

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUIZ EDUARDO PIVOVAR

**ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DA  
TEMPERATURA AO LONGO DE UM COLETOR SOLAR E  
RESERVATÓRIO DE ÁGUA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

(TCC 2- Nº de Inscrição - 23)

CURITIBA

2014

LUIZ EDUARDO PIVOVAR

**ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DA  
TEMPERATURA AO LONGO DE UM COLETOR SOLAR E  
RESERVATÓRIO DE ÁGUA**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Doutor Luciano Fernando dos Santos Rossi

CURITIBA

2014

## **TERMO DE ENCAMINHAMENTO**

Venho por meio deste termo, encaminhar para apresentação a monografia do Projeto de Pesquisa "ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA AO LONGO DE UM COLETOR SOLAR E RESERVATÓRIO DE ÁGUA", realizado pelo aluno(s) Luiz Eduardo Pivovar, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica do Paraná.

Orientador: Prof. Luciano Fernando dos Santos Rossi

UTFPR - DAMEC

Curitiba, 09 de Dezembro de 2014

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA AO LONGO DE UM COLETOR SOLAR E RESERVATÓRIO DE ÁGUA", realizado pelo aluno(s) LUIZ EDUARDO PIVOVAR, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Doutor Luciano Fernando dos Santos Rossi  
Departamento de Mecânica, UTFPR  
Orientador

Prof. M. Raul Henrique Erthal  
Departamento de Mecânica, UTFPR  
Avaliador

Prof. Doutor Silvio Luiz de Mello Junqueira  
Departamento de Mecânica, UTFPR  
Avaliador

Curitiba, 09 de Dezembro de 2014

## DEDICATÓRIA

*À pessoa que, diante de toda  
simplicidade, ensinou as coisas  
mais importantes da minha vida.  
Minha mãe, Teresinha Pivovar*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos os envolvidos com a direção da Escola Estadual professora Luiza Ross, no período durante o qual essa monografia foi desenvolvida. Tais profissionais manifestaram apoio e valorização por muitas vezes superior ao que eu merecia.

Agradeço a todos os meus amigos, sem os quais todo o esforço de concretização de um objetivo não teria sentido para mim.

Ao meu orientador, cuja paciência e conhecimento foram de importância superlativa para a concretização deste trabalho.

À banca avaliadora, responsável por sugerir um direcionamento decisivo para a concretização deste estudo.

Agradeço em especial a Bruna Juliane Vieira, por quem sinto um amor isento de qualquer justificativa.

***“Toda a nossa ciência, comparada com a realidade é primitiva e infantil – e, no entanto, é a coisa mais preciosa que temos”***

***Albert Einstein***

## Resumo

Este trabalho foi estruturado com o objetivo de descrever o comportamento térmico de um coletor solar para aquecimento de água, construído a partir de materiais recicláveis (garrafas PET e embalagens Tetra Pack). A principal justificativa para este estudo está na importância gradativa do desenvolvimento de tecnologias associadas ao uso de fontes energéticas renováveis. Utilizando recursos de *Computational Fluid Dynamics* (CFD), foram identificados os principais mecanismos de transferência de calor responsáveis pelo aquecimento da água. Também foi realizada uma descrição da dinâmica de aquecimento do reservatório de água quente. Um estudo preliminar indicou a baixíssima influência que a condutividade térmica das embalagens Tetra Pack exerce no aquecimento da água, devido à pequena espessura dessas superfícies. Resultados mostram que a temperatura de saída da água é fortemente influenciada pela temperatura do ar no interior das garrafas PET. Tais resultados foram utilizados para direcionar as simulações posteriores. A simulação computacional realizada no coletor evidenciou que a maior temperatura do fluido ocorre na saída dos tubos, sendo esse o mecanismo que gera o empuxo responsável pelo escoamento. Também foi possível constatar que a temperatura de saída da água é proporcional ao número de tubos utilizados. De forma específica, chegou-se a um aumento na temperatura de 11%, para um aumento no número de tubos de 10 vezes, considerando o fato de que a vazão mássica foi mantida constante. Por fim, a análise térmica do reservatório, em regime transiente, indica uma tendência à estratificação térmica, na qual o fluido quente se localiza na parte superior e o fluido frio na parte inferior do equipamento.

Palavras Chave: Coletor Solar, Comportamento Térmico, Simulação Computacional.



## **ABSTRACT**

PIVOVAR, Luiz Eduardo. Análise Numérica do Comportamento da Temperatura ao Longo de um Coletor Solar e Reservatório de Água: Estudo de Caso. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). UTFPR – DAMEC. Curitiba. 2014.

This work was structured in order to describe the thermal behavior of a solar collector for water heating, built from recyclable materials (PET bottles and Tetrapak packaging). The main rationale for this study is the gradual importance of developing technologies associated with the use of renewable energy sources. Using Computational Fluid Dynamics resources (CFD), the main heat transfer mechanisms responsible for heating the water have been identified. A description of the dynamics of the heating hot water tank was also performed. A preliminary study indicated the slight influence the thermal conductivity of the Tetrapak packaging plays in heating the water, due to the small thickness of these surfaces. Results have shown that the water outlet temperature is strongly influenced by the air temperature inside the PET bottles. These results were used to direct subsequent simulations. The computer simulation performed on the collector showed that the highest temperature of the fluid occurs in the output of the tubes, which is the mechanism that generates the thrust responsible for disposal. It also appeared that the outlet temperature of the water is proportional to the number of used tubes. Specifically, we arrived to a eleven percent increase in the temperature to increase in the number of tubes tenfold, given the fact that the mass flow rate was kept constant. Finally, analysis of the thermal reservoir, in transient, indicating a tendency towards thermal stratification in which the hot fluid is located at the top and bottom of the cold fluid in the equipment.

Keywords: Solar Collector, Thermal Performance, Computational Simulation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Matriz energética mundial .....	2
Figura 2. Matriz energética brasileira .....	2
Figura 3. Espectro de radiação eletromagnética .....	10
Figura 4. Natureza direcional da radiação solar .....	11
Figura 5. Disposição dos Coletores Solares.....	14
Figura 6. Montagem das garrafas PET's e embalagens Tetrapak.....	15
Figura 7. Sistema de Aquecimento Solar .....	16
Figura 8. Figuras esquemáticas para coletores concentradores e não concentradores .....	19
Figura 9. Concentrador Parabólico.....	21
Figura 10. Concentrador Fresnel.....	22
Figura 11. Concentrador de Disco Parabólico .....	23
Figura 12. Torre de concentração na Espanha .....	24
Figura 13. Exemplo de Coletor Solar Plano .....	25
Figura 14. Componentes de Coletor Solar Plano .....	25
Figura 15. Coletor Solar à Vácuo .....	27
Figura 16. Coletor Solar Esférico .....	28
Figura 17. Coletor Solar Alternativo .....	29
Figura 18. Simplificação Geométrica para o Coletor Solar .....	32
Figura 19. Modelo para Distribuição de Temperatura no Coletor .....	33
Figura 20. Fontes de calor que atuam no coletor .....	34
Figura 21. Simplificação para um Elemento de Coletor .....	36
Figura 22. Circuito Térmico para um Elemento de Coletor .....	37
Figura 23. Balanço de energia no fluido.....	41
Figura 24. Perfil de velocidades para escoamento laminar em tubo.....	46
Figura 25. Estratificação Térmica de Reservatório de Água Quente .....	47
Figura 26. Balanço de Energia no Reservatório .....	48
Figura 27. Exemplo de Malha Gerada por CFD .....	51
Figura 28. Modelo para Elemento de Coletor .....	52
Figura 29. Modelo de Elemento de Coletor com por garrafa PET .....	52
Figura 30. Modelo de Coletor Solar Composto por Cinco Elementos.....	53
Figura 31. Superfície que Representa o Reservatório de Água Quente .....	53

Figura 32. Montagem do Coletor Solar .....	55
Figura 33. Montagem dos Tubos no Reservatório de Água Quente .....	56
Figura 34. Figura esquemática para pescador giratório .....	57
Figura 35. Malha Utilizada no Elemento de Coletor Solar .....	64
Figura 36. Análise Gravitacional do Coletor Solar .....	65
Figura 37. Resultados para análise de influência do $K_{Tetrapak}$ .....	66
Figura 38. Temperatura de Saída x Temperatura do Ar .....	68
Figura 39. Distribuição de temperatura no coletor .....	70
Figura 40. Distribuição de Temperatura na Entrada e Saída do Coletor .....	71
Figura 41. Absorção de Calor nas Paredes do Coletor .....	72
Figura 42. Distribuição de Velocidades .....	73
Figura 43. Linhas de Corrente para o Escoamento .....	74
Figura 44. Perfil de Velocidades para $z = -0,42m$ .....	75
Figura 45. Valor da Velocidade no Ponto Considerado .....	75
Figura 46. Distribuição de Pressão ao Longo do Escoamento .....	76
Figura 47. Absorção de Calor para Quatro Elementos .....	77
Figura 48. Linhas de Corrente para Quatro Elementos .....	78
Figura 49. Resultados para Influência do Número de Tubos na temperatura de saída da água .....	79
Figura 50. Número de Tubos x Temperatura de Saída do Fluido.....	80
Figura 51. Malha Utilizada na Superfície do Reservatório .....	82
Figura 52. Distribuição de temperatura para o reservatório (sem uso) .....	83
Figura 53. Análise do reservatório em regime transiente (sem uso).....	84
Figura 54. Características do Escoamento no Interior do Reservatório (sem uso).....	85
Figura 55. Temperatura em Função do Tempo para um ponto Central do Reservatório.....	86
Figura 56. Sugestão para Captação de Água Fria .....	87
Figura 57. Estratificação Térmica no Reservatório .....	88
Figura 58. Relação entre a temperatura fornecida pelo coletor e a temperatura disponibilizada ao uso.....	89
Figura 59. Análise em Regime Transiente para o Reservatório (em uso).....	90
Figura 60. Características de Escoamento no Reservatório (em uso) .....	91
Figura 61. Temperatura x Tempo.....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Radiação média anual de alguns países.....	6
Tabela 2. Principais tipos de coletores concentradores .....	20
Tabela 3. Dados para Coeficiente de película.....	61
Tabela 4. Dados do Fluido de Trabalho e Tubo PVC.....	61
Tabela 5. Dados Climáticos para Cidade de Curitiba .....	62
Tabela 6. Dados para Escoamento do Fluido .....	62
Tabela 7. Dados para Análise de Influência do KTetrapak.....	66
Tabela 8. Dados para A Influência da Temperatura do Ar .....	68
Tabela 9. Dados para a Influência do Número de Tubos .....	80
Tabela 10. Dados do Material do Reservatório .....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAVA	Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado e Ventilação
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEDER	Centro de Energias Renováveis
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
CFD	Computational Fluid Dynamics
DASOL	Departamento Nacional de Aquecimento Solar
EUA	Estados Unidos da América
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
MEC	Ministério da Educação
MME	Ministério de Minas e Energia
PET	Politereftalato de Etileno
PP	Projeto de Pesquisa
PPP	Proposta de Projeto de Pesquisa
PR	Estado do Paraná
PVC	Policloreto de Vinila
RBCAS	Rede Brasil de Capacitação Solar
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$  - Absortividade

$\beta$  – Slope (°)

$a_w$  - Azimute

$G$  - Fluxo total de radiação ( $W/m^2$ ).

$G_0$ - Radiação solar extraterrestre ( $W/m^2$ ).

$G_{sc}$  - Constante solar ( $W/m^2$ )

$E_a$  -Energia irradiada ( $W/m^2$ )

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ - Constante de Stefan – Boltzmann

$T_s$  - Temperatura absoluta de superfície(K)

$\varepsilon$  - Emissividade

$G_{abs}$  - Energia irradiante absorvida ( $W/m^2$ )

$i$  - Ângulo de incidência (°)

$\alpha$  – Ângulo de altura solar (°)

$\gamma$  - Ângulo do sistema para evitar aprisionamento de bolhas (°)

$Y$  – Comprimento do coletor (m)

$X$  – Largura do coletor (m)

$Z$  – Espessura do coletor (m)

$A$  - Área ( $m^2$ )

$U$  – Coeficiente global de transmissão de calor ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

$c_p$ - Calor específico ( $kJ/Kg^\circ C$ ).

$m$  – massa (kg)

$k$  – Condutividade térmica ( $W/m \cdot k$ )

$h$  – Coeficiente de película ( $W/m^2 \cdot k$ )

$D$  - Diâmetro do tubo (m)

$R$  – Resistência térmica ( $m^2 K / W$ )

$\overline{Nu}_D$  - Número de Nusselt médio

$Pr$  - Número de Prandtl

$Rad$  - Número de Rayleigh

$g$  - Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

$\nu$  – Viscosidade cinemática ( $m^2/s$ )

$Q_{util}$  – Energia útil (W)

$Q_{rad}$  -Energia disponível (W)

$\eta$  - eficiência térmica

$A_c$  - Área do coletor ( $m^2$ )

$G_T$  - Radiação solar incidente no coletor ( $W/m^2$ )

$P$  – Perímetro (m)

$\rho$  - Massa específica ( $kg/m^3$ )

$\mu$  - Viscosidade dinâmica (  $N.s/m^2$ )

$Re$  – Número de Reynolds

## Sumário

<b>1.</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.2	Caracterização da Oportunidade	3
1.3	Objetivos	5
1.3.1	Objetivos Gerais	5
1.3.2	Objetivos Específicos	5
1.4	Justificativa	5
1.5	Escopo do Trabalho	7
<b>2.</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>9</b>
2.1	Energia Solar	9
2.2	Sistemas de Aquecimento de Água com Energia Solar	12
2.3	Descrição do Sistema de Aquecimento de água constituído de Materiais Recicláveis	14
2.4	Coletores solares	17
2.4.1.	Coletor com Concentração.	20
2.4.2.	Coletor sem Concentração.	24
2.4.3	Classificação do sistema estudado	29
<b>3.</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>31</b>
3.1	Radiação Interna do Sistema	31
3.2	Considerações Térmicas no Coletor Solar	32
3.2.1	Determinação das perdas térmicas no coletor	35
3.2.2	Análise de Desempenho de Coletores Solares	39
3.3	Balanço de energia no fluido	41
3.4	Considerações sobre escoamento	42



3.5	Considerações térmicas no reservatório	46
<b>4.</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>49</b>
4.1	Análise Numérica do Sistema	49
4.2	Etapas da Simulação	51
4.3	Obtenção do Fluxo de Radiação Solar	54
4.4	Componentes do Coletor Solar para Montagem em Escola Pública	54
4.4.1	Coletores	54
4.4.2	Reservatório de água	56
4.5	Justificativa da Metodologia	57
<b>5.</b>	<b>Desenvolvimento das Simulações</b>	
<b>Computacionais</b>		<b>59</b>
<b>6.</b>	<b>Resultados</b>	<b>60</b>
6.1	Estudo Preliminar	60
6.1.1.	Dados de Entrada para simulação	60
6.1.2.	Influência da condutividade térmica na temperatura de saída do fluido	63
6.1.3.	Influência da temperatura do ar recluso nas garrafas PET na temperatura na saída do fluido	67
6.2.	Análise do comportamento térmico do coletor	69
6.3.	Descrição do Escoamento ao longo do Coletor	72
6.4	Influência do Número de Elementos na Temperatura de saída do	77
6.5	Descrição do comportamento termo-fluidodinâmico do Reservatório	81
6.5.1.	Análise termo-fluidodinâmico para reservatório isento de uso	83
6.5.2	Análise termo-fluidodinamica para reservatório em uso	87
6.6	Considerações sobre as simulações	93
<b>7.</b>	<b>Conclusões</b>	<b>94</b>

<b>8. Referências Bibliográficas</b>	<b>97</b>
<b>Apêndice - Unidade Experimental</b>	<b>102</b>

## 1. Introdução

Os discursos de incentivo a utilização de energias renováveis se acentuam, tendo em vista as previsões de escassez para as fontes ditas não renováveis, bem como, os impactos ambientais ocasionados por elas.

As fontes não renováveis de energia caracterizam-se por estarem presentes na natureza em quantidade limitada, uma vez que seu processo de regeneração ocorre em escala de tempo geológica ou de formação do sistema solar (Ministério de Minas e Energia, 2001). Estão, portanto, sujeitas a um limite de exploração. Nesta categoria, se inserem os combustíveis de origem fóssil - carvão mineral, gás natural, petróleo - e combustíveis de origem nuclear, como o urânio.

Por outro lado, as fontes de energia renováveis possuem a capacidade de regeneração em tempo real e, por esse motivo, não se esgotam (Ministério de Minas e Energia, 2001). Como exemplos para esse grupo pode-se citar a energia solar, energia eólica (dos ventos), energia hidráulica (dos rios), biomassa (matéria orgânica), geotérmica (calor interno da Terra), maremotriz (das ondas de mares e oceanos) e energia de correntes marítimas.

A disponibilidade de ambas as formas de energia, portanto, já seria uma importante justificativa para a progressiva adoção de fontes renováveis, seguida do baixo impacto ambiental associado à sua utilização, quando comparada às fontes de energia limitadas.

O que se constata atualmente, no entanto, é a predominância do uso de combustíveis fósseis, contexto esse que leva alguns autores a definir o petróleo como o paradigma atual da geração de energia.

Segundo Pimentel (2011), esse cenário não se explica apenas pela momentânea abundância experimentada pela referida fonte, mas, principalmente, pela alta competitividade associada a ela. Esse autor explica que foram os investimentos em tecnologia e infraestrutura, ao longo de mais de um século, os responsáveis por adaptar ao petróleo as estruturas de produção e consumo de energia (Pimentel 2011).

A predominância dos combustíveis fósseis em detrimento as fontes renováveis de energia pode ser constatada na figura 1, a qual indica a matriz energética mundial de 2010. A baixíssima parcela relativa ao uso de energia solar faz com que ela não tenha espaço na escala utilizada no gráfico.

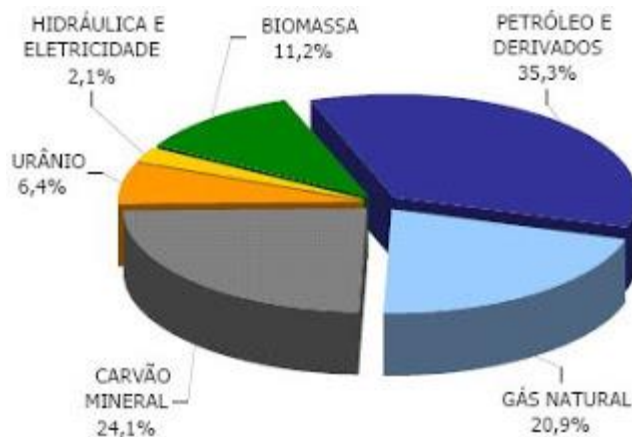


Figura 1. Matriz energética mundial  
Fonte: Agência Internacional de Energia

A análise da matriz energética brasileira revela um cenário um pouco diferente das tendências mundiais, como é indicado na figura 2. Em termos nacionais, a parcela das fontes de energia renováveis é mais significativa, sendo reforçada pelo elevado número de hidroelétricas no país. A ausência da energia solar no gráfico, entretanto, reflete a tendência mundial de baixa adesão a essa fonte.

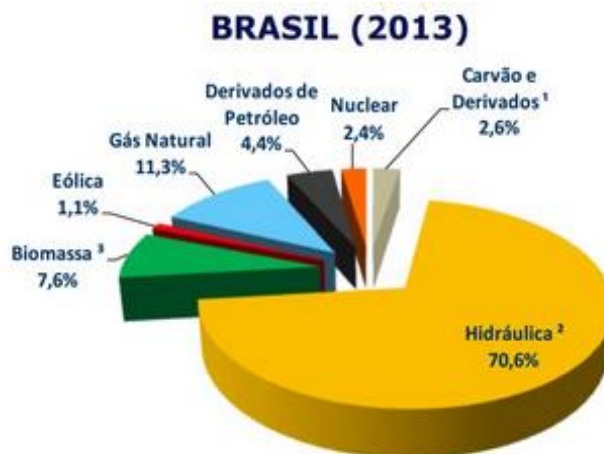


Figura 2. Matriz energética brasileira  
Fonte: Ministério de Minas e Energia

Muito embora os combustíveis fósseis exerçam domínio absoluto entre as parcelas de uso de energia atuais, uma mudança no sentido do seu abandono para a adoção de fontes renováveis é fato inevitável. A prospecção, no entanto, a respeito do momento e da forma como essa transição irá ocorrer é uma tarefa difícil de ser descrita.

Inserido nesse contexto, o presente trabalho defende o desenvolvimento de tecnologias associadas às fontes renováveis de energia, vislumbrando torná-las competitivas a ponto de serem amplamente empregadas. De forma específica, será apresentado um estudo a cerca do comportamento térmico de um sistema que utiliza energia solar para aquecimento de água.

O referido sistema possui como característica notória o fato de ser construído a partir de materiais recicláveis. A metodologia de análise envolverá o uso de modelagem numérica em elementos finitos, com o propósito de determinar o comportamento da temperatura ao longo de um coletor solar e de seu reservatório de água.

Pretende-se com esse estudo levantar dados que auxiliem no dimensionamento do sistema de aquecimento, de acordo com características específicas de demanda de água quente. Também será avaliada a viabilidade de aplicação do aquecedor em termos de eficiência energética.

É relevante destacar que este projeto não assume a pretensão de ser o responsável pela transição entre o paradigma atual do petróleo e as fontes de energia que causam menores danos ao planeta. O que se pretende com os resultados dessa pesquisa é defender a tese de que deve ser destinado um espaço cada vez maior na matriz energética global para as fontes de energia renováveis.

## **1.2 Caracterização da Oportunidade**

O estudo da viabilidade de aplicação do sistema descrito acima será, neste projeto, sintetizado em dois âmbitos: No âmbito de análise e dimensionamento, serão descritas as distribuições de temperatura nos coletores e no reservatório de água, com o propósito de determinar o número de componentes (garrafas PET), necessário a atender os requisitos de demanda. Tais requisitos dizem respeito à vazão e temperatura de água,

inerentes a um banho agradável. Também será feito um estudo relativo ao tempo necessário para obter as temperaturas de banho desejadas.

Esses dados devem ser utilizados para determinar as potencialidades do coletor, bem como a energia elétrica que pode ser poupada com o seu funcionamento. Muito embora tenha sido apresentado em 2004, o referido sistema térmico ainda não foi submetido à similar análise, sob o ponto de vista da engenharia. Além de auxiliar no desenvolvimento do projeto e dimensionamento do aquecedor, os dados obtidos por este estudo contribuirão para sustentar a tese de que sua aplicação é viável.

No âmbito do estudo de caso, será feito o dimensionado e aplicação de um protótipo do aquecedor na Escola Estadual Professora Luiza Ross, localizada na cidade de Curitiba PR. A possibilidade de aplicar em uma escola pública um sistema de geração de energia limpa e renovável e, sobretudo, desenvolvido a partir de materiais recicláveis, constitui –se numa grande fonte de motivação para a concretização deste trabalho.

O projeto do aquecedor solar de baixo custo será vinculado ao projeto de ensino médio inovador, promovido pelo governo federal e contemplado pela referida escola. O ensino médio inovador consiste no aumento da carga horária para esse nível de ensino, visando o desenvolvimento de atividades que tornem o aprendizado mais atrativo para os jovens e reduza a evasão escolar (Ministério da Educação, 2012). Portanto, o presente projeto também terá uma dimensão de apoio educacional, podendo atuar como relevante instrumento de ensino na escola onde foi aplicado. Especificamente, o coletor solar servirá como laboratório para as aulas de ciência, física, química e geografia.

Atuando como exemplo prático e concreto de um projeto de sustentabilidade, o equipamento contribuirá para a conscientização sobre a importância da reciclagem e para motivar o uso de energia solar em ambientes públicos. Por fim, deve ser apontado que a água quente produzida no sistema térmico da escola será usada no vestiário de educação física.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivos Gerais**

- Avaliar a viabilidade de aplicação de um sistema de coleta de energia solar, desenvolvido a partir de materiais recicláveis.

- Promover o sistema como relevante recurso educacional, para ser utilizado nas aulas de ciência de ensino fundamental e médio.

- Descrever o comportamento térmico do coletor e reservatório, utilizando recurso CFD.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Analisar o comportamento da temperatura ao longo do coletor e do reservatório de água do sistema de aquecimento usando energia solar.

- Determinar o número de elementos (tubos de PVC) necessários ao fornecimento de água a determinada temperatura, de acordo com vazão demandada.

- Determinar a eficiência energética do coletor.

- Identificar os mecanismos de trocas de calor responsáveis pelo aquecimento da água.

## **1.4 Justificativa**

Os benefícios inerentes a este projeto se concretizam em várias dimensões, porém a mais importante delas diz respeito à economia de energia elétrica. A utilização desse sistema pressupõe o aquecimento da água através da energia solar, contribuindo com significativa redução no consumo da eletricidade.

Não é tarefa fácil precisar o quanto de energia pode ser poupada com a presença de um aquecedor solar, uma vez que os perfis de consumo finais de energia elétrica possuem significativas variações de acordo com a região bioclimática do país, e ainda diferem entre si de acordo com as estações do ano (Fedrigo *et al*, 2009).

Um estudo realizado por Fedrigo (*et all*, 2009) indica que a parcela de energia consumida pelos chuveiros é mais acentuada nas regiões sul e sudeste, chegando a 43% na região sul, durante o inverno.

É relevante destacar, no entanto, que os benefícios da redução de energia não se restringem ao âmbito financeiro. A redução global na demanda energética pode contribuir com a diminuição na possibilidade de ocorrência de apagões e racionamento de energia.

Outra importante justificativa para aumentar os investimentos no desenvolvimento de tecnologias que utilizem energia solar refere-se ao enorme potencial associado a ela e que tem sido pouco explorado no mundo. O argumento é ainda reforçado ao analisar os dados de energia solar que atingem o Brasil anualmente. Esses dados são indicados na tabela 1, onde também é possível constatar que a radiação solar recebida pelo Brasil é superior aos valores relativos a alguns países da Europa, os quais possuem maior tradição no emprego da referida fonte energética.

Tabela 1. Radiação média anual de alguns países

País	Radiação Solar Anual (KW/m <sup>2</sup> )
Brasil	4200-6700
Alemanha	900-1250
França	900-1650
Espanha	1200-1850

Fonte: Atlas de Energia Solar Brasileiro

Por fim, a última justificativa para a concretização desse projeto apresenta-se como uma solução para a baixa competitividade associada à energia solar. Trata-se da característica mais marcante do tipo de aquecedor solar que será analisado : a maior parte dos materiais utilizados no sistema é reciclável e confere a ele um baixo custo, em comparação aos coletores comerciais. De forma específica, são utilizadas garrafas PET como elementos estruturais e caixas de leite do tipo Tetra PAK que, pintados com tinta preta fosca, desempenham a função de trocadores de calor. É evidente que tal característica também contribui com a preservação da



natureza, já que retira dos ecossistemas as garrafas e embalagens que não forem recicladas.

### **1.5 Escopo do Trabalho**

Este texto está estruturado em seis capítulos, sendo complementado por um apêndice. O capítulo 1 refere-se a uma descrição do contexto no qual o trabalho se insere. Nele são apresentadas as motivações para a abordagem da pesquisa, os objetivos do estudo e os argumentos que justificam a concretização deste trabalho. Enfatiza a importância do uso progressivo das fontes energéticas renováveis.

O capítulo 2 corresponde a Revisão Bibliográfica do trabalho, onde são apresentadas as características associadas à energia solar e a importância de se empregar esse tipo de energia. Em seguida, faz-se uma descrição a respeito dos tipos de sistemas de aquecimento solar empregados atualmente, enfatizando o sistema composto por materiais recicláveis. Por fim, apresentam-se os tipos de coletores solares existentes, com o propósito de classificar o coletor estudado neste trabalho.

O Capítulo 3, apresentado como fundamentação teórica, aborda uma síntese dos principais conceitos que direcionam o desenvolvimento desse estudo. Inicia-se descrevendo as principais propriedades inerentes à energia solar. Em seguida, faz-se uma abordagem a cerca do funcionamento do aquecedor solar, objeto de estudo deste trabalho. Por fim, são apresentadas as análises térmicas e de escoamento, as quais definem o procedimento metodológico adotado. Ao longo desse capítulo são apresentadas breves descrições de trabalhos similares que contribuíram para o direcionamento desta pesquisa.

No capítulo 4 apresenta-se a metodologia necessária para a obtenção dos resultados almejados. Faz-se uma descrição a cerca da técnica de CFD utilizada neste trabalho e das etapas realizadas pelas simulações computacionais.

No capítulo 5 é feita uma descrição geral a cerca do que foi realizado neste trabalho, enfatizando as simulações computacionais realizadas.

Os resultados são apresentados no capítulo 6, iniciando-se com um estudo preliminar que define os parâmetros estruturais do sistema que influenciam no aquecimento de água. Em seguida, faz-se a descrição térmica e de escoamento do coletor colar, enfatizando a influência do número de tubos no aquecimento de água. O capítulo se encerra com a análise térmica e de escoamento do reservatório de água quente.

As conclusões, por fim, são contempladas no capítulo 7. Nele é apresentada uma síntese das principais teses inferidas neste estudo e propõem-se sugestões de pesquisas para trabalhos futuros, com o propósito de aprofundar os resultados obtidos neste trabalho. Também são apresentadas sugestões de melhorias para o sistema de aquecimento de água.

## 2. Revisão Bibliográfica

Este capítulo inicia-se com uma síntese a cerca das características associadas à energia solar e da importância de se empregar esse tipo de energia. Em seguida, faz-se uma descrição a respeito dos tipos de sistemas de aquecimento solar empregados atualmente, enfatizando o sistema composto por materiais recicláveis. Por fim, apresentam-se os tipos de coletores solares existentes, com o propósito de classificar o coletor estudado neste trabalho.

### 2.1 Energia Solar

A maior parte da energia produzida pelo sol é resultado de uma reação termonuclear dos isótopos de Hidrogênio e Hélio. A principal função dessa energia é manter a estabilidade do sol, evitando que ele entre em colapso devido à sua elevada gravidade.

Estima-se que esse processo será mantido ainda pelos próximos 6,5 bilhões de anos até que cesse o hidrogênio do sol e as reações nucleares deixem de acontecer (Maciel 1995). Além de manter a estrutura do sol intacta toda essa energia é irradiada para o espaço, tendo uma contribuição fundamental para a manutenção da vida na Terra.

De acordo com sua natureza a radiação solar é classificada como onda eletromagnética e se propaga com velocidade de 300 000 km/h. Também chamada de onda curta, ocorre para uma faixa espectral de 0,1 $\mu$ m a 5  $\mu$ m, tendo uma máxima densidade espectral em 0,5  $\mu$ m, que é a luz verde (CRESESB, 2003). A maior parte da radiação solar está entre 0,15 e 4,0  $\mu$ m, indicando que apenas a faixa do visível, ultravioleta e infravermelha possui relevância na energia que atinge a Terra (Souza 1994). A distribuição percentual da radiação indica 46% de infravermelho, 45% de luz visível e 9% de luz ultravioleta. O espectro completo da radiação solar é indicado na figura 3.

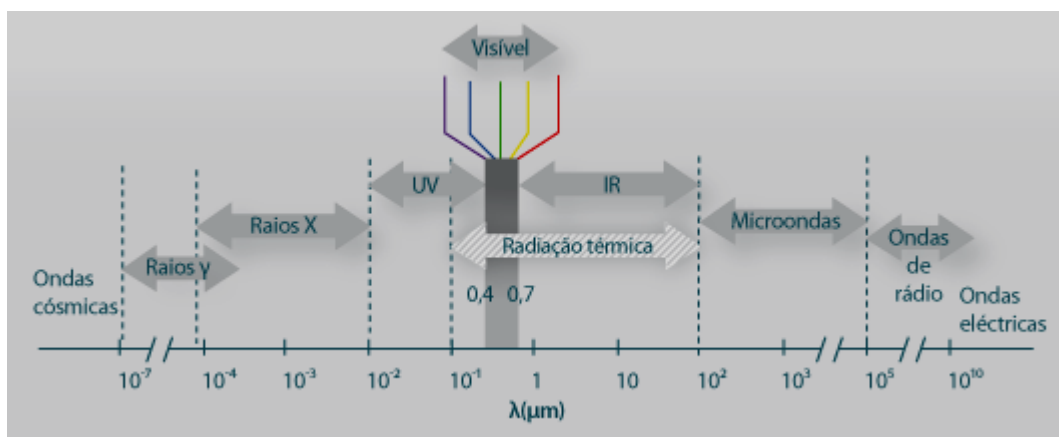


Figura 3. Espectro de radiação eletromagnética  
 Fonte: Halliday, Resnick (2008)

A Terra recebe do sol uma energia correspondente a  $1,7 \times 10^{17}$  kW durante um ano (Ministério de Minas e Energia). A compreensão de tal ordem de grandeza pode ser melhor concretizada através de comparações: corresponde a uma energia de dez mil vezes o consumo mundial desse período; estima-se que com uma eficiência de conversão de 10%, uma área de cerca de 150 Km<sup>2</sup> poderia fornecer energia suficiente para todos os Estados Unidos (Pimentel, 2011); de acordo com Vidal (1998 apud Hatashita 2004, p18) a energia solar irradiada no território brasileiro, equivale a produção energética de 120 mil usinas hidrelétricas de Itaipu, operando 24 horas por dia.

A despeito de todo esse potencial é importante destacar que, mesmo em dias totalmente claros, nem toda energia solar direcionada para Terra chegará à superfície, uma vez que grande parte da radiação é absorvida ou espalhada pelos gases que compõem a atmosfera.

Sob essa ótica, a radiação solar é separada em três categorias (Souza 1994): a radiação direta é definida como a parcela de energia que atravessa a atmosfera terrestre sem sofrer qualquer alteração em sua direção original; A radiação difusa é a componente da radiação que, ao atravessar a atmosfera, é espalhada por aerossóis, poeira e pode ser refletida pelos elementos que compõem a atmosfera; A radiação global é a energia radiante por unidade de tempo e de área que incide em uma superfície, expressa em W/m<sup>2</sup>.

Do ponto de vista numérico, o fluxo de radiação é a energia incidente ou emitida num plano, por unidade de área e por unidade de tempo. No caso da emissão, inclui as componentes refletida e transmitida, além daquela emitida

conforme seu nível de temperatura, sendo representada pelo símbolo  $G$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). Neste trabalho esse parâmetro será utilizado para a determinação da eficiência térmica do coletor solar.

Segundo Siqueira (2009), no que se refere à intensidade e a dependência espectral e direcional da radiação solar incidente, a radiação na extremidade externa da atmosfera terrestre comporta-se como um feixe de raios praticamente paralelos que formam um ângulo  $\theta$  com a vertical, conforme indica a figura 4.

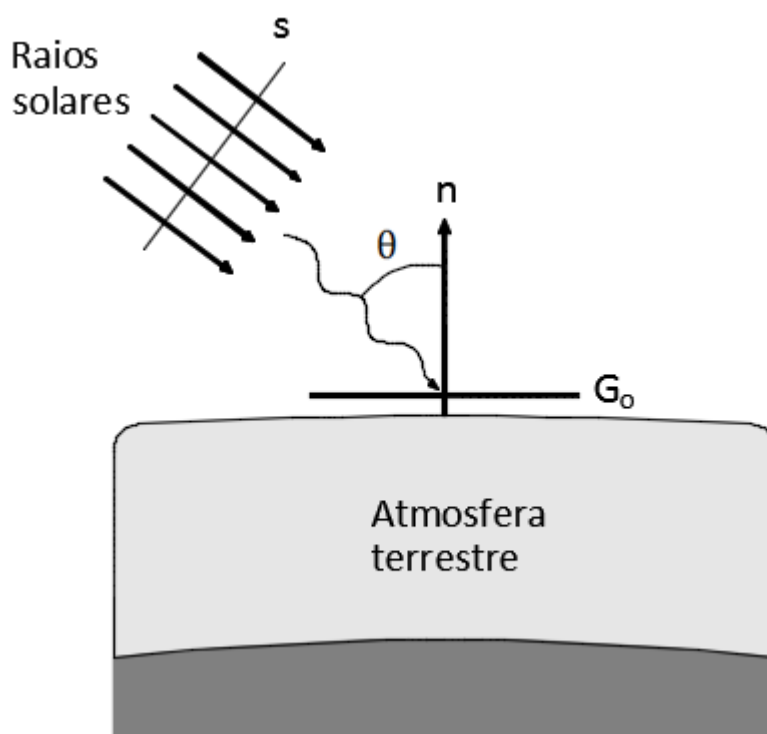


Figura 4. Natureza direcional da radiação solar  
Fonte: autoria própria

A radiação solar extraterrestre  $G_0$ , é função da latitude geográfica, da hora do dia e do dia do ano. Também depende da constante solar,  $G_{sc}$ , a qual é definida como o fluxo de radiação incidente em uma superfície posicionada perpendicularmente à direção de propagação da radiação, fora da atmosfera terrestre na distância média da Terra ao sol.

O principal atrativo inerente à energia solar é que se trata de uma fonte energética limpa, ou seja, apresenta baixos índices de agressão ao meio ambiente.

Vale citar os benefícios propiciados por cada metro quadrado de coletor solar instalado, segundo a ABRAVA (2003) :

- Evita a inundação de cerca de 56 m<sup>2</sup> para a instalação de hidroelétricas
- economiza 55kg de GLP/ano
- economiza 66 litros de diesel/ano
- economiza 73 litros de gasolina/ano
- elimina o consumo de 215 kg de lenha/ano
- diminui a necessidade de energia nuclear

Apesar de todos esses atrativos a baixa competitividade associada à energia solar faz com que todo esse potencial ainda esteja longe de ser bem aproveitado. Em 2007, a energia solar representava apenas 0,01% da eletricidade gerada em âmbito mundial. Esse baixo percentual pode ser explicado a partir de dois âmbitos: 1) Em relação ao uso de energia solar para aquecimento de água, a baixa adesão justifica-se devido aos elevados custos inerentes à implantação de painéis coletores; 2) No âmbito da geração de eletricidade, os problemas estão relacionados às irregularidades da incidência de luz em painéis fotovoltaicos ou espelhos concentradores de luz, não apenas em função da época do ano, mas também ao longo do dia e hora. O aparato tecnológico para suportar tais imprevisibilidades também encarece o sistema.

## **2.2 Sistemas de Aquecimento de Água com Energia Solar**

Segundo dados do Departamento Nacional de Aquecimento Solar (Departamento Nacional de Aquecimento Solar, 2013), a produção nacional de coletores para sistemas de aquecimento solar cresceu 19,8% em 2013, em comparação com 2012, somando mais de 1,38 milhão de m<sup>2</sup>. Em pesquisa realizada pelo DASOL, junto a empresas do setor a área acumulada de coletores instalados no país chegou a 9,793 milhões m<sup>2</sup> (Departamento Nacional de Aquecimento Solar, 2013).

Para esse mesmo ano, a produção de coletores solares abertos (para piscinas) cresceu 18,3%, enquanto a de coletores fechados (para aquecimento da água de banho) aumentou 19,4%. Já a fabricação de reservatórios térmicos registrou a produção de 171.223 unidades e capacidade média de 74 litros por metro quadrado (Departamento Nacional de Aquecimento Solar, 2013).

Grande parte dos sistemas de aquecimento solar empregados no Brasil utiliza a água como fluido térmico e compõem-se de dois itens básicos: o coletor solar e o reservatório. Os itens secundários referem-se às tubulações e conexões. Podem ou não possuir fonte auxiliar de energia.

De acordo com seu princípio de funcionamento os sistemas de aquecimento de água que utilizam energia solar podem ser classificados em ativos e passivos.

Segundo Siqueira (2009), nos sistemas passivos ou sistema termossifão, a circulação da água é obtida por convecção natural. Para este caso, a vazão mássica de água é garantida apenas pela diferença de densidade resultante da estratificação da temperatura no sistema. Massas de fluido com menor temperatura tendem a se posicionar nas partes inferiores do reservatório gerando um empuxo capaz de mover as porções de fluido quente para as partes superiores. Nesses sistemas, as partes superiores dos coletores (saída de fluido quente) devem ser posicionadas abaixo da base dos reservatórios para que o fluxo do líquido seja garantido (Siqueira, 2009).

De acordo com Siqueira (2009) nos sistemas ativos a circulação do fluido de trabalho é assegurada por uma bomba hidráulica. Nesse tipo de sistema não existe restrição relativa à disposição entre os coletores solares e os reservatórios, o que possibilita uma flexibilidade para a instalação dos coletores visando à otimização na captação de energia. Apresenta como desvantagem, porém, o fato de ter que usar uma fonte auxiliar de energia. Neste caso, a bomba de circulação é controlada por um sistema de sensores que monitoram a temperatura no fundo do reservatório e na saída do coletor. Se a temperatura na saída do coletor for superior à temperatura do fundo do reservatório, a bomba será ativada e será desativada em caso contrário (Siqueira, 2009).

A disposição dos coletores é fator importante no desempenho do sistema bem como em sua manutenção. A figura 5 apresenta os ângulos que influenciam no desempenho de um aquecedor solar.

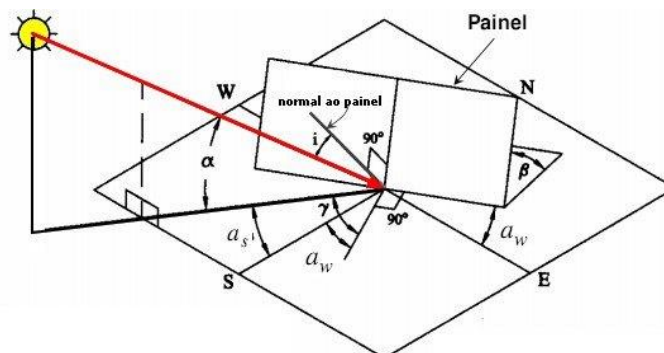


Figura 5. Disposição dos Coletores Solares  
Fonte: [www. eficiencia.com](http://www. eficiencia.com)

O ângulo de inclinação da placa em relação a uma superfície horizontal é chamado de *slope*, representado pela letra  $\beta$ , na figura 5. Outro ângulo relevante é o azimute, definido como direção entre a placa e a perpendicular à linha do equador, definido como  $a_w$  na figura. Na figura 5 também são indicados o ângulo de incidência  $i$  e o ângulo de altura solar  $\alpha$ .

Os níveis de irradiação sobre a placa estão relacionados com a orientação da instalação. Em Portugal, por exemplo, a orientação ótima de uma instalação é a direção sul, com um ângulo de inclinação de  $35^\circ$ . No Brasil, o painel deve estar voltado para o Norte geográfico com uma inclinação de  $25^\circ$  a  $30^\circ$ . Neste caso, o nível de irradiação chega a ser 15% maior do que numa placa horizontal (ângulo de inclinação:  $\beta = 0$ ) (Souza 1994).

### 2.3 Descrição do Sistema de Aquecimento de água constituído de Materiais Recicláveis

O sistema de aquecimento de água, objeto de estudo deste trabalho, foi desenvolvido pelo técnico em eletromecânica aposentado José Alcino Alano. Esse sistema apresenta como característica particular o fato de usar coletores de energia solar, construídos com materiais recicláveis. Especificamente,



garrafas PET's atuam como elementos estruturais e geram um efeito estufa para preservar o calor fornecido aos tubos de PVC. Isso ocorre, pois o material das garrafas deixa entrar a radiação visível e impede a saída de infravermelho. Também protege o entorno dos coletores de influências externas, como o vento e oscilações de temperatura, que podem comprometer o desempenho do sistema.

As caixas de leite TETRAPAK, pintadas com tinta preta fosca, comportam-se como trocadores de calor, uma vez que recebem a energia irradiada pelo sol e a transmitem para os tubos. Dessa forma, contribuem para potencializar a captação de energia, pois aumentam a área de troca térmica. A figura 6 mostra em alguns detalhes a montagem das garrafas PET's e das embalagens TETRAPAK.



Figura 6. Montagem das garrafas PET's e embalagens Tetrapak  
Fonte: Alano (2004)

Os itens obtidos comercialmente correspondem, essencialmente, aos tubos de PVC e ao reservatório de água. Os coletores solares consistem numa estrutura composta por esses tubos envolvidos pelas caixas Tetrapak e pelas garrafas PET. O sistema como um todo, é apresentado na figura 7.



Figura 7. Sistema de Aquecimento Solar  
 Fonte: Alano (2004)

Segundo Alano (2004) a circulação de água no sistema é assegurada pelo princípio do termo sifão (sistema passivo), isto é, um sistema em que a água circula apenas por diferença de densidade (ou massas específicas), sem a necessidade de uma bomba. É essa a perspectiva adotada neste projeto.

Para este caso, o coletor solar deve ser instalado de forma que o barramento superior (9) – ligado ao retorno de água quente – seja instalado abaixo do nível inferior do reservatório de água. Sugere-se uma diferença de altura de no mínimo 30 cm e de no máximo 3m. Dessa forma, a circulação de água é garantida, pois a água fria (e mais densa) tende a se localizar na parte inferior do reservatório e se mover para a parte inferior do coletor (Alano, 2004). A diferença de densidade entre as massas de água quente e fria gera uma força de empuxo responsável por descolar a água quente para as partes superiores do sistema. Enquanto houver radiação solar incidindo sobre o sistema, esse ciclo é mantido.

Na figura 7 também é indicado um redutor de turbulência (4), que deve ser utilizado em reservatórios com capacidade superior a 500 litros, com a finalidade de garantir a estratificação entre as massas de água quente e fria. Sem ele, a mistura dessas massas de água pode comprometer o desempenho do sistema. Nessa mesma figura, o pescador giratório (7) tem a função de

controlar o fluxo de água que é enviado para o consumo. De acordo com seu posicionamento, pode permitir o envio de apenas água aquecida, ou uma mistura entre a água fria (proveniente da rede de abastecimento) e a água aquecida.

A disposição da instalação também está relacionada com a manutenção do coletor. Recomenda-se que os coletores recebam uma inclinação em relação ao fluxo de água, denotada pelo ângulo  $\gamma$ , na figura 7, a fim de dissipar as bolhas que tendem a se formar nos tubos. A permanência de bolhas no sistema pode inibir a circulação de água, provocando avarias irreversíveis nos componentes.

## **2.4 Coletores solares**

O coletor solar constitui-se como o principal componente de um sistema de aquecimento solar. Segundo Faria (2007) a função desse componente é promover o aquecimento de um fluido de trabalho, como água, ar ou óleo, através da conversão da radiação eletromagnética proveniente do sol em energia térmica. Devido a essa função, os coletores solares devem ser constituídos de materiais que possuem alta emissividade e absorvidade de radiação.

Segundo Kalogirou (2009), de acordo com a temperatura obtida, os coletores solares são classificados em duas categorias: coletores concentradores e coletores não concentradores. O fator que classifica um coletor solar em uma dessas categoriais é a taxa de concentração de energia, sendo definida como a área de abertura do coletor (área do plano perpendicular ao raio incidente) sobre a área de absorção do receptor (Kalogirou, 2009).

Os coletores não concentradores não possuem métodos de concentração de energia, ou seja, para esses equipamentos a taxa de concentração varia entre um e cinco (Kalogirou, 2009). Eles são empregados em sistemas que necessitam de temperaturas baixas (inferiores a 100°C), como o aquecimento de água residencial.

Em aplicações que necessitem de temperaturas superiores (acima de 100°C), são empregados os coletores concentradores, os quais possuem taxa de concentração acima de cinco (Kalogirou, 2009). Esses equipamentos possuem superfícies refletoras (em alguns modelos são utilizadas lentes ópticas) que direcionam a radiação solar direta em um foco, onde há um receptor pelo qual escoam o fluido a ser aquecido.

A fim de realizar uma comparação entre as dimensões relativas ao coletor e receptor, para cada um dos coletores citados acima, considera-se a figura 8.

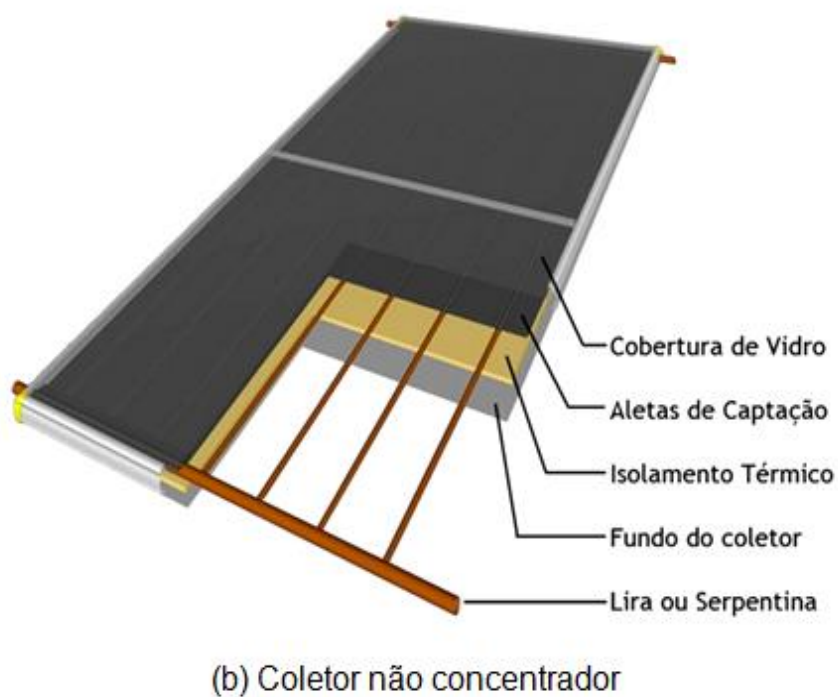
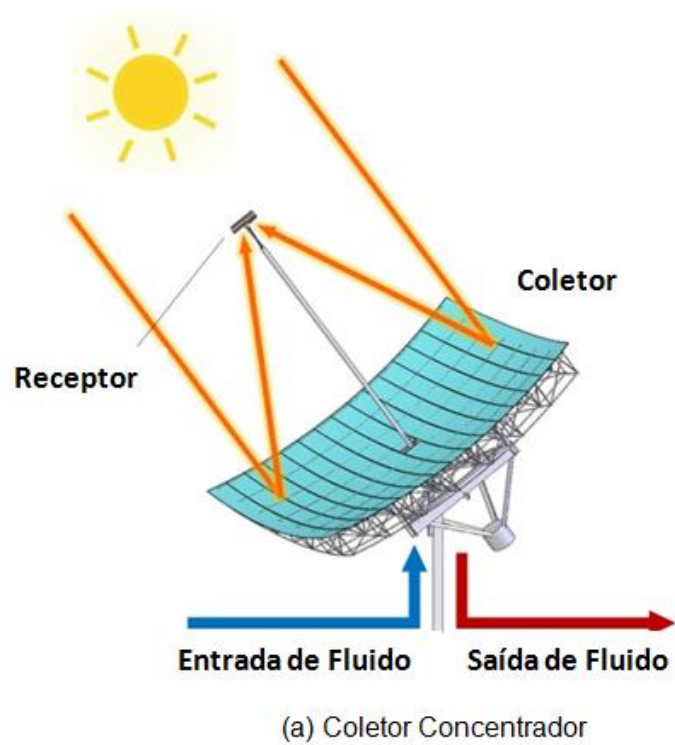


Figura 8. Figuras esquemáticas para coletores concentradores e não concentradores

Fonte: Kalogirou (2009)

Na figura 8a são indicadas as dimensões para um coletor solar com concentração. Neste caso, é possível constatar que a área do coletor é bem superior à área do receptor. Na figura 8b, são indicadas as dimensões para um coletor plano sem concentração, no qual a área do coletor (aletas de captação) possui dimensão mais próxima à área do receptor (tiras ou serpentina).

#### 2.4.1. Coletor com Concentração.

Devido à possibilidade de gerar temperaturas maiores, os coletores solares com concentração são empregados em processos industriais e na geração de energia elétrica. Na tabela 2 são listados os principais coletores com concentração, assim como suas propriedades térmicas.

Tabela 2. Principais tipos de coletores concentradores

Tecnologia	Faixa de Capacidade (MW)	Taxa de Concentração	Eficiência Solar Elétrica (%)	Área Requerida (m <sup>2</sup> /kW)
Parabólico	10-200	70-80	10-15	18
Fresnel	10-200	25-100	9-11	-
Torre	10-150	300-1000	8-10	21
Disco	0,01-0,4	1000-3000	16-18	20

Fonte: Kalogirou (2009)

De acordo com Kalogirou (2009), os concentradores parabólicos são revestidos por um material refletor em formato parabólico. Ao longo da linha de foco desse coletor é colocado um tubo metálico pintado de preto, coberto por um tubo de vidro para evitar perdas de calor (Kalogirou, 2009). Quando o aquecedor aponta para o sol, a radiação direta é refletida e direciona essa energia para o foco, no qual se localiza o receptor. Dessa forma, a radiação concentrada aquece o fluido que circula internamente no tubo. Um exemplo desse tipo de coletor é indicado na figura 9.



Figura 9. Concentrador Parabólico  
Fonte: Renewable Power News

As primeiras plantas que utilizam esse tipo de coletor começaram a operar em meados da década de 1980, no estado da Califórnia, EUA. Considerada como a tecnologia mais madura do setor de captação de energia solar, segundo Kalogirou (2009), esses equipamentos permitem o aquecimento de fluidos a temperaturas de até 400 °C, de modo a serem utilizados na geração de energia e para geração de calor em processos industriais.

Os coletores Fresnel subdividem-se em duas categorias: o coletor Fresnel de lentes e o coletor linear Fresnel Kalogirou (2009). O primeiro é constituído de um material plástico transparente de modo a concentrar os raios em um receptor, enquanto que o segundo é formado por uma série de tiras planas lineares reflexivas (Kalogirou, 2009), como é indicado na figura 10.



Figura 10. Concentrador Fresnel  
Fonte: Centro de Energias Renováveis (2010)

Uma consideração a respeito do coletor linear de Fresnel refere-se ao cuidado necessário no projeto, para evitar que um espelho cause sombra em outro, fato que exige o aumento na área a ser ocupada pela planta. Os modelos de Fresnel constituem-se, ainda, como uma tecnologia incipiente e a maior parte das plantas do mundo são plantas piloto. Dentre elas destacam-se as plantas em operação nos EUA e na Espanha, cuja capacidade varia entre 1 e 5MW (Kalogirou, 2009).

O disco parabólico é um concentrador que possui foco pontual, como é indicado na figura 11. Nesse equipamento o disco possui a capacidade de rastrear o sol partir de dois eixos, e assim é capaz de apontar diretamente para o sol desde o nascer até o poente (Kalogirou, 2009).





Figura 11. Concentrador de Disco Parabólico  
Fonte: Global Nevadacorp (2011)

Segundo Kalogirou (2009), esse sistema é considerado o mais eficiente entre os coletores concentradores, uma vez que possui as maiores taxas de concentração (600 a 2000) e conta com sistema de rastreamento em dois eixos. Por essa razão é capaz de atingir temperaturas elevadas que variam entre 100°C e 1500 °C. Nesse sistema, os raios solares incidem sobre a parábola refletora e são direcionados para o ponto focal do espelho, onde aquecem o fluido de trabalho. Esse calor pode ser transportado através do fluido por tubulação para um sistema central ou ser transformado em eletricidade em um gerador acoplado diretamente no receptor.

O sistema de Torre Central é composto de vários espelhos planos (ou levemente côncavos), capazes de rastrear o sol em dois eixos e refletir a radiação direta na direção de um receptor, o qual é instalado no alto de uma torre.

O calor concentrado no receptor é transferido para um fluido circulante, que pode ser armazenado ou utilizado para a produção de trabalho. Na figura 12, é indicada a vista área de duas plantas localizadas na Espanha. Os

sistemas de Torre Central possuem elevada capacidade de geração de energia elétrica superando o valor de 10MW (Kalogirou, 2009).



Figura 12. Torre de concentração na Espanha  
Fonte: Centro de Energias Renováveis (2010)

#### **2.4.2. Coletor sem Concentração.**

Os coletores solares sem concentração são aplicados em sistemas cuja temperatura do fluido a ser aquecido não supera o valor de 100°C (Kalogirou 2009), como o aquecimento de água de residências e piscinas. Os modelos de aquecedores que se inserem nessa categoria são: coletor solar de placa plana; coletor a vácuo; coletores cônicos ou esféricos; coletores alternativos.

Segundo Faria (2006) o coletor solar plano é caracterizado por uma estrutura mecânica simples, constituída por placas coletoras planas e um sistema de tubos. As placas possuem a função de absorver a energia irradiada pelo sol, tanto direta quanto difusa, e transformá-la em energia térmica. Essa energia é transmitida ao fluido a ser aquecido (água ou ar), o qual circula no interior dos tubos (Faria, 2006). Um exemplo desse tipo de equipamento é indicado na figura 13.



Figura 13. Exemplo de Coletor Solar Plano  
Fonte: Heliotek (2014)

Esses coletores se aplicam ao aquecimento de água em residências, edifícios, e para aquecimento industrial a baixa temperatura, sendo indicados para sistemas cuja temperatura não supera em  $100^{\circ}\text{C}$  o valor da temperatura do ambiente (Faria, 2012). Esse sistema também exige um reservatório em unidade separada para armazenar a água quente. Os componentes desse sistema são indicados na figura 14.

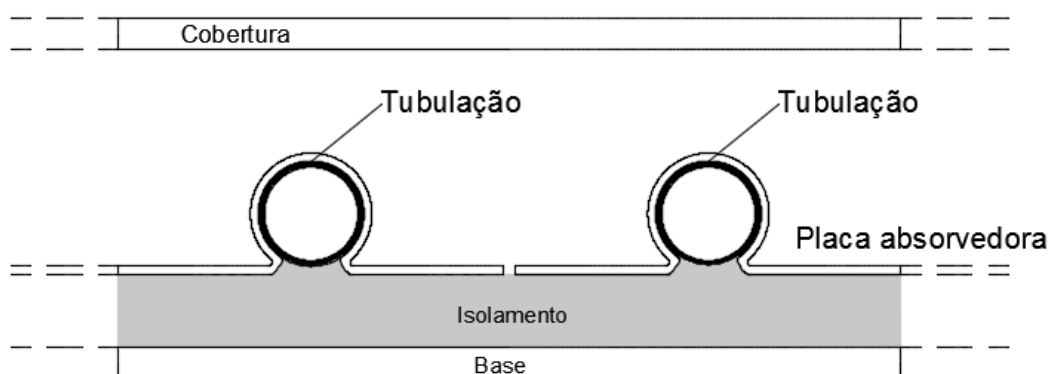


Figura 14. Componentes de Coletor Solar Plano  
Fonte: autoria própria

Como é indicado na figura 14, os componentes do sistema são:

- Placa coletora constituída de material leve, normalmente cobre ou alumínio, a qual deve ser pintada de preto para melhorar a absorção da radiação.

- Os tubos devem ser constituídos de cobre ou alumínio, para absorver e transferir a energia térmica para o fluido.

- Cobertura transparente de modo a permitir a passagem de radiação solar para o ambiente. Também possui a função de reduzir as perdas de calor por convecção para o ambiente.

- Isolamento térmico, para reduzir as perdas de calor no fundo e na lateral da caixa. Normalmente constituída de poliuretano expandido, poliestireno ou lã de vidro.

O coletor a vácuo possui componentes similares ao coletor plano, como a presença de aletas para a absorção de calor, tubos para a circulação de fluido e cobertura de vidro. Esse sistema necessita de reservatório de água quente em unidade separada do coletor.

O que caracteriza esse sistema, é a presença de uma cobertura dupla e hermeticamente fechada, na qual é feito vácuo. Um esquema desse sistema é indicado na figura 15. Essa cobertura permite aumentar o isolamento do coletor e reduzir as perdas de energia para o exterior por convecção (Rinnai, 2005)..

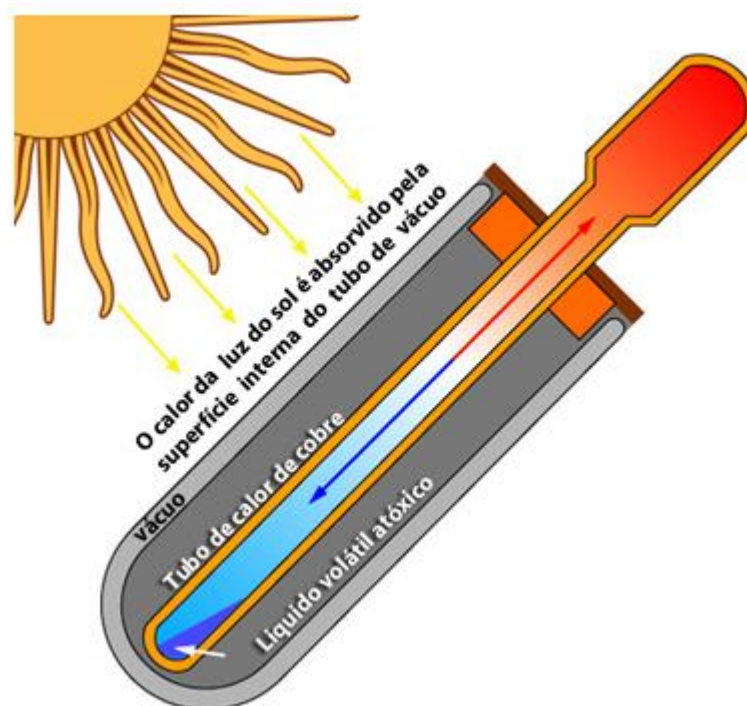


Figura 15. Coletor Solar à Vácuo  
Fonte: Rinnai (2005)

Esses coletores são mais caros que os coletores planos e tendem a “perder o vácuo” ao longo do tempo. Suas aplicações também são direcionadas para a produção de água quente sanitária e necessitam de reservatório para armazenar a água quente.

Ambos os sistemas citados acima requerem um reservatório de água quente que se encontra separado do coletor. Para os coletores cônicos ou esféricos, tanto o coletor quanto o reservatório se encontram na mesma unidade. Esses equipamentos possuem superfície de captação na forma cônica ou esférica, com cobertura de vidro da mesma geometria (Domosolar, 2004).

Essa configuração permite que a superfície iluminada se mantenha constante ao longo do dia. O coletor esférico apresenta como desvantagem problemas de estratificação de água e sua superfície útil de captação é pequena. Um exemplo desse tipo de sistema é indicado na figura 16, onde é

possível constatar que a principal aplicação consiste no aquecimento de piscinas.



Figura 16. Coletor Solar Esférico  
Fonte: DOMOSOLAR (2003)

Outra classe de coletores não concentradores corresponde aos coletores alternativos. Santos (2007) apresentou um trabalho de projeto e construção desse tipo de sistema, utilizando materiais recicláveis como garrafas PET, tubos PVC e latas de alumínio. De acordo com esse autor os coletores solares alternativos recebem essa denominação por utilizarem materiais de baixo custo, com o propósito de baratear os sistemas de aquecimento solar e torná-los viáveis, a ponto de serem utilizados por uma parcela maior da população. Esses sistemas têm sido sistematicamente estudados na principal linha de pesquisa do Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar da UFRN, com o propósito de verificar a viabilidade de aplicação e melhorar seu desempenho (Santos, 2007).

A substituição dos materiais se resume, de modo geral, em se utilizar tubos de PVC no lugar das serpentinas convencionais constituídas de cobre e alumínio, e trocar o vidro utilizado na cobertura do coletor por garrafas PET. Também utiliza materiais alternativos para o reservatório, substituindo materiais metálicos (aço inox, cobre) por materiais alternativos, como polietileno e fibra de vidro. Um exemplo desse tipo de sistema é indicado na figura 17.



Figura 17. Coletor Solar Alternativo  
Fonte: Santos (2007)

As desvantagens associadas a esses sistemas referem-se à limitação na temperatura obtida, facilidade de deterioração do sistema e baixo rendimento, em comparação aos sistemas convencionais.

#### **2.4.3 Classificação do sistema estudado**

A partir dos tipos de coletores solares apresentados na seção anterior é possível realizar a classificação do sistema a ser estudado neste trabalho. Sob o ponto de vista da temperatura obtida e características dimensionais, esse sistema classifica-se como não concentrador, pois opera em temperaturas

inferiores a 100°C e possui taxa de concentração inferior a cinco (a área do coletor possui valor próximo à área do receptor).

Inserido na categoria de não concentrador, o coletor deste trabalho classifica-se como coletor de placas planas, uma vez que a captação de energia é feita por caixas TETRA PAC, que formam uma superfície plana no interior das garrafas PET. Nesta categoria também se inserem os sistemas que necessitam de reservatório de água quente em unidade separada, assim como o coletor estudado neste trabalho.

Em relação ao tipo de material utilizado, o coletor é classificado como alternativo, pois substitui as serpentinas de cobre por tubos de PVC, e utiliza garrafas PET no lugar da cobertura de vidro. Também substitui os reservatórios convencionais metálicos pelo poliestireno.



### 3. Fundamentação Teórica

Neste capítulo é apresentada uma síntese da fundamentação teórica utilizada neste trabalho, focando nos conceitos físicos e matemáticos que descrevem o comportamento térmico do coletor e do reservatório de água quente.

#### 3.1 Radiação Interna do Sistema

No sistema analisado a radiação solar não é transmitida diretamente para os tubos que transportam o fluido de trabalho, pois estes estão envolvidos por embalagens de leite Tetrapak. Dessa forma, é necessário apresentar os fundamentos que determinam as trocas de radiação internas ao coletor solar.

Define-se corpo negro, como sendo um corpo cuja superfície emite o máximo de radiação possível, em todas as direções e em todos os comprimentos de onda, ou seja, um emissor perfeito. Por outro lado, um emissor perfeito é também um receptor perfeito, ou seja, nenhuma energia irradiante é refletida em sua superfície, mas toda ela é absorvida (Incropera, 2008).

A energia irradiada  $E_a$  ( $W/m^2$ ) por um corpo negro é função de sua temperatura, como indica a equação 1.

$$E_a = \sigma T_s^4 \quad (1)$$

Onde  $T_s$  é a temperatura absoluta (K) da superfície e  $\sigma$  é a constante de Stefan – Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/(m^2.K^4)$ ).

Para superfícies que não apresentam o comportamento de corpo negro, à mesma temperatura, o fluxo térmico é sempre menor. Neste caso, será dado pela equação 2.

$$E_a = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2)$$

Onde  $\varepsilon$  é uma propriedade irradiante da superfície, conhecida como emissividade, limitada na faixa  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  e fornece uma medida da eficiência na qual uma superfície emite energia em relação ao corpo negro. Esse parâmetro depende do material da superfície e de seu acabamento. Para determinar a radiação absorvida por um material, será usada a equação 3.

$$G_{abs} = \alpha G \quad (3)$$

Onde  $G_{abs}$  é a taxa na qual a energia irradiante é absorvida por unidade de superfície ( $W/m^2$ ),  $G$  é a energia irradiante por todas as fontes que exercem influência na superfície absorvedora e  $\alpha$  é uma propriedade da superfície absorvedora, denominada absorvidade. Seu valor também se situa na faixa  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

### 3.2 Considerações Térmicas no Coletor Solar

A simplificação geométrica para direcionar o balanço de energia e a distribuição de temperatura na placa coletora é indicada na figura 18, onde o comprimento é indicado por  $Y$ , a largura é indicada por  $X$  e  $Z$  representa a espessura

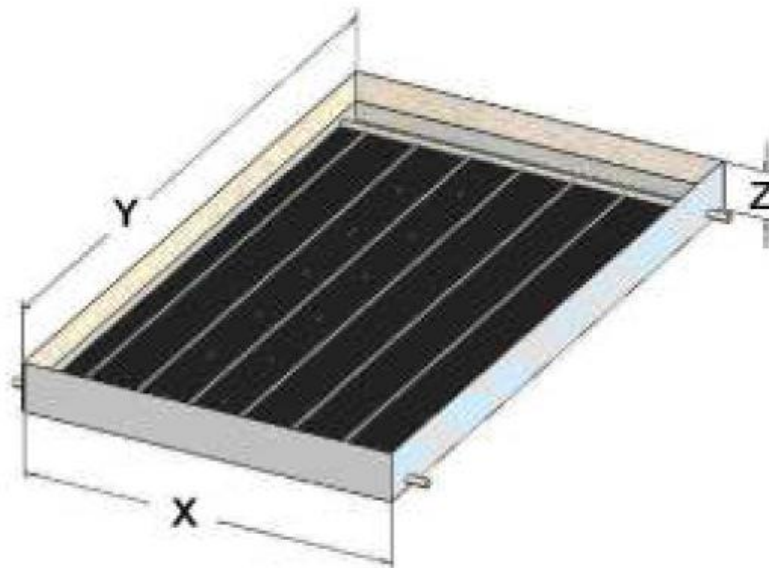


Figura 18. Simplificação Geométrica para o Coletor Solar

A energia absorvida pela placa aquecerá o fluido causando um gradiente de temperatura na direção do fluxo. Um modelo de distribuição de temperatura foi proposto por Duffie e Beckman (1980), em que foi desconsiderado a não uniformidade da distribuição de fluido. A distribuição de temperatura para o eixo  $x$  é indicada na figura 19a e para o eixo  $y$ , na figura 19b.

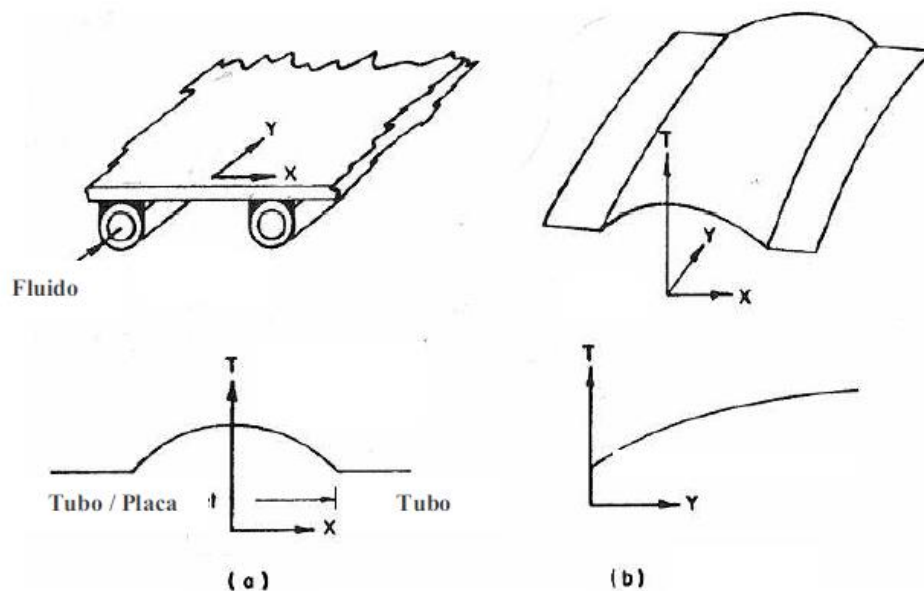


Figura 19. Modelo para Distribuição de Temperatura no Coletor  
Fonte: Duffie e Beckman (1984)

A modelagem da placa coletora deve ser realizada mediante as seguintes simplificações:

1. A superfície da placa possui temperatura constante. No caso de se inserir isolamento na base da placa, o isolamento terá a mesma temperatura da placa.
2. A placa não possui gradientes de temperatura na direção do fluxo, nem no sentido transversal do fluxo, sendo função apenas do tempo.
3. A temperatura da água escoando no interior dos tubos varia apenas ao longo do comprimento do coletor.
4. Desprezam-se as perdas de calor nas laterais da placa.

Na figura 20 são indicadas as fontes de calor que influenciam na distribuição de temperatura do coletor. Nessa figura, o termo  $U_A$ , corresponde ao calor perdido para o ambiente por convecção, o termo  $G_{abs}$ , consiste no fluxo solar absorvido pelo coletor e o termo  $U_F$  corresponde ao calor transmitido para o fluido através de convecção.

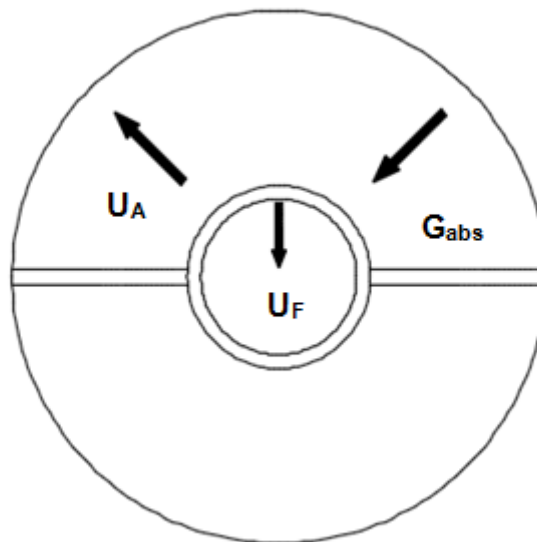


Figura 20. Fontes de calor que atuam no coletor

Assim, a distribuição de energia na placa coletora é dada pela equação 4. A equação indica que a troca de calor condutiva entre os tubos e o fluido foi desprezada, tendo em vista a baixa espessura do tubo.

$$(mc_p)_{placa} \cdot \frac{dT_{placa}}{dt} = A \cdot G_{abs} + AU(T_a - T_p) + A_{tubo} h_f (T_p - T_f) \quad (4)$$

Segue abaixo a descrição dos termos da equação:

1.  $(mc_p)_{fluido} \cdot \frac{dT_{placa}}{dt}$ : Termo de energia acumulada em regime transiente, onde:

$m$ : massa (kg).

$C_p$ : calor específico da água a pressão constante (J/kg.°C).

4.  $A \cdot G_{abs}$ : termo correspondente à radiação absorvida pela placa.

$A$ : área da placa (m<sup>2</sup>).

$G_{abs}$ : fluxo de radiação (W/ m<sup>2</sup>).

5.  $A \cdot U \cdot (T_a - T_p)$ : termo correspondente a perda de energia para o ambiente (ar no interior da placa), por convecção.

A: área da placa ( $m^2$ ).

U: coeficiente global de transferência de calor ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ).

$(T_a - T_p)$ : diferença de temperatura entre o ambiente (ar no interior da placa) e a placa ( $^\circ C$ ).

6.  $A_{tudo} h_f (T_p - T_f)$ : termo que corresponde à transferência de energia para o fluido, escoando internamente.

$A_{tubo}$ : área de troca térmica entre o tubo e o fluido ( $m^2$ ).

$h_f$ : coeficiente de transferência de calor por convecção entre o fluido e o tubo ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ).

$(T_p - T_f)$ : diferença de temperatura entre o fluido e o tubo ( $^\circ C$ ).

Tendo em vista as simplificações do coletor solar a área de troca térmica com o ambiente será dada pela equação 5.

$$A = X.Y \quad (5)$$

A área de troca térmica entre o tubo e o fluido em escoamento interno é dada pela equação 6.

$$A_{tubo} = \pi .D. Y . n_t \quad (6)$$

Onde:

D: Diâmetro do tubo (m).

$n_t$ : número de tubos.

Y: comprimento do tubo (m).

### 3.2.1 Determinação das perdas térmicas no coletor

A figura 21 apresenta uma simplificação para um elemento do coletor, em vista isométrica e em perfil. Nessa figura, a circunferência externa representa a garrafa PET e o círculo interior representa o tubo de PVC. A linha espessa central representa a embalagem Tetrapak.

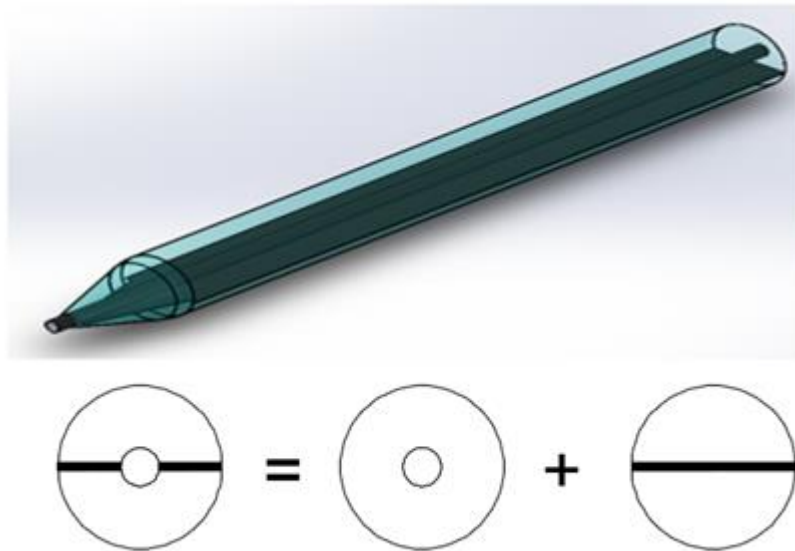


Figura 21. Simplificação para um Elemento de Coletor

Tendo em vista essa simplificação, a análise do fluxo de calor do coletor para o ambiente será realizada em duas partes. Internamente, considera-se o calor que é transmitido por convecção, das caixas Tetrapak e tubos de PVC, para ao ar no interior das garrafas PET. Esta etapa é representada pelas resistências térmicas em paralelo  $R_1$  e  $R_2$ , mostradas na figura 13. Externamente, consideram-se as perdas de calor por irradiação e convecção da superfície das garrafas PET para o ambiente. Essas contribuições são representadas pelas resistências em paralelo  $R_3$  e  $R_4$ . O circuito total também é indicado na figura 22.

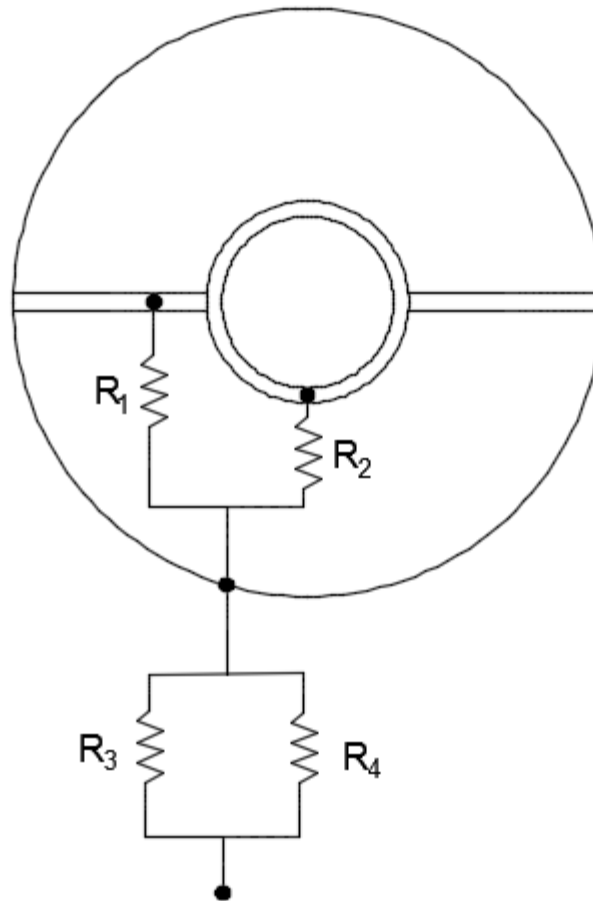


Figura 22. Circuito Térmico para um Elemento de Coletor

Os significados das resistências são apresentados abaixo:

$R_1$  - resistência convectiva entre o tubo de PVC o ar entre o tubo e a garrafa PET, dada por:

$$R_1 = \frac{1}{h_i 2\pi r_t L} \quad (7)$$

$R_2$ - Resistência convectiva entre a superfície TETRA PAC e o ar interior.

$$R_2 = \frac{1}{h_i A_t} \quad (8)$$

Onde  $A_t$ , representa a área de troca térmica entre o coletor e o ar recluso no interior da garrafa PET.

R<sub>3</sub>. Resistência convectiva entre as garrafas PET e o ar externo

$$R_3 = \frac{1}{h_e 2\pi r_{PET} L} \quad (9)$$

R<sub>4</sub>. Resistência de irradiação entre as garrafas PET e o ambiente.

$$R_4 = \frac{1}{h_{irradiação} 2\pi r_{PET} L} \quad (10)$$

A resistência total será determinada pela equação 11.

$$R_T = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)^{-1} + \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}\right)^{-1} \quad (11)$$

Considerando o fluxo de calor constante entre as partes interna e externa do coletor, tem-se:

$$q'_1 = q'_2 \quad (12)$$

Assim, O coeficiente global de transmissão de calor será determinado pela equação 13 (Incropera, 2008).

$$U_1 \cdot A_1 = U_2 \cdot A_2 = (\sum R_t)^{-1} \quad (13)$$

Logo:

$$U_2 = \frac{1}{\sum R_t A_2} \quad (14)$$

Para determinar o coeficiente convectivo, o sistema será aproximado como um fenômeno de convecção natural externa em cilindro longo. Para esta situação a relação matemática para o coeficiente convectivo é dada pela equação 15 (Incropera, 2008).

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}D}{k} \quad (15)$$

A correlação para determinar  $\overline{Nu}_D$  é dado pela equação 16 (Churchill e Chu).

$$\overline{Nu}_D = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 Ra_D^{\frac{1}{4}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^2} \right\}^2 \quad Ra_D \lesssim 10^{12} \quad (16)$$



O termo  $R_{ad}$  é dado pela equação 17.

$$R_{ad} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)d^3}{\nu\alpha} \quad (17)$$

### 3.2.2 Análise de Desempenho de Coletores Solares

Segundo Duffie e Beckman (1991) o balanço de energia em um coletor solar é descrito levando em conta a energia absorvida pela placa coletora e as perdas térmicas, como é indicado pela equação 18.

$$Q_u = A_c[S - U_l(T_p - T_a)] \quad (18)$$

Onde  $Q_u$  representa a energia absorvida pelo coletor, por unidade de área ( $W/m^2$ ),  $A_c$ , representa a área do coletor ( $m^2$ ),  $S$  representa a radiação absorvida pelo coletor em ( $W/m^2$ ),  $U_l$  é o coeficiente global de transferência de calor ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ),  $T_p$  é a temperatura da placa ( $^\circ C$ ) e  $T_a$  é a temperatura ambiente ( $^\circ C$ ).

A análise do desempenho de um coletor solar foi realizada por Hasan (1997), em função da configuração e do volume do reservatório térmico do sistema. Para tanto, o autor utilizou o software *Trinsys*. O autor concluiu que a eficiência de aquecedores solares operando com termossifão pode ser aumentada pelo uso de reservatórios maiores ou menores áreas de coleta. Em relação à configuração, foi constatado que não há diferença significativa entre o desempenho de tanques verticais e horizontais.

Um estudo do desempenho de coletores solares também foi realizada por Barcelos (2003), que focou sua análise no monitoramento das temperaturas atingidas pelos coletores. O autor analisou o custo benefício da implantação de aquecedores planos, operando em diferentes condições de operação e materiais. Para tanto, utilizou um modelo de sistema com características comerciais como referência e outros oito módulos distintos. O referido aparato permitiu a comparação de resultados em termos de diferença de temperatura e fluxo de calor através da superfície de base do coletor. O autor constatou que coletores sem cobertura podem prover uma melhor eficiência térmica a um custo reduzido.

Hatashita (2004) realizou uma síntese a cerca do desempenho de aquecedores solares convencionais, utilizados em âmbito predial, na cidade de Curitiba. O autor focou a análise na viabilidade econômica propiciadas por tais sistemas. Foi constatado que os aquecedores solares para uso predial na cidade de Curitiba são viáveis pois, segundo Hatashita, no pior dos cenários obtém-se o retorno do investimento antes do término do sexto ano após a instalação.

Siqueira (2009) analisou o desempenho de um aquecedor de baixo custo feito de materiais poliméricos, sendo a placa do coletor solar feita de dois tipos de material, o PVC e o polipropileno. A comparação entre os sistemas alternativos indicou que o coletor feito de polipropileno apresentou um melhor desempenho em comparação ao coletor construído em PVC. A autora também constatou que, apesar de ter apresentado bons resultados em termos de desempenho, os coletores de baixo custo ainda são inferiores aos coletores comerciais.

Uma análise de desempenho do aquecedor solar será apresentada neste trabalho em termos de eficiência energética. Para determinar a eficiência energética de qualquer sistema térmico deve-se obter a razão entre a quantidade de energia útil pela quantidade de energia disponível no sistema. Neste caso, tais parâmetros referem-se ao calor útil ganho pelo coletor  $Q_{util}(W)$ , e a energia solar incidente sobre ele  $Q_{rad} (W)$ , conforme indica a equação 19.

$$\eta = \frac{Q_{util}}{Q_{rad}} \quad (19)$$

Sendo:

$$Q_{util} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{saída} - T_{entrada}) \quad (20)$$

$$Q_{rad} = A_c \cdot G_T \quad (21)$$

Onde  $A_c$  representa a área do coletor ( $m^2$ ),  $G_T$  é a radiação solar incidente no coletor ( $W/m^2$ ) e  $c_p$  é o calor específico do fluido de trabalho ( $kJ/Kg^\circ C$ ).

Neste trabalho, será possível estimar a eficiência energética do sistema em função da vazão mássica, a partir das temperaturas de entrada e de saída do coletor.

### 3.3 Balanço de energia no fluido

O volume de controle utilizado para realizar o balanço de energia no fluido é indicado na figura 23.

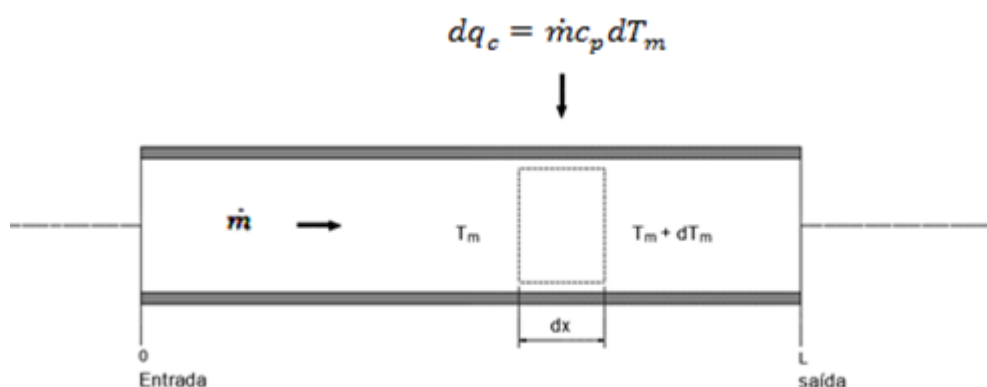


Figura 23. Balanço de energia no fluido

Para o fluido, será considerada apenas a parcela de calor fornecida pela superfície interna do tubo, sendo determinada pela equação 22.

$$dq_c = \dot{m}c_p dT_m \quad (22)$$

Onde  $dq_c$ , representa o diferencial de energia térmica fornecido ao elemento de fluido,  $\dot{m}$  representa a vazão mássica  $c_p$  representa o calor específico à pressão constante e  $dT_m$  representa a diferença de temperatura entre o elemento de fluido e a superfície do coletor.

Então, obtêm-se a distribuição de temperatura no fluido de acordo com a equação 23.

$$(mc_p)_{\text{fluido}} \frac{dT}{dx} = h \cdot P \cdot (T_t - T_f) \quad (23)$$

Onde  $P$  é o perímetro do coletor dado por:

$$P = \pi \cdot D \quad (24)$$

Na equação 23, o termo  $T_t$  representa a temperatura da superfície do tubo e  $T_f$  representa a temperatura do fluido.

O coeficiente convectivo é dado pela equação 25.

$$\bar{h}_{fluido} = \frac{\bar{Nu}}{D} k_{fluido} \quad (25)$$

O número de Nusselt será determinado, segundo correlações de Azevedo e Sparrow, para uma condição de escoamento em canais inclinados, formados por placas paralelas. Essa correlação é dada pela equação 26.

$$\bar{Nu} = 0,645 \left( Ra \frac{S}{Lc} \right)^{1/4} \quad (26)$$

Definir  $s$ ,  $l$  e  $c$

O número de Rayleigh é dado pela equação 27.

$$Ra = g \cdot \beta (T_{placa} - T_{fluido}) \frac{S^3}{\alpha \nu} \quad (27)$$

A difusidade térmica da água é calculada pela equação 28.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (28)$$

### 3.4 Considerações sobre escoamento

Nesta seção será apresentada uma descrição analítica para o escoamento do fluido, com o propósito de comparar tais resultados com os resultados obtidos através de solução em CFD. A solução analítica para o escoamento interno, em tudo longo, é realizada mediante as seguintes hipóteses (Fox e McDonald).

1. O fluido será considerado incompressível, ou seja, considera-se que possui massa específica ( $\rho$ ) constante em todos os pontos do escoamento.

2. O escoamento é considerado permanente. Não há mudança de nenhuma propriedade com o tempo.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = 0. \quad (29)$$

3. Trata-se de escoamento completamente desenvolvido. Logo, o perfil de velocidade não muda na direção do escoamento, definida como direção do eixo z.

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} = 0 \quad (30)$$

4. Desprezam-se as trocas de calor entre o fluido e o ambiente externo.

5. Considera-se que o efeito da gravidade na pressão é desprezível, em comparação ao gradiente de pressão imposto nas extremidades do tubo. Dessa forma  $\mathbf{g} = \mathbf{0}$ .

6. O escoamento ocorre unicamente na direção z, logo  $v_r = v_\theta = 0$ .

7. A queda de pressão varia linearmente com a direção z.

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \text{cte} \quad (31)$$

8. O escoamento ocorre em regime laminar.

As condições de contorno para esse escoamento são:

1. O escoamento é submetido ao princípio da aderência. Um fluido viscoso deve possuir velocidade relativa igual a zero nos seus contornos sólidos. Para o caso de coordenadas cilíndricas tem-se:

$$v_z(R) = 0 \quad (32)$$

2. O fluido deve possuir velocidade finita em todo seu domínio.

A solução deste escoamento será realizada mediante a equação da continuidade a qual, em coordenadas cilíndricas é dada por:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (33)$$

Também serão utilizadas as equações de Navier Stokes para coordenadas cilíndricas. Para a componente em r, tem - se (Fox e McDonald):

$$\begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\theta^2}{r} \right) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{v_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right] + \rho g_r \end{aligned} \quad (34)$$

Para a componente em  $\theta$ :

$$\begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{v_r v_\theta}{r} \right) \\ &= -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta}{r^2} \right] + \rho g_\theta \end{aligned} \quad (35)$$

Para a componente em Z:

$$\begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \end{aligned} \quad (36)$$

Ao aplicar as hipóteses e condições de contorno descritas acima, tem-se para a componente em r:

$$-\frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (37)$$

Para a componente em  $\theta$ :

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} = 0 \quad (38)$$

Para a componente em z:

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) = 0 \quad (39)$$

Utilizando a hipótese 7, e sabendo que  $v_z = v_z(r)$ , a equação 37 pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{d}{dr} \left( r \frac{du_z}{dr} \right) = \frac{r}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (40)$$

Ao integrar a equação 38, em relação a r, tem-se:

$$r \frac{du_z}{dr} = \frac{r^2}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) + C_1 \quad (41)$$

Ao integrar a equação 39 em relação a z, tem-se:

$$u_z = \frac{r^2}{4\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) + C_1 \ln(r) + C_2 \quad (42)$$

Para a condição de contorno (2) aplicada em  $r = 0$ , tem-se que  $C_1 = 0$ . Ao aplicar a condição de contorno (1), determina-se  $C_2$ .

$$\begin{aligned} v_z &= \frac{r^2}{4\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) + C_2 \\ 0 &= \frac{R^2}{4\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) + C_2 \\ C_2 &= -\frac{R^2}{4\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (43)$$

Logo a distribuição de velocidade na direção de z, ao longo do raio do cilindro é determinada pela equação 44.

$$v_z = \frac{R^2}{4\mu} \left( -\frac{\partial p}{\partial z} \right) \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (44)$$

O perfil de velocidades previsto para essa equação é parabólico, com velocidade nula nas paredes do tubo e máxima no centro ( $r = 0$ ), como é indicado na figura 24.

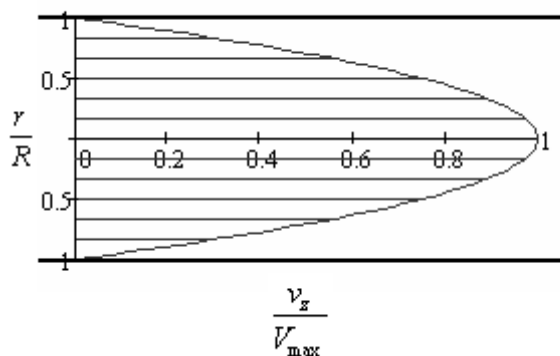


Figura 24. Perfil de velocidades para escoamento laminar em tubo  
Fonte: autoria própria

Esse perfil de velocidades obtido de forma analítica será comparado ao perfil apresentado pela análise em CFD a qual, vale lembrar, dispensa algumas simplificações consideradas no método ora apresentado. O método CFD, permite que seja considerada a influência da gravidade no escoamento, considera influência térmica e não exige que a distribuição de pressão ao longo do escoamento seja linear.

### 3.5 Considerações térmicas no reservatório

Um modelo de estratificação de temperatura para o reservatório de água quente é proposto por Siqueira (2009). Nesse modelo o reservatório é dividido em três camadas, cada uma com volume e temperatura definida, como indica a figura 25. A estratificação da temperatura ocorre ao longo da altura do reservatório, onde as massas de fluido mais quentes tendem a se localizar na parte superior do reservatório e as massas mais frias tendem a se posicionar na parte inferior.

Essa distribuição de temperatura será mantida por mais tempo possível se as velocidades de entrada e de saída de água não forem tão altas ao nível de evitar turbulência no interior do reservatório. Existe, ainda a tendência de perda da estratificação devido as transferências de calor entre as camadas. Avaliar esse comportamento constitui-se num objetivo deste trabalho



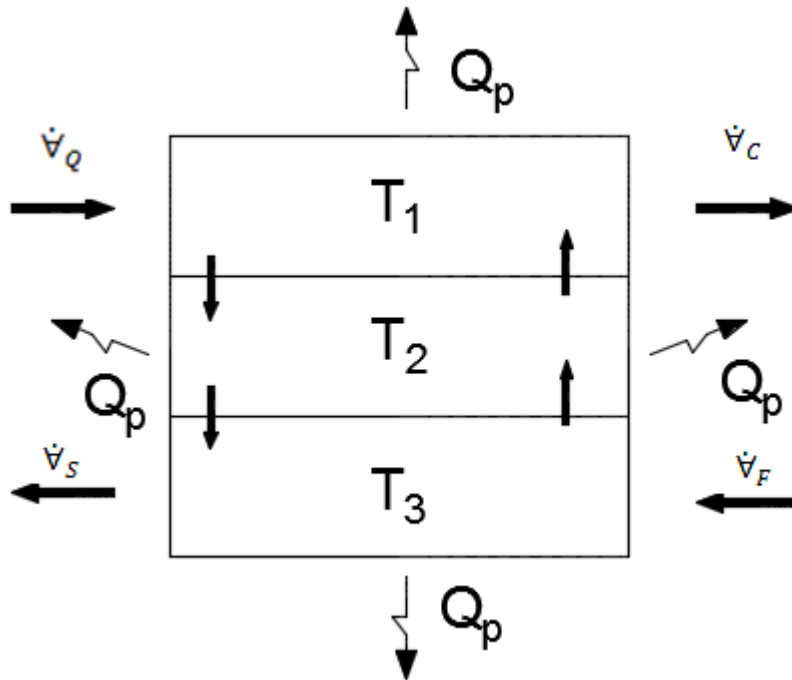


Figura 25. Estratificação Térmica de Reservatório de Água Quente  
 Fonte: autoria própria

A figura indica que o consumo será definido por um volume de água  $V_q$  a uma temperatura  $T_1$ . O volume consumido deve ser reposto com a finalidade de manter constante o volume total do reservatório. Esse volume fornecido pela rede de abastecimento é definido na figura 15 como  $V_f$ , a uma temperatura  $T_f$ .

O balanço de energia no coletor será determinado em função das vazões mássicas de água que entram e saem do coletor. Esses parâmetros são ilustrados na figura 26.

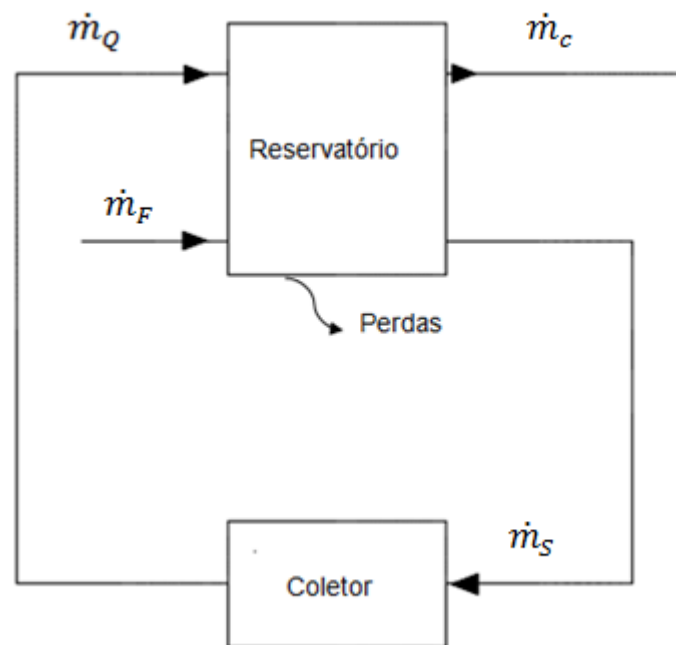


Figura 26. Balanço de Energia no Reservatório  
Fonte: autoria própria

O balanço de energia no reservatório é dado pela equação 45.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{E}_i - \dot{E}_o \quad (45)$$

Ao aplicar a equação 43 em termos da entalpia para cada elemento tem-se:

$$(\rho V c_p) \frac{dT}{dt} = \dot{m}_Q h_Q + \dot{m}_F h_F - (\dot{m}_C h_C + \dot{m}_S h_S + \dot{Q}_{perdido}) \quad (46)$$

Segue abaixo o significado de cada termo da equação:

$\dot{m}_c$ : vazão mássica de consumo de H<sub>2</sub>O

$\dot{m}_F$ : Vazão mássica de abastecimento de H<sub>2</sub>O no reservatório

$\dot{m}_S$ : Vazão mássica de H<sub>2</sub>O do reservatório para o coletor

$\dot{m}_Q$ : Vazão mássica de H<sub>2</sub>O do coletor para o reservatório

## 4. Materiais e Métodos

Neste projeto propõe-se realizar a modelagem matemática de um sistema de aquecimento solar, visando a descrição completa de seus parâmetros térmicos. Os dados obtidos com a modelagem servirão de base para o dimensionamento de um protótipo a ser aplicado numa escola estadual da cidade de Curitiba – PR.

A abordagem metodológica aqui adotada pode ser classificada, em parte, como estudo de caso, tendo em vista a possibilidade de submeter essa pesquisa a uma situação real, através do uso prático do aquecedor.

Por outro lado, a descrição do comportamento térmico do sistema será realizada através da articulação entre métodos numéricos e recursos computacionais. Partindo-se do balanço de energia nos elementos do sistema, obtêm-se equações diferenciais que descrevem a distribuição de temperatura no coletor, no fluido escoando internamente aos tubos e no reservatório de água quente.

Essas equações que descrevem o comportamento térmico dos elementos do aquecedor não serão resolvidas de forma analítica, tendo em vista a elevada complexidade associada a elas. Soluções numéricas aproximadas serão obtidas através do *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Esse recurso permite a visualização dos resultados em interface gráfica e tabela de valores.

Os dados obtidos servirão de base para definir a quantidade de elementos do sistema (quantidade de garrafas PET, volume do reservatório) que propiciem um fluxo de água em temperatura adequada para consumo.

### 4.1 Análise Numérica do Sistema

Os métodos de resolução de problemas conhecidos como *Computational Fluid Dynamic* (CFD) foram desenvolvidos na década de 1960 com o propósito de resolver equações diferenciais lineares, inviáveis ou impossíveis de serem solucionadas de forma analítica. Inicialmente desenvolvido para interface bidimensional, o CFD alcançou abrangência para problemas tridimensionais

com o avanço da informática. A partir da década de 1970 passou a ser capaz de resolver equações diferenciais não lineares (Fortuna 2000).

Nos primórdios do método, as simulações em CFD eram restritas ao uso militar, cujas instituições detinham supercomputadores com capacidade de processamento adequada para resolver os problemas matemáticos. Com a evolução da informática e desenvolvimento de softwares com interfaces mais simples a ferramenta foi difundida para diversas áreas do conhecimento.

Hoje é empregada como recurso para a solução de problemas relacionados à Mecânica dos Fluidos, sobretudo relacionados ao escoamento de diversas substâncias, aerodinâmica, reações químicas, combustão e muitas outras situações.

O CFD utiliza recursos matemáticos e algoritmos que se fundamentam nas leis de conservação de massa, da quantidade de movimento da energia as quais são submetidas a condições de contorno específicas. Os resultados obtidos variam entre distribuição de pressão, velocidade, temperatura e fluxo de calor, dentro de um domínio ou volume de controle. Os problemas podem ser solucionados em regime permanente ou transiente.

Shaw 1992, afirma que o CFD se baseia, basicamente, em três técnicas para a solução de problemas. Neste trabalho será utilizada a técnica do método dos elementos finitos (MEF), cuja determinação foi direcionada pelo software escolhido. O referido método consiste em discretizar um meio contínuo em pequenos elementos mantendo as propriedades do meio original. Esses elementos são descritos por equações diferenciais, cuja solução é uma descrição aproximada do problema real.

O conjunto de elementos discretizados que representam a geometria original de um corpo é denominado de malha, tendo um exemplo apresentado na figura 27. As condições de convergência bem como a acurácia das soluções do MEF não dependem apenas da formulação do problema e do software utilizado. A utilização de uma malha adequada é fundamental para a obtenção de bons resultados.

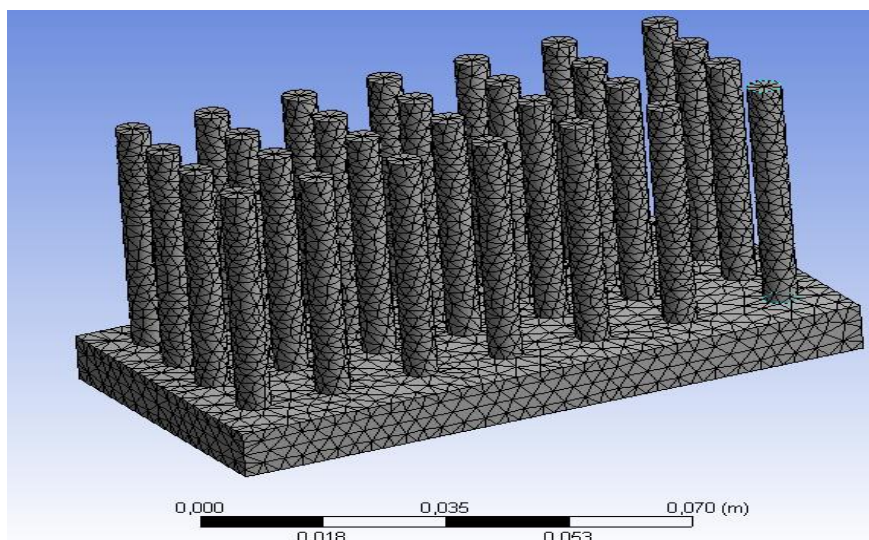


Figura 27. Exemplo de Malha Gerada por CFD  
Fonte: autoria própria

## 4.2 Etapas da Simulação

A primeira etapa da simulação numérica refere-se à modelagem dos elementos do aquecedor solar em Solidworks (solidworks Corporation EUA), com a finalidade de gerar uma simplificação das superfícies de controle de interesse. Os modelos foram definidos de acordo com as dimensões indicadas pelo manual do coletor solar. Na figura 28 é indicada a modelagem de um elemento do coletor, que representa os tubos de água sobre as caixas de leite TETRAPAK.

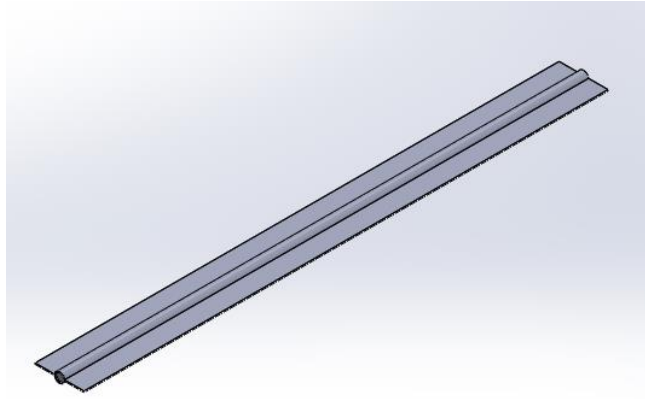


Figura 28. Modelo para Elemento de Coletor  
Fonte: autoria própria

A figura 29 indica a modelagem de um elemento de coletor envolvido por uma superfície que representa as garrafas PET.

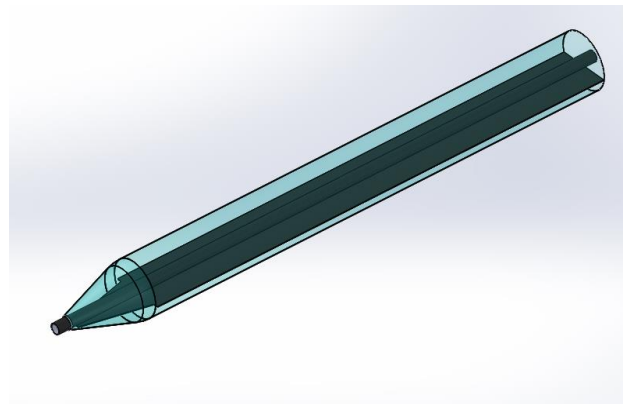


Figura 29. Modelo de Elemento de Coletor com por garrafa PET  
Fonte: autoria própria

A figura 30 indica a representação completa de um coletor solar, composto por cinco elementos.

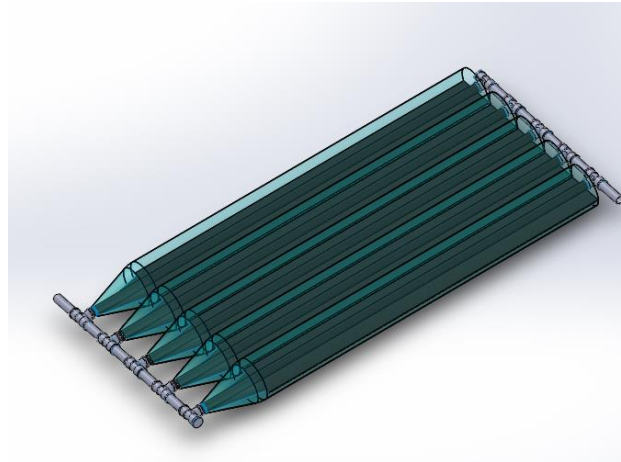


Figura 30. Modelo de Coletor Solar Composto por Cinco Elementos  
Fonte: autoria própria

Na figura 31 é indicada uma simplificação em Solidworks para a superfície que representa o reservatório de água quente. No caso do reservatório a simulação será realizada no modo superfície (geometria em duas dimensões) e não sólido (geometria em três dimensões), tendo em vista as características de simetria do referido corpo. Essa medida também auxilia na convergência da simulação.

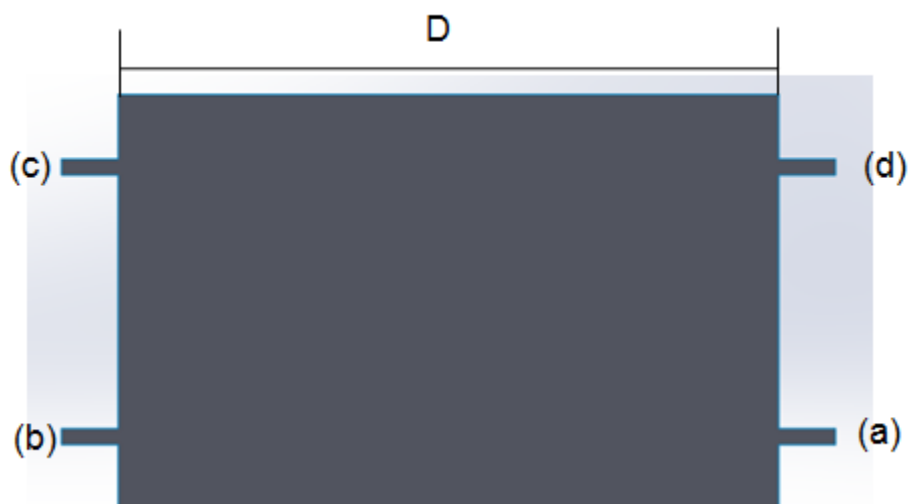


Figura 31. Superfície que Representa o Reservatório de Água Quente  
Fonte: autoria própria

Segue abaixo a descrição de cada termo indicado na figura 31. Deve ser considerado que, posteriormente, as superfícies de entrada e saída de fluido serão definidas e termos de vazão mássica.

- (a) - Corresponde à superfície de entrada de água proveniente da rede de abastecimento.
- (b) - Corresponde a superfície pela qual o fluido escoar para o coletor.
- (c) - Corresponde a superfície pela qual o fluido retorna do coletor.
- (d) - Corresponde a superfície pela qual o fluido é disponibilizado para uso.
- (e) – corresponde ao diâmetro do coletor.

Os modelos criados em Solidworks são exportados para uma plataforma neutra de extensão Step, para que possam ser reconhecidos pelo software de modelagem numérica. Neste trabalho, a simulação em CFD foi realizada pelo recurso Fluent do software ANSYS.

Os parâmetros relativos à malha utilizada serão apresentados no capítulo referente aos resultados, tendo em vista a importância desse procedimento para a obtenção de resultados adequados.

### **4.3 Obtenção do Fluxo de Radiação Solar**

O principal parâmetro meteorológico a ser utilizado é o fluxo de radiação solar total sobre uma superfície. Tal parâmetro será obtido através do Atlas Solarimétrico Brasileiro, o qual fornece dados de radiação obtidos por diversos métodos para todo o território nacional. Para a região sul do Brasil, a radiação obtida corresponde à 5 kWh/m<sup>2</sup>.

## **4.4 Componentes do Coletor Solar para Montagem em Escola Pública**

### **4.4.1 Coletores**

Os coletores são os componentes que recebem os materiais recicláveis. Trata-se de uma estrutura na qual a água circula no interior de tubos de PVC de 105 cm de comprimento. Os tubos devem ser pintados com tinta preta fosca. Para aumentar a captação da radiação, utilizam-se caixas de leite Tetrapak, que também devem ser pintadas, devidamente cortadas e dobradas para envolver os tubos. A fixação das embalagens aos tubos é garantida



com a inserção de uma garrafa PET, transparente. A figura 32 indica como a montagem do coletor deve ser realizada.

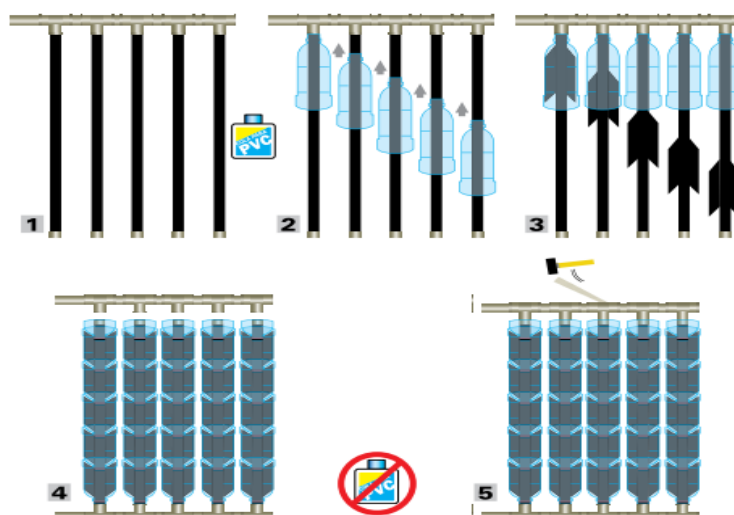


Figura 32. Montagem do Coletor Solar  
Fonte: Alano (2004)

Os tubos devem ser fixados na parte superior do coletor com adesivo plástico de PVC. Em seguida devem ser pintados com tinta preta. Depois disso, devem ser inseridos os pares garrafa PET - embalagem TETRA PAC. Recomenda-se fixar os tubos apenas na parte superior do coletor, onde ocorre a vazão de água quente. Esse procedimento não acarretará riscos por se tratar de um sistema não pressurizado e facilitará a troca de componentes em caso de avaria.

Após a fixação dos tubos, deve ser inserida uma garrafa PET e posicionada uma embalagem TETRA PACK, logo abaixo da garrafa. Esse procedimento deve ser realizado até que se complete uma fileira contendo cinco garrafas. Recomenda-se que cada painel seja construído com no máximo vinte e cinco garrafas, uma vez que, um número maior do que esse pode resultar em peso excessivo da estrutura. Dessa forma, os painéis podem ser montados de forma isolada no solo e unidos no telhado.

#### 4.4.2 Reservatório de água

Como reservatório, deve ser utilizada uma caixa d'água feita em polietileno com capacidade máxima de 500L. Para evitar perdas de energia, a caixa deverá ser revestida com isopor, por se tratar de um material leve e que também pode ser reciclável. A figura 33 indica como os tubos devem ser inseridos no reservatório.

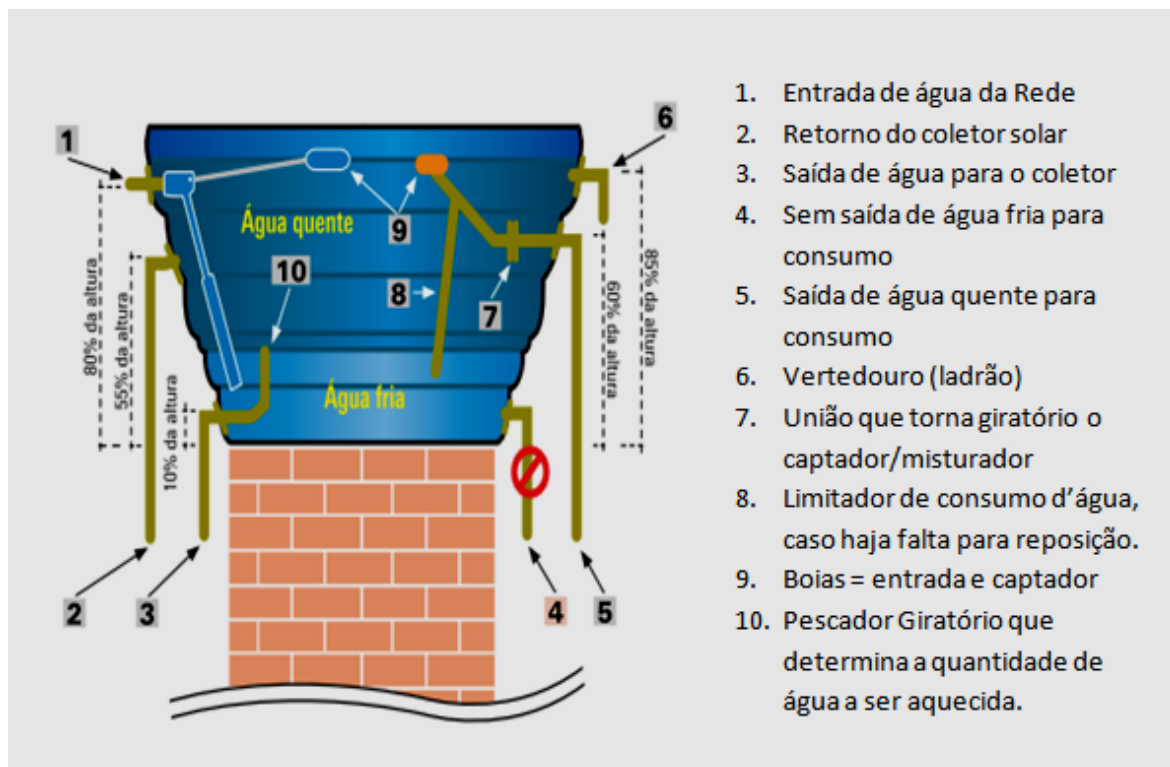
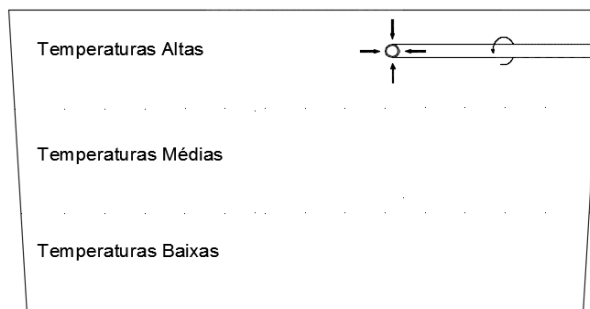


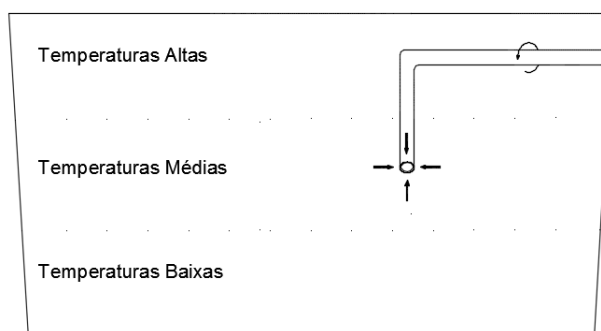
Figura 33. Montagem dos Tubos no Reservatório de Água Quente  
 Fonte: Alano (2004)

A figura 33 indica que a água da rede é captada no ponto 1 do reservatório, levada ao coletor pelo ponto 3, retorna do coletor (aquecida) pelo ponto 2, e possui saída para consumo pelo ponto 5.

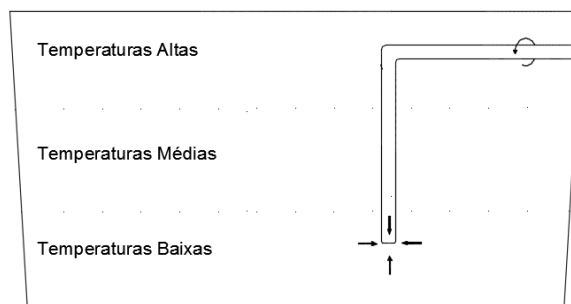
Uma forma de controlar a quantidade de água quente que é enviada para consumo é instalar um pescador giratório (item 10 da figura 33). Como é indicado na figura 34, ao rotacionar o tubo, controlando sua altura de captação de água, é possível obter água a temperaturas médias (posição intermediária no reservatório), água totalmente aquecida no inverno (posição superior no reservatório), ou água fria no verão (posição inferior no reservatório).



(a) Captação de temperaturas altas



(b) Captação de temperaturas médias



(c) Captação de temperaturas baixas

Figura 34. Figura esquemática para pescador giratório  
 Fonte: autoria própria

#### 4.5 Justificativa da Metodologia

Tendo em consideração o principal objetivo deste empreendimento como sendo o de promover o uso de energias renováveis, a aplicação de um sistema de captação de energia solar em um ambiente público, em especial em uma escola, pode-se dizer que a metodologia a ser aplicada é bem adequada.

Em relação ao estudo térmico de sistemas que apresentam alta complexidade em termos de geometria e condições de contorno, recomenda-

se, nos dias atuais, o uso de métodos numéricos. Tais métodos, aliados a recursos computacionais, apresentam interface gráfica para a visualização dos resultados e interatividade para a constante alteração nos parâmetros utilizados. A precisão dos resultados e a velocidade de processamento têm crescido constantemente com o desenvolvimento computacional. Desta forma, reduz-se, consideravelmente, a necessidade de protótipos e simulações físicas, resultando em benefícios econômicos.

## 5. Desenvolvimento das Simulações Computacionais

O estudo inicia-se com o levantamento de informações e a descrição dos fundamentos matemáticos e conceituais a serem aplicados nas simulações, com o intuito de garantir a convergência das interações e a qualidade dos resultados. Concomitantemente a esse processo, foi realizado um treinamento intenso para compreender o funcionamento do software utilizado na aplicação do CFD.

As simulações foram realizadas no pacote *Fluent*, o qual é disponibilizado no software de simulação numérica ANSYS. A primeira delas foi realizada com o intuito de verificar os fatores que influenciam no aquecimento da água. De forma específica, verificou-se a relação entre o coeficiente de transmissão de calor das embalagens Tetra Pack e a temperatura do ar no interior das garrafas PET, no comportamento da temperatura de saída da água do coletor.

A segunda simulação foi responsável por descrever o comportamento térmico e de escoamento do coletor solar, indicando a distribuição de temperatura na superfície em elemento do coletor e no fluido escoando internamente. Também descreveu o comportamento da temperatura de saída da água em função do número de tubos utilizados.

A terceira simulação foi realizada com o propósito de analisar o comportamento térmico e de escoamento no reservatório de água quente. Procurou-se compreender a dinâmica de aquecimento desse equipamento através de simulação em regime transiente para duas situações, uma em que a água está sendo usada, e outra em que o reservatório funciona como um termoacumulador (sem uso).

O trabalho é concluído com a síntese de todos os resultados obtidos e sugestões de pesquisas e melhorias no sistema, a partir dos resultados obtidos pelas simulações computacionais.

## **6. Resultados**

Neste capítulo será apresentada uma síntese dos resultados obtidos neste trabalho. Inicia-se com um estudo preliminar, visando identificar os parâmetros que mais influenciam no aquecimento da água. Em seguida faz-se a descrição do comportamento térmico do coletor e do reservatório de água quente, através de fluidodinâmica computacional (CFD).

### **6.1 Estudo Preliminar**

A análise que objetiva descrever o comportamento térmico e auxiliar no dimensionamento do coletor será precedida por um estudo preliminar que visa verificar os fatores responsáveis pelo aquecimento de água.

Este estudo inicial servirá para direcionar a simulação numérica do sistema, definindo as condições de contorno que deverão ser aplicadas e as estratégias de simulação. Nesta etapa será avaliado o comportamento da temperatura da água na saída do coletor em função de dois parâmetros: da condutividade térmica das superfícies Tetra Pack e da temperatura do ar no interior das garrafas PET.

#### **6.1.1. Dados de Entrada para simulação**

. A tabela 3 apresenta os dados utilizados na determinação do coeficiente de transmissão de calor por convecção para um tubo longo. Utilizando-se a equação 16, o valor de coeficiente de película encontrado foi de 3,9 w/m<sup>2</sup>k, como é indicado na tabela 3.

Tabela 3. Dados para Coeficiente de película

<b>Coeficiente de Transmissão de Calor por Convecção</b>		
<b>Grandeza</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Aceleração da Gravidade ( $m/s^2$ )	$g$	9,8
Coeficiente de Expansão Volumétrica ( $T^{-1}$ )	$\beta$	0,003323
Viscosidade cinética ( $m^2/s$ )	$\nu$	1,59E-05
Diâmetro (m)	$D$	0,1
Temperatura da Superfície (K)	$T_s$	306,8
Temperatura do Ar (K)	$T_\infty$	295
Difusividade Térmica ( $m^2/s$ )	$\alpha$	2,25E-05
Número de Rayleigh	$R_{aD}$	1074928
Número de Nusselt	$N_{uD}$	14,82731
Número de Prandtl	$Pr$	0,707
Condutividade Térmica (W/m.K)	$k$	2,63E-02
Coeficiente de Película (W/m <sup>2</sup> .K)	$h$	3,9

Fonte: autoria própria

As propriedades do fluido de trabalho, bem como, do material utilizado nos tubos são indicadas na tabela 4.

Tabela 4. Dados do Fluido de Trabalho ( $H_2O$ ) e Tubo PVC

<b>Dados do Fluido</b>		
<b>Grandeza</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Tipo	Água (estado Líquido)	
Massa Específica ( $Kg/m^3$ )	$\rho$	998,2
Calor Específico (J/Kg.K)	$c_p$	4182
Condutividade Térmica (W/m.K)	$k$	0,6
<b>Dados do Sólido</b>		
<b>Grandeza</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Tipo	PVC	
Massa Específica ( $Kg/m^3$ )	$\rho$	1470
Calor Específico (J/Kg.K)	$c_p$	1672
Condutividade Térmica (W/m.K)	$k$	0,21

Fonte: autoria própria

Os dados climáticos para a cidade de Curitiba são indicados na tabela 5. Nesta etapa da simulação foi utilizado o valor médio para a região sul do Brasil de fluxo de radiação solar, indicado pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar (UFSC *et al*). As temperaturas de referência para a cidade de Curitiba foram retiradas na norma brasileira ABN NBR 16401 – 1. Para a temperatura da água da rede de abastecimento foi adotado o valor médio de 295K para a cidade de Curitiba, segundo dados da Agência Nacional de Águas (ANA, 2015).

Tabela 5. Dados Climáticos para a Cidade de Curitiba

<b>Dados Climáticos</b>		
<b>Grandeza</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Radiação ( $\text{W/m}^2$ )	$Q_{\text{rad}}$	416,7
Temperatura no Verão (K)	$T_{\text{Bs}}$	303,9
	$T_{\text{Bu}}$	296
Temperatura no Inverno (K)	$T_{\text{Bs}}$	275,8
Temperatura de Entrada da Água (K)	$T_e$	295

Fonte: autoria própria

Na tabela 6 são indicados os dados que estabelecem os parâmetros que definem o escoamento do fluido. Com o intuito de manter um escoamento em regime laminar foi escolhido um valor para a velocidade na entrada do coletor que proporciona um número de Reynolds inferior a 2300 (Incropera, 2008).

Tabela 6. Dados para Escoamento do Fluido

<b>Velocidade do Fluido</b>		
<b>Gradezas</b>	<b>Símbolos</b>	<b>Valor</b>
Vazão Volumétrica (l/min)	$\nabla$	1,58
Vazão mássica (kg/s)	$\dot{m}$	0,0261
Massa específica ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho$	993
Diâmetro (m)	$D$	0,017
Viscosidade (kg/m.s)	$\mu$	0,000855
Velocidade (m/s)	$u_m$	0,116
Número de Reynolds	$Re$	2291

Fonte: autoria própria



### 6.1.2. Influência da condutividade térmica na temperatura de saída do fluido

A principal motivação para avaliar a influência da condutividade térmica na temperatura de saída do fluido está na dificuldade em definir o coeficiente de condutividade térmica das embalagens Tetra Pack. Essas embalagens são compostas por diversos materiais, como plástico, papel e alumínio, e a quantidade de cada material empregado varia de acordo com o fabricante, dificultando a determinação do coeficiente de transmissão de calor por condução.

As condições de contorno para realizar a simulação são:

1. Velocidade de entrada do Fluido:  $v = 0,116\text{m/s}$
2. Temperatura de Entrada do Fluido  $T_e = 295\text{K}$
3. Fluxo de Radiação:  $Q_{\text{rad}} = 416,7\text{ W/m}^2$
4. Propriedades dos materiais definida na seção 5.1.1
5. Paredes do coletor submetidas à convecção e irradiação.

Essa simulação consiste em aplicar valores arbitrários de  $k$  para as superfícies Tetra Pack , em intervalos bem espaçados, mantendo todos os outros parâmetros fixos e avaliar as mudanças na temperatura de saída do fluido. Para tanto, foi utilizada uma malha refinada através do recurso *inflation*, em superfícies que possuem comportamento de parede, conforme é indicado na figura 35.

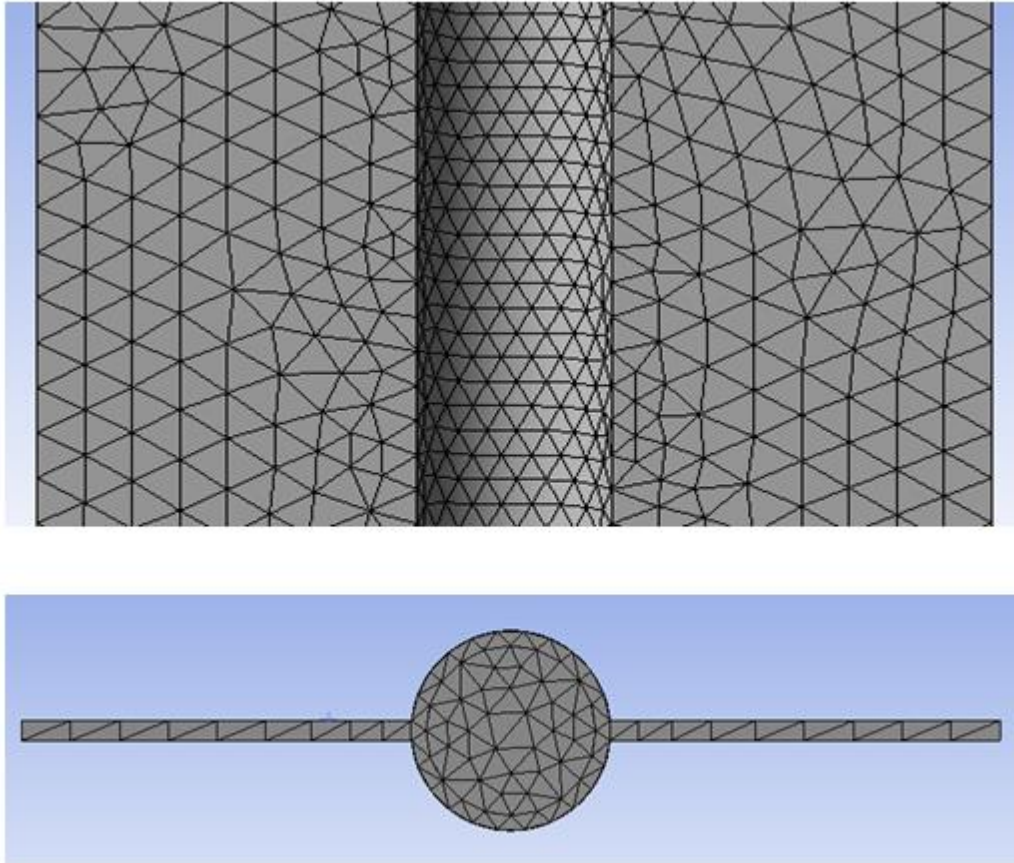


Figura 35. Malha Utilizada no Elemento de Coletor Solar  
Fonte: autoria própria

Tendo em vista que o coletor possui inclinação em relação à horizontal de  $28^\circ$ , é possível simular a influência da gravidade no escoamento atribuindo uma componente da aceleração gravitacional ao eixo ao longo do qual ocorre o escoamento. Também deve ser considerado que o sentido do escoamento se opõe à aceleração da gravidade. No software de simulação o escoamento ocorre ao longo do eixo Z, como indica a figura 36.

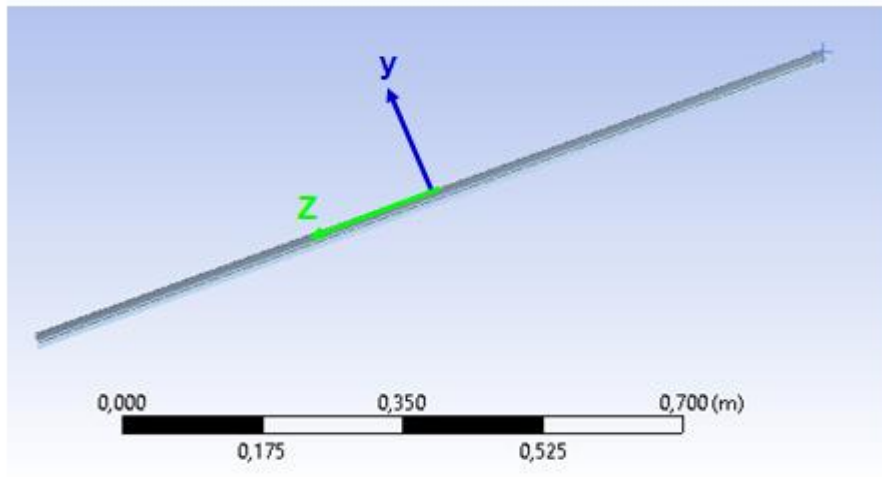


Figura 36. Análise Gravitacional do Coletor Solar  
Fonte: autoria própria

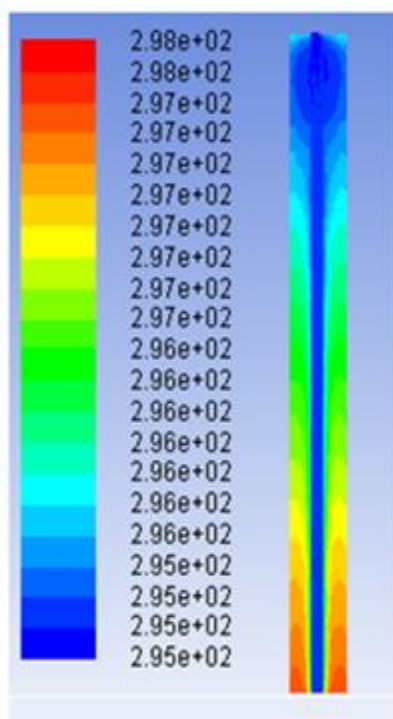
Logo, a componente da aceleração da gravidade ao longo do eixo z é calculada pela equação 45.

$$g_z = g_{\text{vertical}} \sin(28^\circ) \quad (45)$$

$$g_z = -4,6 \text{ m/s}^2$$

Assim, para simular a gravidade na simulação, atribui-se uma aceleração de  $-4,6 \text{ m/s}^2$  para o eixo z.

Definidas as condições de contorno, realiza-se a simulação variando o coeficiente de transmissão de calor. Os valores de coeficiente utilizados foram  $K_{\text{pvc}} = 0,21 \text{ W/m.k}$ ,  $K_1 = 100 \text{ W/m.k}$ ,  $K_2 = 1000 \text{ W/m.k}$  e  $K_3 = 2000 \text{ W/m.k}$ . Para esses valores as temperaturas de saída do fluido são indicadas na figura 37, assim como a distribuição de temperatura no coletor.



(a) Distribuição de Temperatura

Static Temperature		(k)
inlet		295
outlet		296.33438
Net		296.33438

(b)  $K_{PVC} = 0.21 \text{ W/m.K}$ 

Static Temperature		(k)
inlet		295
outlet		296.33438
Net		296.33438

(c)  $K = 100 \text{ W/m.K}$ 

Static Temperature		(k)
inlet		295
outlet		296.38849
Net		296.38849

(d)  $K = 1000 \text{ W/m.K}$ 

Static Temperature		(k)
inlet		295
outlet		296.39606
Net		296.39606

(e)  $K = 2000 \text{ W/m.K}$ 

Figura 37. Resultados para análise de influência do  $K_{Tetrapak}$   
 Fonte: autoria própria

Os dados obtidos para essa simulação são indicados na tabela 7.

Tabela 7. Dados para Análise de Influência do  $K_{Tetrapak}$

$k \text{ (W/m.K)}$	$T_s \text{ (K)}$
0,21	296,33
100	296,33
1000	296,39
2000	296,39

Fonte: autoria própria

A figura 37a, apresenta a distribuição de temperatura para a referida simulação. Deve ser mencionado que esta simulação não se propõe a descrever o comportamento térmico do sistema, uma vez que isso será feito em etapa posterior.

Os resultados apresentados nas figuras 37b a 37e permitiram constatar a baixíssima influência da condutividade térmica proporcionada pelas superfícies Tetra Pack. A diferença entre a temperatura de saída proporcionada pelo menor coeficiente de condução e pelo maior foi inferior a 0,021%.

Esse comportamento é explicado pelo baixo valor da espessura das caixas Tetra Pack. Deve ser destacado, no entanto, que essas superfícies cumprem papel relevante no aquecimento da água, uma vez que aumentam a área de absorção da radiação solar. Pintadas de preto, a concentração de calor é potencializada, aumentando assim a temperatura do ar no interior das garrafas PET. Este, portanto, é um parâmetro que influencia fortemente no valor da temperatura de saída do fluido, como será demonstrado na próxima seção.

Os resultados deste estudo justificam que seja desprezada a transmissão de calor por condução das caixas de leite para a água.

### **6.1.3. Influência da temperatura do ar recluso nas garrafas PET na temperatura na saída do fluido**

Para esta simulação, as condições de contorno, bem como, as características de malha são as mesmas utilizadas na seção anterior. O que será feito nesta etapa, é variar a temperatura do ar no interior das garrafas PET e analisar o efeito desse parâmetro na temperatura de saída do fluido.

Inicia-se o estudo com a temperatura de bulbo seco de verão para a cidade de Curitiba, e aumenta-se esse valor em intervalos de 10K. Foi tomada a precaução de se utilizar um valor máximo de temperatura igual a 360K, para evitar a mudança de estado físico da água. Os resultados obtidos por essa simulação são apresentados na tabela 8, onde também pode ser visualizado o crescimento no rendimento do sistema com o aumento na temperatura do ar, o qual foi determinado a partir da equação 19.

Tabela 8. Dados para a Influência da Temperatura do Ar

Temperatura da Atmosfera (K)	Temperatura de Saída do Fluido (K)	Rendimento (%)
303,9	296,33	0,30
310	297,38	0,53
320	298,9	0,87
330	300,65	1,26
340	302,88	1,76
350	304,83	2,20
360	306,94	2,67

Fonte: autoria própria

O crescimento da temperatura de saída do fluido em função da temperatura da atmosfera pode ser visualizado de forma gráfica na figura 38.

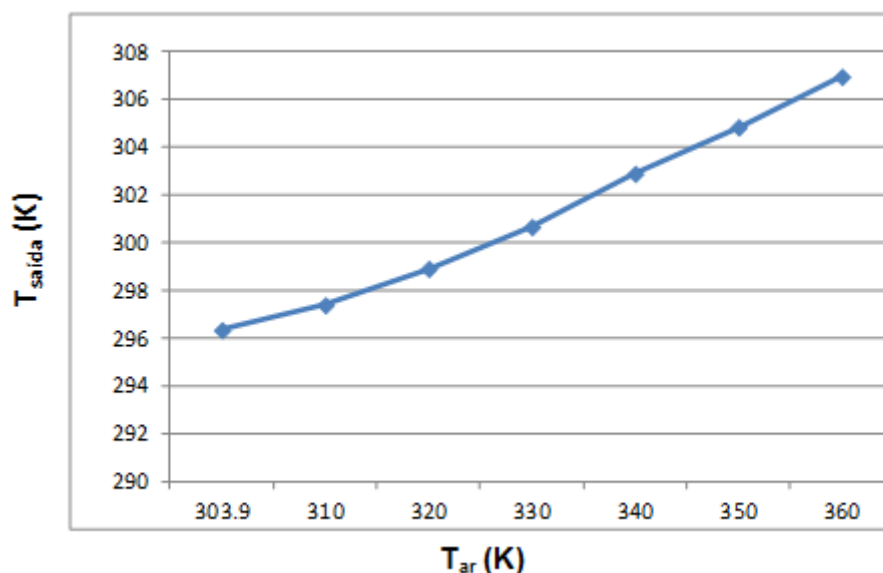


Figura 38. Temperatura de Saída x Temperatura do Ar

Fonte: autoria própria

A constatação mais direta é que o aquecimento da água é fortemente influenciado pela temperatura do ar no entorno dos tubos: o aumento na temperatura do ar causa aumento progressivo na temperatura de saída da água.

As garrafas PET produzem a atmosfera ao redor do tubo com ar aquecido, diminuindo as perdas de calor por irradiação e convecção e

contribuem para aumentar a temperatura do ar recluso no interior das garrafas. O ar aquecido no interior das garrafas PET transmite calor por convecção para os tubos de PVC, aumentando a temperatura da superfície desse material o qual, por sua vez, aquece a água por condutividade térmica. O aquecimento do ar é potencializado devido às superfícies Tetra Pack, pintadas com tinta preta fosca.

Em sínteses, este estudo preliminar permitiu a constatação dos seguintes itens:

1. As superfícies Tetra Pack não contribuem com o aquecimento da água através de transmissão de calor por condução. Esse fato justifica o emprego, nas simulações posteriores, de coeficiente de transmissão de calor arbitrário para essas superfícies.
2. A temperatura do ar no interior das garrafas PET contribui significativamente para o aquecimento de água. Um aumento nessa temperatura de 18,5% promoveu um crescimento na temperatura de saída da água em 3,6%.
3. Os elementos constituídos de materiais recicláveis (PET e Tetra Pack) possuem alta relevância na transmissão de calor para a água uma vez que contribuem para o aumento da temperatura do ar no interior das garrafas.

## **6.2. Análise do comportamento térmico do coletor**

O detalhamento do comportamento térmico e escoamento de fluido no coletor serão analisados a partir de um elemento. Os parâmetros relevantes para a simulação e a malha utilizada são os mesmos apresentados na seção 5.1.2. Ressalte-se que, no software, as superfícies Tetra Pack receberam o mesmo valor do coeficiente de transmissão de calor do PVC.

Para esta simulação as condições de contorno utilizadas foram:

1. Temperatura de Entrada do Fluido: 295K
2. Velocidade de entrada do Fluido: 0,116 m/s.
3. Fluxo de Radiação Médio para o Sul do Brasil: 416.7W/m<sup>2</sup>
4. A temperatura do ar no interior da garrafa PET foi adotada de acordo com o valor máximo de temperatura suportada pelo PVC (333K)

A figura 39a indica a distribuição de temperatura na superfície do coletor, e a figura 39b, indica a distribuição de temperatura em um plano perpendicular as superfícies Tetra Pack, localizado no interior do condutor. Também deve ser destacado que o escoamento do fluido ocorre ao longo do eixo Z.

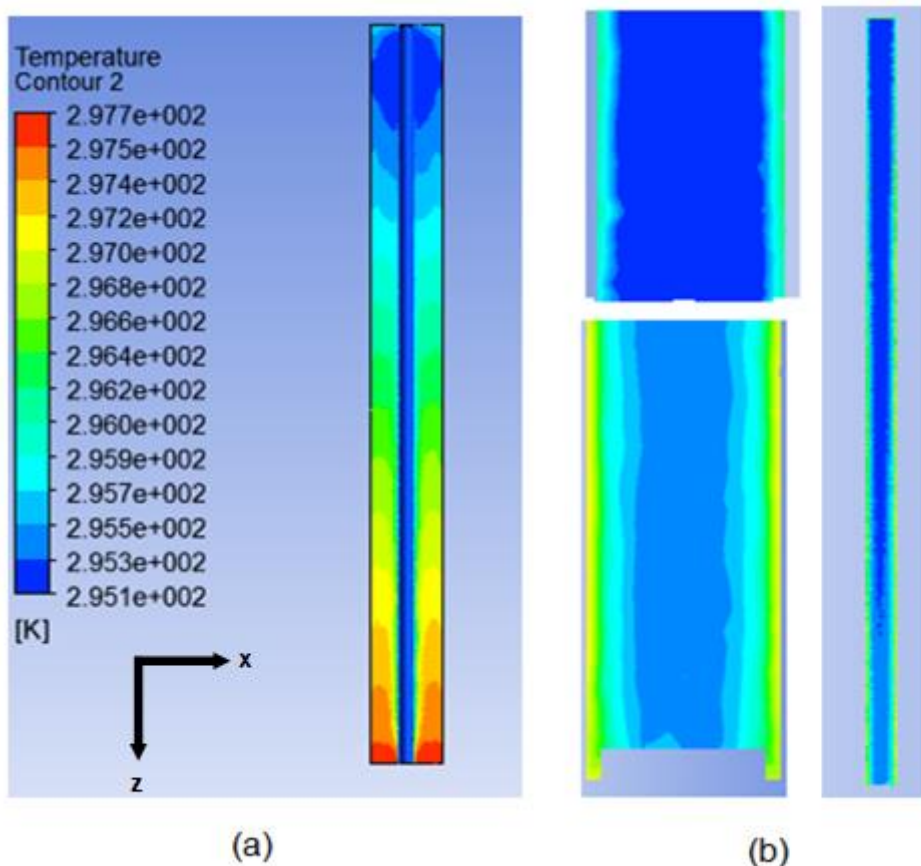


Figura 39. Distribuição de temperatura no coletor  
Fonte: autoria própria



A constatação mais evidente indica temperaturas maiores na saída do coletor em relação às temperaturas de entrada. Esse comportamento é refletido para o fluido escoando no interior do tubo, indicado pelo plano da figura 39b, onde é possível constatar que o fluido possui maior temperatura na saída do coletor. Ressalta-se que a temperatura maior na saída do coletor implica em menor densidade do fluido nessa região, gerando empuxo necessário para garantir o escoamento do fluido.

A figura 40a indica a distribuição de temperatura na região de entrada do fluido numa superfície perpendicular ao escoamento, e a superfície apresentada na figura 40b, indica a distribuição de temperaturas numa superfície localizada na saída do tubo.

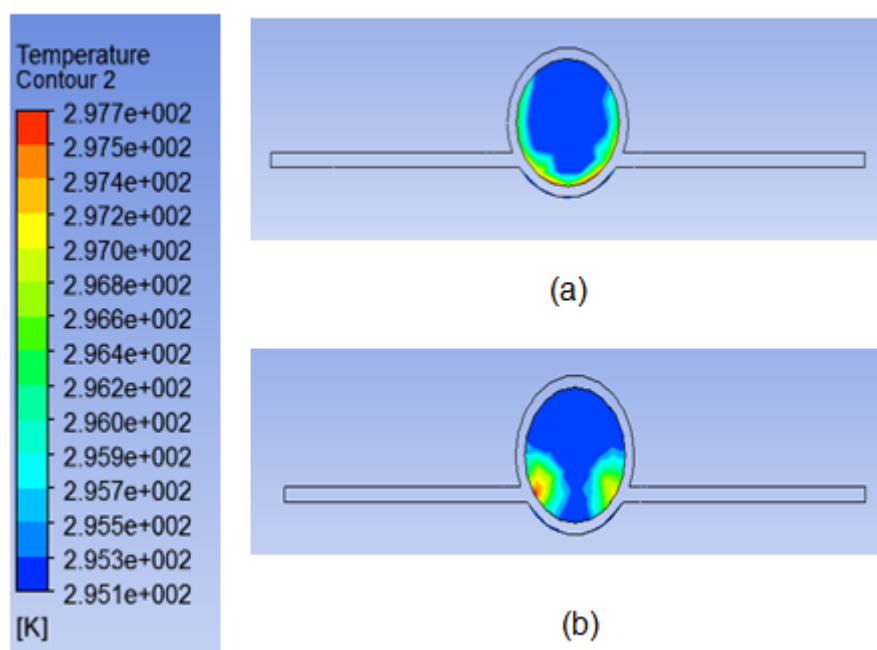


Figura 40. Distribuição de Temperatura na Entrada e Saída do Coletor  
Fonte: autoria própria

É possível constatar que a média das temperaturas na superfície de saída do fluido é superior em comparação à superfície da entrada do fluido. Também pode ser observado que o fluido inicia seu aquecimento nos pontos adjacentes às superfícies Tetra Pack, onde se localizam os pontos de maior temperatura do ar exterior.

A figura 41 indica a transferência de calor nas paredes do coletor. Constata-se que as superfícies tetra Pack são as maiores responsáveis pela

absorção de calor do sistema, contribuindo para o aumento da temperatura do ar exterior. O indicativo maior fluxo de calor na parte superior do coletor aponta uma coerência com os resultados para a distribuição de temperatura.

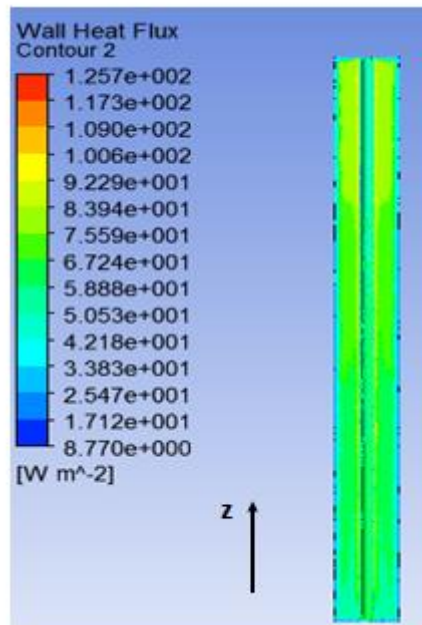


Figura 41. Absorção de Calor nas Paredes do Coletor  
Fonte: autoria própria

### 6.3. Descrição do Escoamento ao longo do Coletor

Os detalhes do escoamento no interior do coletor são indicados na figura 32, em um plano localizado no interior do tubo, sendo apresentada através de distribuição de cores na figura 42a e de vetores na figura 42b.

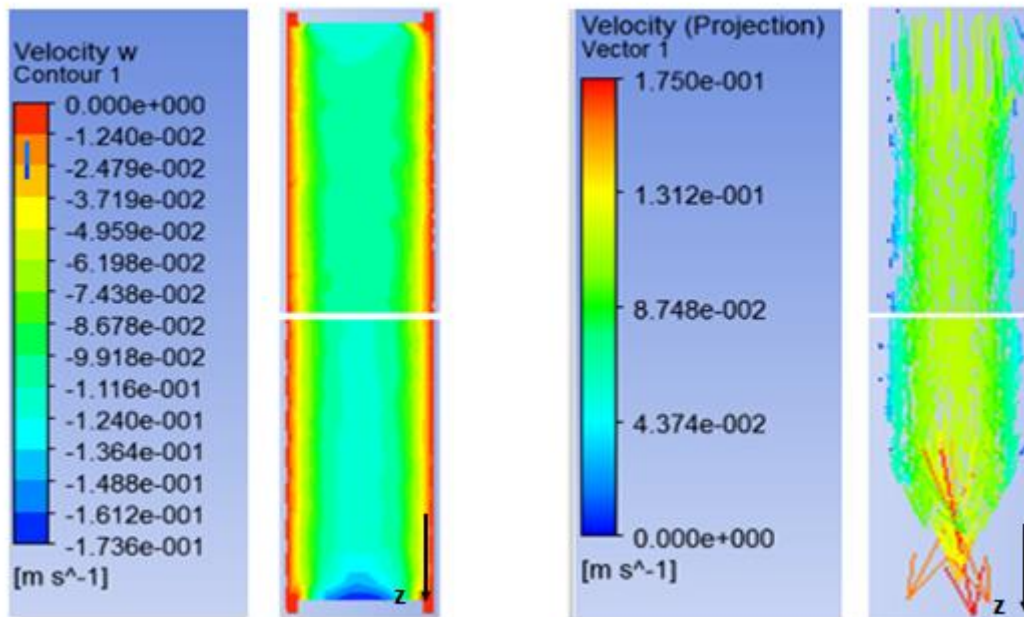


Figura 42. Distribuição de Velocidades  
 Fonte: autoria própria

Deve ser observado que o ponto de maior velocidade se localiza na saída do tubo, indicando que este é acelerado para fora do coletor, devido à diferença de densidade entre o ponto de entrada e o de saída. A condição de não escorregamento é constatada pelo valor nulo de velocidade nas paredes do coletor.

Um aspecto relevante do escoamento é indicado na figura 43, onde pode ser observado que as linhas de corrente se mantêm paralelas, indicando um escoamento laminar em todo o coletor.

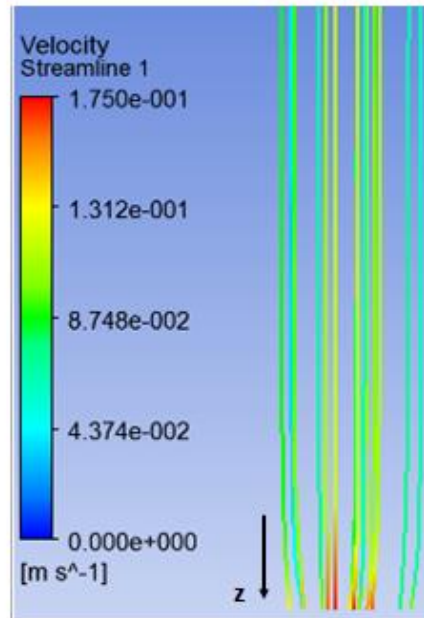


Figura 43. Linhas de Corrente para o Escoamento  
Fonte: autoria própria

A comparação entre o perfil de velocidades previsto pela solução analítica do perfil de escoamento com os resultados obtidos pela simulação pode ser observada no perfil de velocidades indicado na figura 34, para um ponto do escoamento em  $z = -0,42\text{m}$ , nas proximidades da saída do fluido. Assim como prevê a solução analítica, é possível identificar um perfil de velocidades parabólico para este ponto. A coerência qualitativa entre os dois métodos é, portanto, verificada.

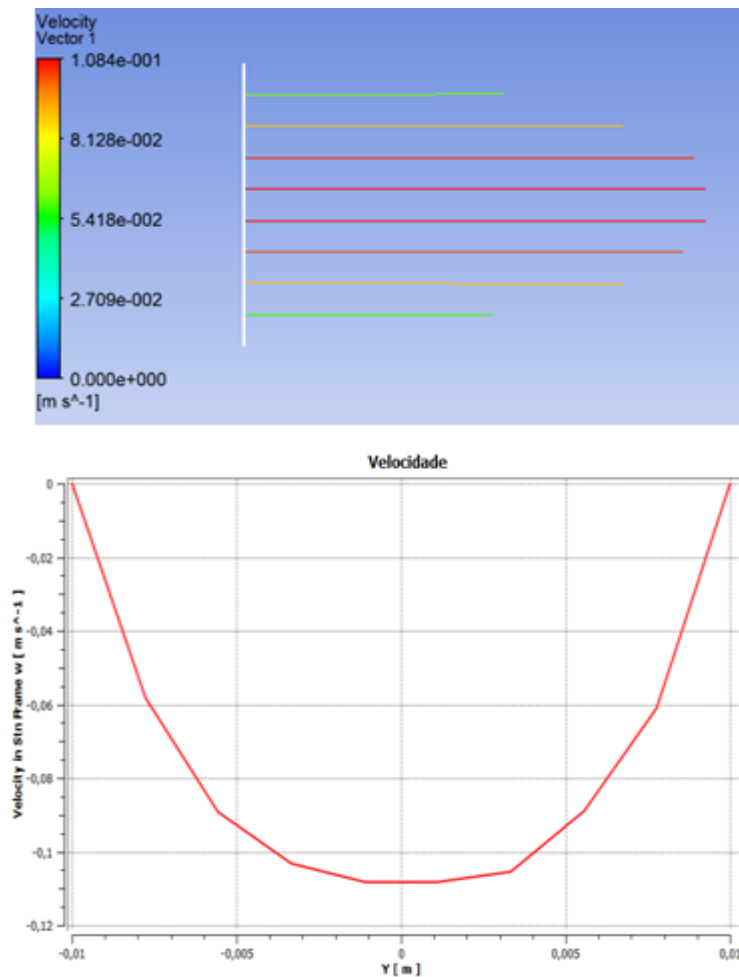


Figura 44. Perfil de Velocidades para  $z = -0,42\text{m}$   
 Fonte: autoria própria

Muito embora os perfis de velocidade previstos pelos dois métodos possam características geométricas semelhantes, deve ser analisado, se existe coerência numérica entre eles. O valor de velocidade para esse ponto do escoamento ( $z = -0,42\text{m}$ ) na altura relativa ao eixo do tubo é igual a  $0,114\text{ m/s}$ , como é indicado na figura 45.

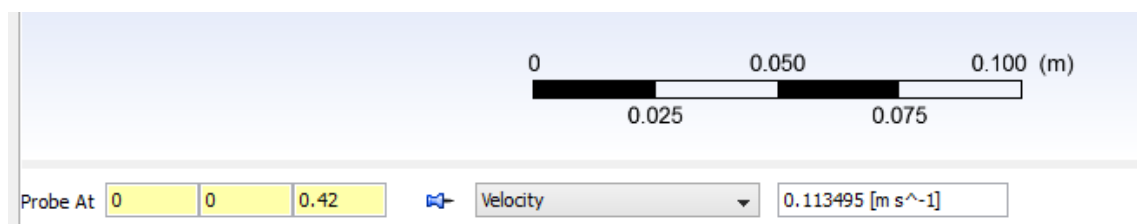


Figura 45. Valor da Velocidade no Ponto Considerado  
 Fonte: autoria própria

Para determinar a velocidade fazendo uso do método analítico será utilizada a equação 42. As pressões utilizadas no método analítico foram retiradas da simulação.

$$v = \frac{0,01^2}{4.954 \cdot 10^{-6}} \left( \frac{11,46}{0,945} \right) \left[ 1 - \left( \frac{0}{0,01} \right)^2 \right]$$

$$v = 0,32 \text{ m/s}$$

A elevada discrepância entre os resultados indica que as simplificações inerentes à solução analítica torna o método inadequado para a presente aplicação. Um dos motivos que explica esse distanciamento entre os resultados refere-se a distribuição de pressão ao longo do escoamento, que não possui comportamento linear ao longo de todo o escoamento, como mostra a figura 46.

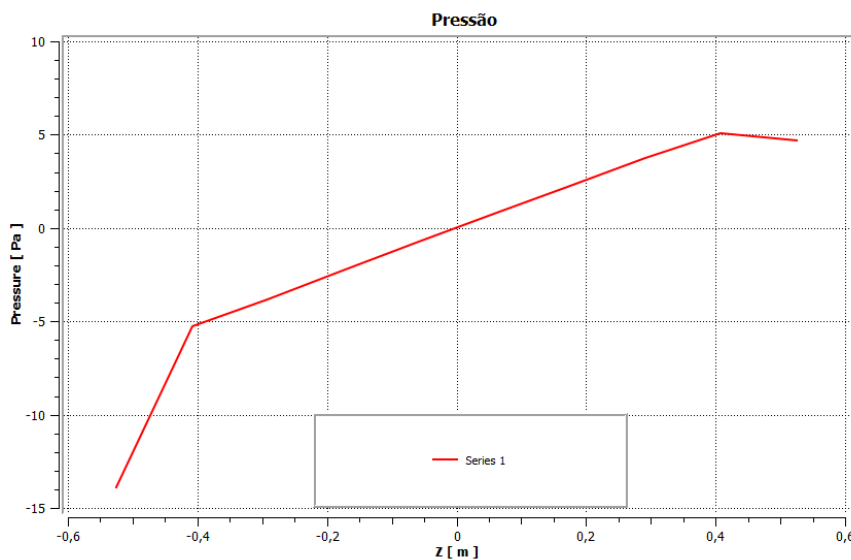


Figura 46. Distribuição de Pressão ao Longo do Escoamento  
Fonte: autoria própria

As discrepâncias entre os dois métodos também são explicadas pela aplicação de calor e do efeito da gravidade na simulação numérica, considerações essas, desprezadas na solução analítica.

## 6.4 Influência do Número de Elementos na Temperatura de saída da água

Este item visa avaliar a influência do número de tubos na temperatura de saída do fluido. Tendo em vista que para a temperatura do ar no interior das garrafas PET, foi utilizado o valor arbitrário de 333K, este estudo não deve ser utilizado como definitivo para o dimensionamento do sistema. Assume-se aqui, portanto, um caráter descritivo. Os demais parâmetros de simulação e condições de contorno são similares aos das seções anteriores.

As condições de contorno para essa simulação são:

1. Fluxo de Radiação Solar Constante de  $416.7 \text{ W/m}^2$
2. Vazão Volumétrica de  $0,0261 \text{ kg/s}$ .
3. Propriedades dos materiais definida na seção 5.1.1.
4. Paredes do coletor submetidas à convecção e irradiação.

Com o intuito de assegurar a convergência da simulação algumas simplificações foram aplicadas no coletor em relação à geometria real. Após vários testes chegou-se a geometria indicada no exemplo da figura 47 para quatro elementos, onde também é mostrada a distribuição para absorção de calor nas paredes do elemento. Mais uma vez pode ser constatada a influência da superfície Tetrapak na absorção de calor do sistema.

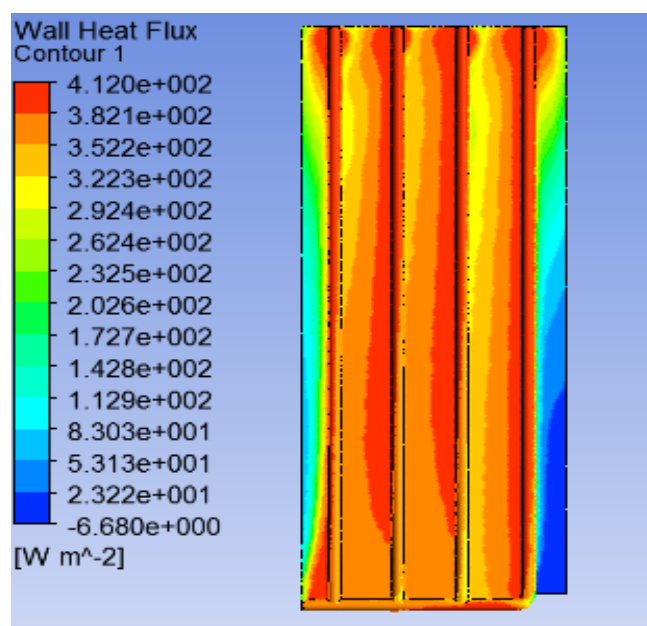


Figura 47. Absorção de Calor para Quatro Elementos  
Fonte: autoria própria

Os detalhes do escoamento para quatro elementos são apresentados na figura 48, onde pode ser constatado um escoamento laminar ao longo dos tubos, evidenciado pelas linhas de corrente que apresentam-se paralelas ao longo do escoamento.

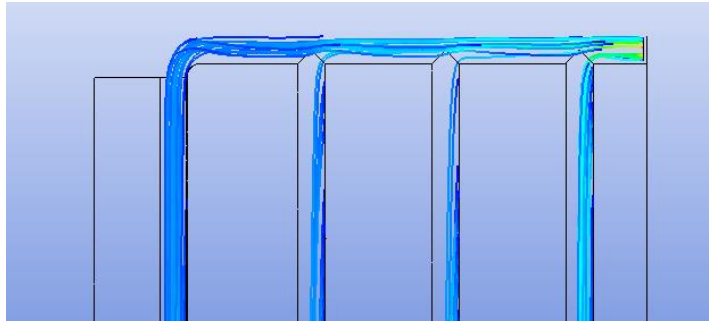


Figura 48. Linhas de Corrente para Quatro Elementos  
Fonte: autoria própria

Essa simulação consiste em aplicar as condições de contorno referidas acima aumentando-se o número de elementos de coletor em intervalos pares, até o valor máximo de 10 elementos. Então faz-se o registro da temperatura de saída do fluido em função do número de elementos. Tais resultados estão indicados na figura 49.



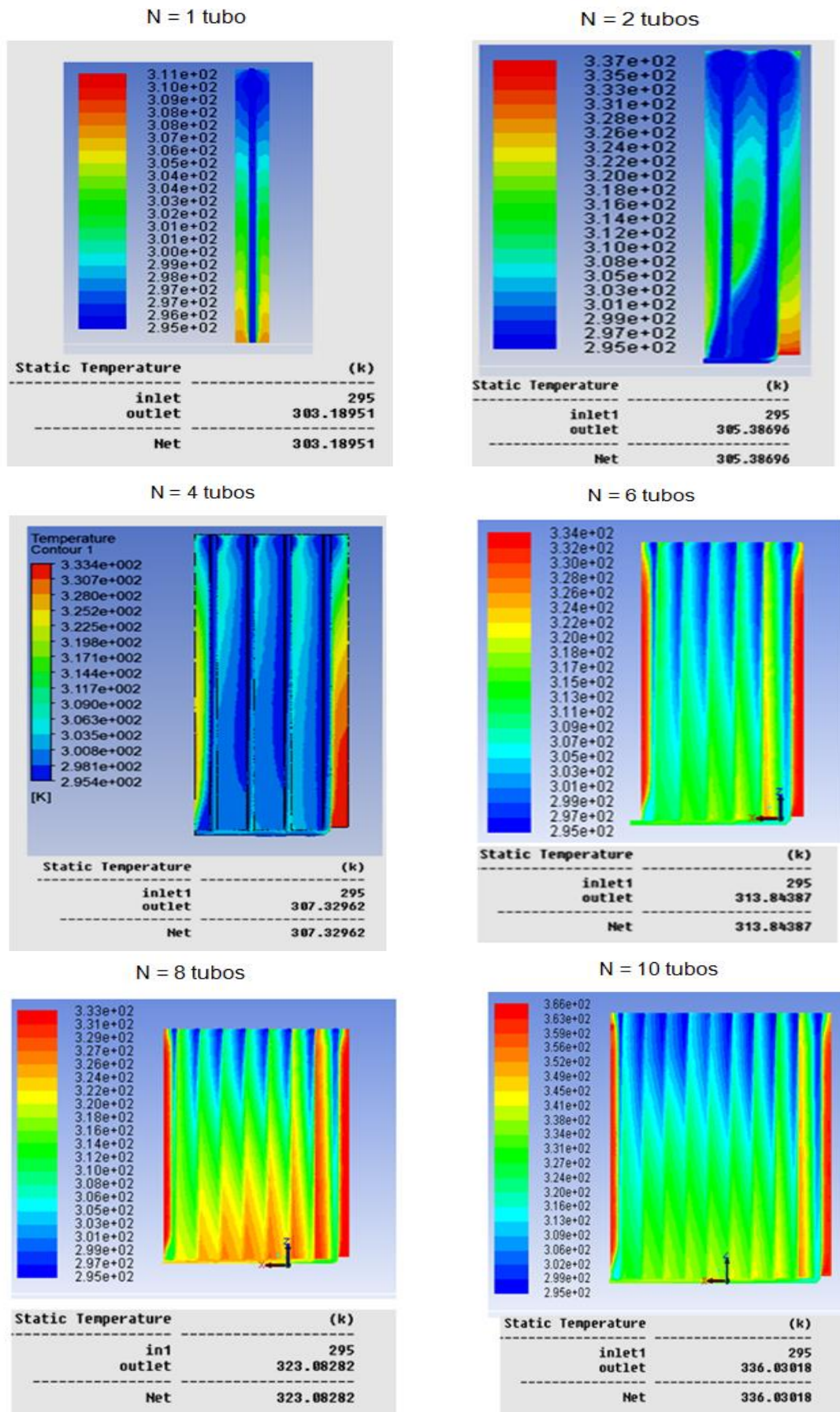


Figura 49. Resultados para Influência do Número de Tubos na temperatura de saída da água

Os valores de temperatura de saída do fluido em função do número de tubos está organizado na tabela 8.

Tabela 9. Dados para a Influência do Número de Tubos na Temperatura de saída

<b>nº de Tubos</b>	<b>T<sub>e</sub></b>	<b>T<sub>s</sub></b>
1	295	303
2	295	305,4
4	295	307,41
6	295	313,84
8	295	323,08
10	295	336,03

Fonte: autoria própria

A constatação mais direta desta análise é o aumento da temperatura na saída do fluido em função do aumento do número de tubos. Essa relação está indicada de forma gráfica na figura 50, onde pode-se constatar um comportamento não linear entre essas duas grandezas. O gráfico fornece um indicativo no número de tubos que deve ser utilizado para se obter determinada temperatura na saída do fluido.

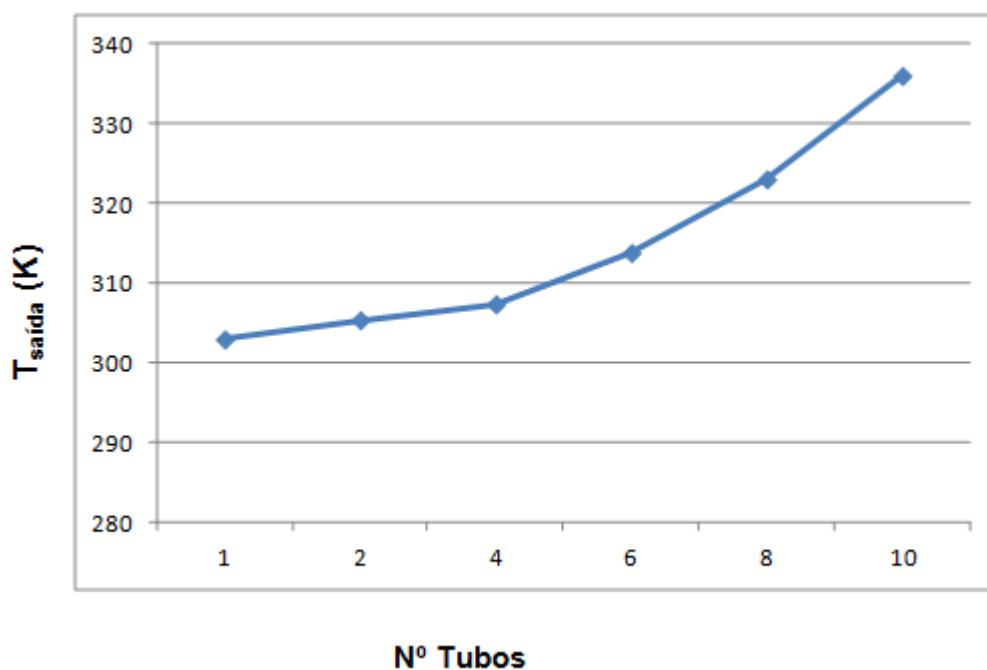


Figura 50. Número de Tubos x Temperatura de Saída do Fluido  
Fonte: autoria própria

O aumento na temperatura de saída do fluido em função do número de tubos é explicado pelo fato de que nessa simulação a vazão de escoamento foi mantida constante e a velocidade de entrada foi reduzida gradativamente. Para dois tubos, por exemplo, a velocidade foi reduzida pela metade. Com isso, o fluido passa a receber maior quantidade de energia ao longo do escoamento, pois passa a permanecer por maior tempo no interior do tubo.

### **6.5 Descrição do comportamento termo-fluidodinâmico do Reservatório**

Neste item será realizada a descrição do comportamento térmico e de escoamento da água no interior do reservatório, sob duas perspectivas:

1. A primeira refere-se ao coletor isento de uso, ou seja, não há entrada da água de abastecimento e nem saída de água para uso. O escoamento se restringe na saída de água do reservatório para o coletor e retorno do coletor para o reservatório.
2. A segunda análise é realizada para o coletor em uso. Neste caso, fazem parte do escoamento o fornecimento de água por parte da rede de abastecimento e a saída de água para uso.

Em comparação ao estudo do coletor, as condições de contorno usadas no estudo do reservatório são mais simples, assim como a geometria a ser modelada. A malha utilizada e as superfícies de interesse são indicadas na figura 51.

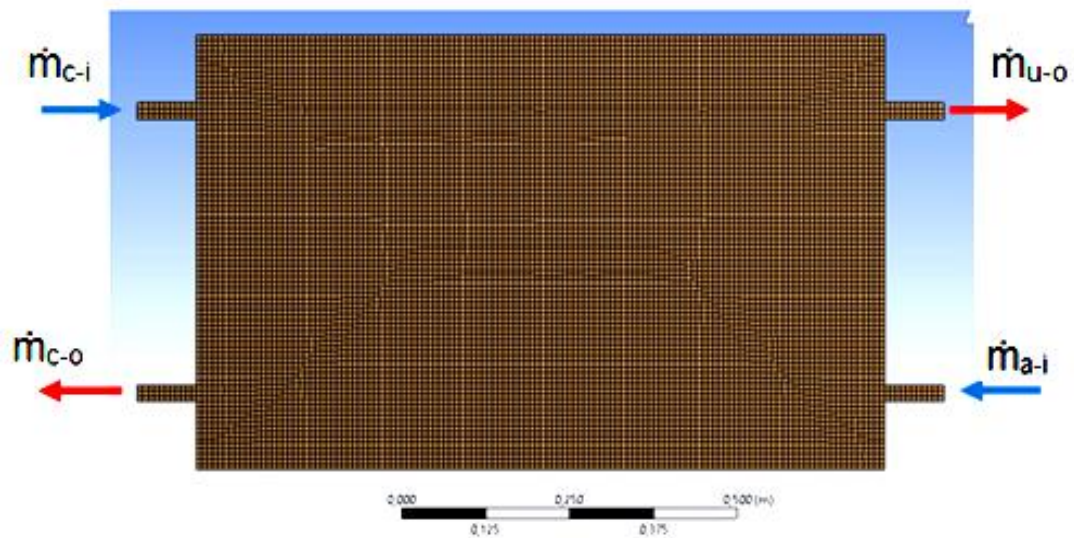


Figura 51. Malha Utilizada na Superfície do Reservatório  
Fonte: autoria própria

As superfícies de entrada e saída de fluido são:

$\dot{m}_{a-i}$ : Água de abastecimento -  $T = 295k$

$\dot{m}_{c-o}$ : Água que vai para o coletor - temperatura a ser determinada.

$\dot{m}_{c-i}$ : Água proveniente do coletor - temperatura fornecida pelo coletor.

$\dot{m}_{u-o}$ : Água para uso - temperatura a ser determinada.

As propriedades para o material do reservatório são indicadas na tabela 10.

Tabela 10. Dados do Material do Reservatório

<b>Dados do Reservatório</b>		
<b>Grandeza</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Tipo		Polietileno
Massa Específica ( $Kg/m^3$ )	$\rho$	950
Calor Específico ( $J/kg.K$ )	$c_p$	1900
Condutividade Térmica ( $W/m.K$ )	$k$	0,4

Fonte: autoria própria

### 6.5.1. Análise termo-fluidodinâmica para reservatório isento de uso

Nesta simulação é analisado o comportamento térmico do coletor, numa situação em que este não está sendo usado, mas recebe continuamente água quente proveniente do coletor. Assim as condições de contorno são:

1. Superfícies de entrada de água da rede e de uso são transformadas em parede (estão fechadas).
2. A superfície de retorno de água do coletor recebe condição de contorno de entrada de fluido com velocidade de 0,116 m/s (a fim de manter o escoamento em regime laminar) e temperatura de 336,03K (a maior fornecida pelo coletor neste trabalho)
3. A superfície de saída de água para o coletor recebe condição de contorno de saída de fluido com temperatura a ser determinada.

Para simulação em regime permanente a distribuição de temperatura no reservatório é indicada na figura 52. O que pode ser constatado é uma tendência de que, em regime permanente, todo o reservatório entre em equilíbrio térmico.



Figura 52. Distribuição de temperatura para o reservatório (sem uso)  
Fonte: autoria própria

Muito embora a análise em regime permanente forneça uma importante informação a respeito do comportamento térmico do coletor é relevante compreender a dinâmica de aquecimento desse equipamento. Para tanto, faz-se uma análise em regime transiente para ele. As informações a cerca dessa

simulação são indicadas na figura 53, onde apresentam-se imagens da distribuição de temperatura em tempos específicos do aquecimento.

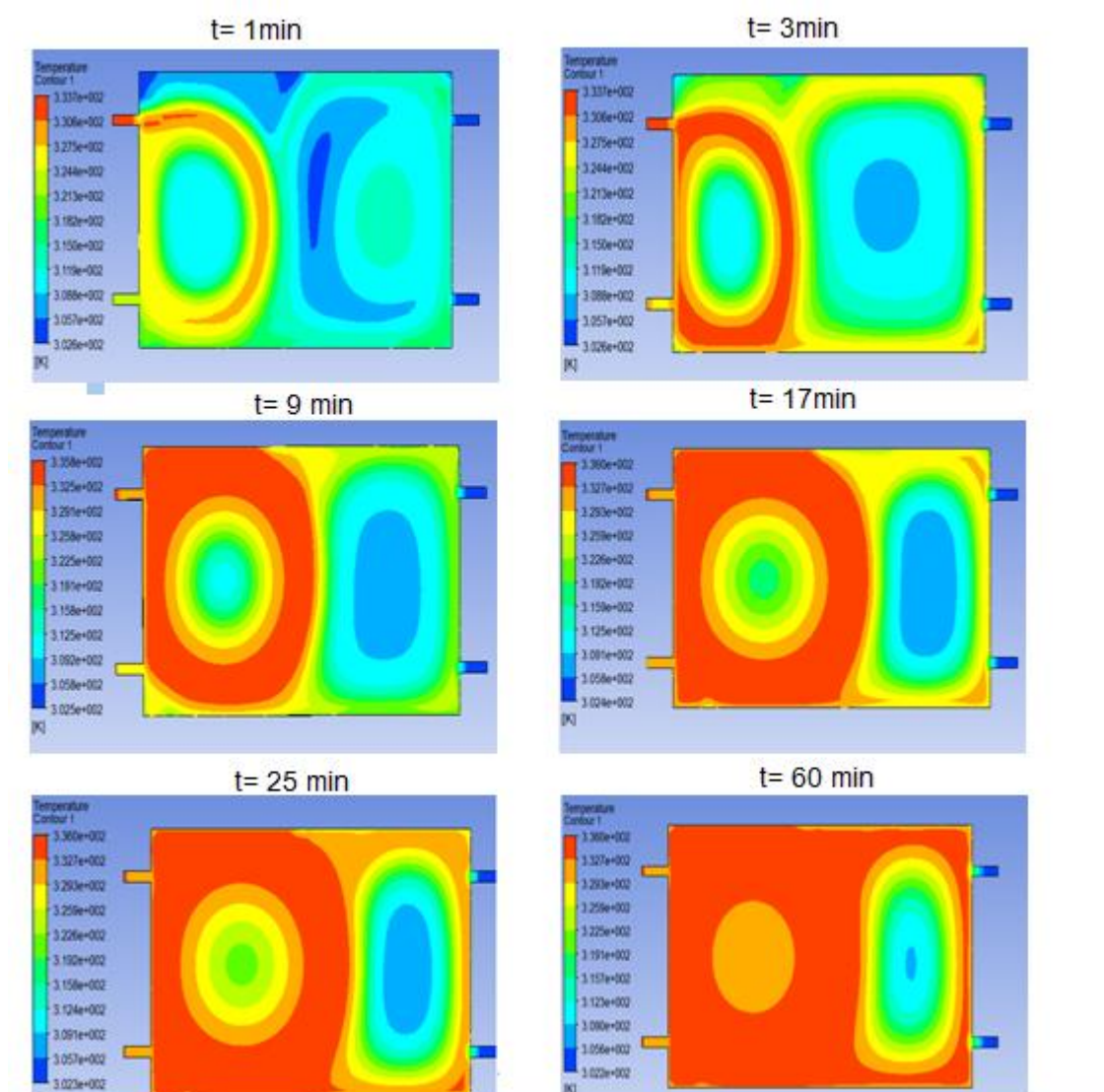


Figura 53. Análise do reservatório em regime transiente (sem uso)  
Fonte: autoria própria

Pode-se constatar que o aquecimento do fluido procede da lateral onde ocorre entrada de água quente para o lado oposto do reservatório. A entrada de fluido quente na parte superior faz com que ali a temperatura seja maior, e como consequência, a massa específica seja menor.

A medida que avança na direção oposta, o fluido vai cedendo calor e aumenta sua massa específica, ocasionando uma circulação descendente. Ainda que tenha diminuído a temperatura, essa porção de fluido está mais

quente que aquela posicionado inicialmente na parte inferior do reservatório. Isso propicia o empuxo que provoca um fluxo ascendente no lado do reservatório onde se localizam as superfícies de entrada e de saída de fluido. A porção de fluido que não é acelerada para cima retorna ao coletor. As características dessa circulação são indicadas na figura 54a, através de linhas de corrente e na figura 54b através dos campo de velocidades.

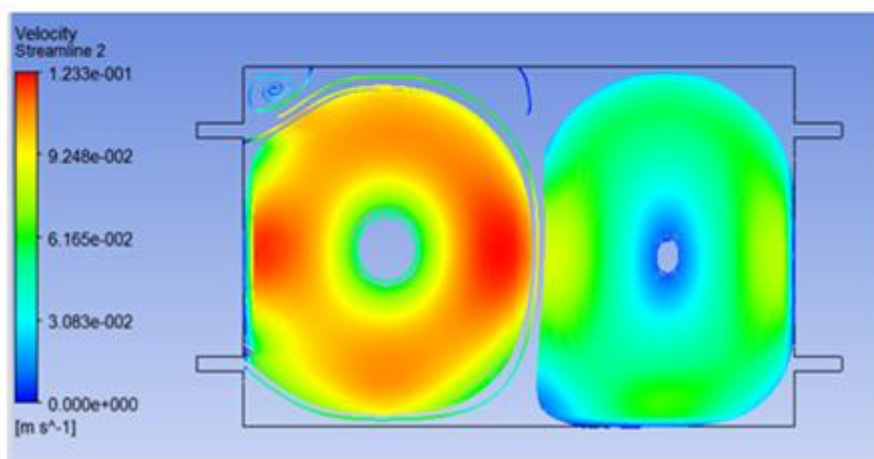
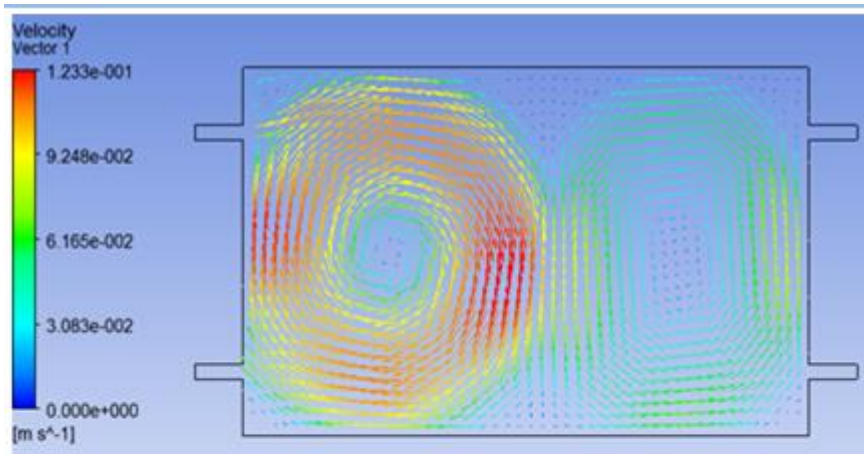


Figura 54. Características do Escoamento no Interior do Reservatório (sem uso)

Fonte: autoria própria

A figura 55 indica a evolução da temperatura em função do tempo para um ponto central do reservatório. Pode-se constatar que, neste ponto, o fluido leva cerca de 5,6 horas para atingir o regime permanente. Deve ser ressaltado que essas características são válidas para o caso de insolação constante.

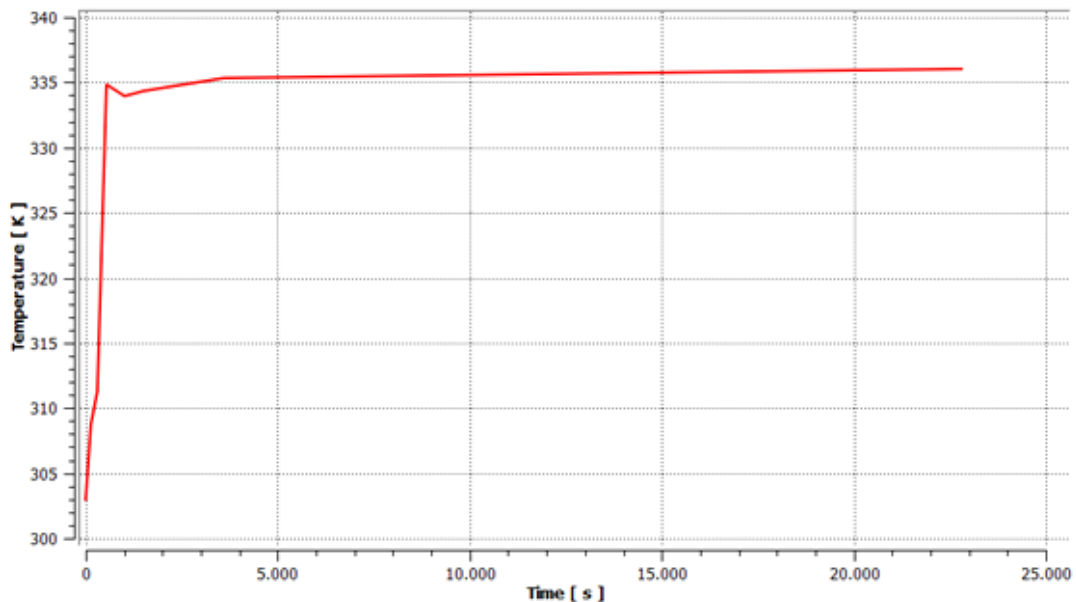


Figura 55. Temperatura em Função do Tempo para um ponto Central do Reservatório  
Fonte: autoria própria

A explicação para o elevado tempo necessário para atingir o regime permanente pode ser obtida mediante as características de recirculação da água quente indicadas na figura 54. Observa-se que parte do fluido quente retorna para o coletor e não contribui para o aquecimento do sistema.

Esse fenômeno pode ser evitado com a captação de água do reservatório em pontos de menor temperatura, através da inserção de um tubo que se estenda até as proximidades da face oposta à entrada do fluido quente, como indica a figura 57. Essa medida poderá reduzir as perdas de calor e diminuir o tempo relativo ao regime permanente.



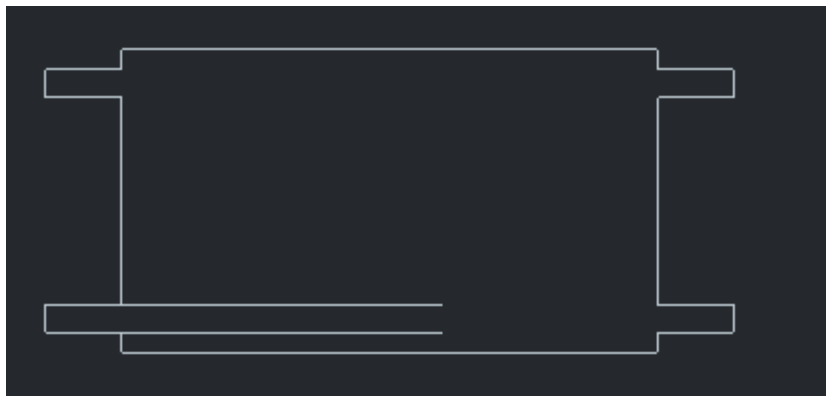


Figura 56. Sugestão para Captação de Água Fria  
Fonte: autoria própria

### 6.5.2 Análise termo-fluidodinamica para reservatório em uso

Essa simulação visa analisar as dinâmicas de aquecimento do reservatório, quando este está em uso. Assim, as propriedades e características de malha são mantidas as mesmas da seção anterior, tendo as seguintes condições de contorno:

1. A superfície pela qual a água proveniente da rede entra no reservatório ( $\dot{m}_{a-i}$ ) recebe condição de contorno de entrada de fluido, com velocidade constante de 0,058m/s e temperatura  $T = 295K$  (água proveniente da rede). Essa velocidade foi definida com a função de manter o escoamento em regime laminar no interior do reservatório.

2. A superfície  $inlet_2$  recebe condição de contorno de entrada de fluido com velocidade constante de 0,058m/s e temperatura de 336,03K (maior temperatura fornecida pelo coletor, proveniente de arranjo com dez tubos).

3. A superfície de saída de fluido que vai para o coletor ( $\dot{m}_{c-i}$ ) e a superfície destinada ao uso ( $\dot{m}_{u-o}$ ) recebem condição de contorno de saída de fluido (definida como *outflow* no software). Dessa forma, os parâmetros de temperatura e de velocidade para essas superfícies são definidas em função das demais condições de contorno utilizadas na simulação.

Para esta situação a distribuição de temperatura é indicada na figura 57. Pode ser constatado que, em regime permanente, ocorre uma estratificação do reservatório em três partes, tendo os maiores valores de temperatura na parte

superior do reservatório, temperaturas intermediárias na parte central e temperaturas menores na parte inferior.

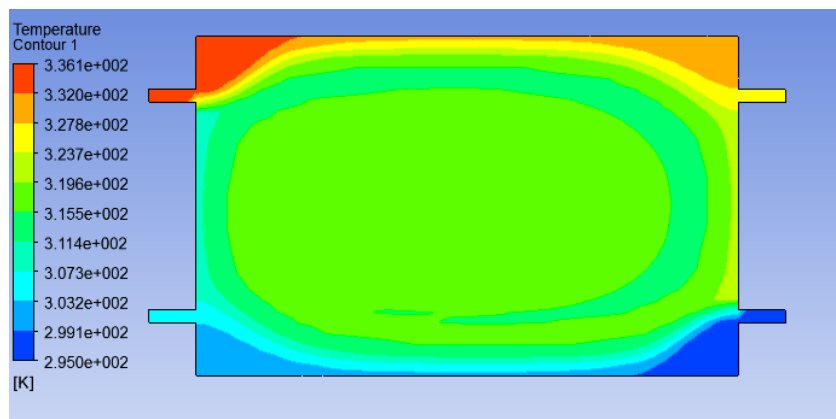


Figura 57. Estratificação Térmica no Reservatório  
Fonte: autoria própria

A figura 58 indica a relação entre a temperatura de saída do reservatório (água de uso), em função da temperatura fornecida pelo coletor para os números de elementos obtidos na seção 5.4. Constata-se que a temperatura de saída do reservatório é muito próxima da temperatura de entrada, indicando um baixo nível de perdas no interior do coletor. A maior variação de temperatura está em torno de 2,8% para um número de tubos igual a 10.

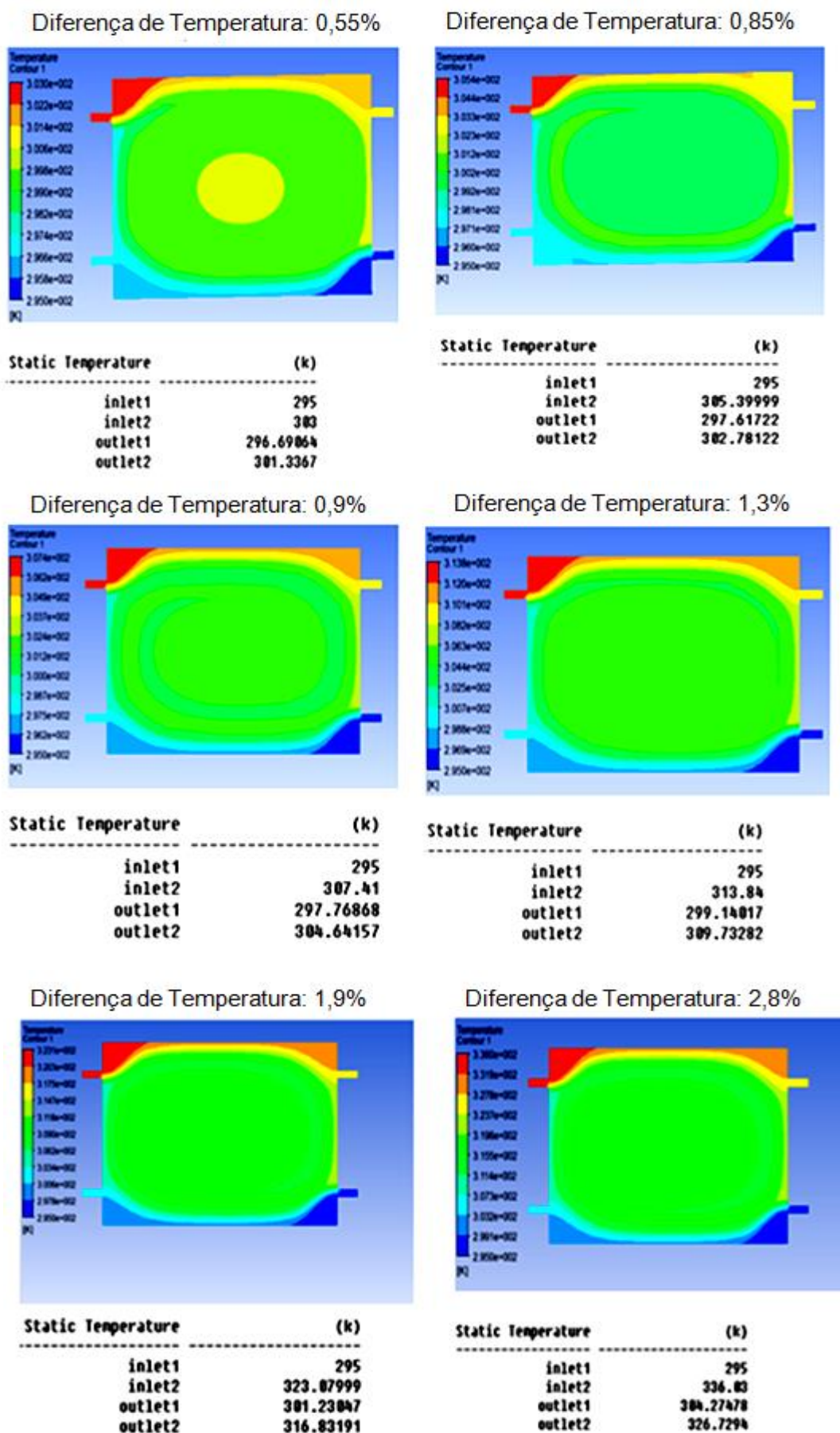


Figura 58. Relação entre a temperatura fornecida pelo coletor e a temperatura disponibilizada ao uso

A análise em regime permanente permitiu a constatação de que ocorre estratificação térmica do reservatório quando ocorre uso da água quente. No entanto a análise será complementada através de simulação em regime transiente para esta situação. As informações a cerca dessa simulação são indicadas na figura 59, contendo as imagens da distribuição de temperatura em tempos específicos do aquecimento.

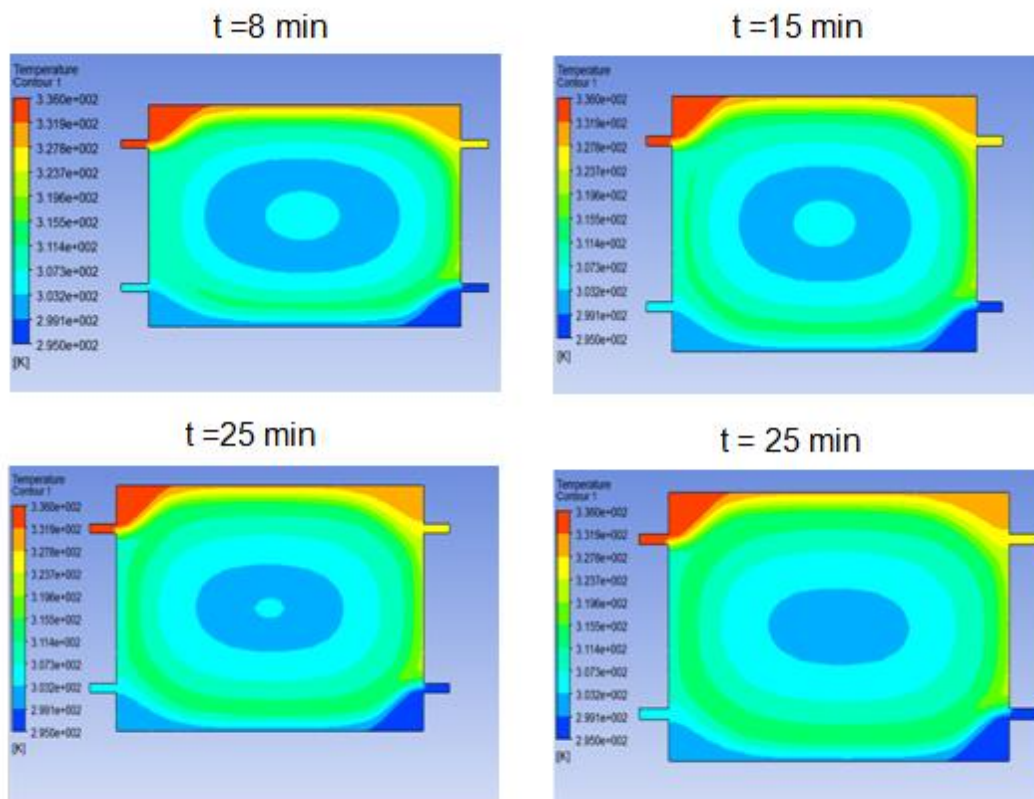
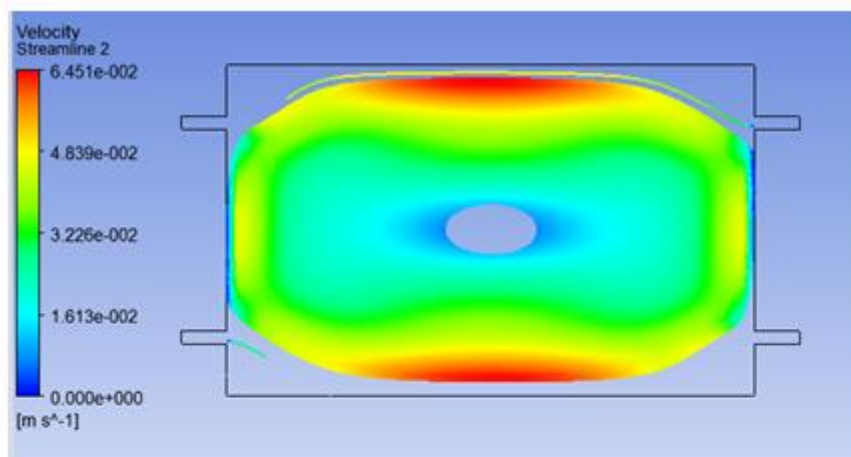


Figura 59. Análise em Regime Transiente para o Reservatório (em uso)  
Fonte: autoria própria

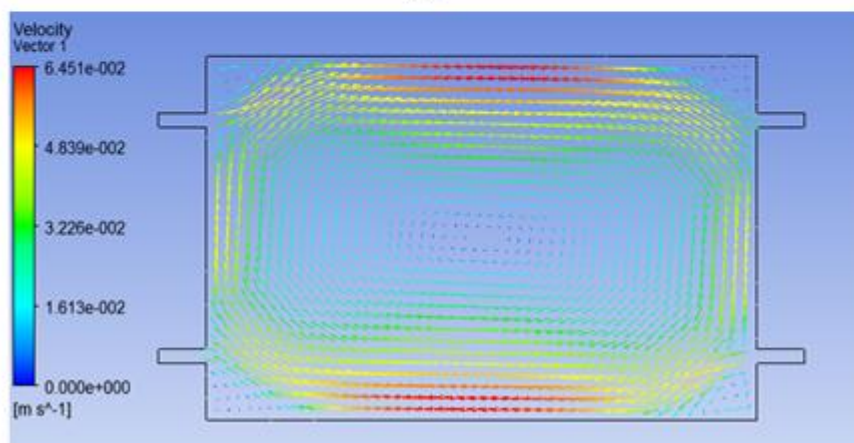
A figura 59 indica que a estratificação do reservatório é mantida em todo o tempo de aquecimento. O fluxo contínuo em regime laminar entre a superfície de entrada 2 ( $\dot{m}_{c-i}$ ) e de saída 2 ( $\dot{m}_{u-o}$ ), garante que não ocorra grandes trocas de calor com as porções de fluido da parte inferior.

Uma pequena parcela do fluxo posicionado na face oposta a entrada, esfria e desce. Sendo levada de volta para a face de entrada através do escoamento proveniente da rede, a temperatura dessa porção de fluido aumenta e esta sobe novamente. Isso garante uma pequena recirculação de

fluido na parte central do reservatório, como indica a figura 60a, através de linhas de corrente e 60b, através de vetores.



(a)



(b)

Figura 60. Características de Escoamento no Reservatório (em uso)  
Fonte: autoria própria

Para avaliar a influência do tempo na temperatura de aquecimento de forma quantitativa consideram-se os gráficos apresentados nesta seção. O gráfico da figura 61 representa a dinâmica de aquecimento para um ponto localizado na superfície de saída do reservatório (destinada ao uso), representada pela curva em vermelho. No mesmo gráfico é representado esse comportamento para um ponto central do equipamento, através da curva em azul.

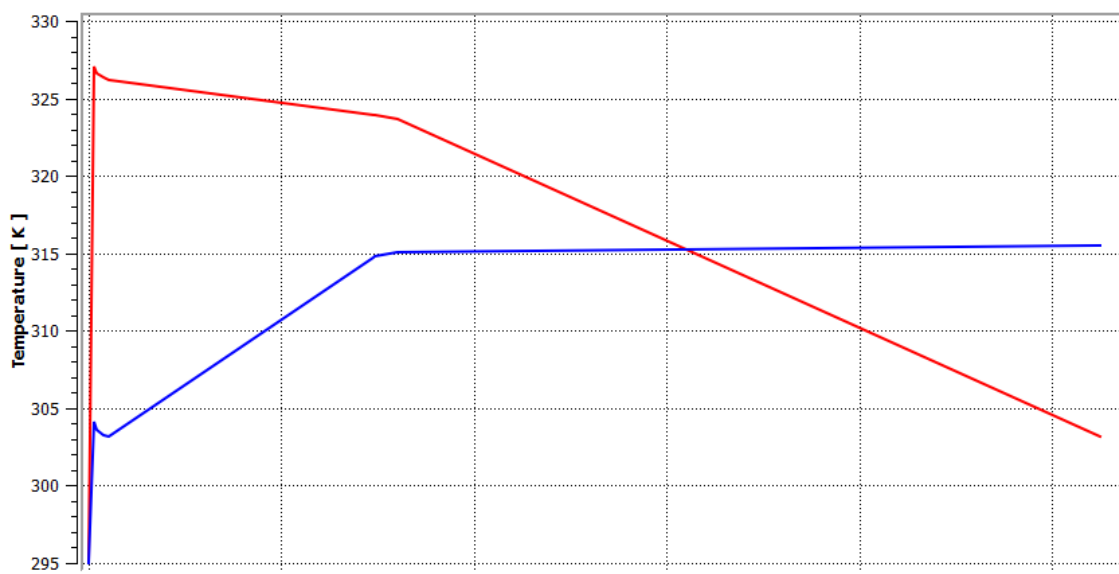


Figura 61. Temperatura x Tempo

Fonte: autoria própria

A curva em vermelho indica que a temperatura da água destinada ao uso atingiu o valor máximo num período de aproximadamente 17 minutos. Após esse ponto, a temperatura passa a cair continuamente em função do uso do reservatório. O gráfico indica que, se a radiação for mantida, a temperatura levará um tempo de aproximadamente 9 horas para sofrer uma variação de 4°C.

Através da curva em azul, é possível constatar que o ponto central tende a atingir o regime permanente para um tempo superior a 28 horas. Do ponto de vista prático isso jamais ocorreria, tendo em vista a impossibilidade de que a radiação seja mantida por um tempo tão prolongado.

## 6.6 Considerações sobre as simulações

As simulações deste trabalho foram realizadas mediante fortes considerações, fato esse que impossibilita o dimensionamento dos referidos coletores alternativos, a partir dos resultados obtidos. O trabalho classifica-se, portanto, como um estudo preliminar, de caráter descritivo. Apesar dessas limitações, os resultados obtidos neste estudo podem servir como base para direcionar trabalhos futuros.

De forma específica, admitiu-se como sendo constante a velocidade de entrada do fluido nos tubos do coletor e reservatório de água quente e, como consequência, a vazão de escoamento. Presume-se, no entanto, que em sistemas passivos de aquecimento solar esses parâmetros possuem dependência em relação à radiação absorvida pelo coletor. Também vale destacar que a temperatura do ar recluso no interior das garras PET, foi assumida como sendo constante.

Uma simulação que se propõe ao dimensionamento efetivo e descrição térmica quantitativa do sistema deve levar em conta a interdependência entre todos esses parâmetros citados. Uma solução efetiva para obter resultados satisfatórios, consiste em inserir a garrafa PET no volume de controle, aplicar as condições de contorno adequadas e refinar a malha, de modo a assegurar a convergência da simulação.

## 7. Conclusões

Este trabalho assumiu um caráter descritivo a medida que, para alguns parâmetros relevantes ao aquecimento da água, foram atribuídos valores arbitrários. Ressalte-se, porém, que esses valores estão inseridos dentro de uma faixa coerente para as condições de operação do sistema. Desta forma, os resultados numéricos obtidos, sobretudo no que se refere a relação entre o número de tubos e a temperatura final da água, não devem ser considerados com extrema precisão para o dimensionamento de sistemas.

Um parâmetro que recebeu valor arbitrário nas simulações corresponde à temperatura do ar no interior das garrafas PET (o maior valor de temperatura suportada pelos tubos de PVC). A relevância deste parâmetro para o aquecimento de água foi evidenciada no estudo preliminar. No entanto, a determinação exata dos valores de  $T_{ar}$  a serem incluídos na simulação deve ser obtida através de estudo experimental, o qual acabou se mostrando como inviável de ser contemplado no presente trabalho. Sugere-se que esta análise seja realizada em trabalhos posteriores.

Além do emprego de valor arbitrário para  $T_{ar}$ , os dados relativos ao aquecimento da água neste projeto, estão relacionados ao fluxo de radiação solar médio para o sul do Brasil. Nesse aspecto, apresenta-se como sugestão para estudo futuro que seja determinada uma relação matemática entre o fluxo de radiação solar e a temperatura final da água. A partir disso, o sistema pode ser dimensionado de acordo com o fluxo de radiação específico para cada região.

No que se refere à descrição qualitativa do comportamento térmico e de escoamento do sistema, entendido como o principal objetivo deste trabalho, os resultados foram satisfatórios. Quanto a esse aspecto foi possível constatar que:

1. A condução de calor das embalagens Tetrapack para a água é tão reduzida a ponto de ser desprezada no aquecimento. A consequência dessa constatação é a possibilidade de se atribuir nas simulações valor arbitrário de  $k$  para as superfícies compostas pelas embalagens Tetra Pack.



2. A temperatura de saída da água quente é diretamente influenciada pela temperatura do ar no interior das garrafas PET. O estudo preliminar constatou que um aumento de 18,5% em  $T_{ar}$ , implica num aumento de 3,6% na temperatura de saída da água. Essa constatação reforçou a importância dos elementos recicláveis para o rendimento do sistema: as embalagens Tetra Pack, pintadas de preto, aumentam consideravelmente a captação de radiação solar e as garrafas Pet impedem que o ar quente seja dissipado e reduz as perdas externas por convecção e irradiação. Todos esses fenômenos contribuem para o aumento da temperatura do ar em torno do coletor.

3. Em relação ao coletor solar, as simulações foram efetivas na finalidade de descrever a distribuição de temperatura e calor ao longo dos elementos. A constatação de temperaturas superiores na saída do coletor indicou uma coerência em relação ao comportamento empírico do coletor. Também, para os parâmetros específicos deste trabalho, constatou-se que um aumento em dez vezes no número de tubos causa aumento de 11% na temperatura de saída da água. Em relação as características de escoamento, foi observado um escoamento laminar ao longo de todo o coletor. Em termos quantitativos, os perfis de velocidade obtidos pela simulação computacionais são discrepantes em relação aos valores previstos pela solução analítica do escoamento.

4. Os resultados das simulações realizadas no reservatório de água quente também foram satisfatórios no propósito de descrever o comportamento térmico do sistema. A análise transiente indicou que se o reservatório não for usado enquanto receber água quente do coletor, todo o seu interior tende a assumir a temperatura da água de entrada, num período de aproximadamente 5,6 horas. Esse tempo pode ser diminuído com a inserção de um tubo que capte apenas a água fria do reservatório e evite a perda de água quente. Para a situação em que ocorre o uso da água quente, o estudo concluiu que o reservatório tende a uma estratificação térmica na qual temperaturas maiores se localizam na parte superior do reservatório, temperaturas intermediárias se localizam no centro e temperaturas menores se localizam na parte inferior. Para este caso, a temperatura da água

disponível para uso tende a atingir o valor máximo em um tempo de 17 minutos, caindo gradativamente após isso. Ambos os casos contradizem a afirmação do inventor do sistema, segunda a qual a porção de água quente no reservatório assume o mesmo valor de temperatura e volume correspondente ao número de garrafas do coletor.

## 8. Referências Bibliográficas

ANELL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/> > Acesso em: 02 de Janeiro de 2014.

ALANO. **José Alcino. Manual sobre a Construção e Instalação do Aquecedor Solar com Descartáveis**. Tubarão – SC. 2004

CEDER - **CENTRO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS**. Disponível em: <http://www.ceder.uta.cl> . Acesso em: 12 de fevereiro de 2015

RINNAI. **Coletor Solar com Tubo a Vácuo - Manual do Usuário**. Disponível em: [www.rinnai.com.br](http://www.rinnai.com.br). Acesso em: 12 de fevereiro de 2014.

CRESESB - **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Slavi Brito**. Disponível em: < <http://www.cresesb.cepel.br/principal.php>> Acesso em: 26 de Dezembro de 2013.

DASOL, **Levantamento econômico dos coletores solares no Brasil em 2013**. Disponível em: <http://www.dasolabrava.org.br/> Acesso em: 04 de janeiro de 2014.

DOMOSOLAR - **AQUECEDORES SOLARES ESFÉRICOS**. Disponível em: <http://domosolar.com/> . Acesso em: 12 de fevereiro de 2015.

DUFFIE, J.A. BECKMAN, W.A. **Solar Engineering of Thermal Processes**, 1ª Ed, New York: John Wiley & Sons, 1980.

EFFICIENZA- Automação e Energia. Disponível em: <<http://www.encia.eng.br/energia-solar.php>> Acesso em: 02 de janeiro de 2014.

ELECTRÓNICA. Disponível em: <http://www.electronicapt.com/index.php/content/view/273/204/> . Acesso em: 03 de Janeiro de 2014

FARIA, Lucas Paglioni Pataro. **Modelagem Matemática e Avaliação Experimental da Não Uniformidade do Escoamento da Água em Coletores Solares**. Dissertação de Mestrado. PUC Minas, 2007

FOX, Robert W. MCDONALD Alan T. PRITCHARD, Philip J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Editora LTC, 6ª Ed. RJ, 2006.

FEDRIGO, Natália Sens, GONÇALVES, Guilherme, LUCAS, Paulo Figueiredo. **Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro**. UFSC. Florianópolis. 2009.

GLOBAL NEVADACORP, 2011. **Global NevadaCorp – Las Vegas Corporate Headquarters**. Disponível em: <http://globalnvcorp.com/divisions/energy/solar> Acessado em: 12 de Fevereiro de 2015.

GREENPEACE. **Mudanças do Clima, Mudanças de Vidas - Como o aquecimento global já afeta o Brasil**. Greenpeace Brasil, 2006.

HALLIDAY, David. RESNICK, Robert. **Fundamentos de Física – Óptica e Física Moderna**. 8ª Edição. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2008

HATASHITA, Luiz Seiti. **Estudo da Viabilidade Técnica, Econômica e Financeira de Aquecedores Solares, para uso Predial em Curitiba (PR)**. UTFPR, Curitiba 2004.

HASAN, A. **Thermosyphon Solar Water Heaters: effect os Storage Tank Volume anda Configuration onde Efficiency**. Energy Conversion anda Management. 1997.

HELIOTEC. Disponível em: <http://www.heliotek.com.br/> Acesso em: 12 de fevereiro de 2015.

INCROPERA, Frank P. **Fundamentos da Transferência de Calor e Massa**. 6ª Edição. Editora LTC, Rio de janeiro, 2008

INCROPERA, Frank P, DEWITT, D.P. **Fundamentos da Transferência de Calor e Massa**. 4ª Edição. Editora LTC, Rio de janeiro, 1998.

JUNIOR, André Luiz Barcelos. **Análise Termoeconômica de Coletores Solares Planos**. PUCPR. Curitiba, 2003.

KALOGIROU, S. A. **Solar energy engineering: processes and systems**. 1ª edição, Academic Press, Elsevier. 2009, EUA.

LAHERRÈRE, Jean. **The Hubbert Curve, its strengths and weaknesses**. Disponível em: <<http://dieoff.org>>. Acesso em: 24 de Dezembro de 2013.

Maciel Walter J. **O Futuro do Sol**. USP. Ciência Hoje das Crianças, Ano 8, No. 46, 1995.

MEC. Ministério da Educação. Disponível em: <<http://www.mec.gov.br/>>  
Acesso em: 04 de Janeiro de 2014.

MME. **Balço Energético Nacional de 2012**. Resultados Preliminares. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme>>. Acesso em: 27 de Dezembro de 2013.

MORAN, Michael J. Shapiro, Howard N. **Princípios da Termodinâmica para Engenharia**. 6ª Edição, Editora LTC, 2008

NORMA BRASILEIRA ABNT 16401 -1. **Instalações de Ar Condicionado – Sistemas Centrais e Unitários**. 2008

PIMENTEL, Fernando. **O Fim da Era do Petróleo e a Mudança do Paradigma Energético Mundial: Perspectivas e Desafios para a Atuação Diplomática Brasileira**. Brasília, 2011.

RBCAS – Rede Brasil de Capacitação Solar. **Noções iniciais sobre o aquecimento solar** 2005. Disponível em: <[www.mesasolar.org.uy](http://www.mesasolar.org.uy)> Acesso em 12 de fevereiro de 2015

RENEWABLE ENERGY. Disponível em: <<http://www.renewableenergyworld.com/>>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2015.

SANTOS, Natanaelyfle Randemberg Gomes. **Projeto, Construção e Análise de Desempenho de Coletores Solares Alternativos Utilizando Garrafas PET**. UFRN, 2007.

SIQUEIRA, Débora Abrahão. **Estudo do Desempenho do Aquecedor Solar de Baixo Custo**. UFU, Uberlândia, 2009.

SOUZA, A.W Albino de. **Fundamentos da Teoria da Energia Solar e seu Uso**. Editora da Fundação de Direito Econômico. Belo Horizonte 1994.

STOECKER, Wilbert F. **Refrigeração e Ar condicionado**. Editora McGraw-HILL. São Paulo, 1985.

TIRADENTES, Átalo Antônio Rodrigues. **Uso da Energia Solar para Geração de Eletricidade e para Aquecimento de Água**. Lavras,2007.

VEIGA, Patrícia Maria Rodrigues. **Análise Técnica e Econômica de um sistema Híbrido (Solar - Eólico) para Geração elétrica em local isolado: uma alternativa à extensão da rede rural**. UTFPR. Curitiba, 2005.

## Apêndice - Unidade Experimental

Um protótipo do sistema de aquecedor solar de Alano (2004) será montado na escola Professora Luiza Ross, localizada na cidade de Curitiba-PR. A escola se localiza a uma altitude em relação ao nível do mar de 934m e possui latitude de  $-25^{\circ} 25' 40''$ .

O sistema será montado de acordo com as recomendações descritas no manual do projetista (Alano, 2004). Deverá ser voltado para o norte, com uma inclinação de no mínimo  $10^{\circ}$  e no máximo  $30^{\circ}$ . Será utilizada inclinação de  $28^{\circ}$ , por se tratar de um valor intermediário entre o valor máximo permitido e a latitude de Curitiba.

A inclinação para evitar a permanência de bolhas também será considerada e o requisito para o funcionamento de sistemas passivos também será atendido: a saída da água quente no coletor ficará no mínimo 30 cm abaixo da caída de água.