.

$$Q_{abs} = \alpha_p \cdot \tau_v \cdot I \cdot A$$

$$Q_{abs} = 0,85 \cdot 0,85 \cdot 779 \cdot 1,85$$

$$Q_{abs} = 1041,23W$$

$$Q_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$$cte = \dot{m} \cdot c_p = 9,4$$

$$Q_u = cte \cdot \Delta T$$

$$Q_u = 9,4 \cdot 14,1$$

$$Q_u = 132,54W$$

$$Q_p = Q_{abs} - Q_u$$

$$Q_p = 1041,23 - 132,54$$

$$Q_p = 908,69W$$

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

$$U_{loss} = \frac{908,69}{1,85 \cdot (56 - 32)}$$

$$U_{loss} = 20,46W / m^2 \cdot K$$

$$\eta_t = \frac{Q_u}{A \cdot I}$$

$$\eta_t = \frac{132,54}{1,85 \cdot 779}$$

$$\eta_t = 9,19\%$$

O coeficiente global de perda térmica foi muito superior ao dos coletores convencionais de mercado, com  $U_{loss}$  entre 6,0 e 12,0 W/m<sup>2</sup>.K, o que demonstrou a sua elevada perda térmica, em função da utilização de uma menor espessura de isolamento térmico, 3,0 cm, ao invés dos 5,0 cm utilizados nos coletores convencionais (SOUZA, 2012).

Como se trata de um coletor solar alternativo, o Uloos encontrado está dentro da margem prevista para esses coletores, geralmente acima de  $20\text{W/m}^2\text{K}$ . Ressalte-se que essa levada perda térmica não inviabilizou a utilização do sistema de aquecimento alternativo proposto, pois como já foi dito foi possível o aquecimento de toda a massa de água do RTA a uma temperatura bem maior que a ideal de banho, em apenas um dia de aquecimento, proporcionando quatro banhos.

Ressalte-se ainda que esse resultado do sistema de aquecimento foi obtido utilizando-se um coletor solar com tubos absorvedores de PVC, com condutividade térmica de  $0,15\text{W/m}^2\text{K}$ , muito inferior à dos tubos de cobre de  $K$  igual a  $300\text{W/m}^2\text{K}$ .

#### 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 12.

<b>Tabela 12.</b> Resultados do teste realizado com o reservatório térmico alternativo proposto.			
<b>TEMPO (Horas)</b>	<b>T água (°C)</b>	<b>T ambiente (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>T média externa tambor (%)</b>
10:00	51,3	30,8	32,9
12:00	51,1	32,0	34,6
14:00	50,4	31,8	33,7
16:00	50,0	28,0	31,4
18:00	49,7	26,0	30,2
20:00	49,3	25,5	28,7
22:00	48,9	25,0	28,5
00:00	48,5	25,0	27,6
02:00	48,0	24,9	27,6
04:00	47,7	25,0	28,3
06:00	47,1	27,0	28,7
08:00	46,7	29,0	31,2
10:00	46,4	31,0	32,4
<b>MÉDIA</b>	<b>48,9</b>	<b>27,8</b>	<b>30,4</b>

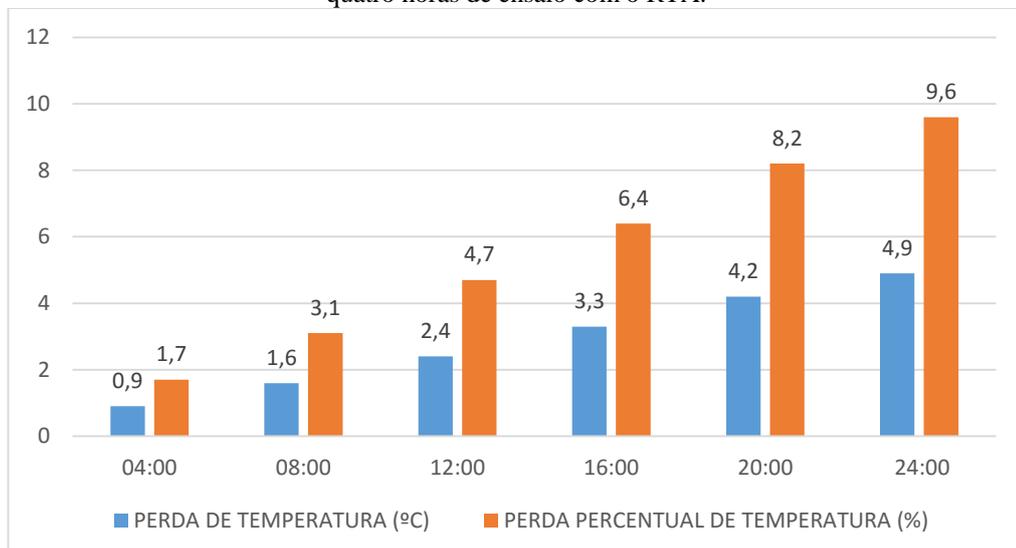
Foram demonstrados a boa eficiência do reservatório térmico alternativo proposto. Houve uma queda de temperatura, durante as 24 horas, correspondente a 4,9°C essa queda de temperatura está dentro da média apontada pela literatura para reservatórios térmicos convencionais, de cobre ou inox, que apresentam valores em torno de 5°C para o nível de temperatura testado. Ressalta-se, ainda, o preço do reservatório alternativo proposto, foi muito menor que os reservatórios convencionais.

Percebeu-se que a temperatura média da superfície externa do reservatório esteve acima da temperatura ambiente em torno de 8,55%, sendo maior para o período noturno. A Tabela 13 mostra a evolução da perda de temperatura da água no interior do RTA a cada quatro horas, e o gráfico da Fig. 82 mostra a Perda percentual de temperatura na massa de água a cada quatro horas, para um período de vinte e quatro horas de ensaio com o RTA.

**Tabela 13.** Perda percentual de temperatura na massa de água a cada quatro horas, para um período de vinte e quatro horas de ensaio com o RTA

<b>TEMPO (HORAS)</b>	<b>PERDA DE TEMPERATURA (°C)</b>	<b>PERDA PERCENTUAL DE TEMPERATURA (%)</b>
04:00	0,9	1,7
08:00	1,6	3,1
12:00	2,4	4,7
16:00	3,3	6,4
20:00	4,2	8,2
24:00	4,9	9,6

**Figura 82.** Perda percentual de temperatura na massa de água a cada quatro horas, para um período de vinte e quatro horas de ensaio com o RTA.



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

#### 4.4. Custo para fabricação e montagem do CSA e do RTA proposto

Para a construção do coletor estudado os principais materiais utilizados foram: chapa em aço galvanizado; placa de EPS de 30mm; tubos de PVC de ½”; joelhos de ½” e cola PVC; vidro transparente de 4mm, etc. O custo de fabricação do coletor solar de grade mista ficou em torno de R\$ 566,11, onde correspondente a 50% do relativo a um coletor solar convencional de mercado. A Tabela 14 mostra a planilha de custo para construção deste coletor.

**Tabela 14.** Custo dos materiais utilizados na montagem do coletor solar alternativo.

<b>MATERIAL</b>	<b>UNID.</b>	<b>QUANT.</b>	<b>CUSTO UNIT. (R\$)</b>	<b>CUSTO TOTAL (R\$)</b>
Chapa em aço galvanizado	Unid.	01	180,00	180,00
Chapa em alumínio	m	1,6	16,00	25,60
Placa de EPS de 30mm	m <sup>2</sup>	2,5	12,00	30,00
Tubos de PVC de Ø ½”	m	36	2,00	72,00
Joelhos de ½” em PVC	Unid.	46	0,37	17,02
T de ½” em PVC	Unid.	22	0,64	14,08
Borracha quadrada de 5 x 15mm	m	06	4,50	27,00
Vidro transparente de 4mm	m <sup>2</sup>	1,85	85,00	157,25
Adesivo plástico para PVC	Unid.	02	6,58	13,16
Esmalte preto fosco	Litro	01	18,00	18,00
Cola silicone grande	Unid.	01	12,00	12,00
<b>TOTAL</b>				<b>566,11</b>

Para a construção do reservatório estudado os principais materiais utilizados foram: chapa em aço galvanizado; tambor de polietileno de 200 litros; resina de poliuretano; resina isoftálica.

O custo de fabricação do reservatório térmico alternativo ficou em torno de R\$ 706,20, apresentando perda térmica comparável à de reservatórios convencionais de mercado, com custo de fabricação 70% menor. A Tabela 15 mostra a planilha de custo para construção deste reservatório (HELIOTEK, 2016).

<b>Tabela 15.</b> Custo dos materiais utilizados na montagem do reservatório térmico alternativo.				
<b>MATERIAL</b>	<b>UNID.</b>	<b>QUANT.</b>	<b>CUSTO UNIT. (R\$)</b>	<b>CUSTO TOTAL (R\$)</b>
Chapa em aço galvanizado	Unid.	01	180,00	180,00
Tambor de polietileno de 200 litros	Unid.	01	75,00	75,00
Resina de poliuretano	Kg	2,5	96,00	240,00
Resina isoftálica	Kg	02	15,00	30,00
Tecido de fibra de vidro	m	02	10,16	20,32
Borracha quadrada de 10 x 10 mm	m	2,5	8,00	20,00
Fechadura de pressão	Unid.	03	12,00	36,00
Esmalte cinza 350 ml	Unid.	01	10,50	10,50
Esmalte preto fosco 900 ml	Unid.	01	18,00	19,50
Adaptador flange em PVC de 1/2"	Unid.	04	6,16	24,64
Registro de 1/2" em PVC	Unid.	01	7,74	7,74
Mangueira revestido com isolante térmico	m	05	8,50	42,50
<b>TOTAL</b>				<b>706,20</b>

O sistema de aquecimento solar estudado mostrou-se economicamente viável quando se compara seu custo de fabricação com os sistemas convencionas de aquecimento solar disponíveis no mercado. Seu custo de fabricação correspondente a R\$ 1.272,31, foi aproximadamente 60% menor (HELIOTEK, 2016).

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com base nos objetivos gerais e específicos definidos para o desenvolvimento dessa dissertação serão apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

### 5.1. Conclusões

1. O sistema solar de aquecimento demonstrou-se viável para o aquecimento residencial de água destinada ao banho, para uma família de quatro pessoas, devendo ter o banheiro dupla tubulação, uma para água fria e outra para água quente;
2. O sistema mostrou-se de fácil fabricação e montagem, podendo esta tecnologia ser repassada para pessoas de baixos níveis sócias e intelectuais;
3. O coletor solar misto estudado foi capaz de aquecer toda a massa de água contida no RTA acima da temperatura ideal de banho em apenas um dia de aquecimento;
4. A autonomia do sistema de aquecimento para um dia de ensaio foi de quatro banhos, com retirada de 40 litros por banho. Ressalte-se que a temperatura da água retirada para os banhos estava sempre bem acima da temperatura ideal de banho, podendo aumentar autonomia do sistema;
5. A perda térmica do coletor solar alternativo misto foi bastante superior a apresentada por coletores convencionais, porém, competitiva com outros modelos de coletores alternativos já estudados no LMHES da UFRN e em relação a outros mostrados pela literatura solar para aquecimento de água residencial;
6. A perda térmica do RTA foi competitiva com a relativa a reservatórios térmicos utilizados em sistemas de aquecimento solares até mesmo para reservatórios convencionais de cobre ou inox. Isso demonstrou a boa capacidade do isolamento térmico utilizado;
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;

## 5.2. Sugestões

1. Para uma maior autonomia do sistema dobrar a área do coletor e estudar seu comportamento principalmente em relação a perda de carga gerada. Neste caso a configuração de grade mais indicada seria a em paralelo;
2. É imprescindível que se instale o sistema em um banheiro, com bóia de alimentação do reservatório térmico e ligação do coletor ao ponto de banho, 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;
3. É necessário se fazer testes por um período mais longo para verificar a sua durabilidade e resistência às intempéries e assim confirmar sua competitividade com coletores disponíveis no mercado.

## 6. REFERÊNCIA

ACERVO CIENTÍFICO, Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (LMHES/UFRN)(2016).

ASTROSOL. Disponível em < [http:// www.astrosol.com.br](http://www.astrosol.com.br)>. Acesso em: 2016.

CARDOSO, L. C., Comparativo de Métodos para Cálculo da Produção Mensal de Energia em Coletores Colares. IV CBENS - Congresso Brasileiro de Energia Solar, São Paulo/SP, 2012.

COSERN. Disponível em < [http:// www.cosern.com.br](http://www.cosern.com.br)>. Acesso em: 2016.

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 Engenharia Mecânica, UFRN, 2007.

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

DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, New York, John & Sons, 757 p.,2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Disponível em <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 2016.

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.

GALVÃO, A. C. P., Obtenção e Caracterização de um Compósito de Poliuretano de Mamona e Pó de Vidros para Aplicações em Isolante Térmicos. Dissertação de Engenharia Mecânica, UFRN, 2014.

GOMES, M. R., Projeto, Construção e Análise de Eficiência Térmica de um Sistema de Aquecimento Solar de Água de Baixo Custo. Dissertação de Engenharia Mecânica, UFRN, 2010.

HELIOTEK. Disponível em < [http:// www.heliotek.com.br](http://www.heliotek.com.br)>. Acesso em: 2016.

INSTITUTO DO PVC. Disponível em < <http://www.institutodopvc.org>>. Acesso em: 24 mai., 2016.

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.

JOSHI, V. S., BOKIL, R. S., NAYAK J. K., Test Standards for Thermosiphon-type Solar Domestic Hot Water System: Review and Experimental Evaluation. Solar Energy, 2005.

KALOGIROU, S., Termal Performance, Economic and Environmental Life Cycle Analysis of Thermosiphon Solar Water Heaters. Solar Energy, 2009.

KRENZINGER, A., Desenvolvimento um Sistema de Ensaios e Comparações de Coletores Solares Para Aquecimento De Água, IV CBENS - Congresso Brasileiro de Energia Solar, São Paulo/SP, 2012.

KIPPER, L.M., CROSSETTI, G.L., BECKER, R.C. Estudo do aproveitamento do resíduo de espuma rígida de poliuretano no isolamento térmico de produtos de refrigeração - na busca da manufatura sustentável. A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia De Produção. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

LIMA, F. A. S., Obtenção e Caracterização de um Compósito de Matriz Cerâmica com Cargas de Resíduos de EPS e Raspa de Pneu para Construção de Casas populares, Dissertação de Engenharia Mecânica, UFRN, 2016.

LOPO, A. B., Análise do Desempenho Térmico de um Sistema de Aquecimento Solar de Baixo Custo. Dissertação de Engenharia Mecânica, UFRN, 2010.

LORENZETTI. Disponível em < <http://www.lorenzetti.com.br> >. Acesso em: 2016.

MOREIRA, J. V. N., Avaliação da influência do ângulo de inclinação no desenvolvimento térmico de um coletor solar de placas planas. VI CBENS – Belo Horizonte/MG, 2016 VI CBENS, belo horizonte, 2016.

MONDIALLE. Disponível em < <http://www.mondialle.com.br>>. Acesso em: 2016.

NEGÓCIO, D. A. R. C., Solar Water Heating System Using Mixed Absorbing Grid COBEM 2015 - Rio de Janeiro/RJ - 2015.

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 LatinoAmericana da ISES, Florianópolis/SC - 2008.

OLIVEIRA, M.C.R. Compósito de poliuretano de mamona e resíduo industrial para isolamento térmica e absorção sonora. Dissertação de Engenharia Mecânica, UFRN, 2010.

REIS, E. P., Análise do Desempenho Térmico de um Sistema de Aquecimento Solar Utilizando Coletor com Superfície Absorvedora em Chapas de PVC. Dissertação de Engenharia Mecânica, UFRN, 2009.

SOCIEDADE DO SOL. Disponível em < <http://www.sociedadedosol.org.br>>. Acesso em: 2016.

SODRÉ D., Construção e Análise de Desempenho de um Sistema de Aquecimento Solar de Água Utilizando Placas de Policarbonato como Superfície Absorvedora. Dissertação de Engenharia Mecânica, UFRN, 2010.

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., Sistema de Aquecimento solar de Água utilizando telha ondulada e tubos PVC, CONEM 2012 – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, São Luiz/ MA - 2012.

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.

TOMÉ, M. C., Análise do impacto do chuveiro elétrico em redes de distribuição no contexto da tarifa horozonal. Dissertação de mestrado na UNICAMP, São Paulo/SP, 2014.

TREIS, F. L., Simulação de sistemas de aquecimento de agua por energia com circulação natural. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/Rio Grande do Sul, 1991.

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

VILAR, W.D. Química e tecnologia dos poliuretanos. 3º ed., Editora Pronor, São Paulo 2007, 400 p.

VLADIMIROV, V. S. et al., New types of light-weight refractory and heat-insulation materials for long-term use at extremely high temperatures. *Glass and Ceramics* 68, 2011, pp. 116-122.