



**UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU**



AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DE UM COLETOR SOLAR TIPO TUBO EVACUADO MODIFICADO

Elson Avallone

BAURU – SP
2013



**UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU**



AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DE UM COLETOR SOLAR TIPO TUBO EVACUADO MODIFICADO

Elson Avallone

Orientador: Prof. Dr. Alcides Padilha

Dissertação apresentada à
Faculdade de Engenharia da
UNESP - Campus de Bauru,
como parte dos requisitos
para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia
Mecânica

**BAURU – SP
2013**

Avallone, Elson.

Avaliação da eficiência térmica de um coletor solar tipo tubo evacuado modificado / Elson Avallone, 2013

77 f.

Orientador: Alcides Padilha

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2013

1. Energia solar. 2. Coletores solares. 3. Tubo evacuado. 4. Eficiência térmica I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ELSON AVALLONE,
DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A)
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.**

Aos 29 dias do mês de julho do ano de 2013, às 14:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA SEÇÃO TÉCNICA DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. ALCIDES PADILHA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. PAULO CESAR MIORALLI do(a) Departamento de Indústria / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP, Prof. Dr. SANTIAGO DEL RIO OLIVEIRA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ELSON AVALLONE, intitulado "AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DE UM COLETOR SOLAR TIPO TUBO EVACUADO MODIFICADO". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. ALCIDES PADILHA

Prof. Dr. PAULO CESAR MIORALLI

Prof. Dr. SANTIAGO DEL RIO OLIVEIRA

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus de Bauru que me acolheu desde a tenra juventude no Colégio Técnico Industrial formando-me em duas faculdades (Tecnologia Mecânica e Engenharia Mecânica), especialização e agora mestrado.

Aos meus grandes mestres, que me ajudaram a crescer em conhecimento: Prof. Dr. Ivan Domenico Valarelli, Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon, Prof. Dr. Celso Luiz da Silva, Prof. Dr. João Cândido Fernandes, Prof. Dr. Paulo José Paupitz Gonçalves, Prof. Dr. Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves e Prof. Dr. Edson Antônio Capello Souza e todos os professores do Departamento de Engenharia Mecânica que sempre estiveram comigo e torceram pelo meu sucesso.

Aos amigos de estudo que foram incansáveis nas aulas, listas de exercícios, trabalhos e atividades, destacando: André Issao Sato, Gilberto Bueno de Oliveira Junior, Alencar Pedroso Filho, Ricardo Cecílio, Cristiano Angélico, Luiz Eduardo Rodrigues Pereira, Marcelo Barbosa e tantos outros.

A todos os funcionários da Faculdade de Engenharia de Bauru que são incansáveis no auxílio aos alunos e professores.

A CAPES pelo apoio financeiro.

AGRADECIMENTO ESPECIAL

Em algumas ocasiões especiais de nossas vidas, Deus precisa agir para que não sucumbamos.

Para isso, Ele escolhe pessoas iluminadas para cruzar nossos caminhos.

Quando reencontrei o Prof. Dr. Alcides Padilha me lembrei dos tempos das aulas de física nos Cursos Brasília. As dificuldades eram diferentes das de hoje, mas a dedicação desse grande mestre sempre foi a mesma.

Professor Padilha: Muito obrigado pelos ensinamentos, paciência e principalmente por ser um grande amigo. Nunca o esqueci e jamais o esquecerei. Que Deus o abençoe grandemente.

Aos meus pais, Emílio Avallone (*in memoriam*) e Eunice de Souza Avallone que me ensinaram os valores da vida e me puseram no caminho do Senhor nosso Deus.

Ao meu Deus, que me deu condições intelectuais e físicas. A Ele rendo louvores.

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha amada esposa Suréia, que tem sido grande companheira, amorosa, incentivadora e dedicada. Sem ela eu não teria conseguido essa titulação.

“A luz e o calor do universo provém do sol e o seu frio e escuridão do afastamento do sol” – Leonardo da Vinci (1452 – 1519)

RESUMO

A necessidade de fontes renováveis de energia, devido às alterações climáticas e, assim, a busca de fontes limpas de energia, justificam o crescente investimento em novos tipos de coletores solares. As pesquisas têm contribuído com essa expansão no âmbito dos coletores solares concentradores, tendo como objetivo principal sua Desempenho. Muitos trabalhos tem sido desenvolvidos utilizando a estratificação térmica do fluido no interior dos tubos e em reservatórios térmicos, assim como, a modelagem analítica para o problema de fluxo de calor.

Baseando-se nas características de operação e em parâmetros de eficiência dos coletores por tubos evacuados convencionais, este trabalho propõe um estudo experimental de aquecimento de água por sistema de captação solar por tubos evacuados modificados em relação a um sistema convencional.

Uma abordagem importante refere-se a separação física dos fluxos de água fria e quente no interior do tubo evacuado. O desempenho do sistema foi analisado a partir de testes experimentais ao ar livre com incidência solar.

O vácuo no sistema estudado proporciona linearidade e constância na sua eficiência, em relação aos coletores solares por placas planas.

Referindo-se a captação de energia do sistema, há um acréscimo de $8,7^{\circ}\text{C}$ na temperatura de saída da água aquecida em relação à sua entrada. O sistema ensaiado com um tubo evacuado produziu 105,78 litros de água aquecida, durante o dia solar disponível.

Por se tratar de um trabalho experimental inédito, há uma grande dificuldade em localizar pesquisas referentes ao mesmo assunto, dificultando, assim, comparações entre os resultados obtidos e de outros trabalhos científicos.

Palavras Chave: Energia Solar, Coletores Solares, Tubo Evacuado, Eficiência Térmica.

ABSTRACT

The need for renewable energy, due to climate change and thus the search for clean energy sources, justify the increased investment in new types of solar collectors. Research has contributed to this expansion within the concentrator solar collectors, with the main objective performance. Many studies have been developed using the thermal stratification of the fluid inside the tubes and in heat reservoirs, as well as the analytic modeling of the problem of heat flow.

Based on the operating characteristics and performance parameters of evacuated tube collectors for conventional, this work proposes an experimental study of heating water by solar collection system for tubes modified compared to a conventional system.

An important approach refers to physically separate the flows of hot and cold water inside the evacuated tube. The system performance was analyzed from experimental tests outdoors in sunlight.

In this study the vacuum provides linearity and constancy in efficiency compared to a flat plate solar collectors.

Referring to energy harvesting system, there is an increase of 8.7°C in the outlet temperature of the heated water compared the entrance. With only one evacuated tube were production of 105.78 liters of heated water during the solar day available.

Because it is a unpublished experimental work, there is great difficulty in locating researches concerning the same subject, thus hampering comparisons between results and other scientific works.

Keywords: Solar Energy, Evacuated Tube, Thermal Performance

SUMÁRIO

NOMENCLATURA	3
LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE FOTOS	6
LISTA DE GRÁFICOS	7
LISTA DE TABELAS	8
1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Histórico	9
1.2. Preocupação da ONU	12
1.3. Ano internacional da energia sustentável	12
1.4. Tubos evacuados	13
1.5. Desenvolvimento dos aquecedores solares por tubos evacuados	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3. OBJETIVOS	21
4. MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1. Equipamentos utilizados	25
4.2. Instalação	30
4.3. Método de medição da radiação solar incidente no tubo evacuado	34
4.3. Exemplo de cálculo	38
5. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	40
5.1. Gráfico de sinal de saída das temperaturas - <i>Sign Express</i> ®	40
5.1.2. Gráficos dos perfis de temperaturas de água quente e fundo do tubo evacuado	43
5.1.3. Gráfico dos perfis de temperatura do ar ambiente e da água aquecida	44
5.1.4. Gráfico de temperatura ambiente e água fria	45
5.1.5. Gráfico das temperaturas da superfície externa de vidro do tubo e da água quente	46
5.1.6. Gráfico de eficiência térmica do sistema	48
5.1.7. Gráfico da taxa de transferência de calor solar incidente e taxa de calor absorvido	50
5.1.8. Gráficos de vazão mássica	51
5.1.9. Gráfico do experimento efetuado no dia todo	53
5.1.10. Produção do sistema	54
6. ANÁLISE TEÓRICA	55
6.1. Comportamento da saída de água fria no fundo do tubo evacuado	57
6.2. Comportamento da saída de água quente do tubo evacuado	58
6.3. Espectro de velocidades na saída do tubo evacuado	59

7.	CONCLUSÕES.....	62
8.	TRABALHOS FUTUROS.....	63
9.	BIBLIOGRAFIA	64

NOMENCLATURA

r	Raio externo do tubo evacuado [m]
A	Área da superfície do lado do quadrado do paralelepípedo do tubo [m ²]
$\dot{Q}_i$	Fluxo de calor solar incidente no local [W/m ²]
$\dot{Q}_{is}$	Fluxo de calor solar incidente superior [W/m ²]
$\dot{Q}_{ii}$	Fluxo de calor solar incidente inferior [W/m ²]
$\dot{Q}_{il}$	Fluxo de calor solar incidente lateral [W/m ²]
$\dot{m}$	Vazão mássica [kg/s]
$\dot{Q}_a$	Fluxo de calor absorvido pela água [W]
$c_{p\text{água}}$	Calor específico da água a pressão constante [J/kg K]
T_q	Temperatura da fonte quente [°C]
T_f	Temperatura da fonte fria [°C]
T_e	Temperatura de entrada de água fria [°C]
T_s	Temperatura de saída do conector [°C]
η	Eficiência térmica [%]
m	Massa [kg]
ρ	Densidade [kg/m ³]
V	Volume [m ³]
t	Instante de tempo na simulação [s] – (Indicação na simulação do CFD)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Raios de Calor de Arquimedes.....	9
Figura 2: Raios de calor de Arquimedes	10
Figura 3: Reservatório de Saussure	10
Figura 4: Dispositivo de Langley	11
Figura 5: Tubo evacuado como descrito por de Speyer em 1965.	14
Figura 6: a) Refletor Difuso (1975); b) Refletor Parabólico Concentrador CPC (1976) (BUDIHardJO, 2005)	14
Figura 7: Tubo em “U” com aleta de cobre instalado no interior do tubo evacuado como descrito por (LIANG <i>ET AL.</i> , 2011).....	18
Figura 8: Instalação de Tubo Central tal como descrito por (KIM e SEO, 2007).....	18
Figura 9: Equipamento de medição utilizando lâmpadas Halógenas (KIM e SEO, 2007)	19
Figura 10: Aquecedor de água doméstico utilizando "Heat Pipe" descrito por (YANG e WANG, 2012)	19
Figura 11: Tipos de superfícies absorvedoras de (THEUNISSEN e BECKMAN, 1985)	20
Figura 12: Tubo evacuado em corte	21
Figura 13: Sistema modificado em corte.....	22
Figura 14: Esquema do modelo modificado de coletor solar evacuado	24
Figura 15: Pontos de medições das temperaturas.....	30
Figura 16: Detalhes dos pontos de medições 1 e 4.....	30
Figura 17: Conector de passagem.....	31
Figura 18: Conector de passagem em corte.....	31
Figura 19: Instalação da válvula de entrada de água fria	32
Figura 20: Tubo inserido até o fundo do tubo evacuado	33
Figura 21: Vista geral do sistema completo	34
Figura 22: Posição dos pontos de medições na superfície do tubo evacuado	35

Figura 23: Lado do quadrado do paralelepípedo (2b), para cada região do tubo circular interno.....	36
Figura 24: Comportamento da água fria na saída do fundo do tubo evacuado	57
Figura 25: Comportamento da velocidade na saída de água quente do tubo evacuado .	58
Figura 26: Recirculação de água na entrada do tubo evacuado.....	59
Figura 27: Espectro de velocidades na saída de água quente do tubo evacuado.....	60
Figura 28: Recirculação de água	60
Figura 29: Perfis de velocidades no interior do tubo evacuado.....	61

LISTA DE FOTOS

Foto 1: Solarímetro.....	25
Foto 2: Anemômetro.....	26
Foto 3: Balança de precisão marca OHAUS	27
Foto 4: Reservatório de água fria para manutenção da pressão constante	28
Foto 5: (a) Imagem térmica do reservatório d'água; (b) Imagem visível gerada pela câmara térmica.....	28
Foto 6: Câmera Térmica Fluke Ti25	29
Foto 7: Isolamento térmico do conector de passagem de água	32
Foto 8: Instalação do tubo evacuado e conector de passagem	33
Foto 9: Localização geográfica do local dos ensaios (22° 21' 04,01" S e 49° 02' 05,98" W)	35
Foto 10: Imagem térmica do tubo de entrada de água fria às 13:37h.....	42
Foto 11: Imagem de luz visível do tubo de entrada de água fria às 13:37h	42
Foto 12: Imagem térmica da temperatura da saída de água quente às 15:05h	45
Foto 13: Imagem de luz visível da saída de água quente às 15:05h.....	45
Foto 14: Imagem térmica do tubo evacuado às 13:37h.....	48
Foto 15: Imagem luz visível 13:37h.....	48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Sinais de saídas dos perfis de temperaturas em função do tempo.....	40
Gráfico 2: Perfis de temperaturas em função do tempo após aplicação de um filtro polinomial sobre os dados do gráfico 2	41
Gráfico 3: Perfis de temperaturas da água fria e da água quente em função do tempo..	42
Gráfico 4: Perfis de Temperaturas de saída da água quente e injeção água fria no fundo do tubo evacuado em função do tempo	43
Gráfico 5: Perfis de temperaturas do ar ambiente e da água quente em função do tempo	45
Gráfico 6: Perfis de temperaturas do ar ambiente e da água fria em função do tempo..	46
Gráfico 7: Perfis de temperaturas da superfície do vidro e da água quente em função do tempo	47
Gráfico 8: Eficiência térmica do sistema em função do tempo	49
Gráfico 9: Eficiência de diversos tipos de coletores solares, segundo (KALOGIROU, 2009).....	49
Gráfico 10: Taxa de transferência de calor solar incidente e fluxo de calor absorvido em função do tempo	51
Gráfico 11: Perdas do sistema – Área entre taxa de calor incidente e a taxa de calor absorvido em função do tempo.....	51
Gráfico 12: Vazão mássica (Vazão inicial: 0,004311 kg/s) em função do tempo.....	53
Gráfico 13: Perfis de vazões mássicas para diversas vazões iniciais em função do tempo	53
Gráfico 14: Perfis de temperaturas em diversos pontos em função do tempo - período diário completo	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características geométricas	25
Tabela 2: Dados coletados no dia 28/11/2012.....	38
Tabela 3: Temperaturas da água, do ambiente, fluxo absorvido pelo sistema, fluxo de calor solar incidente e eficiência do sistema	48

1. INTRODUÇÃO

1.1. Histórico

O aquecedor solar é um sistema capaz de converter energia solar em energia térmica, pelo aquecimento de um fluxo de água, o qual é armazenado em um reservatório, ou seja, como calor sensível ou através de um material de mudança de fase, como calor latente.

O estudo da captação, transformação e armazenamento, da energia solar em energia útil, têm se tornado atualmente um relevante tópico de pesquisa e desenvolvimento. Vários pesquisadores, pensadores e filósofos tentaram sua utilização para o uso diário e até mesmo como máquina de guerra.

Luciano de Samósata, escritor do século II, escreveu que durante o cerco de Siracusa (214-212 AC), o grande cientista Arquimedes destruiu navios inimigos com uma série de espelhos (HEALTH, 2002). O dispositivo é chamado de “Raios de Calor de Arquimedes” ou “Raio Solar de Arquimedes”, Figura 1 e Figura 2, e concentrava a luz solar nos navios, levando-os à temperatura de autoignição. Como os barcos eram de madeira revestida de betume, a autoignição ocorria com facilidade.

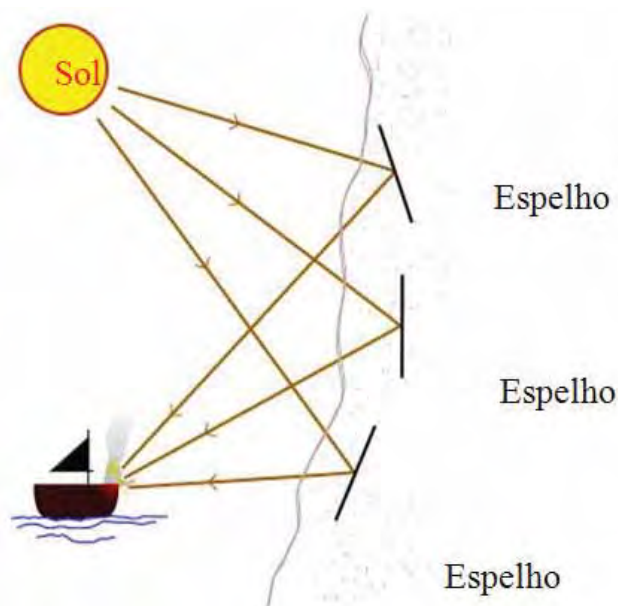


Figura 1: Raios de Calor de Arquimedes

Fonte: fm-fiatlux.blogspot.com.br/2011/07/blog-post.html



Figura 2: Raios de calor de Arquimedes

Fonte: fm-fiatlux.blogspot.com.br/2011/07/blog-post.html

A grande dificuldade na utilização dos sistemas solares sempre foi a captação dessa energia e posterior armazenamento.

Somente no século XVIII, mais precisamente no ano de 1767, o naturalista suíço Horace de Saussure (BUTTI e PERLIN, 2012), iniciou uma série de experimentos com um reservatório d'água revestida com isolamento térmico e coberta por uma superfície envidraçada, pretendendo assim manter o calor em seu interior, como ilustrado na Figura 3.

Já era sabido que um quarto se mantinha mais quente quando os raios solares atravessavam as janelas de vidro, mas até então nenhuma pesquisa havia sido realizada sobre o fenômeno.

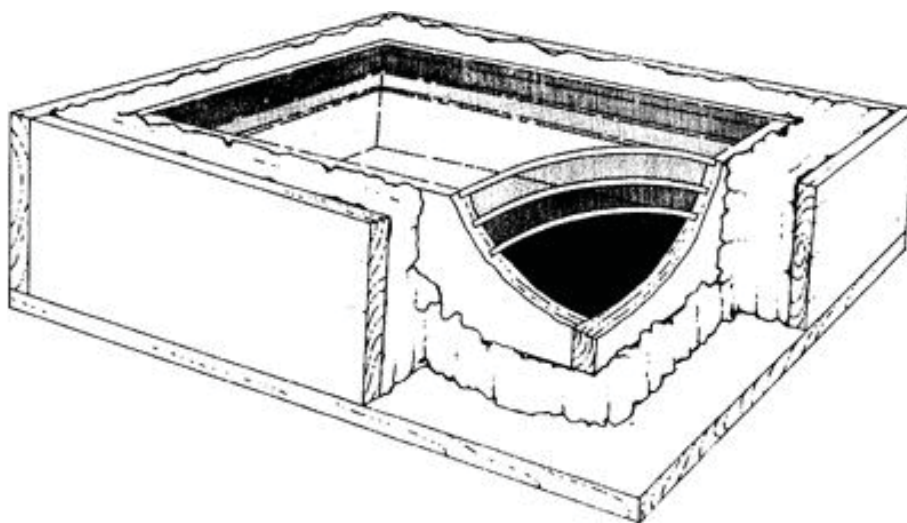


Figura 3: Reservatório de Saussure

Fonte: www.newhome.com.br/HTMLs/Ekohome/Solar/T%C3%A9rmico/Solar.htm

No mesmo ano, Saussure iniciou uma série de experimentos para determinar quão efetivamente o sistema poderia captar a energia do sol. Como não conseguiu chegar a nenhuma conclusão, escreveu: *“Algum dia, alguma utilidade será dada a esse equipamento pequeno, barato e fácil de fabricar”*.

Em 1830 o notável astrônomo inglês Sir John Herschel, em uma expedição ao Cabo da Boa Esperança na África do Sul, construiu um reservatório de madeira e em seu interior, outro reservatório metálico, também coberto de vidro. Com esse equipamento, Herschel conseguiu temperaturas acima de 240°F (115,5°C) e cozinhou ovos e carne. Seu filho chegou a queimar o dedo no equipamento.

Esse experimento intrigou o astrofísico norte americano, Samuel Pierpont Langley que já era fascinado pelo poder solar desde a infância. Em 1882, Langley criou um dispositivo capaz de medir os efeitos observados por Herschel. O dispositivo consistia de um reservatório de madeira termicamente isolado e com uma placa de vidro transparente em sua tampa. No interior desse reservatório instalou-se outro, desta vez de cobre, também com sua tampa coberta por placa de vidro transparente e um termômetro para registrar as variações de temperatura, Figura 4.

Langley então, subiu o Monte Whitney. A medida que subia, a temperatura do solo e ar externo decresciam, chegando ao ponto de congelamento da água. No entanto, no interior do dispositivo, a temperatura chegou ao ponto de ebulição da água.

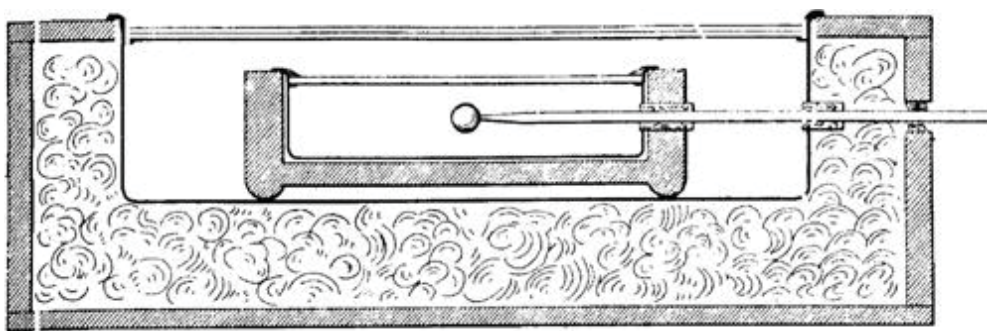


Figura 4: Dispositivo de Langley

Fonte: canivan1.blogspot.com.br/2009/12/hot-box.html

Os coletores solares concentradores foram apresentados pela primeira vez no *Simpósio sobre Fornos Solares de 1957*. Nesse simpósio, foram feitas comparações com os coletores de placa plana chegando a conclusão que os coletores convencionais

são menos eficientes que os concentradores. Desse trabalho foi escrito um livro (LAZNO, 1965) - (DUFFIE e BECKMAN, 1980).

No livro de Duffie e Beckman (1980), foram mostrados alguns tubos cilíndricos absorvedores e notada pouca perda da eficiência pela utilização do vácuo como isolante térmico. Estão presentes, no mesmo trabalho, os cálculos ópticos para diversos tipos de concentradores como planos, tubos evacuados, parabólicos para utilização em fornos e painéis solares.

1.2. Preocupação da ONU

A preocupação com os efeitos das mudanças climáticas levou a ONU a criar o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) - com o apoio do Programa das Nações Unidas (UNEP) e Organização Meteorológica Mundial (OMM) – para buscar e avaliar as pesquisas relacionadas à mudanças no clima. Desde 1990, a organização concluiu o primeiro relatório, que abordou o fato de que as atividades humanas estão contribuindo para o aquecimento global através da emissão de gases de efeito estufa (especialmente o dióxido de carbono que vem da queima de combustíveis fósseis). Outros relatórios seguiram o anterior e procuraram tratar a influência que as mudanças no clima global teria sobre nossas vidas. Também procuraram abordar temas relacionados a matrizes energéticas alternativas, analisando as principais fontes de energia, seus custos, benefícios e possíveis ações que permitam a sua aplicação de forma competitiva. Neste campo, a Energia Solar e suas várias aplicações estão incluídos.

Quanto à energia solar, seu principal uso é de aquecimento de água para uso doméstico, através de equipamentos denominados coletores solares. Tem baixo impacto ambiental em comparação aos combustíveis fósseis, e influenciam as áreas econômicas e sociais, pois seu uso permitiria uma redução considerável no consumo de energia em grande escala podendo reduzir a carga sobre matrizes energéticas convencionais pesquisadas por (SIMS ET AL., 2007).

1.3. Ano internacional da energia sustentável

O ano de 2012 foi eleito pela UNESCO como *Ano Internacional da Energia Sustentável para Todos* (UNESCO e DINIZ ALVES, 2012), visando impulsionar e conscientizar as questões energéticas, incluindo os serviços modernos de energia para

todos, gerando disponibilidade e eficiência energéticas e metas para todos os países de um desenvolvimento sustentável. Nessa convenção, o secretário geral das Nações Unidas criou o Grupo Consultivo para Energia e Mudanças Climáticas para aconselhá-lo sobre as dimensões relacionadas com o tema e a integração das energias renováveis ao cotidiano de todos os povos.

A conferência internacional Rio+20 elaborou uma carta (GRUPO GT, 2012) onde um de seus tópicos referente a Propostas para os Governos, em seu item “V”, menciona a construção de cidades sustentáveis, incluindo o uso racional da energia controlado pelo governo.

1.4. Tubos evacuados

Os tubos evacuados são dispositivos com dois tubos concêntricos, fechados e selados em uma extremidade. Na outra extremidade, os dois tubos concêntricos tem suas bordas seladas com o próprio vidro de sua construção e o tubo interno é aberto para que o fluido possa circular livremente em seu interior. Entre o tubo interno e o externo é produzido vácuo, o qual é o responsável pelo “efeito serra” e isolamento térmico do sistema.

1.5. Desenvolvimento dos aquecedores solares por tubos evacuados

A utilização de tubos evacuados como coletores solares foi proposta inicialmente por Speyer em 1965, Figura 5. Speyer relatou um teste de eficiência de um protótipo de coletor solar evacuado e esboçou uma análise de custos do processo de fabricação. O desenho proposto por ele consistia de um tubo de parede simples fixado a um tubo interno de aço, com as extremidades fechadas, sendo produzido vácuo entre as paredes interna do tubo externo (de vidro) e externa do tubo interno (de aço). A superfície externa do tubo de aço, que está em contato com o vácuo, foi enegrecida. Uma das extremidades do equipamento era fechada e a outra aberta para a entrada e saída de água. A circulação da água acontecia internamente ao tubo de aço.

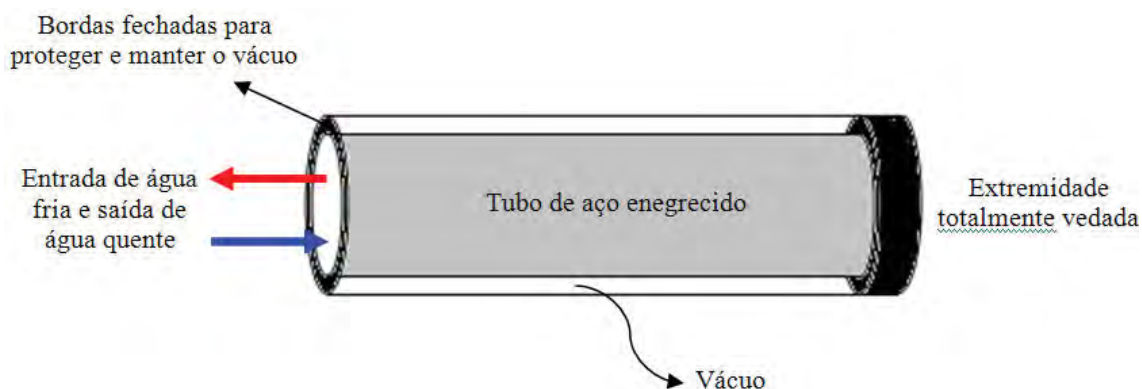


Figura 5: Tubo evacuado como descrito por de Speyer em 1965.

O vácuo proporciona uma isolação térmica de boa eficiência uma vez que os raios solares incidentes, ao passarem pelo vidro, encontram uma superfície transparente. Quando chegam à superfície externa do tubo de aço, uma parte é absorvida pelo material enegrecido e transferido ao líquido interno na forma de calor sensível e outra parte é refletida com comprimento de onda diferente do incidente. Ao chegar à superfície interna do tubo de vidro, este passa a não ser mais transparente para o comprimento de onda refletido pela superfície enegrecida sendo novamente refletido para o tubo de aço e o processo se repete até a absorção total da energia solar incidente.

Em 1975, Winston e Hinterberger propuseram um conjunto simples de espelhos refletores proporcionando a projeção dos raios solares na região inferior do tubo evacuado, chamado de refletor difuso, Figura 6. No ano seguinte Rabl construiu um sistema de espelhos parabólicos que concentravam os raios solares na superfície inferior do tubo evacuado, chamado Concentrador Parabólico Composto (CPC), Figura 6.

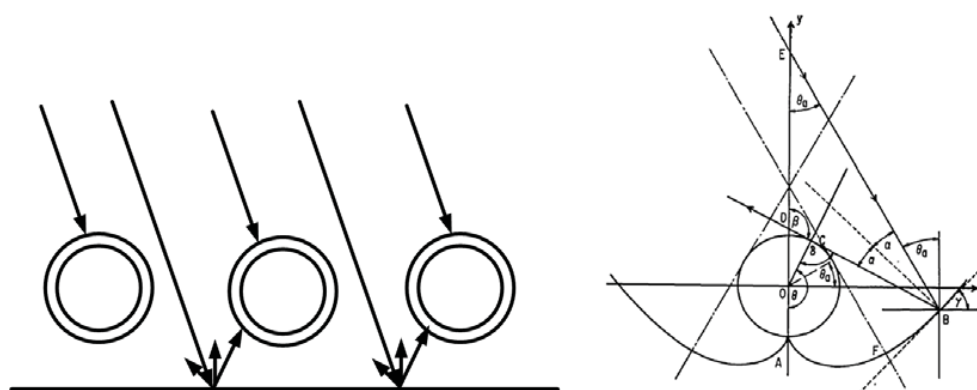


Figura 6: a) Refletor Difuso (1975); b) Refletor Parabólico Concentrador CPC (1976) (BUDIHardJO, 2005)

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Sato, Scalon e Padilha (2011), a utilização de coletores solares – seja para aquecimento de água, produção de energia elétrica ou resfriamento e aquecimento de ambientes – apresenta uma forte expansão em função de variadas razões. As principais são que as fontes de energias renováveis possuem baixo impacto ambiental e a redução de custo que estes sistemas vêm sofrendo. A pesquisa neste campo tem acompanhado tal expansão e que o coletor solar com tubos evacuados destaca-se como um importante foco de estudos. Projetos deste tipo caracterizam-se pelo seu peculiar processo de fabricação e a sua reduzida perda térmica para o ambiente, aumentando a sua eficiência. Quanto à análise fluido-térmica deste equipamento, devem ser considerados os conceitos inerentes a todos os coletores, como os mecanismos de radiação solar, convecção natural, condução e os perfis de velocidades e temperaturas ao longo do sistema. Contudo, a perda por convecção para o meio nestes equipamentos é reduzida em decorrência do vácuo presente no tubo absorvedor e, embora este tipo de aquecedor seja capaz de operar por termosifão, a mistura dos escoamentos ascendente e descendente no interior dos tubos pode prejudicar o desempenho do coletor solar. Com isto, diversos estudos foram publicados para obter a representação da estratificação do fluido no interior dos tubos e do reservatório de armazenamento de água quente, assim como para a modelagem analítica do problema de fluxo de calor.

Cabanillas, Estrada e Avila (1995), em sua investigação, a radiação solar incidente sobre coletor tubular apresenta maior dificuldade na sua quantificação que o coletor solar de placa plana. Devido à geometria do cilindro, a radiação solar incidente torna-se função do ângulo de incidência e hora solar. Com base em resultados experimentais característicos, a distribuição de radiação foi obtida e analisada por Shah e Furbo (2004), que estudaram um protótipo de um coletor de tubo evacuado, instalado na vertical, permitindo a incidência de radiação solar em toda superfície cilíndrica do tubo. O sistema foi baseado em circulação forçada no interior do tubo e um modelo numérico foi desenvolvido para simular o desempenho do sistema térmico.

Budihardjo e Morrison (2009) analisaram um tubo coletor para diversas variáveis, tais como ângulo de inclinação, características de geometria e distribuição da radiação sobre o tubo. Dados de perfis de temperaturas e vazão d'água foram coletados

durante os testes experimentais e apresentaram boa concordância com os resultados da simulação numérica também desenvolvida neste estudo.

Shah e Furbo (2004), efetuaram uma análise da captação de radiação solar em todas as direções, para um protótipo de coletor com tubos evacuados instalados verticalmente. Ensaios experimentais foram realizados em duas localidades e valores ótimos de distâncias entre tubos e ângulo de azimuth foram obtidos; por fim, desenvolveram um modelo teórico para o cálculo do desempenho deste coletor.

Shah e Furbo (2007), realizaram simulações numéricas em coletores com tubos evacuados, sendo estes dispostos horizontalmente e o coletor sujeito a um fluxo forçado de água em seu interior. O desenvolvimento dos escoamentos internos foi investigado considerando que, o fluxo imposto sobre o sistema não afetava diretamente o interior dos tubos e a variação de comprimento de tubo e a vazão imposta no sistema, possibilitaram uma análise quanto ao efeito destes parâmetros sobre a eficiência do coletor.

A partir de dados construtivos e referentes a parâmetros de influência sobre a transferência de calor nestes sistemas de captação com isolamento a vácuo, El-Nashar (2009) avalia o efeito do depósito de poeira sobre a eficiência de tubos evacuados, para isto foi realizado um modelo matemático para simular o acúmulo de poeira sobre o sistema.

O efeito do grau de vácuo no desempenho de um sistema de tubo de vácuo sem vidro foi estudado por Yan Gao *et al.* (2010); um modelo analítico permitiu um melhor entendimento do processo. A análise do coletor solar de tubos evacuados com abertura única e montados sobre um sistema reflexivo possibilitou a concentração da radiação difusa sobre o coletor.

Um estudo foi desenvolvido por Budihardjo e Morrison (2009), por meio de modelo numérico e aparato experimental, sendo também estudado, o efeito da variação da distribuição do fluxo de calor ao longo da circunferência do tubo sobre o escoamento interno.

Através de um modelo matemático desenvolvido por Li e Wang (2006), foi avaliado a transferência de calor presente em um coletor de tubos evacuados com circulação forçada; considerando que o fluxo de água pelo cabeçote de circulação não interfere na convecção natural que se desenvolve dentro dos tubos. O modelo foi validado perante metodologia experimental. Outras aplicações para tubos evacuados também foram estudadas, onde analisaram o processo de transferência de calor em um sistema de refrigeração por adsorção, dotado de tubos evacuados e verificaram modificações que garantissem viabilidade econômica ao processo.

Estudos comparativos entre sistemas de coletores solares também foram realizados através de modelagem numérica e abordagem prática.

Em 2011 os pesquisadores Liang *et al.* (2011) inseriram um tubo de cobre em forma de “U” com uma aleta do mesmo material que circunda o interior de um concentrador solar por tubo evacuado comercial. Por este tubo metálico foi criada uma circulação de água. Ao passar pelo tubo em “U”, a água recebe o calor proveniente da incidência solar na área externa do tubo evacuado e, o transfere para o líquido no interior do tubo de cobre, Figura 7. Entre o tubo de vidro externo e o tubo interno há vácuo. Na região interna do tubo, onde a tubulação em “U” está instalada, há uma circulação de ar que recebe o calor da superfície absorvedora de vidro (**“Absorber tube”**) e o transfere para a aleta de cobre. Ao sair pela outra extremidade do tubo de cobre a água está aquecida. Com este sistema, foi conseguida uma elevação de 12% na eficiência em comparação com o tubo evacuado convencional.

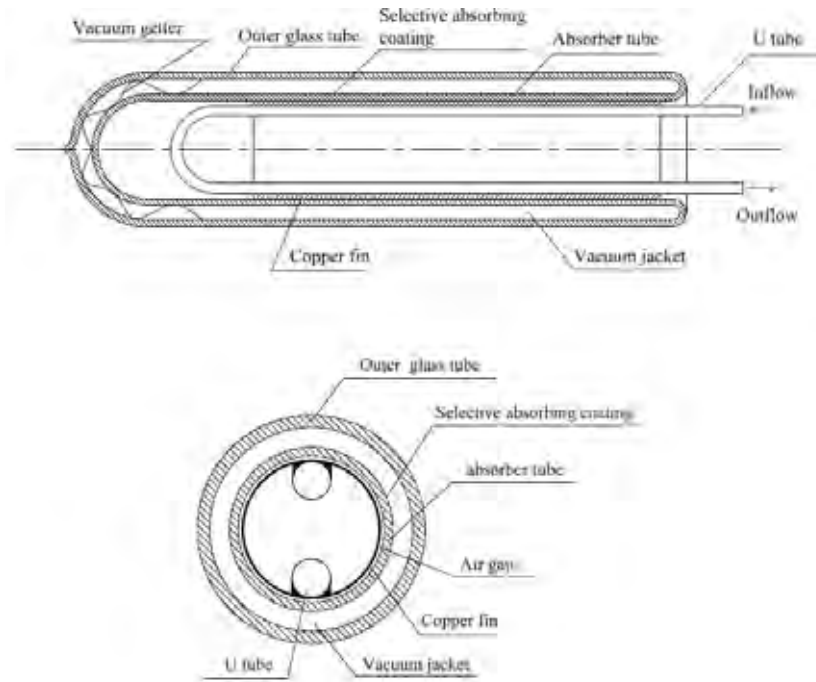


Figura 7: Tubo em “U” com aleta de cobre instalado no interior do tubo evacuado como descrito por (LIANG ET AL., 2011)

Estudos foram realizados na Coreia, com diversos tipos de instalações de tubos utilizando ar como fluido de trabalho. Uma dessas instalações foi a inserção de um único tubo central Figura 8 pelo qual o ar é bombeado para o fundo do tubo evacuado, Kim e Seo (2007). Para simular a luz solar, foram instaladas 20 lâmpadas halógenas de 150W cada uma, gerando um aumento de temperatura de $2,9^{\circ}\text{C}$ resultando em uma eficiência de 10,1%, com um ângulo de incidência de 0° , Figura 9.

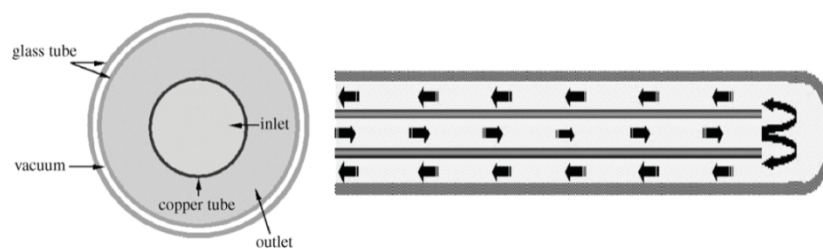


Figura 8: Instalação de Tubo Central tal como descrito por (KIM e SEO, 2007)

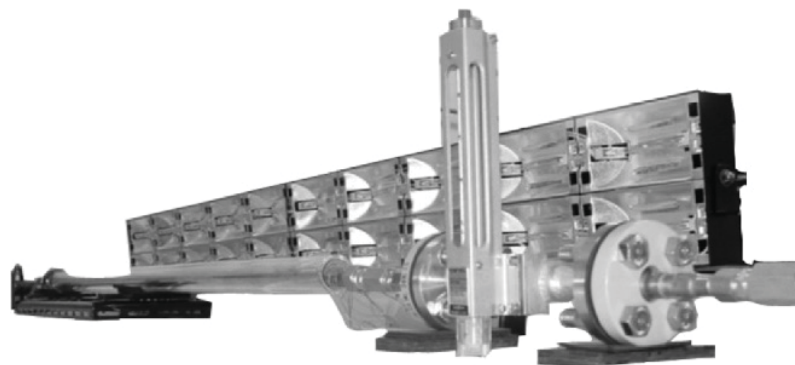


Figura 9: Equipamento de medição utilizando lâmpadas Halógenas (KIM e SEO, 2007)

Em 2012, Yang e Wang (2012) realizaram uma análise experimental do desempenho de coletores solares através da inserção de aletas simples. Nesse trabalho foram realizadas medidas de temperatura do ar ambiente e na seção interna do coletor solar plano aletado atingindo um aumento de 14,5% na eficiência térmica.

Em 2001, um sistema de aquecimento de água doméstico tipo tubo de calor (Heat Pipe) foi estudado por Mathioulakis e Belessiotis (2002) que consistia de um coletor de placa plana com um tanque de armazenamento. A transferência de calor para o tanque é feita pelo processo de ebulição no evaporador. Este evaporador é constituído por tubos de um coletor comum com aletas soldadas ao conjunto, conforme Figura 10.

Foram medidas as temperaturas, tanto no evaporador quando na entrada de água fria e saída de água quente utilizando termopares. O sistema atingiu uma eficiência de 60%.

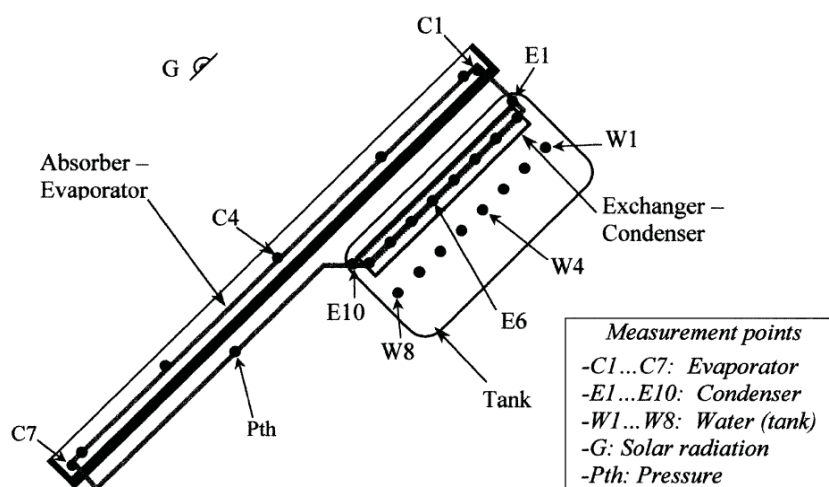


Figura 10: Aquecedor de água doméstico utilizando "Heat Pipe" descrito por (YANG e WANG, 2012)

Através de um estudo sobre a superfície absorvedora interna dos coletores solares com tubos evacuados, Theunissen e Beckman (1985) analisaram a melhor área de absorção térmica interna e a capacidade do vidro em fornecer um foco à superfície absorvedora. Nessa análise, foram estudados dois tipos de superfícies: placa plana e cilíndrica, Figura 11. Os resultados desse experimento foram obtidos com um ângulo de incidência de 60° e azimuth de 26° , para a direção eficaz do feixe de radiação difusa.

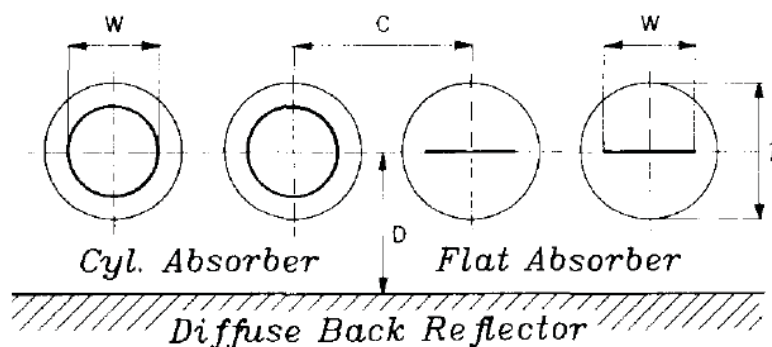


Figura 11: Tipos de superfícies absorvedoras de (THEUNISSEN e BECKMAN, 1985)

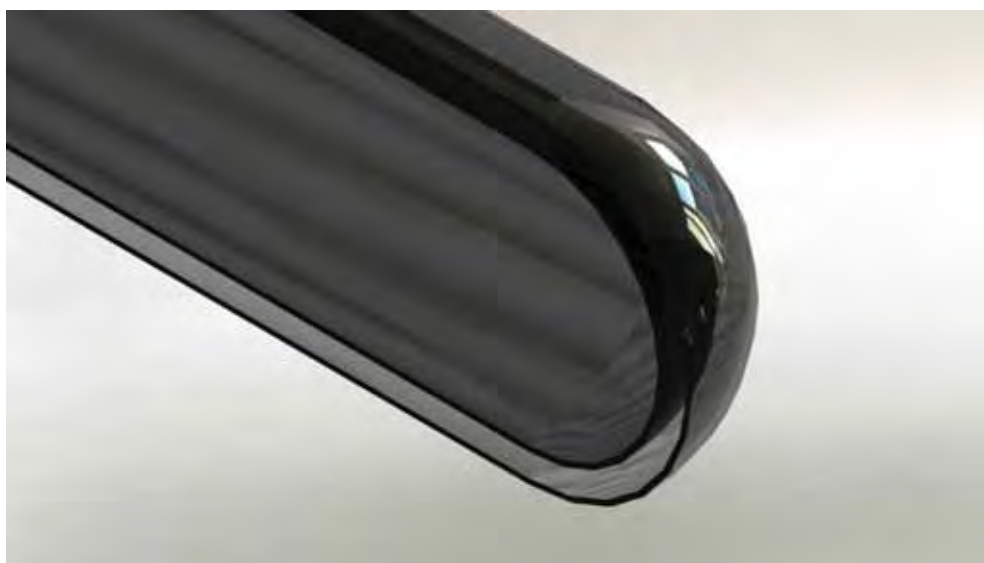
Para melhor aproveitar a radiação solar incidente nos coletores solares, Kalogirou (2009), assim como Duffie e Beckman (1980) propuseram em seus livros, vários estudos de inclinação para os coletores solares. Nesses trabalhos, foram estudadas as eficiências de vários coletores solares e os procedimentos de cálculos para a melhor inclinação solar.

Como método de extração de calor Budihardjo (2005) considerou várias possibilidades, que normalmente para a relação comprimento-diâmetro do tubo é da ordem de 50. Esses métodos são:

- **Tubo de aquecimento:** que consiste de um metal absorvedor montado em um simples sistema de tubos evacuados;
- **Fluxo através do absorvedor:** onde um único tubo central é montado no tubo evacuado por meio de um selo no vidro. O tubo central é responsável por enviar o calor removido para a base do tubo absorvedor;
- **Todos os Tubos de Vidro:** Há um tubo evacuado com a superfície de absorção solar voltada para dentro; Coletor de Armazenamento Integrado: Tubos evacuados com diâmetro superior a 100mm.

3. OBJETIVOS

Do exposto, o objetivo principal deste trabalho é o estudo experimental de um coletor solar, de tubos de vidro concêntricos, evacuado e modificado, avaliando-se a quantidade de calor absorvido e a eficiência do sistema em função da distribuição do fluxo de calor e intensidade de radiação solar nos diferentes horários do dia. O volume entre a superfície interna do tubo de vidro externo e a superfície externa do tubo vidro interno é evacuado, Figura 12.



Figura

12: Tubo evacuado em corte

A proposta de modificação do sistema convencional de coletor por tubos evacuados refere-se a separação física dos fluxos de água fria que entra e quente que sai do interior do tubo evacuado, evitando assim, a mistura entre elas. A referida modificação consiste em introduzir um terceiro tubo de material isolante termicamente, no interior do tubo de vidro interno para injeção de água fria no sistema. O aquecimento e a saída de água quente são feitos na região entre a superfície interna do tubo de vidro interno e a superfície externa do tubo de material isolante. A separação física das correntes de água fria e quente em escoamento em contra corrente, produz uma melhor estratificação e aumenta o desempenho térmico quando comparado ao modelo convencional, Figura 13.

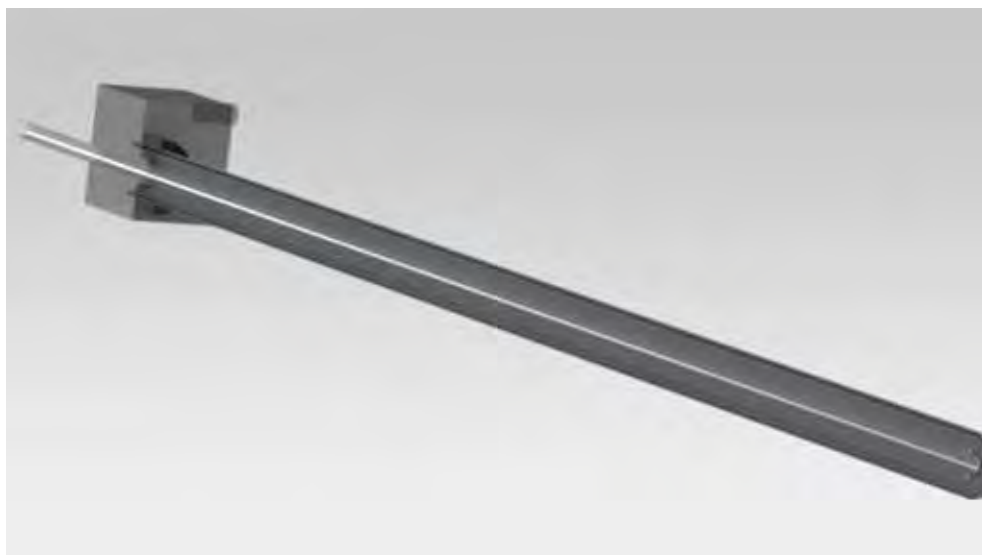


Figura 13: Sistema modificado em corte

Baseando-se nas características de operação e em parâmetros de desempenho dos coletores de tubos evacuados convencionais, este trabalho propõe um estudo experimental de aquecimento de água utilizando sistema de captação solar por tubos evacuados modificado e comparados ao sistema convencional.

No caso proposto nesse estudo, do tubo evacuado modificado, tem-se a separação térmica da água (devido à diferença de densidade) no interior do tubo em três regiões: uma de menor temperatura no fundo, uma de maior temperatura no topo e uma intermediária entre as duas primeiras. Para o sistema convencional, tanto pela Primeira como pela Segunda Lei da Termodinâmica tem-se a mesma eficiência, ou seja, sem a formação de estratificação térmica. No sistema modificado, devido à formação da estratificação térmica, a eficiência térmica pela Segunda Lei é maior que a eficiência pela Primeira Lei, já que a temperatura de saída da água aquecida no sistema modificado é maior que no sistema convencional. Assim, conclui-se que a eficiência do sistema modificado é maior que o sistema convencional, pela Segunda Lei da Termodinâmica.

Nesse trabalho apresenta-se também uma análise qualitativa do estudo experimental desenvolvido utilizando uma ferramenta computacional auxiliar – neste caso, a aplicação do software *CFD - Computacional Fluid Dynamics* (Fluido Dinâmica Computacional). De posse deste modelo implementado, pretende-se realizar uma

simulação numérica avaliando o comportamento do fluido no interior deste coletor solar e possíveis melhorias a serem aplicadas no modelo.

O desempenho do sistema proposto será obtido a partir dos dados experimentais realizados ao ar livre com incidência solar.

Neste estudo, devido a modificação do sistema, ou seja, instalação do tubo para injeção de água fria no fundo do tubo interno de vidro, obteve-se melhoria da estratificação térmica do líquido (separação térmica entre os líquidos quente e frio) em escoamento, busca-se maior desempenho térmico do coletor modificado, quando comparado ao modelo de coletor convencional.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema de coletor Solar modificado consiste de um tubo de aço e de material isolado (CPVC) fixado concentricamente ao tubo interno de vidro. O objetivo dessa modificação é injetar água fria no fundo do tubo, na seção não evacuada, evitando assim, o contato direto entre os escoamentos em contra correntes de água quente que sai do sistema e fria que entra. A separação física das correntes de água a diferentes temperaturas, melhora a estratificação térmica e pode aumentar a eficiência do referido sistema quando comparado ao sistema convencional.

O Tubo evacuado foi conectado a um tanque intermediário sem a finalidade de armazenamento, mas somente de um reservatório de passagem entre o tubo evacuado e o tanque de armazenamento de água quente. Nesse estudo, o volume de água quente no tanque de armazenamento não foi analisado e assim, a água aquecida no sistema foi descartada, uma vez que, foi medida a vazão mássica da água aquecida em função do tempo. O sistema é esquematizado na Figura 14.

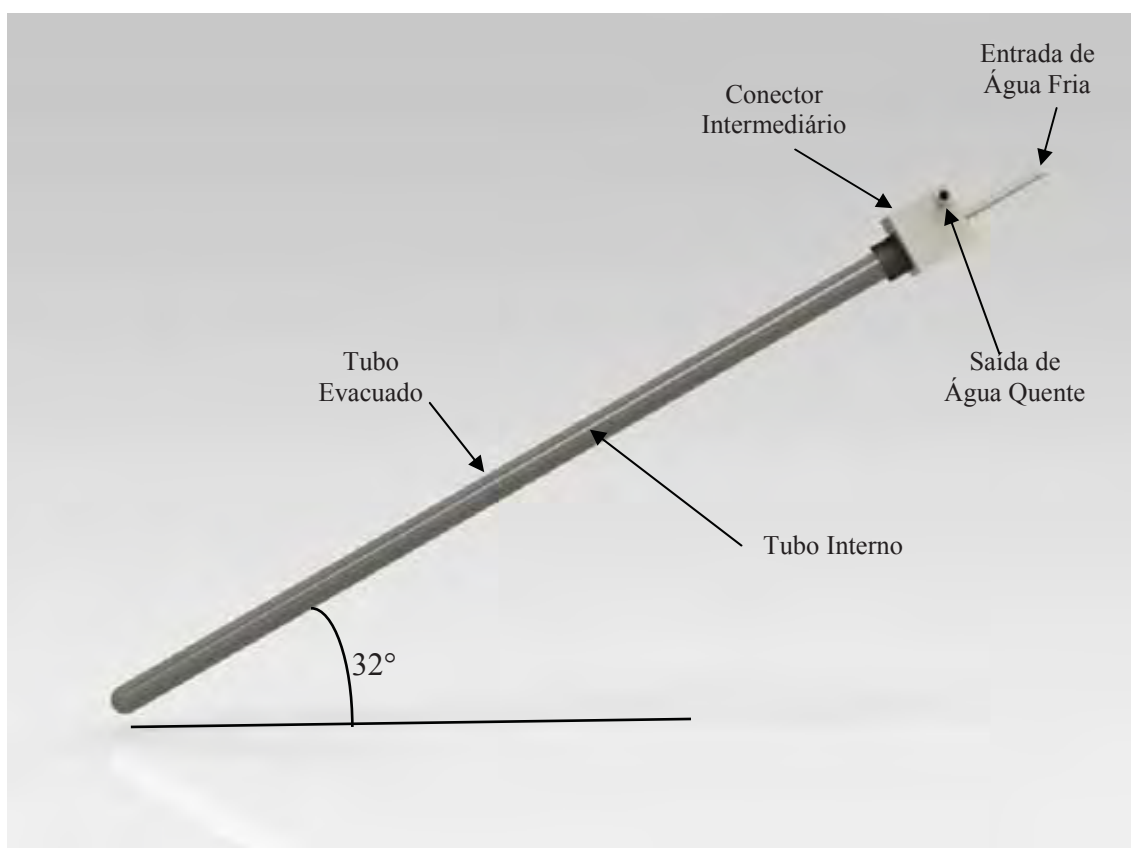


Figura 14: Esquema do modelo modificado de coletor solar evacuado

As características geométricas dos tubos estão indicadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características geométricas	
Tubo de Vidro Evacuado	
Diâmetro Externo	57 mm
Diâmetro Interno	45 mm
Comprimento	1800 mm
Conector de Passagem	
Dimensões	127x127x200 mm
Tubo de Aço e CPVC	
Diâmetro Externo	19 mm
Comprimento	2000 mm

4.1. Equipamentos utilizados

Para medida da potência solar incidente foi utilizado um solarímetro da marca TES, Modelo 1333 com resolução de $0,1 \text{ W/m}^2$ e de intensidade máxima de 2000 W/m^2 , conforme Foto 1, que mede a radiação direta.



Foto 1: Solarímetro

Em conjunto com o solarímetro, foi utilizado um medidor de velocidade do ar local (anemômetro) da marca AirFlow modelo LCA 6000 com faixa de leitura de 0,25 a 30m/s, conforme Foto 2.



Foto 2: Anemômetro

O controle da vazão volumétrica da água foi feito através de um Becker graduado em mililitros (ml) e o tempo de escoamento medido através de um cronômetro. Uma válvula de gás foi utilizada para variação e controle da vazão.

Também foi medida a vazão mássica da água ($\dot{m}$) em kg/s através de uma balança de precisão de 10^{-2} gramas da marca OHAUS Modelo Adventurer Pro, apresentada na Foto 3. Essa medida foi realizada a cada intervalo de 30 minutos de ensaio.



Foto 3: Balança de precisão marca OHAUS

As temperaturas foram medidas utilizando termopares do tipo “T” (Cobre-Constantan) 2x24 AWG com isolamento de PVC, calibrados de acordo com as normas internacionais de medida e calibração. Os termopares foram conectados a uma ponte eletrônica da National Instruments NIDAC® modelo NI 9213 de 16 canais para entradas de termopares e o registro dos dados de temperatura pelo software *Sign Express*®.

A partir das medidas de temperaturas captadas, um gráfico foi gerado mostrando o comportamento das temperaturas durante todo o experimento.

O fluxo de água fria é controlado por uma válvula de gás e a pressão hidrostática de entrada foi mantida constante por um pequeno reservatório instalado acima da entrada de água fria no sistema, como Foto 4. O fluxo mássico é função da intensidade da radiação solar incidente no tubo evacuado e as vazões mássicas foram medidas a cada intervalo de 5 minutos, juntamente com a velocidade do ar e radiação solar. As temperaturas de saída d’água foram medidas a cada intervalo de 5 minutos pelo sistema de captação de dados NIDAC e registrados pelo software *Sign Express*®.



Foto 4: Reservatório de água fria para manutenção da pressão constante

A Foto 5 mostra a imagem térmica do reservatório de nível constante com as temperaturas da superfície da caixa e da tubulação de saída. Esta imagem foi feita às 13:41h no dia 28/11/2012 com o auxílio de uma câmera térmica da marca Fluke modelo Ti-25, número de série Ti25-10090086, lente de 20mm, faixa de calibração -25°C a 125°C, conforme Foto 6.

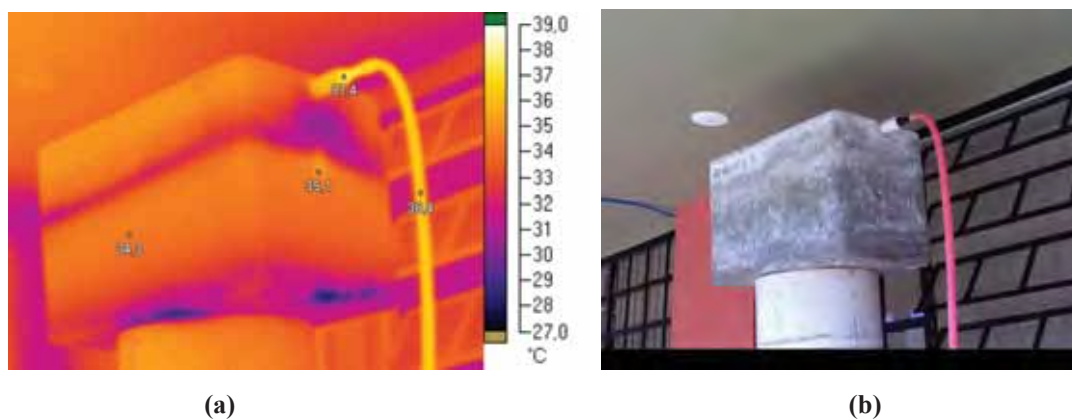


Foto 5: (a) Imagem térmica do reservatório d'água; (b) Imagem visível gerada pela câmera térmica



Foto 6: Câmera Térmica Fluke Ti25

As temperaturas foram medidas nos seguintes pontos:

Ponto 1: Saída de água fria no fundo do tubo evacuado pelo tubo inserido no sistema;

Ponto 2: Saída de água quente;

Ponto 3: Entrada de água fria;

Ponto 4: Superfície externa do tubo de vidro evacuado, em contato com o ar atmosférico;

Ponto 5: Ar ambiente;

Os termopares foram instalados na entrada de água fria, saída de água quente, no ar ambiente e na superfície do vidro externo do tubo evacuado para medidas das respectivas temperaturas, conforme ilustrado na Figura 15 e Figura 16.

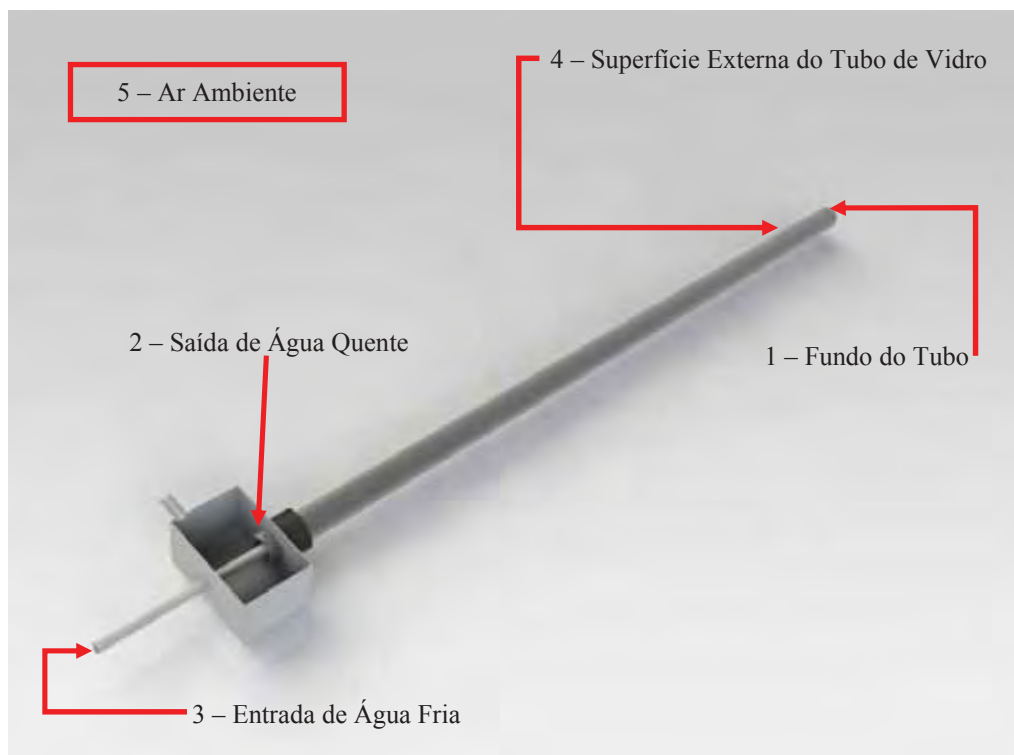


Figura 15: Pontos de medições das temperaturas

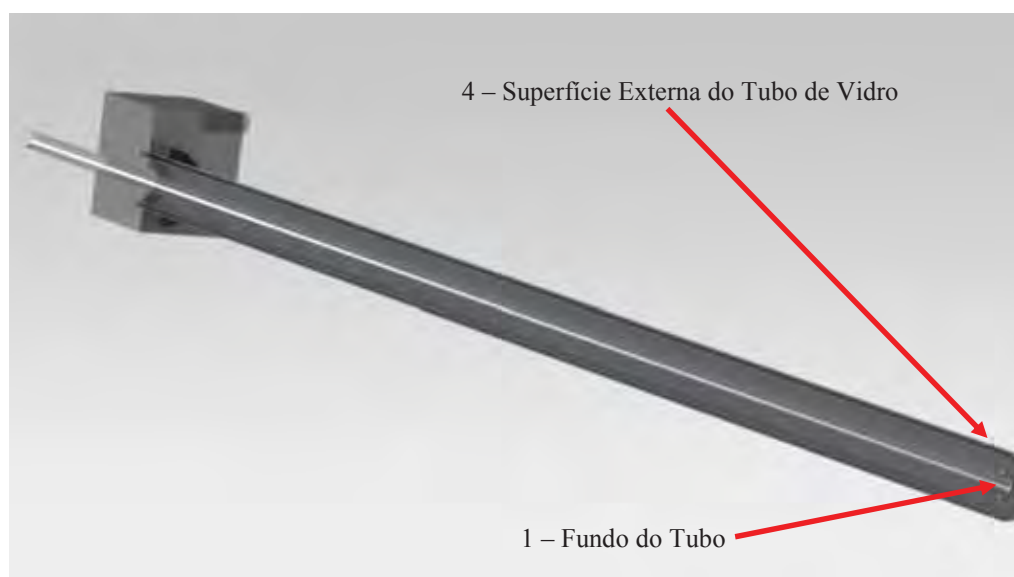


Figura 16: Detalhes dos pontos de medições 1 e 4

4.2. Instalação

O tubo evacuado é fixado na conexão de passagem sendo suas dimensões visualizadas na Figura 17 e Figura 18. Esse conector foi isolado termicamente com manta térmica e papel alumínio, evitando assim a incidência de radiação, o que poderia prejudicar os resultados do experimento, Foto 7.

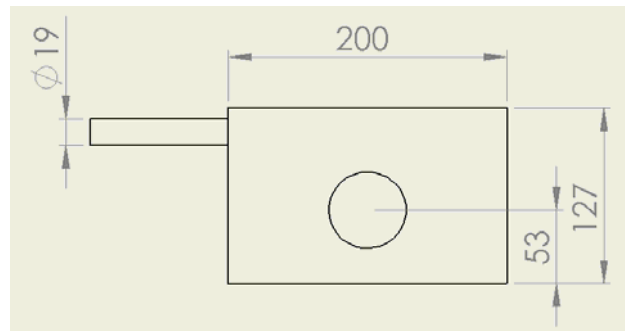


Figura 17: Conector de passagem

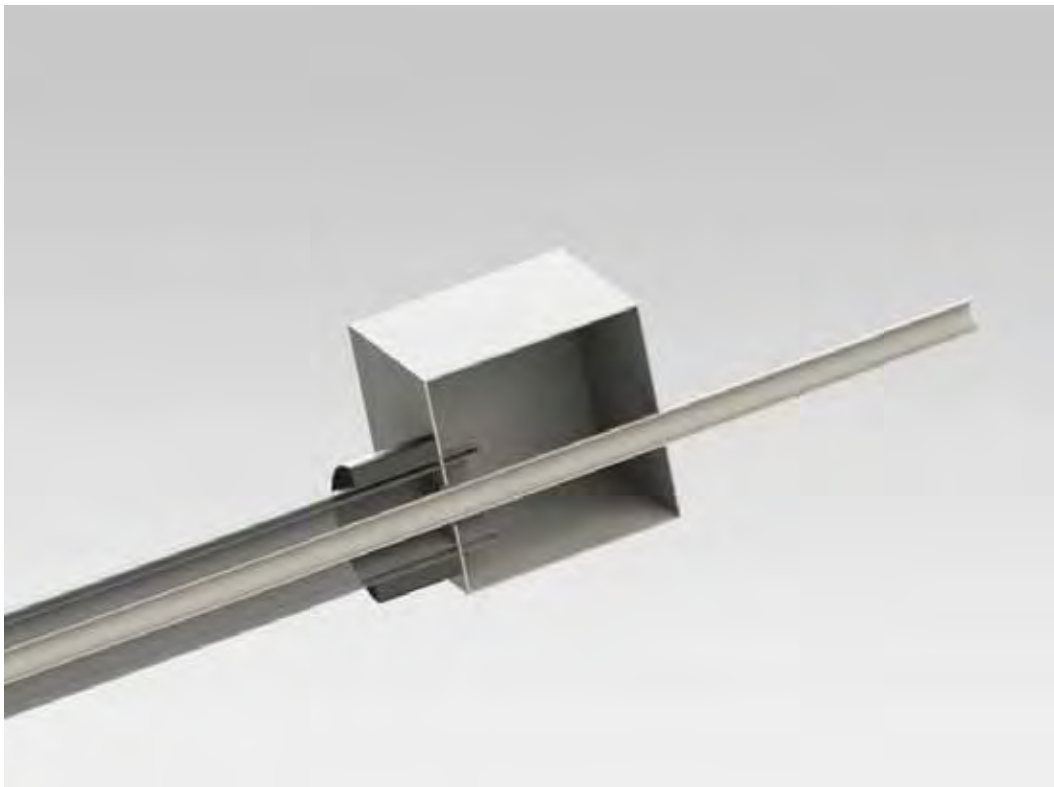


Figura 18: Conector de passagem em corte



Foto 7: Isolamento térmico do conector de passagem de água

A válvula de controle de fluxo de entrada de água fria foi instalada no tubo de entrada, que está fixada à caixa de passagem, conforme Figura 19. Esse tubo é instalado por toda a área interna do tubo evacuado e fica em contato com a água que é aquecida pela radiação solar, em contra corrente, e injeta a água fria no fundo do tubo evacuado, Figura 20.

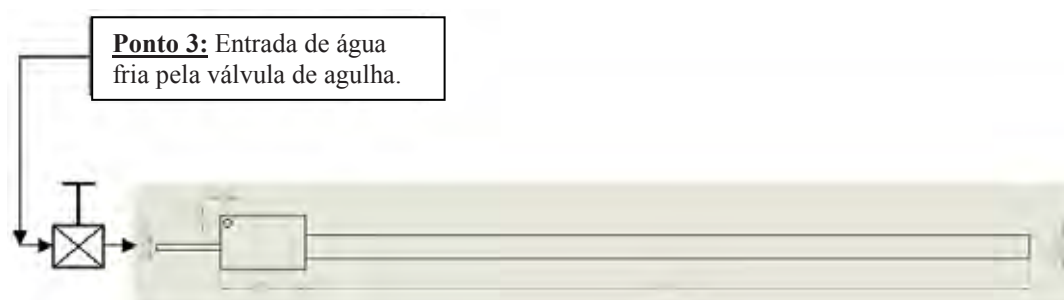


Figura 19: Instalação da válvula de entrada de água fria

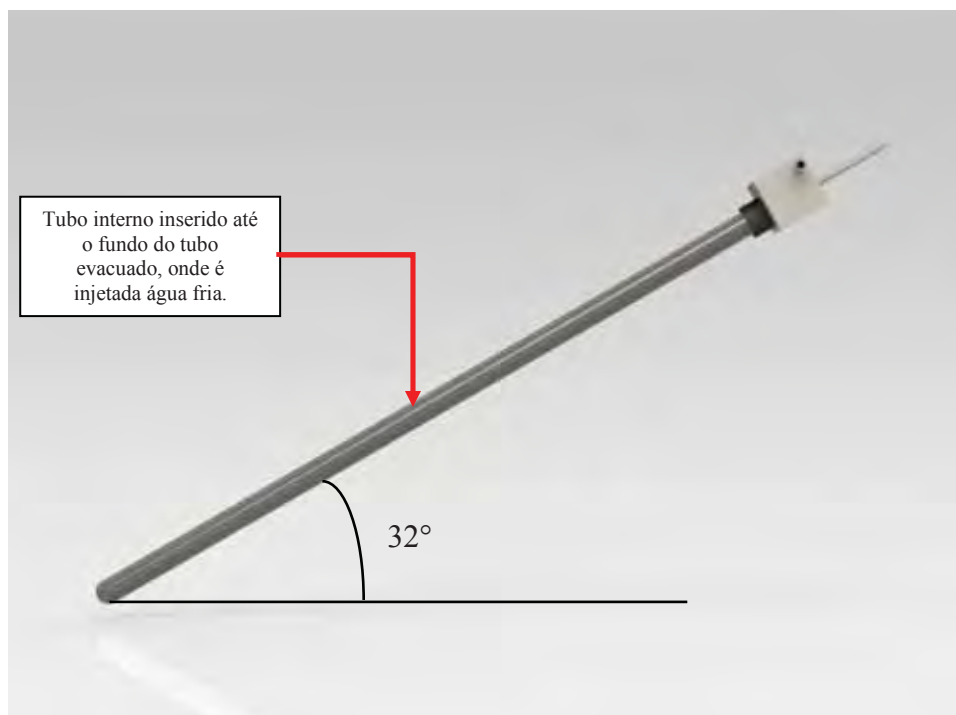


Figura 20: Tubo inserido até o fundo do tubo evacuado

A Foto 8 mostra o tubo evacuado fixado ao conector de passagem e também ilustra a entrada de água fria no tubo central, proveniente do reservatório d'água.



Foto 8: Instalação do tubo evacuado e conector de passagem

O reservatório de água foi instalado a 1,0m acima da entrada de água fria, mantendo-se assim a pressão constante, conforme Figura 21.

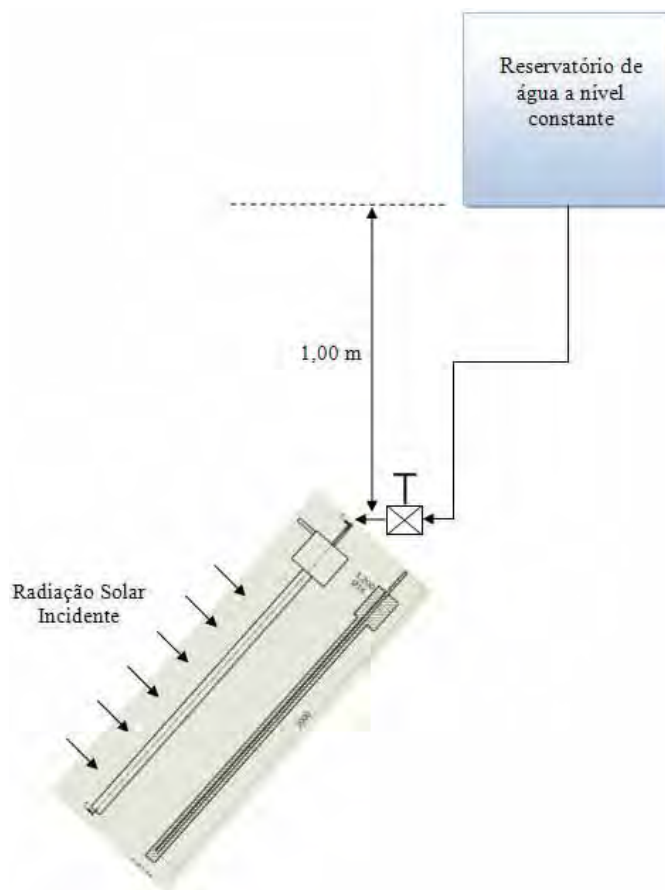


Figura 21: Vista geral do sistema completo

4.3. Método de medição da radiação solar incidente no tubo evacuado

A Foto 9 mostra o local da montagem do experimento com o tubo evacuado modificado em um ângulo de 32° , que representa a latitude do local do experimento ($22^\circ 21' 04,01''$ S), adicionado a 10° para correção do ângulo de incidência solar, para perpendicularizar os raios solares ao plano do coletor, segundo a norma NBR 12.269, (2006), inciso 5.1.3 referente a instalação de coletores solares. As coordenadas do local são: $22^\circ 21' 04,01''$ S e $49^\circ 02' 05,98''$ W com elevação 615 metros) com a superfície de absorção voltada para o norte, onde os ensaios foram conduzidos.



Foto 9: Localização geográfica do local dos ensaios ($22^{\circ} 21' 04,01''$ S e $49^{\circ} 02' 05,98''$ W)

O fluxo de calor, devido à radiação solar incidente na superfície do tubo evacuado, foi medido através do solarímetro, considerando as características geométricas do cilindro do tubo evacuado que foi dividido em quatro áreas de absorção. Neste caso, quatro regiões (duas laterais, a superior e a inferior), da seção do tubo estão representadas na Figura 22, foram estabelecidas para obter a distribuição de radiação incidente durante o dia solar. A justificativa para a utilização do cálculo da área para as regiões é que esse procedimento é necessário para a simulação no software CFD.

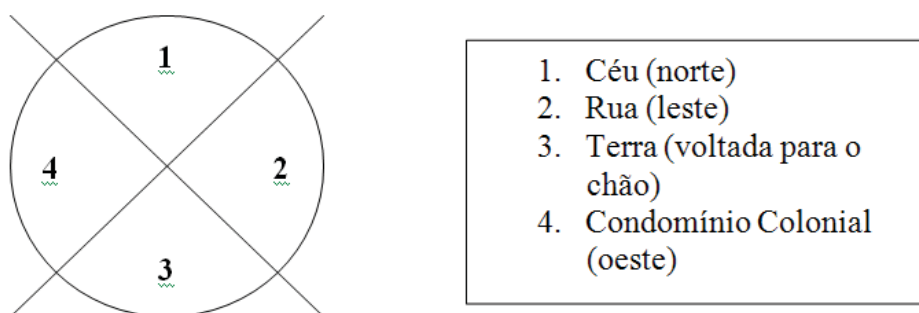


Figura 22: Posição dos pontos de medições na superfície do tubo evacuado

As seções 1, 2, 3 e 4 são as posições de onde foram colhidas as medições da radiação solar e os cálculos foram realizados levando-se em consideração as áreas planificadas dessas seções.

O perímetro do tubo evacuado foi dividido em quatro partes iguais formando um ângulo de 90° entre cada diagonal conforme Figura 22. Este ângulo de 90° foi dividido em dois ângulo de 45° , Figura 23.

Foi necessário efetuar a planificação de cada área de absorção imaginária para que os cálculos pudessem ser realizados. O processo é mostrado na Figura 23.

Um segmento de reta horizontal foi traçado ligando as extremidades do segmento de arco e que forma um ângulo de 90° com a reta vertical, a qual divide o ângulo total do arco de 90° em dois ângulos de 45° conforme Figura 23. O referido segmento de reta horizontal foi dividido em dois segmentos de comprimento “b”. O calculo de “b” foi feito através do seno do ângulo de 45° e a projeção, que é a distância da curvatura projetada em $2b$.

A área é obtida multiplicando-se o lado do quadrado do paralelepípedo pelo comprimento do tubo evacuado.

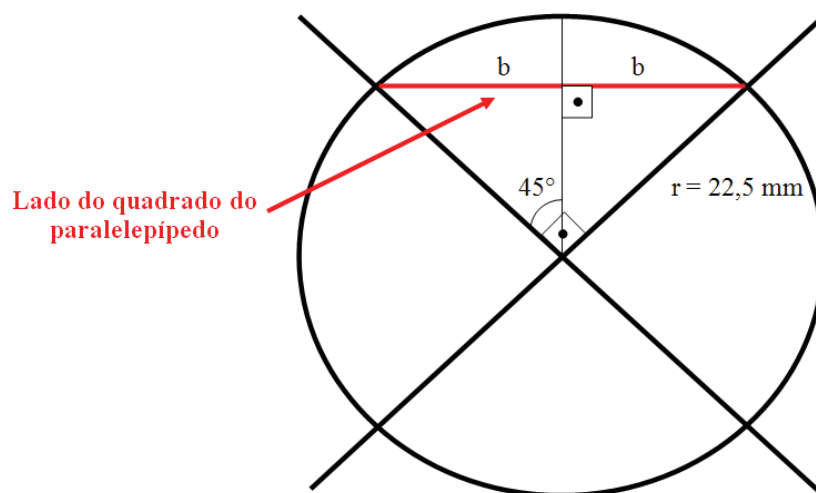


Figura 23: Lado do quadrado do paralelepípedo (2b), para cada região do tubo circular interno

Da relação trigonométrica, para $r = 0,0225m$, tem-se:

$$2.b = r.\sqrt{2} = 0,0318198m$$

Esse valor resulta nas áreas:

$$A = A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = 0,0318198m \times 1,8 m = 0,0572756 m^2$$

Portanto, a radiação solar incidente será considerada para a área projetada de cada uma das regiões do tubo evacuado.

O fluxo de calor solar incidente ($\dot{Q}_i$) é obtido multiplicando-se o referido fluxo de calor medido em cada região do tubo por sua área projetada Figura 23. Esse fluxo é medido com o auxílio de solarímetro, Foto 1.

Através da equação (1) foi calculado o fluxo de calor absorvido pela água ($\dot{Q}_a$) e a eficiência térmica é calculada pela equação (2).

$$\dot{Q}_a = \dot{m} \cdot cp_{\text{água}} \cdot (T_q - T_f) \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{Q}_i} \quad (2)$$

O fluxo de calor solar incidente no tubo é definido por ($\dot{Q}_i$) e foi medido por solarímetro, ($\dot{Q}_a$) é o fluxo de calor absorvido pela água, ($\dot{m}$) é o fluxo mássico da água aquecida, que foi medido com o auxílio da balança de precisão OHAUS e o Becker a cada intervalo de 30 minutos de ensaio, cp é o calor específico da água a pressão constante, T_q (medida através do termopar 2) é a temperatura de água aquecida e T_f (medida através do termopar 3) é a temperatura de água fria, medidos com o auxílio dos termopares. O calor específico foi obtido considerando a temperatura média entre a água fria e aquecida.

A vazão mássica de água fria foi mantida constante na entrada do tubo. A Equação (3) foi utilizada para o cálculo da massa de água colhida a cada 30 minutos.

$$\dot{m} = \frac{m}{t} \quad (3)$$

Com o valor da massa calculada através da Equação (3), é possível determinar o volume de água captado através da Equação (4).

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (4)$$

4.3. Exemplo de cálculo

A Tabela 2 é utilizada para o exemplo de cálculo, a seguir:

Tabela 2: Dados coletados no dia 28/11/2012

Horário	Vazão Mássica		Vazão Volumétrica	Velocidade do Ar Externo	Radiação [W/m ²]			
	[g/min]	[kg/s]	[ml/min]	[m/s]	1	2	3	4
11:00	364,56	0,004311000	258,66	0,33	908	520	187	128
11:30	356,39	0,004174833	250,49	0,29	970	410	208	120
12:00	352,55	0,004110833	246,65	1,63	1095	355	235	158
12:30	351,91	0,004100167	246,01	0,78	1097	320	235	160
13:00	350,02	0,004068667	244,12	0,37	1249	217	264	219
13:30	348,32	0,004040333	242,42	0,23	1260	223	268	366
14:00	348,8	0,004048333	242,90	1,52	1180	363	265	218
14:30	342,05	0,003935833	236,15	0,42	1147	172	252	547
15:00	340,24	0,003905667	234,34	1,96	1010	152	229	702
15:30	337,31	0,003856833	231,41	1,85	936	160	224	840
16:00	333,59	0,003794833	227,69	0,42	839	130	202	870
16:30	330,54	0,003744000	224,64	1,10	750	132	182	930
17:00	326,84	0,003682333	220,94	1,16	550	112	148	1055
17:30	326,93	0,003683833	221,03	1,07	480	91	108	1050
18:00	324,44	0,003642333	218,54	0,83	180	19	41	504
18:30	321,1	0,003586667	215,20	0,35	95	27	19	180

Utilizando, como exemplo, o horário das 11:30h e área 0,0572756m²,

tem-se para:

$$c_{p_{\text{água}}} = 4,178 \text{ KJ/kg.K}$$

$$\dot{m} = 0,004174833 \text{ kg/s}$$

$$T_f = 27,71^\circ\text{C}$$

$$T_q = 28,16^\circ\text{C}$$

Substituindo os referidos dados na Equação (1), tem-se:

$$\dot{Q}_a = \dot{m} \cdot cp_{\text{água}} \cdot (T_q - T_f) \rightarrow \boxed{\dot{Q}_a = 7,785520554 \text{ W}}$$

Para o cálculo da potência total incidente sobre o tubo, utilizando-se as referidas áreas superficiais axiais do quadrado inscrito no paralelepípedo, ou seja,

- Potência solar incidente na área 1 = $970 \times 0,0572756 = 55,557 \text{ W}$
- Potência solar incidente na área 2 = $410 \times 0,0572756 = 23,483 \text{ W}$
- Potência solar incidente na área 3 = $208 \times 0,0572756 = 11,913 \text{ W}$
- Potência solar incidente na área 4 = $120 \times 0,0572756 = 6,873 \text{ W}$

tem-se que:

$$\boxed{\dot{Q}_i = 97,826 \text{ W}}$$

Assim, a eficiência do sistema, utilizando-se a Equação (2), resulta:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{Q}_i} = \frac{7,785520554}{97,826} \rightarrow \boxed{\eta = 7,958539196 \%}$$

5. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

5.1. Gráfico de sinal de saída das temperaturas - *Sign Express*®

O sistema de registro de dados referente às temperaturas produz um resultado conforme o Gráfico 1. Para uma análise mais eficiente, este gráfico foi separado em gráficos com menos informações.

Também foi aplicado um filtro no Gráfico 1, eliminando os picos e vales gerados pelas variações das temperaturas. Essas variações são capturadas pelos termopares decorrentes de sua grande sensibilidade.

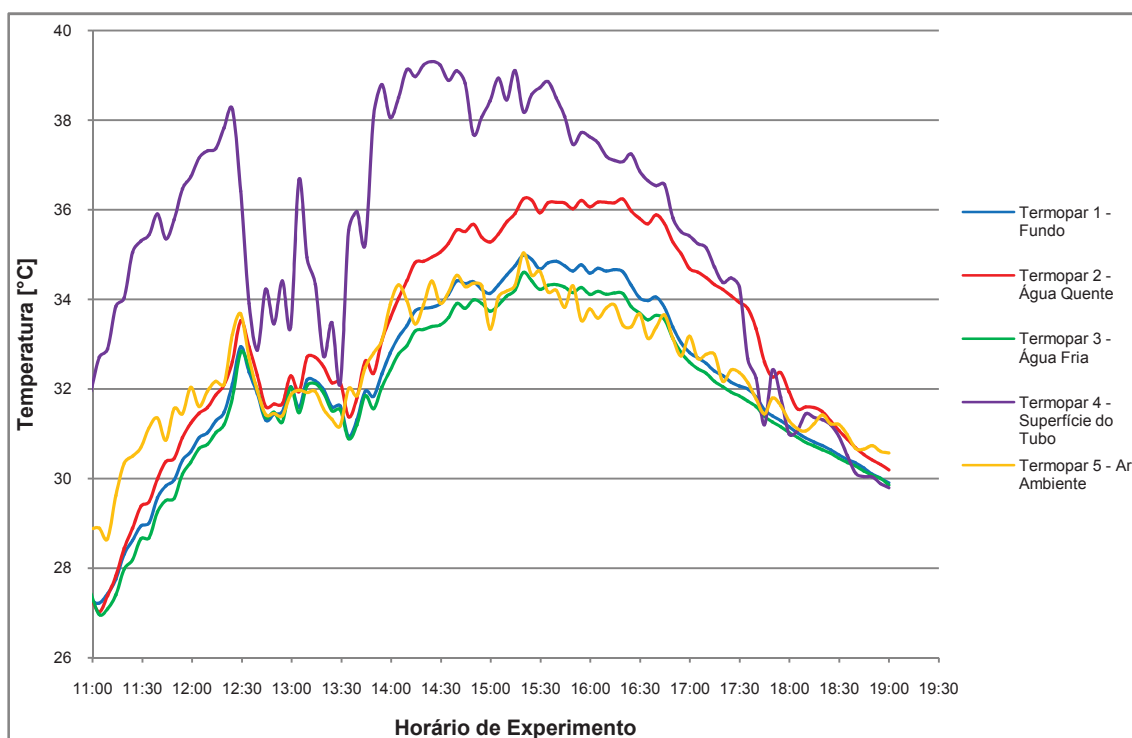


Gráfico 1: Sinais de saídas dos perfis de temperaturas em função do tempo

Um filtro polinomial de grau 6 foi aplicado a cada curva do Gráfico 1, gerando o Gráfico 2. Para aplicação desse filtro, foi utilizado o pacote Excel 2007.

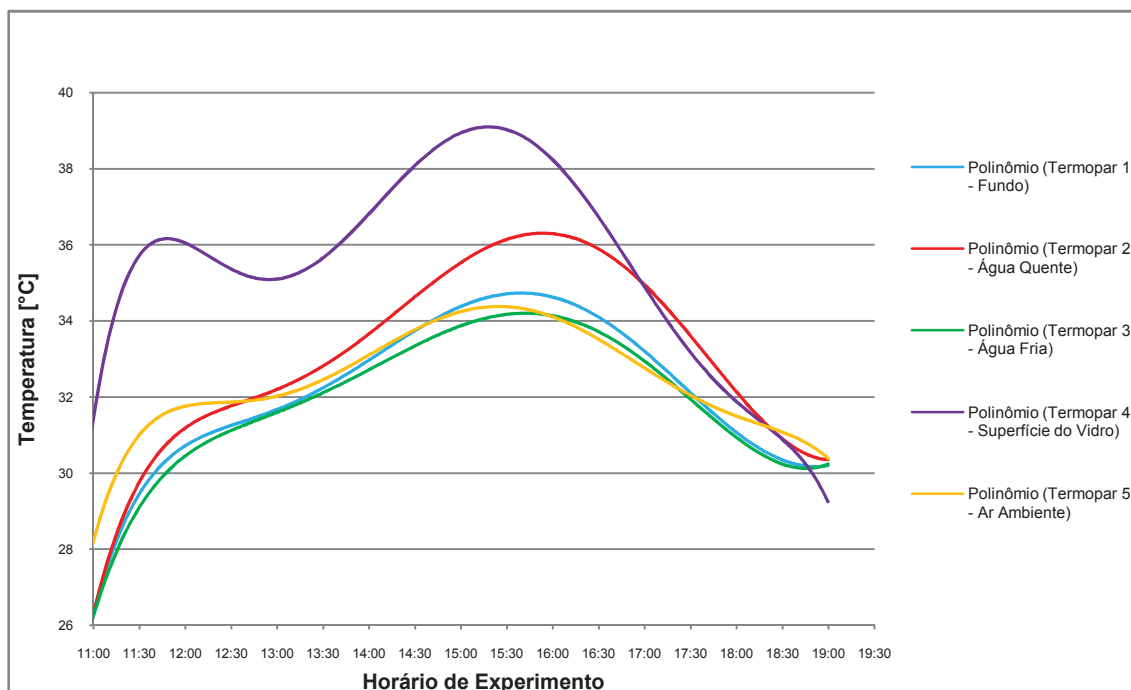


Gráfico 2: Perfis de temperaturas em função do tempo após aplicação de um filtro polinomial sobre os dados do gráfico 2

5.1.1. Gráfico de temperatura de água quente e água fria

O Gráfico 3 exibe as variações de temperaturas entre a água fria e água quente em função do tempo. Nota-se que no início do experimento, as temperaturas são iguais, ou seja, a água ainda não sofreu aumento de temperatura decorrente da radiação solar incidente no tubo.

O aumento de temperatura é pequeno até as 13:30h, pois a intensidade solar ainda não é suficiente para gerar um volume maior de água quente. A partir das 13:30h, a temperatura da água quente aumenta consideravelmente, chegando ao máximo de 36,24°C às 15:20h, onde se estabiliza até às 16:20h. A partir deste horário, inicia-se um decréscimo na temperatura, tanto de água quente quanto de água fria, pois a intensidade solar diminui decorrente do encaminhamento para o final do dia.

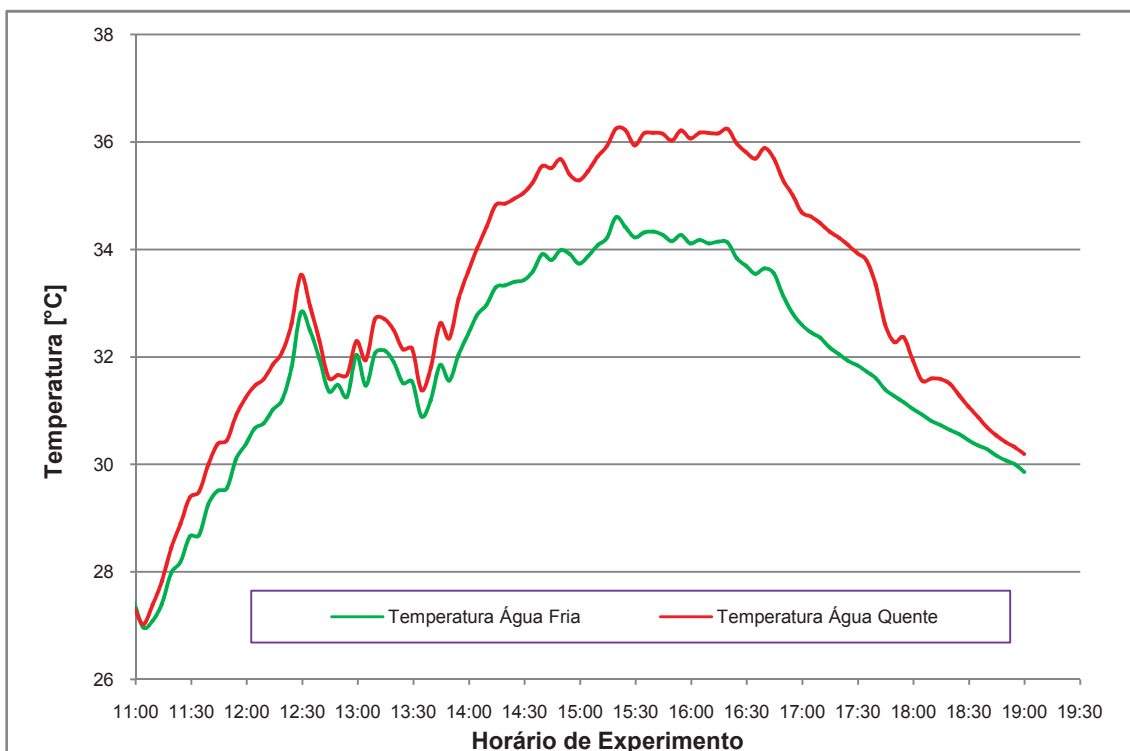


Gráfico 3: Perfis de temperaturas da água fria e da água quente em função do tempo

A Foto 10 exibe a imagem térmica do tubo de entrada de água fria às 13:37h com temperatura de 31,9°C sendo que a temperatura marcada no sistema *Sign Express*® utilizando termopares é de 31,19°C, validando assim o sistema de aquisição de dados por termopares, para um erro relativo de 2,3%. Essa pequena variação de temperatura é decorrente da superfície do tubo estar a uma agitação molecular maior que a do seio do líquido, pois a radiação solar que incide sobre o tubo produz uma temperatura maior em sua superfície. A Foto 11 apresenta a imagem real do tubo de entrada de água fria gerada pela própria câmera térmica.

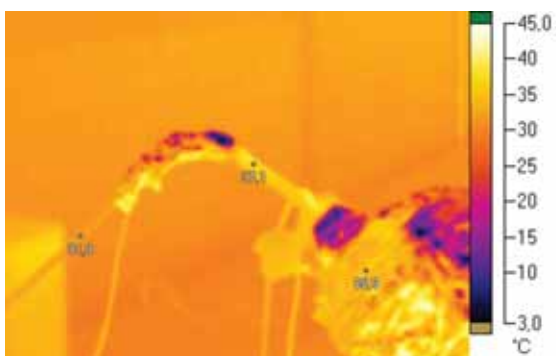


Foto 10: Imagem térmica do tubo de entrada de água fria às 13:37h



Foto 11: Imagem de luz visível do tubo de entrada de água fria às 13:37h

5.1.2. Gráficos dos perfis de temperaturas de água quente e fundo do tubo evacuado

Também foram registradas no Gráfico 4, em função das temperaturas do fundo do tubo evacuado e a temperatura de água quente em sua saída.

Da mesma forma que no Gráfico 3, as temperaturas no início do experimento são iguais, decorrentes da baixíssima intensidade solar.

Até às 13:50h as variações entre as temperaturas na saída de água quente e o fundo do tubo são aproximadamente iguais. A partir desse horário, há uma variação maior na temperatura da água quente em relação à água do fundo do tubo, pois esse é o horário de maior intensidade solar.

Das 15:20h às 16:20h há uma estabilização nas temperaturas da água quente nesse período.

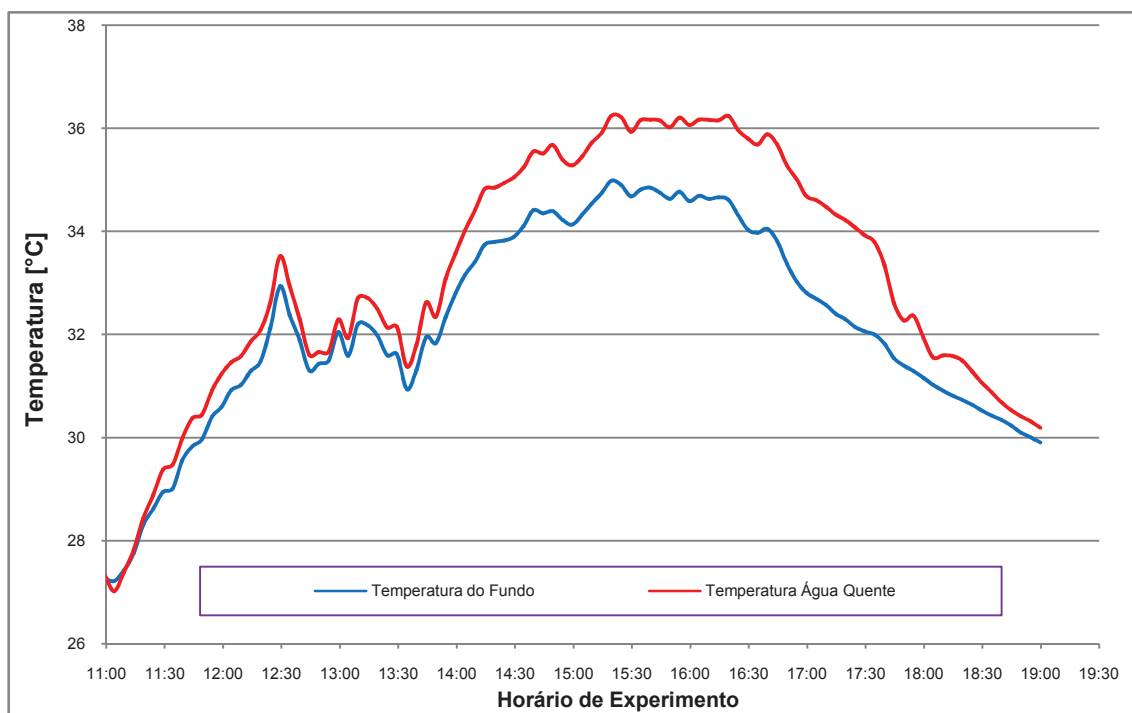


Gráfico 4: Perfis de Temperaturas de saída da água quente e injeção água fria no fundo do tubo evacuado em função do tempo

5.1.3. Gráfico dos perfis de temperatura do ar ambiente e da água aquecida

Para comparar as temperaturas do ar ambiente ao da água aquecida, foi construído o Gráfico 5.

No início do experimento a temperatura de saída água quente é a mesma da água fria e a temperatura do ar ambiente é maior, pois o solo é aquecido através da radiação solar incidente o que aquece então o ar.

Com o passar do tempo a água é aquecida, através da radiação solar incidente na superfície do tubo evacuado, até o ponto em que as duas temperaturas se igualam no horário das 12:20h. Das 12:20h às 14:00h as temperaturas do ar ambiente e da água quente passam por um período de inversão em suas intensidades, ou seja, a temperatura da água maior que a temperatura do ar.

A partir das 14:00h até às 18:25h a temperatura da água quente é significativamente maior que a do ar ambiente, decorrente da alta intensidade da radiação solar sobre o tubo evacuado.

Após às 18:25h a temperatura da água quente torna-se menor que a temperatura do ar ambiente. Isso ocorre pela tendência da água quente se igualar a temperatura da água fria por não haver mais atividade solar significativa e a temperatura ambiente ainda sofrer a influência da temperatura do solo, que foi irradiado pelo sol durante todo o dia. O calor absorvido pelo solo ainda não foi totalmente dissipado para o ar ambiente mantendo assim a temperatura ambiente maior que a da água quente.

A Foto 12 mostra a imagem térmica da saída de água quente bem como a imagem de luz visível na Foto 13 no horário das 15:05h. A temperatura registrada nesse horário pelo termopar foi de 35,28°C e a temperatura lida pela câmera térmica foi de $\approx 35^\circ\text{C}$, com um erro relativo de 0,79%.

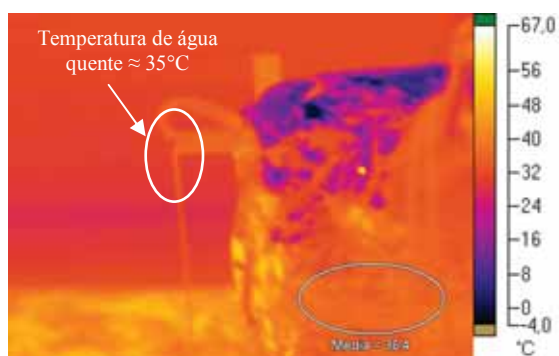


Foto 12: Imagem térmica da temperatura da saída de água quente às 15:05h



Foto 13: Imagem de luz visível da saída de água quente às 15:05h

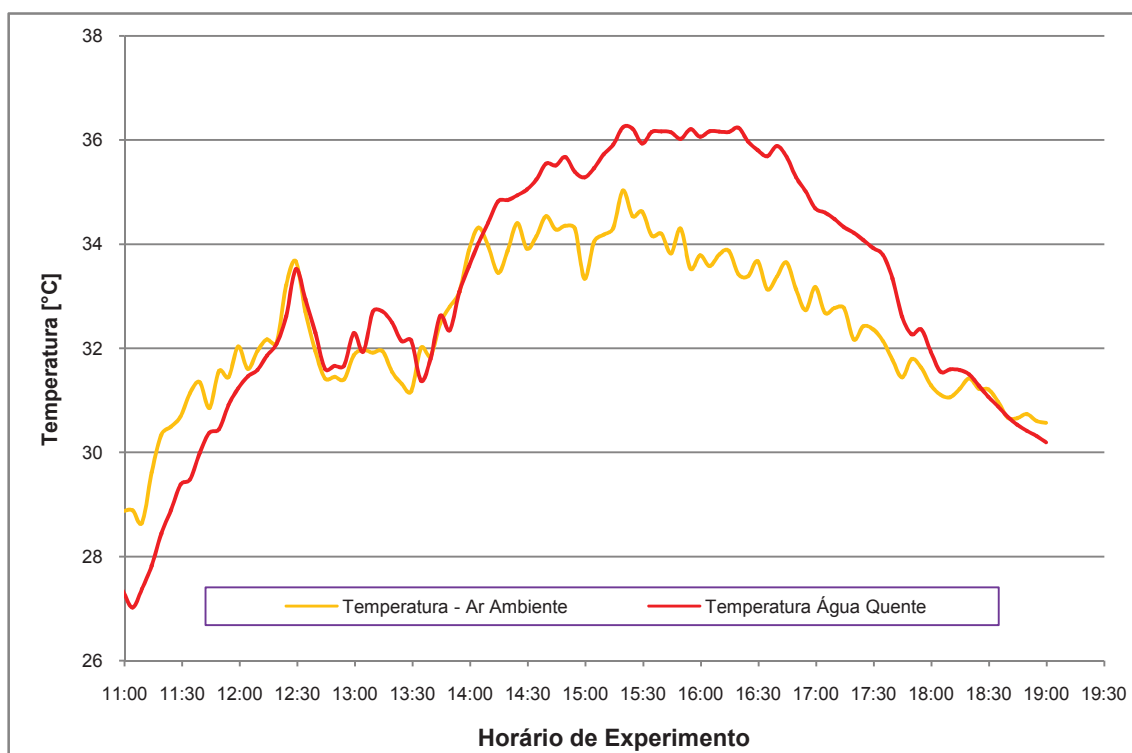


Gráfico 5: Perfis de temperaturas do ar ambiente e da água quente em função do tempo

5.1.4. Gráfico de temperatura ambiente e água fria

Na comparação entre as temperaturas da água fria e do ar ambiente, o Gráfico 6 apresenta um aumento inicial da temperatura do ar ambiente em relação à água fria até as 12:40h, justificando que o ar ambiente está recebendo calor do solo decorrente da radiação solar incidente.

A partir das 12:40h as temperaturas de água fria e ar ambiente se igualam, pois a água de entrada (água fria) sofre um aumento de temperatura por receber radiação solar no tubo de entrada.

Das 13:35h às 15:35h o ar ambiente tem temperatura maior que a água fria, pois a radiação solar incidente no solo produz um aumento de temperatura do ar que está na superfície.

No intervalo de 15:35h e 16:45 há um decréscimo na temperatura do ar ambiente em relação a água fria. Esse fenômeno ocorreu devido a incidência de nuvens no local do experimento.

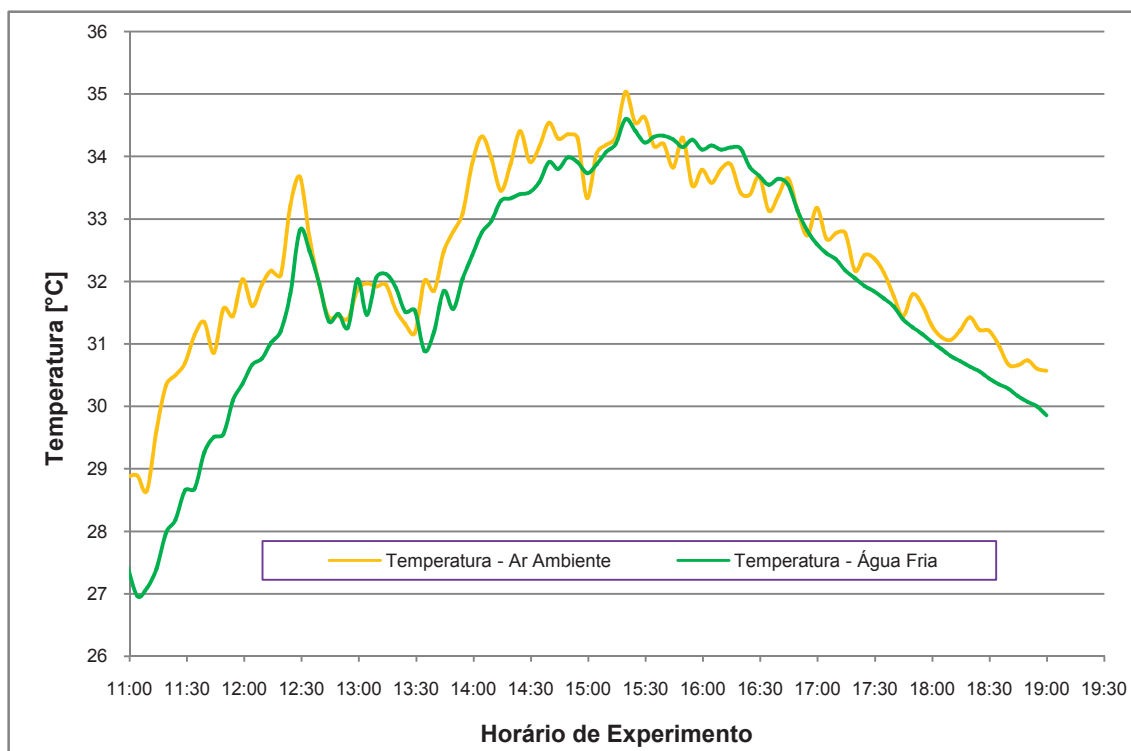


Gráfico 6: Perfis de temperaturas do ar ambiente e da água fria em função do tempo

5.1.5. Gráfico das temperaturas da superfície externa de vidro do tubo e da água quente

Para comparar a temperatura da água quente com a temperatura na superfície do vidro externo do tubo evacuado, foi instalado um termopar na superfície externa do vidro e o resultado das variações das temperaturas está representado no Gráfico 7.

No horário das 12:33h às 13:00h houve a passagem de nuvens sobre o local do experimento, assim como no período das 13:20h às 13:35h.

Das 17:30h às 19:00h a intensidade solar foi drasticamente reduzida, provocando uma queda na temperatura da superfície do vidro mas a temperatura da água quente foi maior decorrente da inércia térmica.

A Foto 14 apresenta a imagem térmica do equipamento e identifica a temperatura na base do tubo evacuado como $36,5^{\circ}\text{C}$ no horário das 13:37h. Nesse mesmo horário, a temperatura registrada pelo termopar é de $35,96^{\circ}\text{C}$, com erro relativo de 1,5%. Essa diferença se dá pelo fato da câmera térmica não medir somente a temperatura da superfície do vidro, mas também de sua base onde se encontra o vácuo, que é enegrecida.

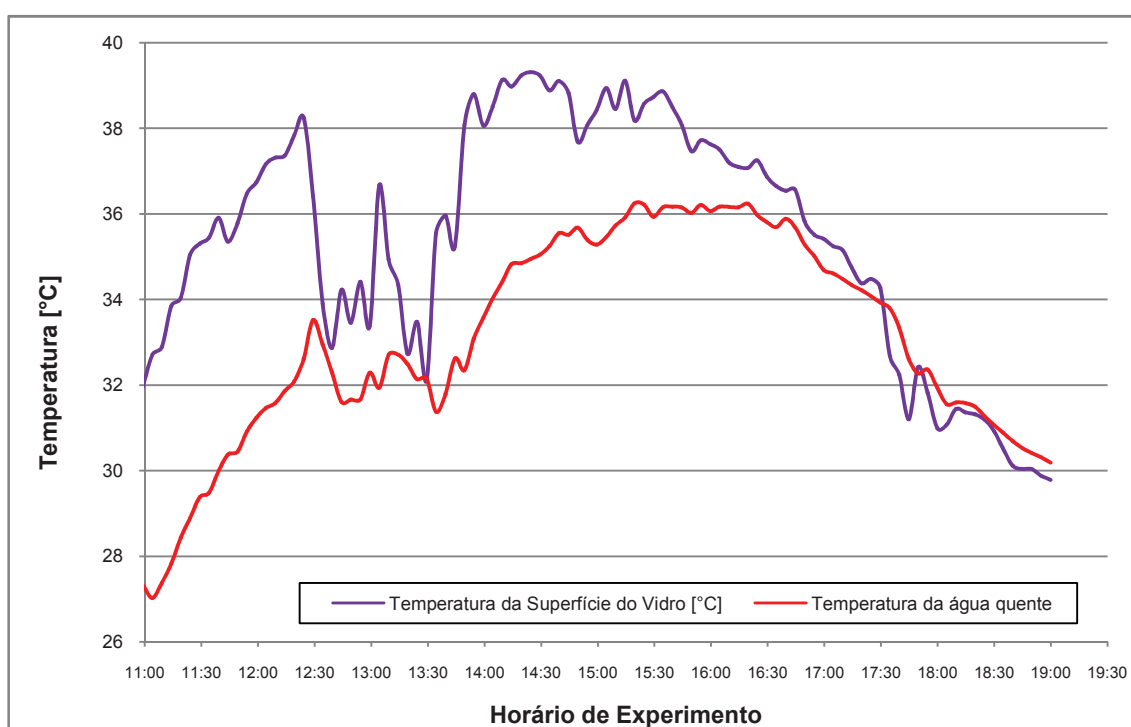


Gráfico 7: Perfis de temperaturas da superfície do vidro e da água quente em função do tempo

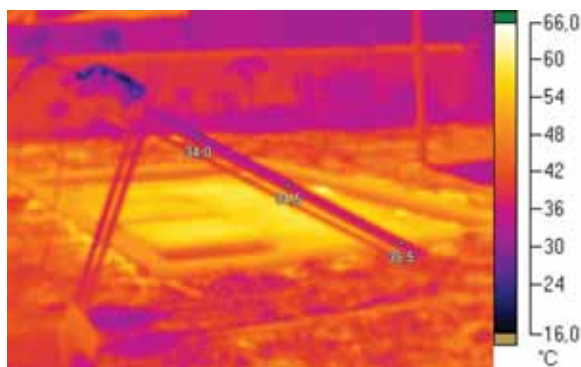


Foto 14: Imagem térmica do tubo evacuado às 13:37h



Foto 15: Imagem luz visível 13:37h

5.1.6. Gráfico de eficiência térmica do sistema

A eficiência do sistema em função do tempo, calculada pela Equação (2), é apresentada no Gráfico 8, com base na Tabela 3.

Tabela 3: Temperaturas da água, do ambiente, fluxo absorvido pelo sistema, fluxo de calor solar incidente e eficiência do sistema

Hora	T _{água quente} [°C]	T _{água fria} [°C]	T _{ambiente} [°C]	Fluxo Absorvido [W]	Fluxo Incidente [W]	Eficiência [%]
11:00	27,34016	27,42436	28,87438	0,0	99,8313708	0,0
11:30	28,15775	27,7114	29,78087	7,78546289	97,8267248	7,958421
12:00	30,40661	29,57653	31,39821	14,25654797	105,5589308	13,50577
12:30	32,18733	31,37953	32,45184	13,83799608	103,7833872	13,33354
13:00	32,07765	31,76511	31,79934	5,312877123	111,6301444	4,759357
13:30	32,35399	31,76695	31,64468	9,909486313	121,2524452	8,172607
14:00	32,46606	31,65668	32,68244	13,68975217	116,0403656	11,79741
14:30	34,68218	33,19687	33,98890	24,42437040	121,3097208	20,13389
15:00	35,44227	33,82069	34,16144	26,46072290	119,8778308	22,07307
15:30	35,91603	34,23142	34,45792	27,14561079	123,7152960	21,94200
16:00	36,12763	34,23979	33,96811	29,93139680	116,8994996	25,60438
16:30	36,08376	34,01303	33,62202	32,39127191	114,2075464	28,36176
17:00	35,37323	33,21214	33,19967	33,24799220	106,8189940	31,12554
17:30	34,27284	32,13089	32,53043	32,96679406	99,02951240	33,28987
18:00	32,71917	31,36147	31,67876	20,66100567	42,61304640	48,48516
18:30	31,42965	30,68233	31,20696	11,19870300	18,38546760	60,91062

O período de maior eficiência se dá das 15:00h às 18:00h, quando o sistema entra em regime permanente.

A partir das 18:00h têm-se a queda da potência solar incidente no tubo e segundo a Equação (2), um pico na eficiência do sistema.

Às 13:00h há uma pequena queda na eficiência decorrente de nuvens no local do experimento.

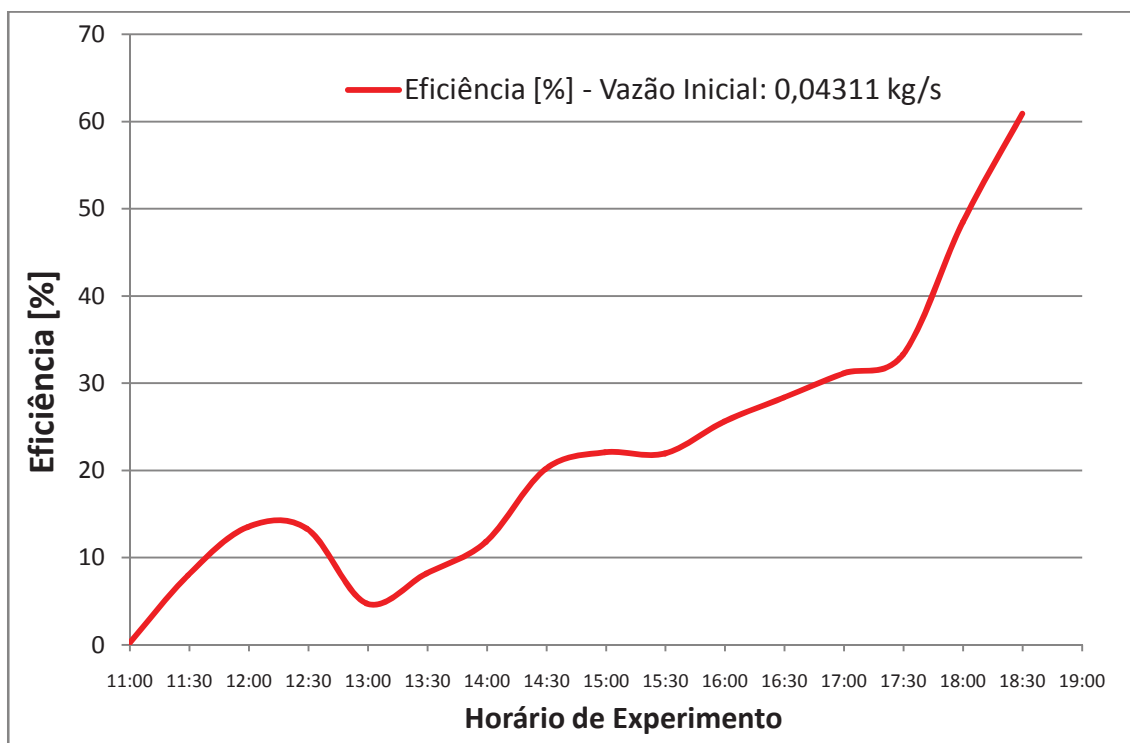


Gráfico 8: Eficiência térmica do sistema em função do tempo

No estudo realizado por Kalogirou (2009) os tubos evacuados possuem uma eficiência térmica constante em relação aos demais coletores, conforme ilustrado no Gráfico 9.

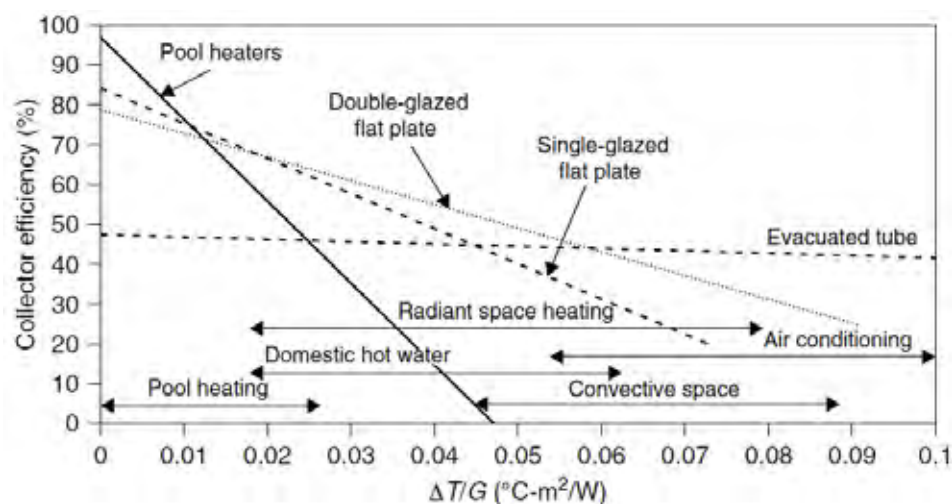


Gráfico 9: Eficiência de diversos tipos de coletores solares, segundo (KALOGIROU, 2009)

Como procedimento de cálculo para determinação da eficiência térmica dos coletores solares, Chang *et al.* (2004) mostraram que a eficiência média para os

coletores solares planos é 60%. Comparando com o Gráfico 9 apresentado por Kalogirou (2009), essa eficiência diminui significativamente em relação aos coletores solares por tubos evacuados, pois nestes, sua eficiência se mantém constante em aproximadamente 48%.

5.1.7. Gráfico da taxa de transferência de calor solar incidente e taxa de calor absorvido

Para uma melhor análise da evolução do fluxo de calor solar incidente e o fluxo de calor absorvido pela água, foi construído o Gráfico 10.

É possível verificar que mesmo com uma queda da intensidade solar, a partir das 13:30h, o sistema continua apresentando aumento na potência, isso é decorrente da inércia térmica e do isolamento térmico proporcionado pelo vácuo.

Uma avaliação estatística foi realizada nos dados das duas curvas e possuem um coeficiente de correlação estatístico de 23,36%. Esse coeficiente muito abaixo de 100% se dá pelo fato de que nem todo fluxo do calor solar incidente foi transformado em fluxo de calor absorvido pela água decorrente de perdas.

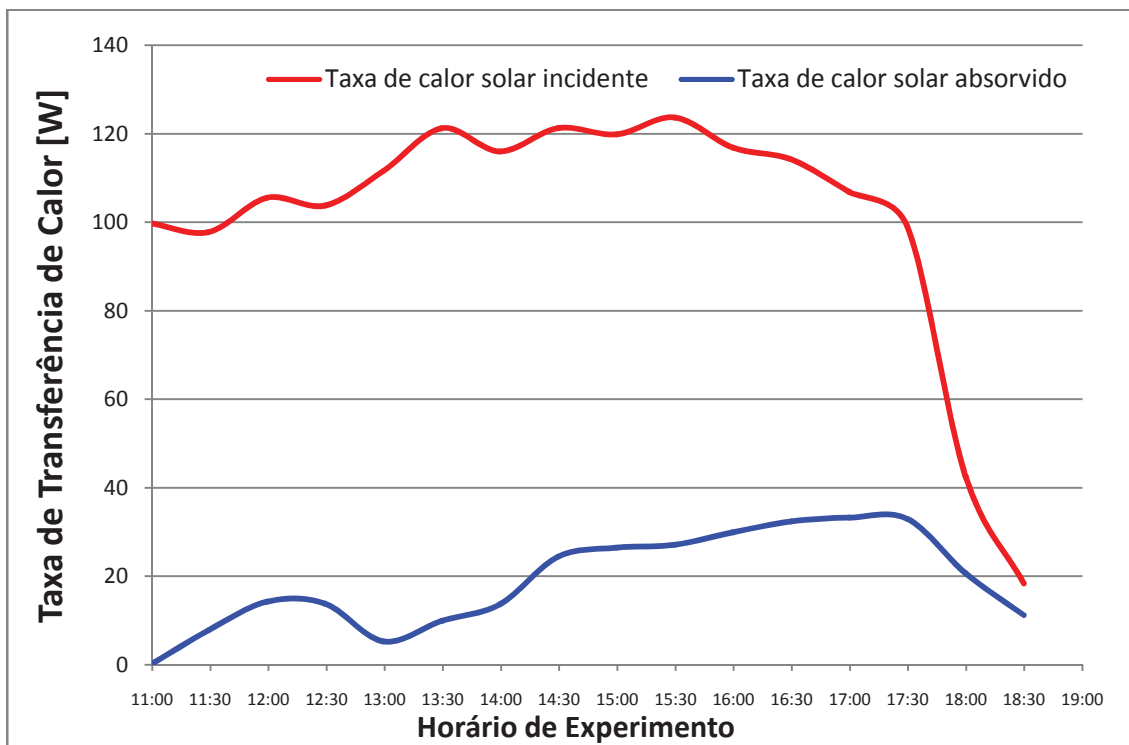


Gráfico 10: Taxa de transferência de calor solar incidente e fluxo de calor absorvido em função do tempo

O Gráfico 11 apresenta as perdas do sistema durante todo o dia de experimento representado na área entre as curvas, ou seja, a diferença entre a taxa de calor incidente e o taxa de calor absorvido.

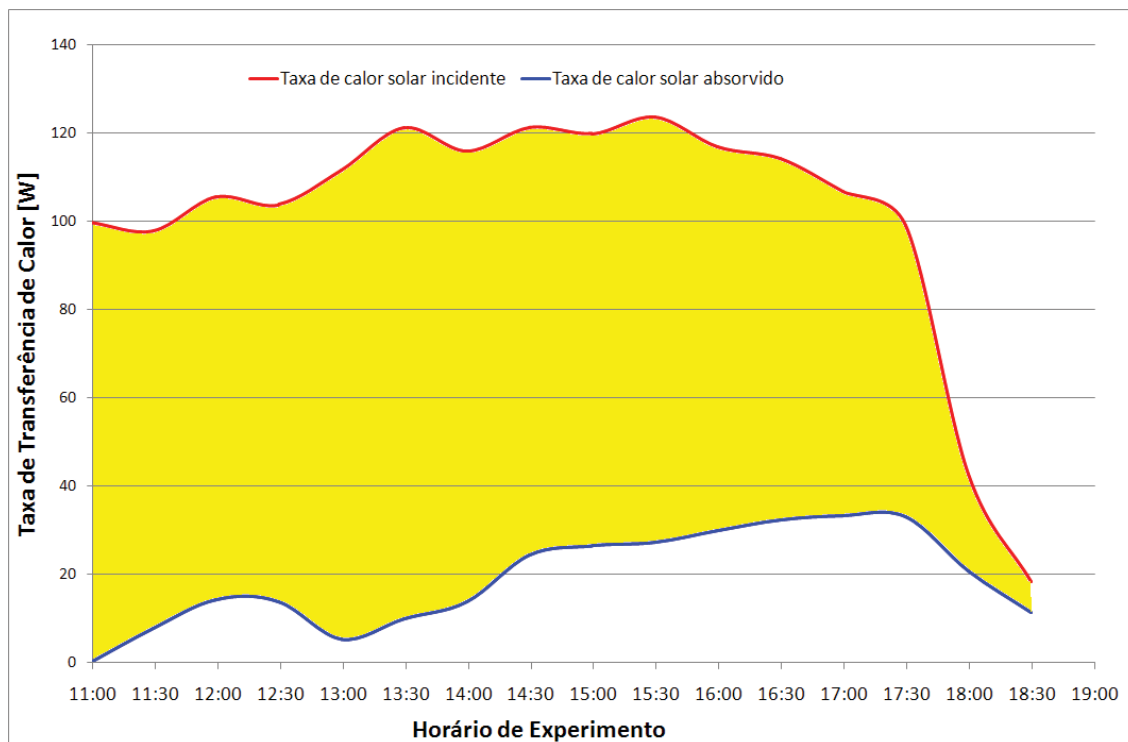


Gráfico 11: Perdas do sistema – Área entre taxa de calor incidente e a taxa de calor absorvido em função do tempo

5.1.8. Gráficos de vazão mássica

Durante todo o experimento, foi observada uma diminuição gradual na vazão mássica na saída do sistema, representada no Gráfico 12.

Verificou-se uma pequena queda na vazão decorrente do aumento de temperatura da água, para uma vazão inicial de 0,004311 kg/s.

Outros ensaios foram efetuados com vazões iniciais diferentes e estão representados no Gráfico 13.

Às 15:30h, quando se trabalhava com uma vazão inicial de 0,002 kg/s, o fluxo de água em escoamento interrompeu-se. Foi necessário aumentar a vazão para que o sistema pudesse novamente voltar a fluir. Esse experimento foi feito

com um tubo de aço injetando água fria no fundo do tubo evacuado. Como a vazão foi pequena a temperatura de trabalho do sistema elevou-se consideravelmente gerando bolhas interrompendo assim a vazão.

O mesmo Gráfico 13 apresenta duas curvas de vazões, uma do experimento realizado no dia 22/11/2012 com vazão inicial de 0,004311 kg/s utilizando um tubo central de aço e outra do experimento realizado no dia 28/11/2012 com vazão inicial de 0,004311 kg/s com tubo central tipo CPVC.

O comportamento da vazão para o tubo CPVC foi mais uniforme em relação ao tubo de aço devido ao próprio isolamento térmico do CPVC. O aço possui uma condutibilidade térmica maior que o CPVC.

À medida que a vazão inicial aumenta a curva de vazão do Gráfico 13 tende a uniformidade, porém é necessária maior circulação de água para se obter a mesma quantidade de energia, ou seja, vazões muito pequenas geram temperaturas maiores, mas provocam paralisação do fluxo de água quente e vazões muito grandes aumentam o volume de água quente com temperaturas menores.

Uma análise percentual de cada perfil de vazão do Gráfico 13, apresenta:

- Para o tubo CPVC com vazão de 0,004311 kg/s, uma redução de 16,8% na vazão;
- Para o tubo de aço com vazão de 0,004311kg/s, uma redução máxima de 57,02%;

Essa análise mostra que o tubo central de CPVC gera valores mais uniformes, decorrente da menor condutibilidade térmica em relação ao aço.

O ponto de melhor equilíbrio de produção foi conseguido com o tubo CPVC com uma vazão inicial de 0,004311 kg/s através dos testes experimentais.

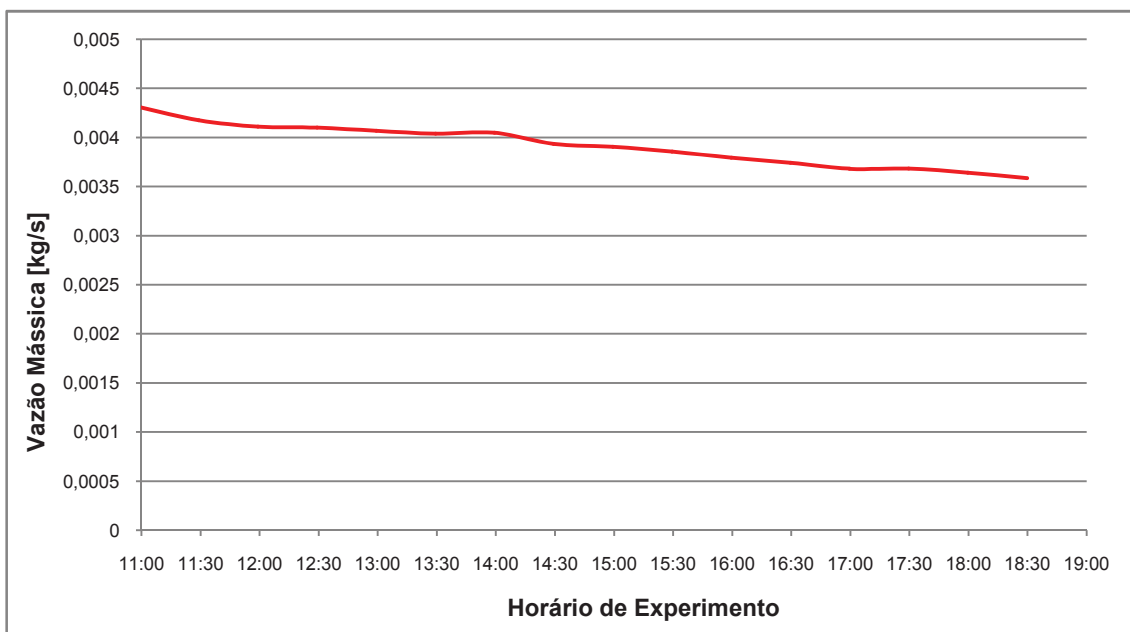


Gráfico 12: Vazão mássica (Vazão inicial: 0,004311 kg/s) em função do tempo

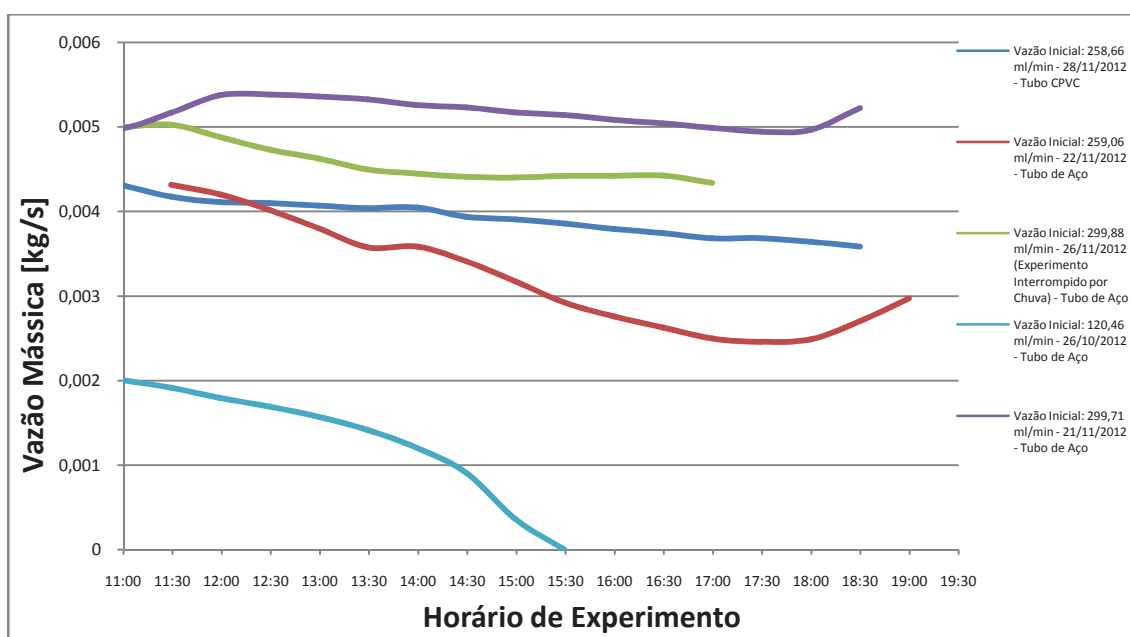


Gráfico 13: Perfis de vazões mássicas para diversas vazões iniciais em função do tempo

5.1.9. Gráfico do experimento efetuado no dia todo

Com a finalidade de checar se o comportamento do sistema difere dos realizados em tempo parcial, foi realizado um ensaio a partir das 07:30h, apresentado no Gráfico 14.

Em comparação com o Gráfico 1, não houve alteração no comportamento das temperaturas. Destaca-se que no horário das 07:30h às 08:30h, quando a atividade solar é baixa, as temperaturas de água quente e água fria são estáveis e muito próximas.

Nota-se também que a temperatura da superfície do vidro é baixa, uma vez que não houve incidência solar no referido período.

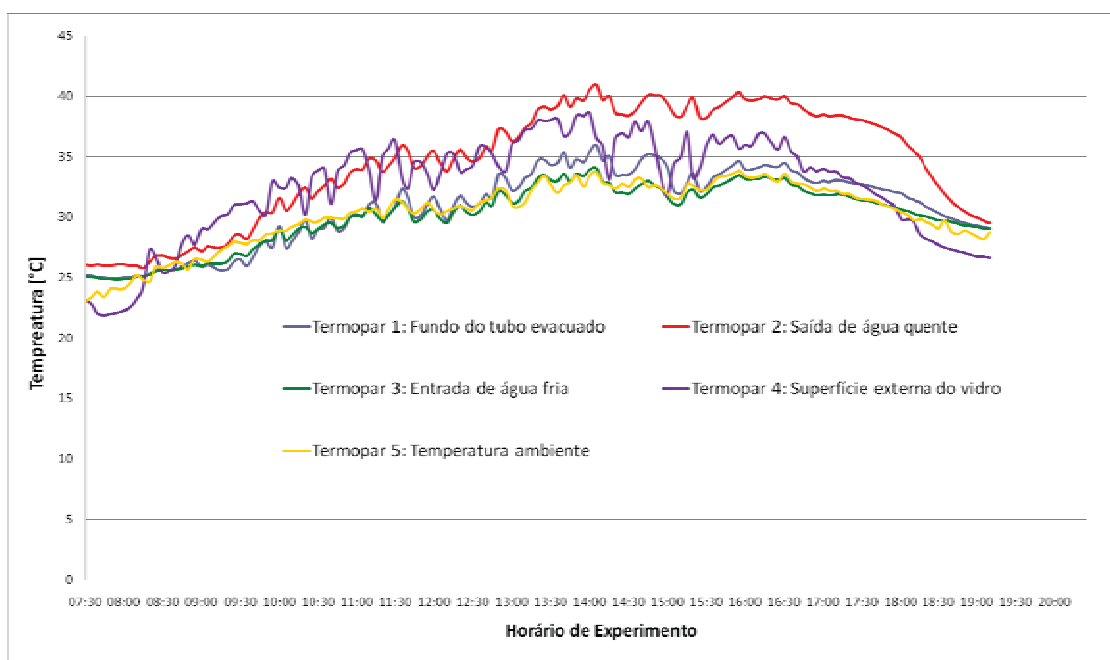


Gráfico 14: Perfis de temperaturas em diversos pontos em função do tempo - período diário completo

5.1.10. Produção do sistema

A temperatura de saída de água quente teve um acréscimo de $8,7^{\circ}\text{C}$ em relação à entrada de água fria.

A vazão volumétrica média é de 0,235074 litros/minuto e, assim, no período das 11:00h às 18:30h, tem-se uma produção de 105,78 litros de água aquecida, para um tubo evacuado.

6. ANÁLISE TEÓRICA

Em uma análise computacional utilizando o software **CFD - Computacional Fluid Dynamics (Fluido-Dinâmica Computacional)**, Avallone e Sato (2012) analisaram o comportamento térmico tanto do tubo evacuado quanto da modificação, ou seja, da instalação do tubo central para injeção de água fria no fundo do tubo evacuado.

As seguintes condições de contorno foram empregadas para a simulação:

- Características do modelo:
 - Modelado apenas a região do fluido;
 - Tubo interno foi omitido, em seu lugar foi admitida uma interface líquido-líquido, sem transporte de massa através da mesma;
 - Devido à simetria do fenômeno no tubo externo, admitiram-se três regiões de incidência;
- Condições Fluidodinâmicas:
 - Condição de não-deslizamento para todas as interfaces líquido/paredes das superfícies dos tubos;
 - Modelo Laminar;
 - Abertura para o conector: modelada como abertura de pressão estática zero;
- Condições de Contorno Térmicas:
 - Fluxo de calor incidente e conhecido na superfície do tubo externo em função do tempo, sendo obtidas dos dados experimentais as seguintes equações:
 - Radiação superior:

$$\dot{Q}_{is} = a_1 \times t^2 + a_2 \times t + a_3$$

- Radiação inferior:

$$\dot{Q}_{ii} = a_4 \times t^2 + a_5 \times t + a_6$$

- Radiação lateral obtida através da interpolação dos dados experimentais colhidos nos pontos de medição “2” e “4”, gerando o seguinte polinômio para os dois pontos:

$$\dot{Q}_{il} = a_7 \times t^2 + a_8 \times t + a_9$$

Onde:

t: Instante de tempo da simulação [s]

$a_1 = 10^{-6} \frac{W}{m^2 \cdot s^2}$	$a_4 = -2 \times 10^{-7} \frac{W}{m^2 \cdot s^2}$	$a_7 = 10^{-6} \frac{W}{m^2 \cdot s^2}$
$a_2 = 0,0359 \frac{W}{m^2 \cdot s}$	$a_5 = 0,0118 \frac{W}{m^2 \cdot s}$	$a_8 = 0,0236 \frac{W}{m^2 \cdot s}$
$a_3 = 910,4 \frac{W}{m^2}$	$a_6 = 188,03 \frac{W}{m^2}$	$a_9 = 317,53 \frac{W}{m^2}$

- Temperatura inicial conhecida: 26,515 °C
- Temperatura da entrada de água fria conhecida (medida pelo termopar):

$$T_e = b_1 \times t^2 + b_2 \times t + b_3$$

- Temperatura d'água na saída do conector conhecida (medida pelo termopar):

$$T_s = b_4 \times t^2 + b_5 \times t + b_6$$

Onde:

$b_1 = -2 \times 10^{-7} \frac{^{\circ}C}{s^2}$	$b_4 = -9 \times 10^{-8} \frac{^{\circ}C}{s^2}$
$b_2 = 0,0019 \frac{^{\circ}C}{s}$	$b_5 = 0,0014 \frac{^{\circ}C}{s}$
$b_3 = 26,515 ^{\circ}C$	$b_6 = 26,498 ^{\circ}C$

→ Admitiu-se uma condição de simetria no tubo evacuado para redução do custo computacional.

6.1. Comportamento da saída de água fria no fundo do tubo evacuado

A água fria escoar pelo tubo central com uma velocidade aproximada de $3,00 \times 10^{-2}$ m/s. Pouco antes de se chocar com o fundo do tubo evacuado, a velocidade reduz para a $1,11 \times 10^{-2}$ m/s, conforme Figura 24.

Com o aumento da temperatura, a densidade da água diminui fazendo com que a velocidade aumente novamente.

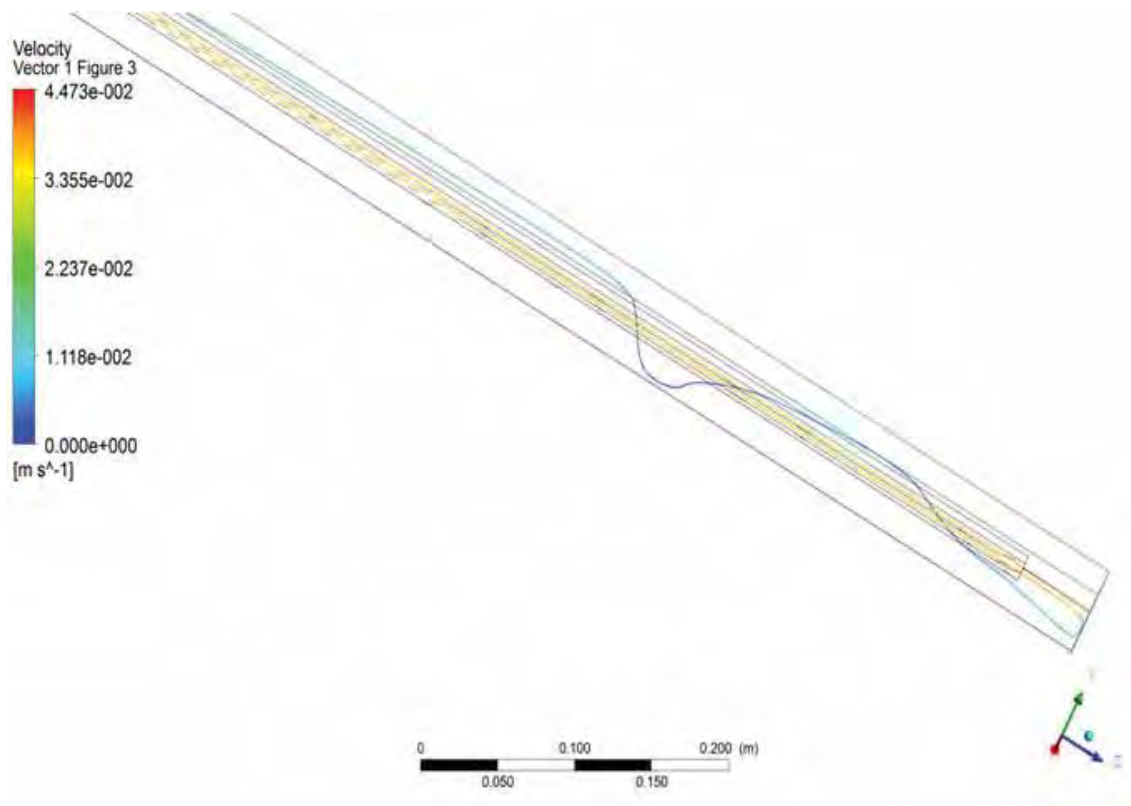


Figura 24: Comportamento da água fria na saída do fundo do tubo evacuado

6.2. Comportamento da saída de água quente do tubo evacuado

A Figura 25 apresenta o comportamento das velocidades na saída de água quente do tubo evacuado.

É possível notar que há um retorno de água para o interior do tubo evacuado provocando uma recirculação, apresentada na Figura 25 e Figura 26.

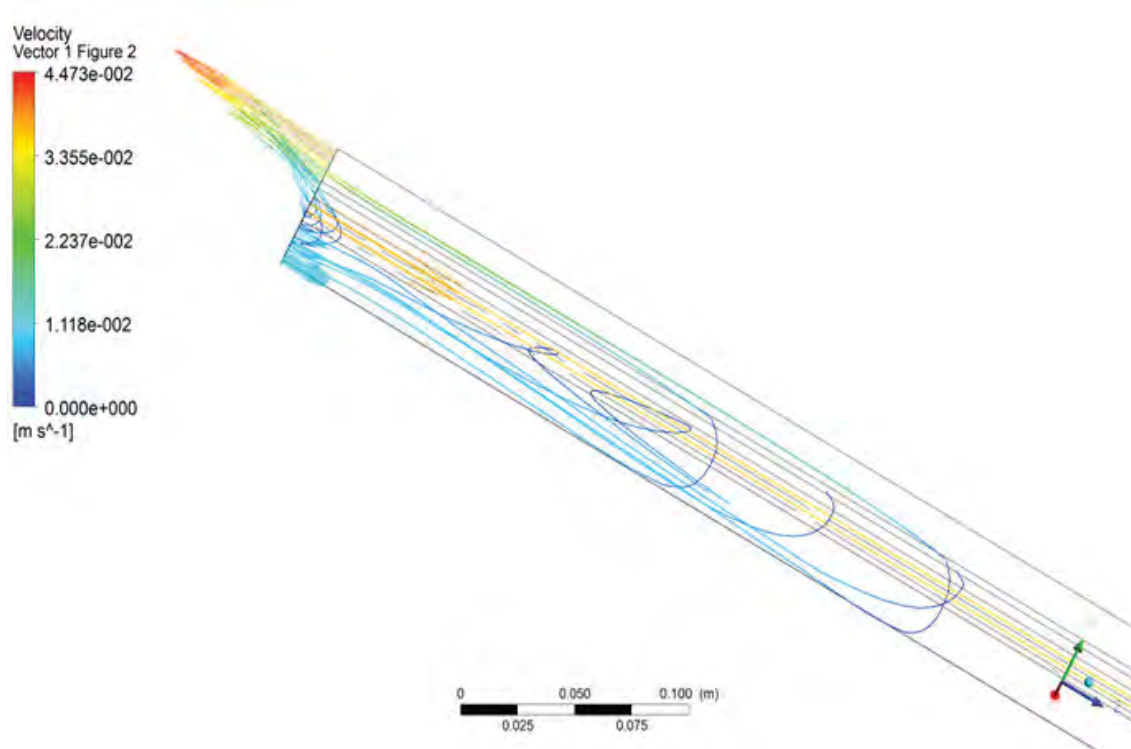


Figura 25: Comportamento da velocidade na saída de água quente do tubo evacuado

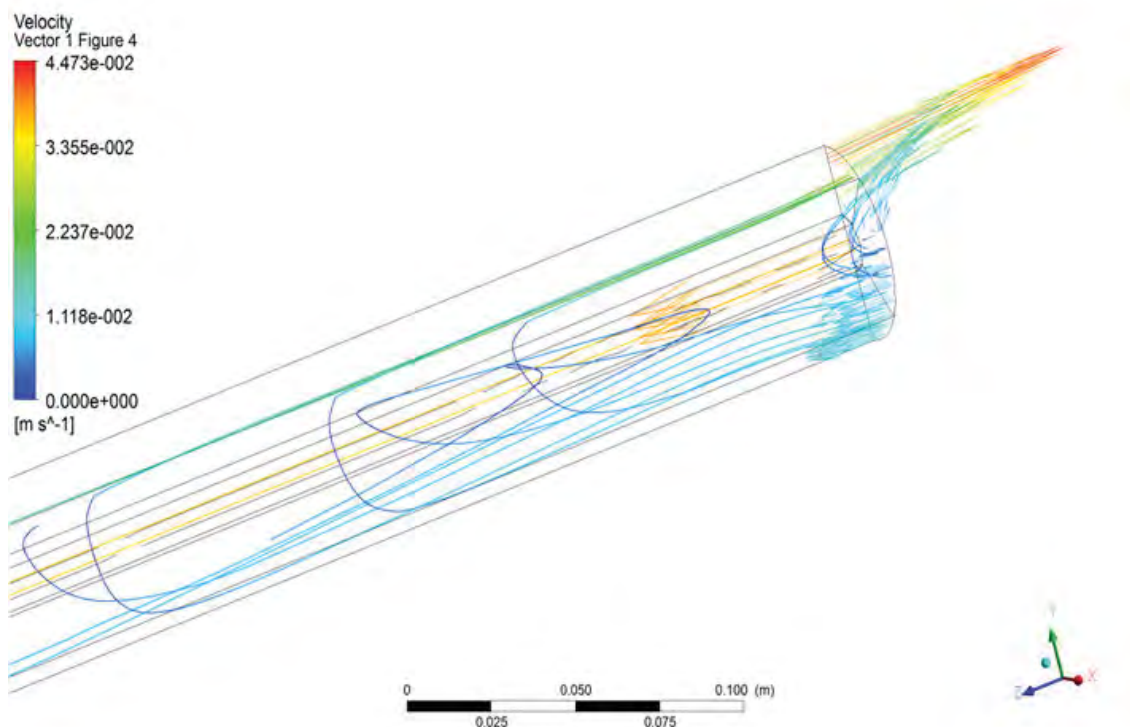


Figura 26: Recirculação de água na entrada do tubo evacuado

6.3. Espectro de velocidades na saída do tubo evacuado

Também é possível visualizar o espectro de velocidades na saída do tubo evacuado, Figura 27. As velocidades na região superior (região 1, Figura 22) do tubo, que recebe o maior fluxo solar, tem intensidade maior que a região inferior (região 3, Figura 22), definidas no item 4.3.

Essa diferença de velocidades corresponde com a realidade, pois quando aumenta-se a temperatura da água sua densidade diminui aumentando assim sua vazão volumétrica.

A região em azul escuro da Figura 27 corresponde à recirculação mencionada no item 6.2.

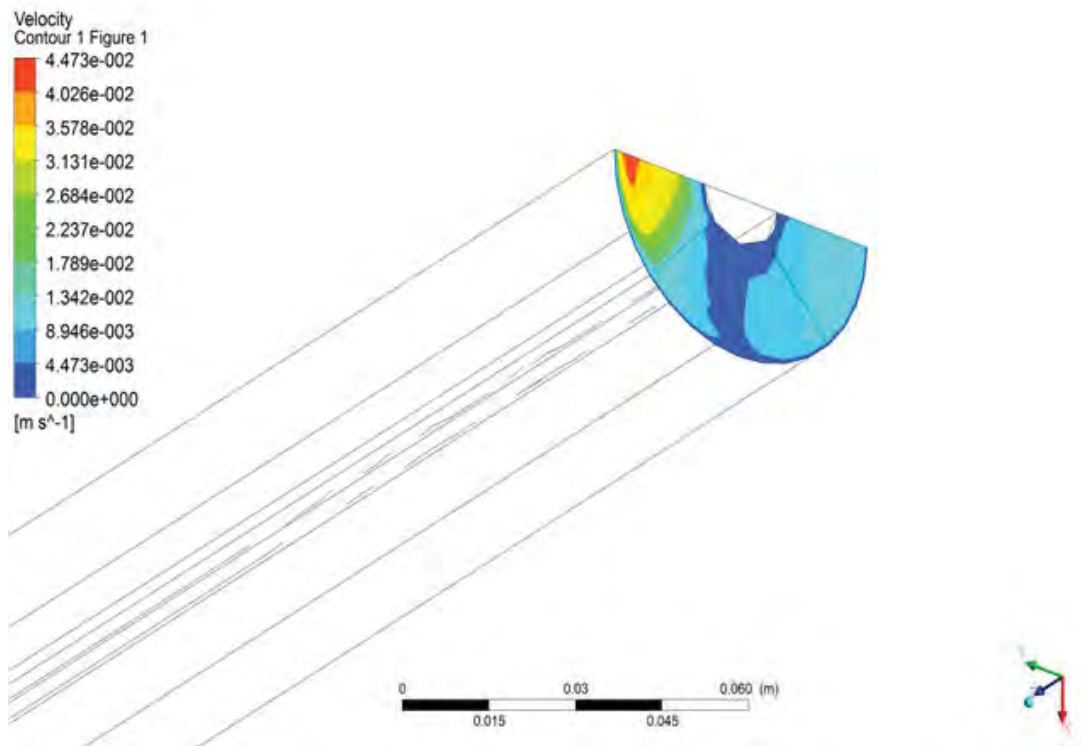


Figura 27: Espectro de velocidades na saída de água quente do tubo evacuado

A mesma recirculação é visualizada na Figura 28 onde a parte superior, que refere-se à região 1 da Figura 22, representa a saída de água quente e a parte inferior, que refere-se à região 3, da Figura 22.



Figura 28: Recirculação de água

A água aquecida retorna para o tubo evacuado, o que pode ser visualizado pelo perfil de velocidades na Figura 29.

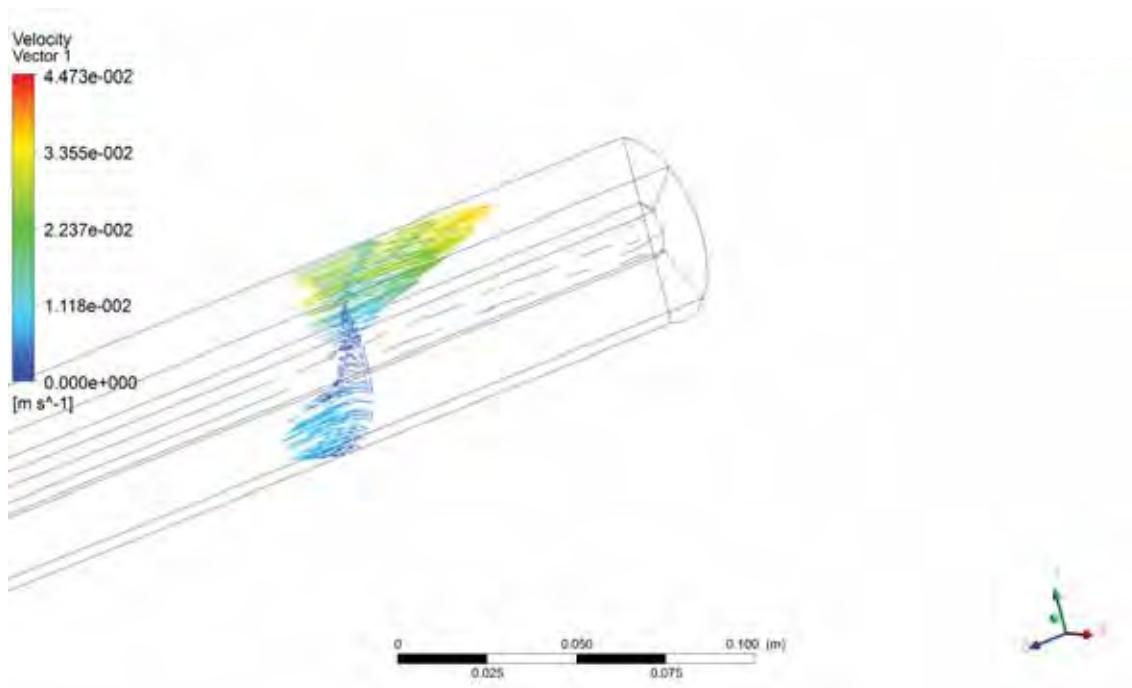


Figura 29: Perfis de velocidades no interior do tubo evacuado

7. CONCLUSÕES

O trabalho apresentado foi pautado no estudo do coletor solar de tubo evacuado com a modificação, ou seja, a instalação de um tubo central até o fundo do tubo evacuado, injetando água fria. A água quente é descarregada em um conector de passagem fixado ao tubo evacuado que possui uma saída superior por onde a água aquecida é descartada.

Com base nos resultados obtidos nos experimentos, conclui-se que:

- Com a instalação do tubo de injeção de água fria para o fundo do tubo evacuado, como proposto nesse trabalho, observou-se uma recirculação indesejada na saída da água quente do tubo evacuado, o que prejudicou a eficiência do sistema;
- A instalação do tubo central em aço, devido sua maior condutibilidade térmica em relação ao tubo CPVC, eleva a temperatura do fluxo de entrada da água fria e, assim, diminui o gradiente de temperatura entre a parede interna do tubo evacuado e o fluxo de entrada de água e portanto menor a temperatura de saída da água, em consequência valores aleatórios na vazão de saída da água.

8. TRABALHOS FUTUROS

- Evitar o contato dos fluxos de água quente e fria, pelo desvio do fluxo da água quente pelo interior do conector de passagem, o que poderia fornecer resultados mais satisfatórios.
- Propor e validar um modelo matemático por comparação entre os dados teóricos e os experimentais obtidos nesse trabalho.
- Efetuar os mesmos ensaios propostos nesse trabalho, utilizando uma instalação com simulação da luz solar por meio de luzes artificiais.
- Análise experimental para determinar o número necessário de tubos em série, para a água atingir sua temperatura máxima na saída.
- Estudar a transmitância do vidro, espessura de parede do tubo interno e a diferença entre os diâmetros interno e externo dos tubos de vidro, visando a diminuição da parcela de calor solar incidente perdida em relação à quantidade do calor solar absorvido pela água.

9. BIBLIOGRAFIA

AVALLONE, E.; SATO, A. I. **Relatório de Simulação Computacional tipo CFD (Computacional Fluid Dynamics) de um Tubo Evacuado Modificado**. Faculdade de Engenharia de Bauru: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP - Bauru, jun. 2012.

BUDIHardJO, I. **Evacuated Tubular Solar Water Heaters**. Sidney - Australia: University of New South Wales, 2005.

BUDIHardJO, I.; MORRISON, G. L. Performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters. **SOLAR ENERGY**, v. 83, n. 1, p. 49–56, 2009.

BUTTI, K.; PERLIN, J. **Horace de Saussure and his Hot Boxes of the 1700's**. Disponível em: <<http://solarcooking.org/saussure.htm>>. Acesso em: 12 jun. 2012.

CABANILLAS, R. E.; ESTRADA, C. A.; AVILA, F. A device for measuring the angular distribution of incident radiation on tubular solar collectors. **Renewable Energy**, v. 6, n. 7, p. 843–847, Outubro. 1995.

CHANG, J. M. *et al.* A proposed modified efficiency for thermosyphon solar heating systems. **Solar Energy**, v. 76, n. 6, p. 693–701, 2004.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1980.

EL-NASHAR, A. M. Seasonal effect of dust deposition on a field of evacuated tube collectors on the performance of a solar desalination plant. **DESALINATION**, v. 239, n. 1-3, p. 66–81, Abril. 2009.

GRUPO GT. **A Rio+20 e a Construção de Cidades Sustentáveis**, 2012.

HEALTH, T. L. **The Works of Archimedes**. United States of America: Dover Publication Inc., 2002.

KALOGIROU, S. **Solar Energy Engineering**. 1º. ed. United States of America: British Library Cataloguing-in-Publication Data, 2009. v. 1

KIM, Y.; SEO, T. Thermal performances comparisons of the glass evacuated tube solar collectors with shapes of absorber tube. **RENEWABLE ENERGY**, v. 32, n. 5, p. 772–795, Abril. 2007.

LAZNO, T. S. **Image Furnance Techniques**, Interscience. New York: [s.n.].

LI, M.; WANG, L. L. Investigation of evacuated tube heated by solar trough concentrating system. **ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT**, v. 47, n. 20, p. 3591–3601, Dezembro. 2006.

LIANG, R. *et al.* Theoretical and experimental investigation of the filled-type evacuated tube solar collector with U tube. **Solar Energy**, v. 85, n. 9, p. 1735–1744, set. 2011.

MATHIOULAKIS, E.; BELESSIOTIS, V. A new heat-pipe type solar domestic hot water system. **Solar Energy**, v. 72, n. 1, p. 13–20, jan. 2002.

NBR 12.269. Instalação de Sistemas de Aquecimento Solar de Água em Circuito Direto - Procedimento. . Agosto 2006.

SATO, A. I.; SCALON, V. L.; PADILHA, A. **Análise numérica de coletor solar com tubo evacuado**. In: CIBEM10. Porto - Portugal: R.M. Natal Jorge, Agosto. 2011. Acesso em: 22 set. 2011

SHAH, L. J.; FURBO, S. Vertical evacuated tubular-collectors utilizing solar radiation from all directions. **APPLIED ENERGY**, v. 78, n. 4, p. 371–395, Agosto. 2004.

SHAH, L. J.; FURBO, S. Theoretical flow investigations of an all glass evacuated tubular collector. **Solar Energy**, v. 81, n. 6, p. 822–828, jun. 2007.

SIMS, R. E. H. *et al.* **Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Metz, B.; Davidson, O.R.; Bosch, P.R.; Dave, R.; Meyer, L.A., , 2007. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch4.html>

THEUNISSEN, P.-H.; BECKMAN, W. A. Solar transmittance characteristics of evacuated tubular collectors with diffuse back reflectors. **Solar Energy**, v. 35, n. 4, p. 311–320, 1985.

UNESCO; DINIZ ALVES, J. E. 2012 - Ano Internacional da Energia Sustentável para Todos. **2012 - Ano Internacional da Energia Sustentável Para Todos**, 2012.

YAN GAO *et al.* **Simulation Study of Influence of Inertia of Water on the Thermal Performance of All-glass Evacuated Tube Solar Collector**. In: POWER AND ENERGY ENGINEERING CONFERENCE (APPEEC), 2010 ASIA-PACIFIC. IEEE, 28 mar. 2010

YANG, M.; WANG, P. Experimental analysis on thermal performance of a solar air collector with a single pass. **BUILDING AND ENVIRONMENT**, v. 56, p. 361–369, out. 2012.