

Alan Ricardo Sparemberger

**ANÁLISE NUMÉRICA DE UM RESERVATÓRIO TÉRMICO DE  
DUPLO TANQUE PARA APLICAÇÕES EM ENERGIA SOLAR**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Mecâ-  
nica da Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia Mecânica.  
Orientador: Prof. Sergio Colle, Dr.

Florianópolis  
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Sparemberger, Alan Ricardo  
ANÁLISE NUMÉRICA DE UM RESERVATÓRIO TÉRMICO DE DUPLO  
TANQUE PARA APLICAÇÕES EM ENERGIA SOLAR / Alan Ricardo  
Sparemberger ; orientador, Sergio Colle - Florianópolis,  
SC, 2016.  
115 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação  
Multidisciplinar em Saúde.

Inclui referências

1. Saúde. 2. Energia solar. 3. Reservatórios térmicos.  
4. Sistemas de aquecimento solar de água doméstico. 5.  
Transferência de calor computacional. I. Colle, Sergio.  
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós  
Graduação Multidisciplinar em Saúde. III. Título.

Alan Ricardo Sparenberger

## **ANÁLISE NUMÉRICA DE UM RESERVATÓRIO TÉRMICO DE DUPLO TANQUE PARA APLICAÇÕES EM ENERGIA SOLAR**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 20 de Dezembro de 2016.

---

Prof. Jonny Carlos da Silva, Ph.D.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

---

Prof. Sergio Colle, Dr. – Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

### **Banca Examinadora:**

---

Prof. Sergio Colle, Dr. – Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Marcia Barbosa Henriques Mantelli, Ph.D.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Vicente de Paulo Nicolau, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Samuel Luna de Abreu, Dr. Eng.  
Instituto Federal de Santa Catarina



À memória de minha mãe, Odete de  
Fatima Sparemberger, por ter sido o  
meu maior exemplo de dedicação,  
força e coragem.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que esteve sempre ao meu lado nesta jornada acadêmica. Agradeço de forma especial ao meu irmão Cristian Sparemberger, que além de irmão é meu melhor amigo e sempre esteve por perto em momentos difíceis. Agradeço ao meu pai Ariosto Sparemberger pelo exemplo de caráter e dedicação, sempre será minha referência. Com muita alegria agradeço à minha mãe Odete de Fátima Sparemberger, que faleceu há cinco anos, por ser minha maior fonte de energia e garra para seguir em frente. À toda minha família paterna e materna pela força e apoio, em especial ao meu avô Arnaldo Sparemberger por ser uma liderança na família na busca de conhecimento e crescimento pessoal.

Ao bolsista Sérgio Souza por ter sido meu principal parceiro na produção desta dissertação, além de ser uma pessoa de um intelecto formidável e de uma simplicidade ímpar.

Ao Prof. Dr. Sergio Colle, meu orientador, pelos conselhos e ensinamentos, por ter acreditado em mim e me inspirado com sua convicção e coragem.

À toda família LEPTEN pelo apoio e amizade, em especial ao meu amigo de longa data, Henrique Carminatti, meu colega desde que comecei no laboratório, ao Juliano Oesterich e à Indyanara Bianchet Marcelino que se tornaram meus melhores amigos nesta fase do mestrado. Aos meus amigos e parceiros de mestrado André de Carvalho e Juliana Gonçalves, que tornaram tudo mais leve e tranquilo.

À Rosângela Avi de Sousa pelo alto astral e energia boa, por estar sempre disponível e disposta para conversar e ajudar.

Aos meus amigos da música eletrônica, com quem passei momentos inesquecíveis que abriram novos horizontes na minha vida, em especial ao Vinicius Gomes da Silva e Rafael Henrique de Oliveira, amigos de sintonia indescritível.

Ao bonde da serrinha, meus amigos de longa data da vida universitária, em especial ao meu amigo e parceiro José Antonio Santos Arcanjo, que é um irmão que adotei em minha vida.



“Nenhum homem realmente produtivo  
pensa como se estivesse escrevendo uma  
dissertação.”  
(Albert Einstein)



## RESUMO

A utilização de sistemas de aquecimento solar doméstico vem ganhando cada vez mais espaço no mercado brasileiro. Segundo o Departamento Nacional de Aquecimento Solar a produção nacional de coletores para sistemas de aquecimento solar cresceu 19,8% em 2013, somando mais de 1,38 milhões de metros quadrados instalados. Neste contexto, esse trabalho visa analisar uma nova concepção de reservatórios térmicos para aquecimento solar doméstico, o reservatório de duplo tanque. Essa nova concepção de reservatório térmico consiste na inserção de um reservatório de volume menor dentro de um maior, ambos cilíndricos e horizontais, visando reduzir as perdas térmicas. O reservatório interno é utilizado como *back up*, contando com aquecimento auxiliar. Primeiramente, são adotados alguns parâmetros de sistema, como volume do reservatório interno, volume do reservatório externo e temperatura de consumo, tomando como base trabalhos anteriores realizados. Definidos esses parâmetros, realiza-se a análise do reservatório através de simulação numérica computacional de transferência de calor e do comportamento dinâmico do fluido. O software utilizado para a simulação será o *Ansys Fluent*, já extensivamente validado. Uma análise de malha é conduzida, comprovando a consistência e estabilidade do modelo. Posteriormente, a validação do modelo CFD é realizada, adotando um reservatório similar, porém mantendo as mesmas características do modelo proposto. Tendo otimizado a malha atendendo certa tolerância e tempo computacional, são realizadas simulações para diferentes posições do tanque interno, com condições de contorno com base na análise conduzida pelo estudo. Finalmente, os resultados obtidos são analisados, com foco na influência do posicionamento do tanque interno, estratificação e mistura do fluido.

**Palavras-chaves:** energia solar, reservatórios térmicos, sistemas de aquecimento solar de água doméstico, transferência de calor computacional.



## ABSTRACT

The use of domestic solar heating systems is gaining more attention in the Brazilian market. According to the National Solar Heating Department, domestic production of solar collectors for solar heating systems grew 19.8% in 2013, totalizing over 1.38 million installed square meters. In this context, this study aims to analyze a new design of thermal reservoirs for domestic solar heating, the double tank reservoir. This new thermal reservoir design consists of inserting a smaller volume reservoir within a larger one, both being cylindrical and horizontal, aiming at a reduction of thermal losses and better stratification. The inner tank is used as a back up, containing an auxiliary heating. Firstly, some system settings are adopted, such as volume of the internal tank, the volume of the external tank and the consumption temperature, based on previous works. As these parameters are defined, the reservoir computational analysis of heat transfer and fluid dynamic behavior is carried out. The software used for the simulation is the Ansys Fluent, extensively validated. A mesh analysis is conducted, proving model's consistency and stability. Subsequently, the validation of the CFD model is performed by adopting a similar reservoir while maintaining the same characteristics of the model. Having optimized the model, given certain tolerance and computational time, simulations are performed for different positions of the inner tank, considering boundary conditions based on the analysis conducted by the study. Finally, the results are analyzed, first revealing the influence of the inner tank position in the stratification of the fluid. Thereafter, analysis of the fluid mixing, stratification and heat exchange between the tanks are conducted.

**Keywords:** solar energy, thermal reservoir, solar heating systems for domestic water, heat transfer, CFD.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Sistema de aquecimento solar com reservatório de duplo tanque. .	28
Figura 1.2 – Perfil de consumo doméstico brasileiro por utensílio [2].	30
Figura 1.3 - Sistema de aquecimento solar de água doméstico [5].	31
Figura 3.1 – Representação da resistência térmica da parede de um reservatório térmico.	46
Figura 3.2 – Resistências térmicas equivalentes à parede do reservatório em série.	46
Figura 3.3 – Dimensões do tanque externo em secção longitudinal central com cotas em milímetros.	49
Figura 3.4 – Vista isométrica da secção longitudinal do reservatório térmico de duplo tanque.	51
Figura 3.5 – Vista isométrica da região do tanque externo.	52
Figura 3.6 – Vista isométrica da região do fluido externo.	52
Figura 3.7 – Vista isométrica da região do tanque interno.	53
Figura 3.8 – Vista isométrica da região do fluido interno.	53
Figura 3.9 – Vista isométrica da região da resistência.	54
Figura 3.10 – Vista da malha da secção longitudinal do reservatório térmico de duplo tanque.	55
Figura 3.11 – Vista da malha da secção transversal.	56
Figura 3.12 – Vista da secção longitudinal da malha de uma das regiões de entrada/saída de fluido.	57
Figura 3.13 – Vista da secção longitudinal da malha de regiões de entrada/saída de fluido e da resistência elétrica.	57
Figura 3.14 – Vista da secção longitudinal do reservatório com indicações das condições de contorno.	59
Figura 4.1 – Imagens gráficas da diferença absoluta dos valores de temperatura das malhas 1 e 2 para o instante inicial de tempo de 0 segundos.	65
Figura 4.2 – Imagens gráficas da diferença absoluta dos valores de temperatura das malhas 1 e 2 para o tempo de 9,92 segundos.	66
Figura 4.3 – Imagens gráficas da diferença absoluta dos valores de temperatura das malhas 1 e 2 para o tempo de 190,4 segundos.	68
Figura 4.4 – Imagens gráficas da diferença absoluta dos valores de temperatura das malhas 1 e 2 para o tempo de 700,35 segundos.	69
Figura 4.5 – Imagens gráficas da diferença absoluta dos valores de temperatura das malhas 1 e 2 em vista de perfil para o tempo de 510,5 segundos	71
Figura 4.6 – Imagens gráficas da diferença absoluta dos valores de temperatura das malhas 2 e 3 para o tempo de 732 segundos.	72
Figura 4.7 – Imagens gráficas da diferença absoluta dos valores de temperatura das malhas 3 e 4 para o tempo de 10 segundos.	74
Figura 4.8 – Imagens gráficas da diferença absoluta dos valores de temperatura das malhas 3 e 4 para o tempo de 202,45 segundos.	75
Figura 4.9 – Imagens gráficas da diferença absoluta dos valores de temperatura das malhas 3 e 4 para o tempo de 722,3 segundos.	76

Figura 4.10 – Estabilidade dos resíduos das equações da continuidade, velocidades nos eixos x,y,z e energia. ....	78
Figura 4.11 – Imagem gráfica com vista do reservatório de perfil do campo de temperatura nos planos da secção longitudinal e planos perpendiculares no tempo de 5 segundos. ....	81
Figura 4.12 – Imagem gráfica com vista do campo de velocidade de uma das regiões de entra/saída de fluido no tempo de 5 segundos. ....	82
Figura 4.13 – Imagem gráfica com vista do reservatório de perfil do campo de temperatura nos planos da secção longitudinal e planos perpendiculares no tempo de 10 segundos. ....	83
Figura 4.14 – Imagem gráfica com vista do reservatório de perfil do campo de temperatura nos planos da secção longitudinal e planos perpendiculares no tempo de 15 segundos. ....	84
Figura 4.15 – Imagem gráfica do campo de velocidade de uma das regiões de entra/saída de fluido no tempo de 15 segundos. ....	85
Figura 4.16 – Imagem gráfica com vista de perfil do campo de velocidade do fluido interno no tempo de 15 segundos. ....	86
Figura 4.17 – Imagem gráfica com vista do reservatório de perfil do campo de temperatura nos planos da secção longitudinal e planos perpendiculares no tempo de 30 segundos. ....	88
Figura 4.18 – Imagem gráfica com vista de perfil do campo de velocidade do fluido interno no tempo de 30 segundos. ....	89
Figura 4.19 – Imagem gráfica com vista de perfil do campo de velocidade do fluido externo no tempo de 30 segundos. ....	90
Figura 5.1 – Vista isométrica do reservatório de tanque simples seccionado longitudinalmente. ....	92
Figura 5.2 – Vista do plano de secção central longitudinal da malha inicial do tanque simples. ....	92
Figura 5.3 – Curvas de estratificação das simulações do modelo k-ε e experimental em 4 minutos. ....	94
Figura 5.4 – Curvas de estratificação das simulações do modelo k-ε e experimental em 16 minutos. ....	94
Figura 5.5 – Curvas de estratificação das simulações do modelo k-ε e experimental em 28 minutos. ....	95
Figura 5.6 – Curvas de estratificação das simulações do modelo laminar e experimental em 12 minutos. ....	95
Figura 5.7 – Curvas de estratificação das simulações do modelo laminar e experimental em 12 minutos. ....	96
Figura 5.8 – Curvas de estratificação das simulações do modelo laminar e experimental em 28 minutos. ....	97
Figura 5.9 – Curvas de estratificação das simulações do modelo laminar e experimental com refinamento de malha em 16 minutos. ....	98
Figura 5.10 – Curvas de estratificação das simulações do modelo laminar e experimental com refinamento de malha em 28 minutos. ....	99
Figura 6.1 – Reservatório com tanque interno na posição superior. ....	101

Figura 6.2 – Reservatório com tanque interno na posição inferior. ....	102
Figura 6.3 – Estratificação do tanque externo para o tanque interior na posição inferior. ....	103
Figura 6.4 – Estratificação do tanque externo para o tanque interior na posição central. ....	104
Figura 6.5 – Estratificação do tanque externo para o tanque interior na posição superior. ....	104
Figura 6.6 – Estratificação do tanque externo no tempo de 6000 segundos para as 3 posições do tanque interno. ....	105
Figura 6.7 – Número de MIX para as três posições do tanque interno. ....	107
Figura 6.8 – Número de MIX do reservatório de duplo tanque na posição central e do reservatório de tanque simples ....	108



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Propriedades dos materiais.....	48
Tabela 3.2 - Parâmetro do sistema.....	49
Tabela 3.3 – Valores das condições de contorno. ....	60
Tabela 4.1 - Número de nós e elementos das malhas.....	63
Tabela 4.2 – Valores das condições de contorno utilizadas na análise de malha. .....	64
Tabela 4.3 – Condições de contorno para a simulação de limites teóricos. ....	79
Tabela 5.1 - Malhas analisadas.....	98
Tabela 6.1 – Condições de contorno da análise da posição do tanque interno.	102



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

<b>CAD</b>	Desenho assistido por computador
<b>CFD</b>	Dinâmica dos Fluidos Computacional
<b>IEA-SHC</b>	Agência Internacional de Energia – Programa de Aquecimento e Resfriamento Solar
<b>LABSOLAR</b>	Laboratório de Energia Solar
<b>LEPTEN</b>	Laboratórios de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia
<b>SASAD</b>	Sistemas de Aquecimento Solar de Água Doméstico



## LISTA DE SÍMBOLOS

### Alfabeto latino:

$c_p$	[J/kgK]	Calor específico
$e$	[J/kg]	Energia específica
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Aceleração gravitacional
$k$	[W/mK]	Condutividade térmica
$t$	[s]	Tempo
$u$	[m/s]	Velocidade no eixo x
$v$	[m/s]	Velocidade no eixo y
$w$	[m/s]	Velocidade no eixo z
$B$	[N]	Força de campo
$\mathbf{V}$	[m/s]	Vetor velocidade
$P$	[Pa]	Pressão
$T$	[K]	Temperatura
$M$	[Jm]	Momento de energia
$W$	[J]	Trabalho

### Alfabeto grego:

$\beta$	[1/K]	Coefficiente de expansão térmica
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Densidade de massa
$\tau$	[Pa]	Tensor tensão
$\mu$	[kg/ms]	Viscosidade
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	Viscosidade cinemática



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>27</b>
<b>1.1</b>	<b>Concepção do reservatório térmico de duplo tanque</b> .....	<b>27</b>
1.1.2	Reservatórios térmicos .....	28
1.1.3	Sistema inteligente e a problemática do pico de demanda ..	29
1.1.4	Sistemas de aquecimento solar de água doméstico .....	31
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>32</b>
1.2.1	Objetivos específicos.....	32
<b>1.3</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>33</b>
<b>1.4</b>	<b>Conceitos de CFD</b> .....	<b>34</b>
1.4.2	Modelo de turbulência k- $\epsilon$ .....	36
1.4.3	Aproximação de Boussinesq .....	36
1.4.4	Aquecimento auxiliar .....	37
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>39</b>
<b>2.1</b>	<b>Trabalhos relativos a reservatórios de duplo tanque</b> .....	<b>39</b>
<b>2.2</b>	<b>Trabalhos relativos a reservatórios de tanque simples</b> ..	<b>41</b>
<b>2.3</b>	<b>Trabalhos complementares</b> .....	<b>44</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>45</b>
<b>3.1</b>	<b>Considerações sobre a modelagem do reservatório</b> .....	<b>45</b>
3.1.1	Resistências térmicas das paredes do reservatório .....	45
3.1.2	Propriedades dos materiais .....	47
<b>3.2</b>	<b>Modelagem do reservatório</b> .....	<b>48</b>
3.2.1	Dimensionamento .....	48
3.2.2	Modelagem em CAD .....	49
3.2.3	Malha .....	54
3.2.4	Condições de contorno .....	58
3.2.5	<i>Fluent</i> CFD.....	61
3.2.6	Processamento de resultados .....	62
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DE MALHA, CONSISTÊNCIA E ESTABILIDADE</b> .....	<b>63</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise de malha</b> .....	<b>63</b>
<b>4.2</b>	<b>Consistência e estabilidade</b> .....	<b>77</b>
<b>4.3</b>	<b>Limites teóricos</b> .....	<b>79</b>
<b>5</b>	<b>VALIDAÇÃO DO MODELO</b> .....	<b>91</b>
<b>5.1</b>	<b>Modelo do reservatório</b> .....	<b>91</b>
<b>5.2</b>	<b>Estratificação</b> .....	<b>93</b>
5.2.1	Análise de modelo e parâmetros .....	93
<b>5.3</b>	<b>Refinamento de malha e validação</b> .....	<b>97</b>
<b>6</b>	<b>ANÁLISE DA POSIÇÃO DO TANQUE INTERNO</b> ...	<b>101</b>
<b>6.2</b>	<b>Estratificação</b> .....	<b>102</b>

<b>6.3</b>	<b>MIX .....</b>	<b>105</b>
<b>6.4</b>	<b>Comparação com um reservatório de tanque simples..</b>	<b>108</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS</b>	
	<b>FUTUROS .....</b>	<b>109</b>
<b>7.1</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>110</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>111</b>
	<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>115</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Concepção do reservatório térmico de duplo tanque

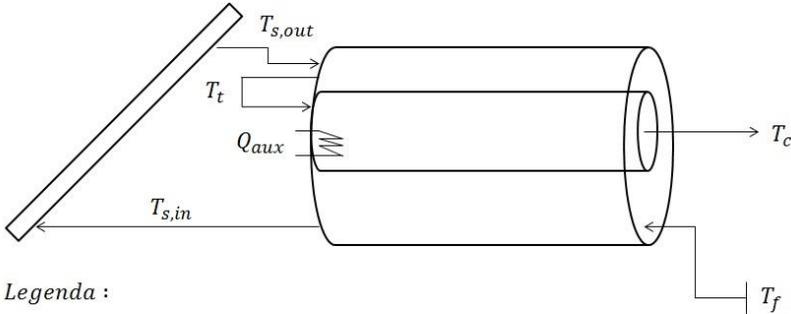
A utilização de sistemas de aquecimento solar de água doméstico vem ganhando cada vez maior espaço no mercado brasileiro. Segundo dados do Departamento Nacional de Aquecimento Solar [1], a produção nacional de coletores para sistemas de aquecimento solar cresceu 19,8% em 2013, somando mais de 1,38 milhões de metros quadrados instalados.

Devido ao recente aumento das tarifas de energia elétrica e à grande oferta de coletores, esses sistemas ganham mais atenção dos consumidores interessados em economia de energia.

Para que os sistemas de aquecimento solar doméstico sejam atrativos e economicamente viáveis, estes necessitam apresentar uma economia de energia que compense o investimento da aquisição e manutenção. Logo, otimizar e aumentar a eficiência dos componentes desse sistema é de extrema importância.

Neste contexto, esse trabalho visa analisar uma nova concepção de reservatórios térmicos para aquecimento solar doméstico, o reservatório de duplo tanque. Essa concepção consiste na inserção de um reservatório de volume menor dentro de um de maior volume, ambos cilíndricos e horizontais, visando redução das perdas térmicas, melhora na eficiência e compactação do sistema. A Figura 1.1 ilustra a concepção de um sistema de aquecimento doméstico utilizando o reservatório de duplo tanque.

O sistema mostrado na Figura 1.1 ilustra o circuito do escoamento da água dentro do sistema de reservatório de duplo tanque. Primeiramente, a água em temperatura de fornecimento, ou seja, da rede de abastecimento, carrega o tanque externo pela parte inferior. Da parte inferior, o tanque é descarregado, fornecendo água para o coletor solar, o qual aquece a água e abastece o tanque externo em sua parte superior. Da parte superior do tanque, a água segue em direção ao volume auxiliar interno, provido de um sistema de aquecimento auxiliar, destinado a função do aquecimento da água até a temperatura de consumo. Por fim, do tanque auxiliar, a água segue para a tubulação de consumo.



Legenda :

$T_{s,out}$ : Temperatura coletor saída	$T_f$ : Temperatura de fornecimento
$T_{s,in}$ : Temperatura coletor entrada	$T_c$ : Temperatura de consumo
$T_t$ : Temperatura do tanque	$Q_{aux}$ : Aquecimento auxiliar

Figura 1.1 - Sistema de aquecimento solar com reservatório de duplo tanque.

A dinâmica do fluido nesse sistema depende do perfil de consumo, uma vez que o aquecimento auxiliar é ativado somente quando a temperatura do tanque interno estiver abaixo da temperatura de consumo.

A diferença de temperatura em relação à altura dentro dos tanques é denominada estratificação, fenômeno que acontece devido à diferença de densidade do fluido. Esse mecanismo físico é de importância para a aplicabilidade desse tipo de reservatório, pois o fluido menos denso e com maior temperatura, por convecção natural, desloca-se para o topo do tanque. Por conseguinte, o volume interno encontra-se em contato com fluido de maior temperatura, reduzindo o gradiente de temperatura nessa área, gerando uma redução das perdas térmicas do tanque interno.

### 1.1.2 Reservatórios térmicos

A disponibilidade de energia solar é uma variável dependente da modulação da radiação pelo efeito do clima, não sendo, portanto, uma função conhecida. Por conseguinte, quantificar a energia radiativa que um sistema de energia solar pode aproveitar não é uma tarefa simples. Por outro lado, tem-se a demanda da energia gerada pelo sistema. O consumidor, que representa a demanda, não utiliza necessariamente a energia no momento que ela está sendo gerada, criando uma discordância entre a oferta e demanda.

Tendo em vista a variabilidade da oferta de energia solar e sua desconexão com a demanda, o armazenamento de energia se faz necessário.

Portanto, armazenar a energia gerada em um sistema solar térmico é necessário para o funcionamento de tal sistema. Desta forma surgiram os reservatórios térmicos, que neste trabalho é abordado através de um reservatório de água aquecida por coletores solares.

Considerando a necessidade dos reservatórios térmicos, surgem questões importantes para seu desenvolvimento, tais como suas características construtivas, capacidade, materiais constituintes, forma física dentre outras. É igualmente importante considerar em um projeto de reservatório térmico suas limitações, tais como viabilidade construtiva, econômica e limitações espaciais. Cabe ainda citar, que mesmo obtendo todas essas informações, torna-se necessário analisar o grau de confiabilidade delas.

O presente trabalho não tem por objetivo abordar todos aspectos técnicos do projeto de um reservatório térmico. Para delimitar o escopo deste trabalho, o autor vai admitir algumas condições simplificadas de oferta de energia do sistema, assim também como de consumo. As características dimensionais e construtivas, como altura, diâmetro, espessuras de isolamento térmico, e demais dimensões do reservatório apresentadas são simplificadas, ressaltando o foco em um estudo inicial da influência do posicionamento do tanque interno na troca de calor e estratificação do reservatório.

### 1.1.3 Sistema inteligente e a problemática do pico de demanda

Este trabalho se insere dentro de um conjunto de esforços realizados pelo Laboratório de Energia Solar, LEPTEN/LABSOLAR, no intuito de desenvolver um sistema de aquecimento de água doméstico inteligente, com o objetivo de atenuar o pico de demanda de energia gerado pelo uso intenso de chuveiro elétrico no Brasil. Nesse contexto, é necessário analisar o consumo de energia doméstico brasileiro. A Figura 1.2 ilustra a distribuição da utilização de energia elétrica doméstica por usuário, tomando a média do ano de 2005 no Brasil, não se encontra disponível uma referência mais recente sobre essa distribuição, porém, infere-se que pela pouca mudança observada dos hábitos em relação a utilização de energia elétrica no ambiente doméstico brasileiro, os valores não sofreram grandes alterações.

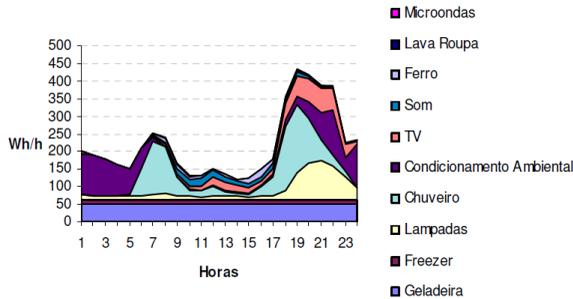


Figura 1.2 – Perfil de consumo doméstico brasileiro por utensílio [2].

Pode ser visto, na Figura 1.2, que o chuveiro elétrico é o principal responsável pelos dois picos de consumos de energia elétrica, além de representar 24% da demanda de energia, conforme [2]. Entretanto, o que mais prejudica a rede de distribuição e o sistema elétrico é o fato dos chuveiros serem energeticamente pouco eficientes [3].

Tendo em vista o problema do pico de demanda de energia elétrica, recentemente, dois trabalhos se destacam dentro do conjunto de pesquisas realizadas pelo LEPTEN. Primeiramente o estudo realizado por Koller [4], contando com a utilização de dados de previsão do tempo em controladores integrados a sistemas de aquecimento solar de água doméstico, SASAD.

O estudo realizado por Koller [4] teve por objetivo reduzir o pico de demanda de consumo mencionado. Nesse estudo se propõe o sistema de aquecimento solar doméstico com controle de aquecimento auxiliar inteligente, o qual, através de informações de previsão do tempo, desloca a utilização da energia auxiliar elétrica do sistema, para fora dos períodos de pico, utilizando a energia elétrica em horários onde a tarifa possui um menor custo e menor carga de utilização da rede elétrica. Os resultados desse trabalho são animadores, à medida que as simulações computacionais nos mostram um deslocamento de praticamente 100% do uso de energia elétrica para banho, desta forma possibilitando a redução total do pico de demanda de energia elétrica.

Posteriormente, o estudo desenvolvido por Carminatti [5], deu continuidade ao trabalho de Koller. O modelo computacional foi revisado, os resultados obtidos foram verificados e foi adicionada uma análise dos efeitos de erro na previsão meteorológica utilizada na atenuação do pico de demanda de energia elétrica.

O trabalho de Carminatti demonstra a eliminação do pico de demanda, além de uma fração solar, (razão entre a energia solar e a energia total utilizada pelo sistema) de 87% para o caso ideal, em relação ao caso onde não se considera erros de previsão. Para o caso de maior incerteza da radiação, onde se considere 50% a menos da radiação solar incidente real, a fração solar resultou em 75%.

Esses resultados indicam que a utilização de previsão meteorológica, visando a atenuação do pico de demanda, mesmo para o caso de maior erro de previsão da radiação solar disponível contribuem consideravelmente à redução do pico de demanda de energia elétrica, além de apresentar um bom rendimento do sistema em termos de fração solar. Os esforços do autor, presentemente concentram-se na validação experimental dos resultados, sendo que uma bancada de experimento se encontra em teste nas dependências do LEPTEN.

#### 1.1.4 Sistemas de aquecimento solar de água doméstico

Os sistemas de aquecimento solar de água doméstico (SASAD) são geralmente constituídos de coletor solar, reservatório térmico, bomba de água, se for ativo, válvulas, tubulações para escoamento de água da rede e entre os componentes, isolamentos térmicos e controladores. O SASAD abordado ao longo do capítulo e seus componentes, podem ser visualizados na Figura 1.3. Esse sistema se diferencia dos demais por possuir um reservatório de água quente ligado a um controlador e uma resistência elétrica, responsável pelo acionamento da energia auxiliar.

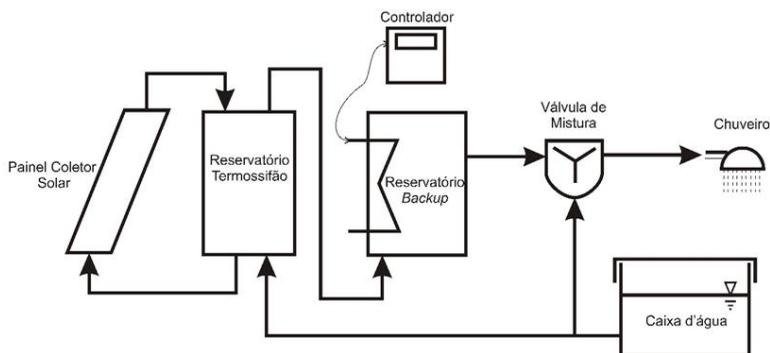


Figura 1.3 - Sistema de aquecimento solar de água doméstico [5].

## 1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é analisar o comportamento térmico e fluidodinâmico do reservatório térmico de duplo tanque, submetido a condições similares às encontradas em sistemas de aquecimento solar de água doméstico.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Dimensionar o reservatório em CAD e desenvolver um modelo do reservatório.
- Implementar a malha e definir os parâmetros de simulação.
- Analisar a malha, a consistência e a estabilidade do modelo.
- Validar um modelo simplificado justificado na bibliografia pertinente.
- Analisar resultados de simulações do reservatório de duplo tanque.
- Analisar resultados de simulações para diferentes posições do tanque interno.

### 1.3 Justificativa

Tendo em vista a problemática do pico de demanda de energia elétrica apresentada na seção 1.1.3, procurou-se realizar esforços na otimização dos sistemas de aquecimento solar de água doméstico. Nesse contexto foram realizados trabalhos em [4] e [5] visando tornar tais sistemas inteligentes, ou seja, o controle do sistema foi otimizado com o uso de informações estratégicas.

Além de um sistema inteligente para minimizar o pico de demanda de energia elétrica, é necessário que esse sistema seja de baixo custo, compacto e de fácil instalação, visto que sua aplicação é destinada para larga escala, portanto, em sua maioria é destinado para a populações de baixa renda.

No que tange a reservatórios térmicos, o laboratório desenvolveu estudos onde se aborda a otimização do volume do reservatório e espessura do isolamento térmico, assim como determinação de coeficiente de perdas. Esses estudos já estão incorporados nas formulações de [4] e [5], portanto os conhecimentos gerados já estão sendo utilizados neste trabalho. No entanto, esses estudos são destinados à reservatórios de tanques simples, como encontrado em aplicações de aquecimento solar nacionais. Portanto, o desenvolvimento de uma nova concepção de reservatório, pode ser visto como uma contribuição para o desenvolvimento de sistemas de aquecimento solar de água doméstico. Dentro desse contexto, esse trabalho se constitui em uma análise preliminar da concepção do reservatório térmico de duplo tanque.

## 1.4 Conceitos de CFD

A análise em CFD consiste em um modelo matemático solucionado por um método numérico através de cálculos computacionais, o qual deve representar com boa precisão o fenômeno físico da dinâmica do fluido e transferência de calor. Tendo em vista que o interesse deste trabalho é encontrar os campos de temperatura e analisar o escoamento do fluido no reservatório térmico, é necessário um modelo matemático que atenda às necessidades da análise requerida.

O modelo matemático utilizado consiste em um conjunto de equações cuja resolução apresente a solução do problema. Esse modelo, no caso de um escoamento de fluido sujeito à transferência de calor, tem sua solução conhecida pela utilização da conservação da massa, quantidade de movimento e energia.

O método escolhido para a solução do problema em questão é o método dos volumes finitos. A escolha deste método deve-se ao fato ser um método conservativo, ou seja, as propriedades físicas de interesse são conservadas em nível elementar.

A utilização de tal método se faz necessária, devido à complexidade do problema em questão, essencialmente, por apresentar geração de calor, advecção e difusão, além de advecção gerada por efeitos de empuxo fortemente presentes no problema.

Visando um bom entendimento das equações da conservação e de seu sentido físico na solução do problema em questão é necessário primeiramente pensar em um volume de controle, no qual tem-se interesse de conhecer os valores das variáveis envolvidas, no caso o campo de velocidade e temperatura. O volume de controle do problema abrange todo reservatório, sendo composto das regiões de fluido e regiões sólidas. Para cada região, volumes discretos elementares são definidos a partir da malha, cada um desses elementos passa por um balanço de massa, quantidade de movimento e energia, respeitando o conjunto das seguintes equações.

Equação da conservação da massa,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u_R) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_R) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w_R) = 0, \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V}) = 0. \quad (1.2)$$

Equações da conservação da quantidade de movimento para as coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$ , conhecidas por equações de Navier-Stokes,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u_R \cdot u) + \frac{\partial y}{\partial y}(\rho v_R \cdot u) + \\ \frac{\partial y}{\partial z}(\rho w_R \cdot u) = \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{xx}) + \frac{\partial y}{\partial y}(\tau_{yx}) + \\ \frac{\partial y}{\partial z}(\tau_{zx}) + B_x, \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u_R \cdot v) + \frac{\partial y}{\partial y}(\rho v_R \cdot v) + \\ \frac{\partial y}{\partial z}(\rho w_R \cdot v) = \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{xy}) + \frac{\partial y}{\partial y}(\tau_{yy}) + \\ \frac{\partial y}{\partial z}(\tau_{zy}) + B_y, \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u_R \cdot w) + \frac{\partial y}{\partial y}(\rho v_R \cdot w) + \\ \frac{\partial y}{\partial z}(\rho w_R \cdot w) = \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{xz}) + \frac{\partial y}{\partial y}(\tau_{yz}) + \\ \frac{\partial y}{\partial z}(\tau_{zz}) + B_z, \end{aligned} \quad (1.5)$$

onde para fluidos newtonianos,

$$\tau_{xx} = -P + \mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \mathbf{V} \right), \quad (1.6)$$

$$\tau_{yy} = -P + \mu \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \mathbf{V} \right), \quad (1.7)$$

$$\tau_{zz} = -P + \mu \left( \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \mathbf{V} \right), \quad (1.8)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad (1.9)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right), \quad (1.10)$$

$$\tau_{zy} = \tau_{yz} = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right). \quad (1.11)$$

Equação da conservação da energia,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u_R e) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_R e) + \\ \frac{\partial}{\partial y}(\rho w_R e) = \frac{\dot{Q}_{entra} - \dot{W}_{sai}}{dV}, \end{aligned} \quad (1.12)$$

onde,

$$i = e - \frac{|V|^2}{2}. \quad (1.13)$$

#### 1.4.2 Modelo de turbulência k-ε

O modelo k-ε é comumente utilizado na modelagem de escoamentos turbulentos, ele será analisado ao longo deste trabalho visando representar casos em que haja uma maior mistura de fluido quente e frio. Esse modelo se caracteriza pela inserção de mais duas variáveis, consequentemente mais duas equações, que representam a energia cinética turbulenta e a dissipação viscosa de energia.

No entanto ele só será utilizado se validado contra dados de referências. Sua inserção neste trabalho se deve ao fato do trabalho de Shah et al [7] questionar o amplo uso do modelo de viscosidade laminar nos trabalhos de análise de reservatórios térmicos, além de seus estudos apontarem discrepâncias entre os modelos CFD aplicados com regime laminar e os resultados experimentais, principalmente em regiões de carga e descarga de fluido.

O modelo k-ε, apesar de largamente utilizado, não é adequado para casos onde há gradientes muito elevados de pressão do escoamento. Entretanto, para baixos gradientes e velocidades como esperados no reservatório considerado, é esperado que sua utilização seja adequada.

#### 1.4.3 Aproximação de Boussinesq

Parte do movimento do fluido no sistema é induzido pela força de empuxo, este fenômeno é decorrente da variação da densidade do fluido

com a temperatura. Para simplificar a solução das equações referentes ao problema em questão, pode-se considerar a densidade constante em todos os termos das equações, exceto no termo de empuxo da conservação da quantidade de movimento, onde a aproximação de Boussinesq é utilizada. A aproximação para a densidade é dada pela seguinte equação,

$$\rho = \rho_0(1 - \beta\Delta T). \quad (1.14)$$

Para realizar tal simplificação, considera-se uma densidade de referência  $\rho_0$  constante, temperatura de referência  $T_0$  e coeficiente de expansão térmica  $\beta$  referente ao fluido na temperatura de operação. Desta forma, o termo de empuxo pode ser representado da seguinte forma,

$$(\rho - \rho_0)g = -\rho_0\beta(T - T_0)g. \quad (1.15)$$

No entanto, a aproximação de Boussinesq só é válida para pequenas variações de temperatura, especificamente quando  $\beta(T - T_0) \ll 1$ .

#### 1.4.4 Aquecimento auxiliar

O sistema de aquecimento solar de água doméstico estudado é dotado de aquecimento auxiliar, que fornece a energia necessária para entregar o fluido para consumo na temperatura desejada, como explicado detalhadamente no capítulo introdutório. Tal aquecimento é normalmente realizado por efeito Joule em uma resistência elétrica. A modelagem da resistência é detalhada no capítulo 3. O valor da potência de geração  $\dot{Q}$ , foi definido baseado nos trabalhos de referência [4] e [5] e será apresentado nas condições de contorno de cada respectiva simulação.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Trabalhos relativos a reservatórios de duplo tanque

Os trabalhos revisados, que consideram a inserção de um tanque de menor volume ou tanque de *backup* ao tanque externo, diferenciam-se do sistema proposto por não apresentar mistura entre os fluidos dos circuitos do coletor solar e do reservatório. Esses sistemas apresentam troca indireta de calor através de trocadores de calor, com circuitos separados de aquecimento solar, aquecimento de água doméstico e aquecimento de ambientes. Porém, apesar da concepção de circuitos fechados, as trocas de calor externas ao reservatório, como as perdas para o ambiente externo, assim como a dinâmica de troca de calor interna entre os dois tanques se assemelham ao sistema proposto. Por conseguinte, esses trabalhos servirão de referência, porém os resultados apresentados não podem ser utilizados para comparação direta devido às diferenças de concepção com o reservatório proposto neste trabalho.

Lundh *et al.* [8] realizou uma análise da fração de economia de energia de um sistema solar combinado, ou seja, direcionado à aquecimento de ambientes e aquecimento de água doméstico. Este trabalho compara a influência do volume auxiliar para aquecimento de água doméstica para os casos interno ou externo ao reservatório, assim como a influência da geometria dos reservatórios. Para tal comparação, esse estudo utiliza simulações anuais do sistema em ambiente do *software* TRNSYS [9]. A partir das simulações, as frações de economia de energia são calculadas em relação a um sistema de referência ideal. A configuração do sistema combinado, para fins de padronização, é o sistema sugerido pelo IEA-SHC [10].

Os resultados mostram uma maior fração de economia de energia para volumes auxiliares internos ao reservatório, possivelmente devido ao fato de que o sistema de duplo tanque concebido apresentar menores perdas térmicas.

H. Druck, E. Hahne [11] analisaram três diferentes reservatórios de aquecimento combinado, destinados à aquecimento de ambientes e de água para consumo doméstico. Os três reservatórios apresentam o tanque menor, para aquecimento doméstico, posicionado internamente ao reservatório.

Para determinação de parâmetros dos reservatórios é utilizado o método descrito pela série de normas europeias prEN 12977-3 [12]. Esses parâmetros juntamente com o modelo numérico [13] são utilizados para descrever o comportamento térmico dinâmico dos reservatórios.

Para realizar uma análise comparativa entre os reservatórios é necessário selecionar alguns parâmetros, alguns deles podem ser diretamente comparados, como, por exemplo, a taxa de perda de calor. Outros parâmetros não podem ser comparados de maneira direta, como exemplo as posições de conexão de carga e descarga e as posições dos sensores de temperatura. Isso se deve ao fato de que certas características dos reservatórios não podem ser traduzidas em parâmetros específicos.

A comparação entre os casos é realizada com base na fração de economia de energia e da análise dos perfis de temperatura da descarga do tanque. Para tal análise o tanque é carregado à temperatura de 60° C até a temperatura de saída da base exceder 55° C e descarregado via o circuito de aquecimento doméstico com vazão de 600 l/h à temperatura de 20° C até a temperatura de saída do circuito de água doméstico atingir a temperatura de 30° C. Esses perfis de temperatura permitem que se investigue a estratificação e o comportamento térmico do reservatório, possibilitando uma comparação direta entre os reservatórios.

Algumas conclusões gerais desse trabalho nos indicam que reservatórios com bom desempenho térmico apresentam as seguintes características:

- Poucas perdas térmicas devido a um bom isolamento térmico.
- Volume auxiliar menor possível.
- Temperatura definida para consumo doméstico menor possível.
- Alta taxa de troca de calor nos trocadores de calor do aquecimento auxiliar e igualmente no de aquecimento solar.
- Boa estratificação do tanque, utilizando geometria adequada e estratificadores se possível.

Knudsen [14] realiza uma investigação teórica do comportamento térmico do fluido em um reservatório de duplo tanque combinado para aquecimento de ambiente e água doméstico. Para tal investigação, é utilizado um *software* CFD adotando uma série de simplificações, tais como modelo de viscosidade laminar, aproximação de Boussinesq e temperatura do tanque interno fixa.

Neste trabalho é analisado o comportamento do fluido próximo às áreas de carga e descarga do reservatório, assim como a estratificação no reservatório, para condições diferentes de operação, como vazão e temperaturas. Os resultados desse trabalho, como gradientes de temperatura e velocidade encontrados, possibilitam o cálculo dos coeficientes de troca de calor convectiva interna e externa do tanque de aquecimento de ambiente. Estes coeficientes podem ser utilizados para desenvolver modelos simplificados de reservatórios para simulações de base anual de um sistema de aquecimento solar de água doméstico e de ambientes.

## 2.2 Trabalhos relativos a reservatórios de tanque simples

A bibliografia referente a reservatórios térmicos de tanque simples, será utilizada para a validação do modelo utilizado nas simulações deste trabalho. Como a bibliografia levantada sobre o reservatório de duplo tanque não apresenta resultados numéricos e experimentais que possam ser utilizados para validar o modelo proposto neste trabalho, principalmente por não apresentar configuração dos tanques posicionados horizontalmente, opta-se pelo uso da bibliografia de reservatório de tanque simples. Por conseguinte, extrapola-se a validação para o reservatório de duplo tanque, porquanto, as mesmas características do modelo são mantidas.

Em S. Levers, W. Lin [15] utiliza-se simulações CFD em três dimensões, para realizar a análise da influência de diferentes parâmetros na estratificação em um reservatório térmico cilíndrico e vertical. Esses parâmetros são a razão de aspecto geométrico, vazões mássicas, posicionamento de injeção de carga e descarga.

Os resultados mostraram que o aumento da razão de aspecto, altura sobre diâmetro, apresenta maior nível de estratificação do tanque, porém seu aumento imoderado apresenta limitações construtivas e espaciais. No que tange as vazões utilizadas, é notável que seu aumento propicia maior mistura no tanque, conseqüentemente reduzindo a estratificação. Quanto ao posicionamento de injeção de carga e descarga, quanto maior a proximidade com a parte inferior e superior do tanque maior a estratificação deste.

M. Arslan, A. A. Igci [16] realizam um estudo numérico, do comportamento em regime transiente, de um reservatório térmico que utiliza uma manta térmica como trocador de calor durante carga e descarga. A manta térmica funciona como um trocador de calor do circuito dos coletores solares, sendo que os circuitos do trocador e do fluido do reservatório são separados. O posicionamento do tanque é vertical e a manta circunda a parte inferior do reservatório.

Os resultados ressaltam que para uma maior eficiência do sistema a diferença de temperatura entre a entrada e saída do circuito do coletor tem de ser maximizada, e também que a vazão de carga do reservatório depois de um certo limite diminui a estratificação do tanque, conseqüentemente diminuindo sua eficiência.

Shahab Alizadeh [17] aborda a análise experimental e numérica de um reservatório térmico horizontal. O principal aspecto estudado é a estabilidade da estratificação devido a carga e descarga do reservatório, sendo que o circuito do coletor é desconsiderado.

Por se tratar de um dos poucos estudos encontrados na bibliografia com o reservatório posicionado na horizontal, os resultados experimentais deste estudo serão utilizados para validar o modelo de tanque simples, desenvolvido neste trabalho.

Os resultados mostraram que uma melhor estratificação do tanque é obtida quando a temperatura inicial da parte inferior do tanque é maior que a temperatura de carga, ou seja, da rede de abastecimento. Igualmente o uso de bicos na parte de injeção melhora a estratificação do tanque. Também pode ser visto que os resultados numéricos obtidos se aproximaram dos resultados experimentais, sobretudo mostrando o comportamento isotérmico horizontal da estratificação do tanque.

Deve-se ressaltar o fato de que uma das análises realizadas com os parâmetros de trabalho nos mostra que a perda térmica do tanque para o ambiente equivale apenas a 1,4% da energia inicial do tanque e por consequência esta pode ser desconsiderada.

Nizami *et al.* [18] realizou um estudo desenvolvendo um modelo unidimensional para prever a distribuição de temperatura transiente axial no fluido interno de um reservatório térmico sujeito a injeção de fluido de fluxo vertical. O reservatório consiste de um tanque vertical. O modelo é validado a partir de dados experimentais e de um modelo CFD 2D. É realizada uma análise da natureza física das “plumas” de empuxo e a mistura nas proximidades região de entrada do fluido é modelada. Uma análise paramétrica da dependência do número de Reynolds ( $Re$ ) e do número de Richardson ( $Ri$ ) é apresentada. A validação numérica para o modelo CFD requer dados experimentais reportados em artigos relatados. Já a validação do modelo numérico unidimensional tem como base ambos os dados experimentais e de modelos em CFD. Complementando o estudo, é realizada uma análise da dependência da malha e passo de tempo do regime transiente.

Os resultados desse trabalho mostram que o modelo unidimensional é capaz de prever corretamente as temperaturas no tanque com esforço computacional reduzido em duas ordens de grandeza. No que tange aos números adimensionais, nota-se uma fraca dependência com o número de Reynolds, porém uma forte dependência do número de Richardson e o diâmetro do bico de entrada do fluido, na mistura do fluido nas proximidades das áreas de entrada deste.

L. J. Shah, S. Furbo [7] realizaram um estudo que consiste na análise dos efeitos da injeção de fluido no reservatório térmico, ou seja, na sua carga/entrada. Focando no impacto do projeto da região de entrada do tanque nos padrões de escoamento e na estratificação do tanque.

Três diferentes concepções de entrada foram testadas numericamente em CFD e experimentalmente, com intuito de analisar a preservação da qualidade da energia, minimizando a geração de entropia, e da estratificação do tanque. Neste estudo é realizada uma análise de malha e uma análise de primeira e segunda lei para quantificação da energia armazenada no reservatório térmico e da estratificação do tanque.

Os resultados mostraram que a entrada concebida na forma de deflector horizontal plano, apresentou melhores resultados em termos de conservação de energia e estratificação do tanque. No entanto, comparando-se os resultados numéricos e experimentais, com base na análise exérgica e entrópica, é possível notar uma menor mistura nas simulações CFD. Esse fato se deve ao modelo considerar o escoamento totalmente laminar, possivelmente também, por desconsiderar perdas pelas paredes do reservatório e gradientes de temperatura em seu material.

J. Fan, S. Furbo [19] realizaram um estudo focado no escoamento gerado pelas forças de empuxo durante o resfriamento de um reservatório térmico cilíndrico vertical. Foram realizados experimentos com o tanque para cálculo do coeficiente de perdas e validação em simulações CFD. Uma análise de dependência de malha foi realizada. Posteriormente, foram realizadas simulações para diferentes tamanhos de tanque e razões de aspecto entre altura e diâmetro para duas condições iniciais, uma com o tanque em temperatura uniforme, superior a temperatura ambiente, e outra com o tanque estratificado. Os resultados mostram a ocorrência de um fluxo significativo nas paredes do reservatório, no sentido da força gravitacional, devido à queda de temperatura da região. Entretanto, no centro do reservatório o fluxo apresenta-se em sentido contrário. Verificou-se também que quanto maior é a estratificação inicial do reservatório, menores os fluxos gerados pelo empuxo.

### **2.3 Trabalhos complementares**

Outros trabalhos não apresentam informações específicas sobre o reservatório térmico e a influência da utilização do tanque de volume auxiliar, para aquecimento doméstico, interno a outro reservatório. Porém, existe uma série de estudos que analisam o sistema como um todo, sendo o reservatório térmico, com volume auxiliar interno, parte integrada desses sistemas de aquecimento solar, esses são apresentados nas referências [20], [21], [22], [23] e [24]. Estes trabalhos, por não apresentarem informações específicas sobre o reservatório térmico de duplo tanque, não são abordados neste estudo, entretanto são referenciados pela pertinência global ao tema apresentado.

### 3 METODOLOGIA

Primeiramente, serão apresentados dados referentes ao sistema, como volume do reservatório interno, volume do reservatório externo e temperaturas de consumo e da rede de fornecimento, tomando como base trabalhos anteriores realizados por [4] e [5].

Apresentados esses valores, será realizada a modelagem do reservatório para uma análise computacional do comportamento térmico e dinâmico do fluido. O software utilizado para a simulação será o *ANSYS FLUENT* [25], já extensivamente validado.

Durante a modelagem do reservatório, algumas simplificações são adotadas, sendo as principais referentes a troca de calor nas paredes sólidas do reservatório e aos materiais utilizados.

Uma análise de malha será levada a efeito para demonstrar consistência e estabilidade do modelo. Posteriormente, a validação do modelo será realizada, adotando-se um reservatório similar, porém mantendo-se as mesmas características do modelo proposto. Tendo otimizado a malha, atendendo certa tolerância e tempo computacional, serão realizadas simulações para diferentes posições do tanque interno, com condições de contorno baseadas na análise conduzida pelo estudo [4].

Finalmente, os resultados obtidos serão analisados, relevando primeiramente a influência do posicionamento do tanque interno na estratificação do fluido. Em sequência, análises de mistura e influência de troca de calor entre os tanques serão conduzidas.

#### 3.1 Considerações sobre a modelagem do reservatório

##### 3.1.1 Resistências térmicas das paredes do reservatório

Algumas considerações serão importantes para simplificar o problema em questão. Primeiramente, na modelagem do reservatório, no que tange aos materiais e formas adotadas, o principal compromisso da simulação é reproduzir o comportamento fluidodinâmico e térmico do reservatório, portanto, a forma, dimensões e propriedades dos materiais não serão necessariamente as mesmas de um reservatório real. Vale ressaltar, que o nível de detalhamento necessário para reproduzir a realidade com precisão, demanda um tempo computacional longo, não apresentando, na maioria dos casos, melhora significativa nos resultados.

Os reservatórios térmicos são normalmente feitos em aço inoxidável, sendo que o isolamento térmico utilizado é constituído de um material de baixa condutividade térmica, como a lã de rocha ou lã de vidro.

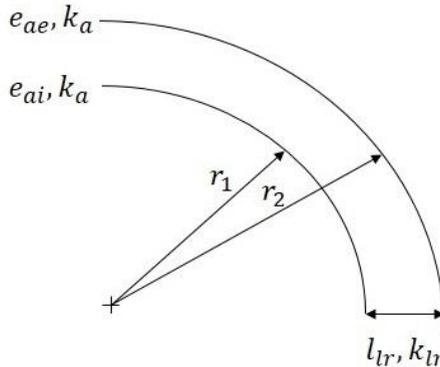


Figura 3.1 – Representação da resistência térmica da parede de um reservatório térmico.

No que tange à resistência térmica das paredes do reservatório, pode ser feita a seguinte análise. A figura 3.1 representa a composição real da parede do reservatório, contando com duas camadas de um material metálico, de pequena espessura, nas quais, um material isolante se encontra enclausurado. Para fins de cálculo de transferência térmica podemos representar essa configuração com resistências térmicas da seguinte forma, Figura 3.2.



Figura 3.2 – Resistências térmicas equivalentes à parede do reservatório em série.

Prosseguindo a análise, agora partindo para o equacionamento de uma resistência térmica equivalente, a partir do circuito térmico da Figura 3.2, têm-se a equação (3.1).

$$R_{eq} = \frac{\ln\left(\frac{r_1 + e_{ai}}{r_1}\right)}{2\pi k_a L} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_{lr} L} + \frac{\ln\left(\frac{r_2 + e_{ae}}{r_2}\right)}{2\pi k_a L}. \quad (3.1)$$

Realizando uma análise de ordem de grandeza dos termos da equação (3.1), pode-se inferir que o segundo termo do lado esquerdo da equação é dominante. Isso se deve ao fato da condutividade do material isolante ser quatro ordens de grandeza menor que a condutividade dos metais.

$$R_{eq} \approx \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_{lr} L} \quad (3.2)$$

No caso em questão, o material isolante térmico utilizado em simulação é a lã de rocha e suas propriedades podem ser vistas na Tabela 3.1 apresentada na seção de propriedades dos materiais.

Portanto, levando em consideração a análise de ordem de grandeza da resistência equivalente, pode-se afirmar que para fins de simulação computacional, considerar as paredes como um único material isolante, desconsiderando suas camadas metálicas, não acarretará em erro significativo nos resultados.

### 3.1.2 Propriedades dos materiais

Os dois materiais analisados na simulação são a água e a lã de rocha. A água está presente nas regiões de fluido do modelo e a lã de rocha, nas regiões sólidas, sendo que suas propriedades são apresentadas na Tabela 3.1. Vale ressaltar, que a densidade da água apresenta variação com a pressão e temperatura, porém, como os gradientes de pressão são baixos em um reservatório térmico, a densidade foi considerada uma função apenas da temperatura, através da aproximação de Boussinesq e de ajuste polinomial. As demais propriedades não apresentam variações consideráveis dentro das condições de uso do modelo, logo são mantidas constantes.

No que tange ao material sólido, foram utilizadas as propriedades da lã de rocha, um material isolante térmico comumente utilizado em reservatórios térmicos. As considerações sobre o uso desse material são apresentadas na seção devotada ao modelo. Suas propriedades não sofrem variações dentro das condições de uso do modelo.

Tabela 3.1 – Propriedades dos materiais

Propriedades	Água	Lã de rocha
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f(T)$	180
$k$ [W/mK]	0,6	0,04
$\nu$ [kg/ms]	0,001003	-
$c_p$ [J/kgK]	4182	800
$\beta$ [K <sup>-1</sup> ]	0,0002-0,0004 $f(T)$	-

### 3.2 Modelagem do reservatório

Seguindo a metodologia de concepção do modelo de reservatório, é necessário modelar-se em CAD a geometria do reservatório térmico. Para tal modelagem geométrica utiliza-se o *software DESING MODELER*, fornecido no mesmo pacote de *softwares* da ANSYS. Posteriormente, é necessário que se defina a malha utilizada na simulação numérica, para deste modo utiliza-se o ANSYS MESH. Consequentemente, a partir de uma geometria e malha definidas utiliza-se o FLUENT para realizar os cálculos de simulação numérica. Finalmente os resultados obtidos são convertidos em interfaces gráficas através do ANSYS POST PROCESSOR.

#### 3.2.1 Dimensionamento

Visando modelar em CAD o reservatório proposto, necessita-se definir suas dimensões. O procedimento da definição das dimensões é simples, adota-se os volumes propostos por Colle [6], Koller [4] e Carmignatti [5], como discutido e definido anteriormente e com base nesses valores, simples cálculos geométricos são adotados.

Definindo-se o comprimento interno do reservatório, parte contendo o fluido, em um metro, como pode ser visto na Figura 3.3 em sua parte superior, onde é apresentada a secção longitudinal do tanque externo do reservatório, vale ressaltar que as cotas estão em milímetros. Posteriormente, foram definidas as espessuras dos tanques interno e externo, os diâmetros das entradas e saídas e seus comprimentos. Finalmente, todas as demais medidas foram obtidas através da fórmula do volume de um cilindro.

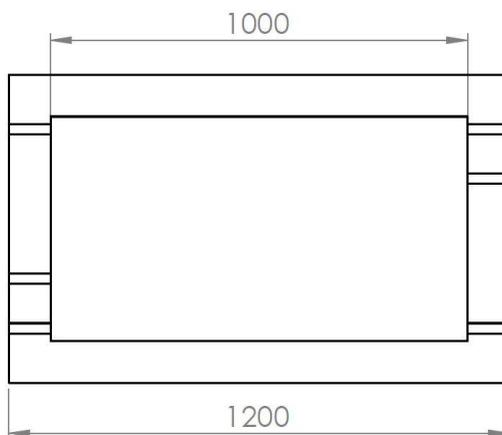


Figura 3.3 – Dimensões do tanque externo em secção longitudinal central com cotas em milímetros.

Os valores dos volumes e espessuras são apresentados na Tabela 3.2, os demais valores dimensionais são apresentados no Apêndice A.

Tabela 3.2 - Parâmetro do sistema

Volume tanque interno (m <sup>3</sup> )	0,07
Volume tanque externo (m <sup>3</sup> )	0,13
Espessura tanque interno (m)	0,025
Espessura tanque externo (m)	0,1

### 3.2.2 Modelagem em CAD

A modelagem geométrica consiste na construção das regiões do domínio do modelo. O *DESIGN MODELER* foi utilizado para tal tarefa. A geometria do reservatório de duplo tanque pode ser vista na Figura 3.4. Lembrando que o duplo tanque consiste em um tanque cilíndrico horizontal, com outro tanque de mesma forma inserido neste. Desta forma, a configuração de dois tanques, constitui quatro regiões referentes aos tanques e fluidos, e mais uma, referente a resistência elétrica. São elas as regiões do tanque externo, tanque interno, fluido externo, fluido interno e resistência elétrica. As quatro regiões são apresentadas nas figuras que se seguem.

Tendo em vista a simetria longitudinal do reservatório, assim como a redução de esforço computacional, o reservatório foi seccionado no plano longitudinal de simetria. Essa simplificação do problema, além de reduzir o tempo computacional, também proporciona uma melhor visualização do reservatório.

A primeira região, Figura 3.5, corresponde à parte sólida do tanque externo, que representa o isolamento térmico. Podem ser vistas as regiões onde situam-se as passagens de entrada e saída de fluido do tanque, assim como a cavidade onde estão inseridos o fluido interno e o tanque interno.

A segunda região corresponde ao fluido externo, Figura 3.6, que representa o fluido presente no tanque externo. As regiões de entrada e saída que aparecem no fluido externo representam a entrada de fluido da rede, saída do fluido para o coletor solar, retorno do fluido do coletor solar e saída do fluido para o tanque interno.

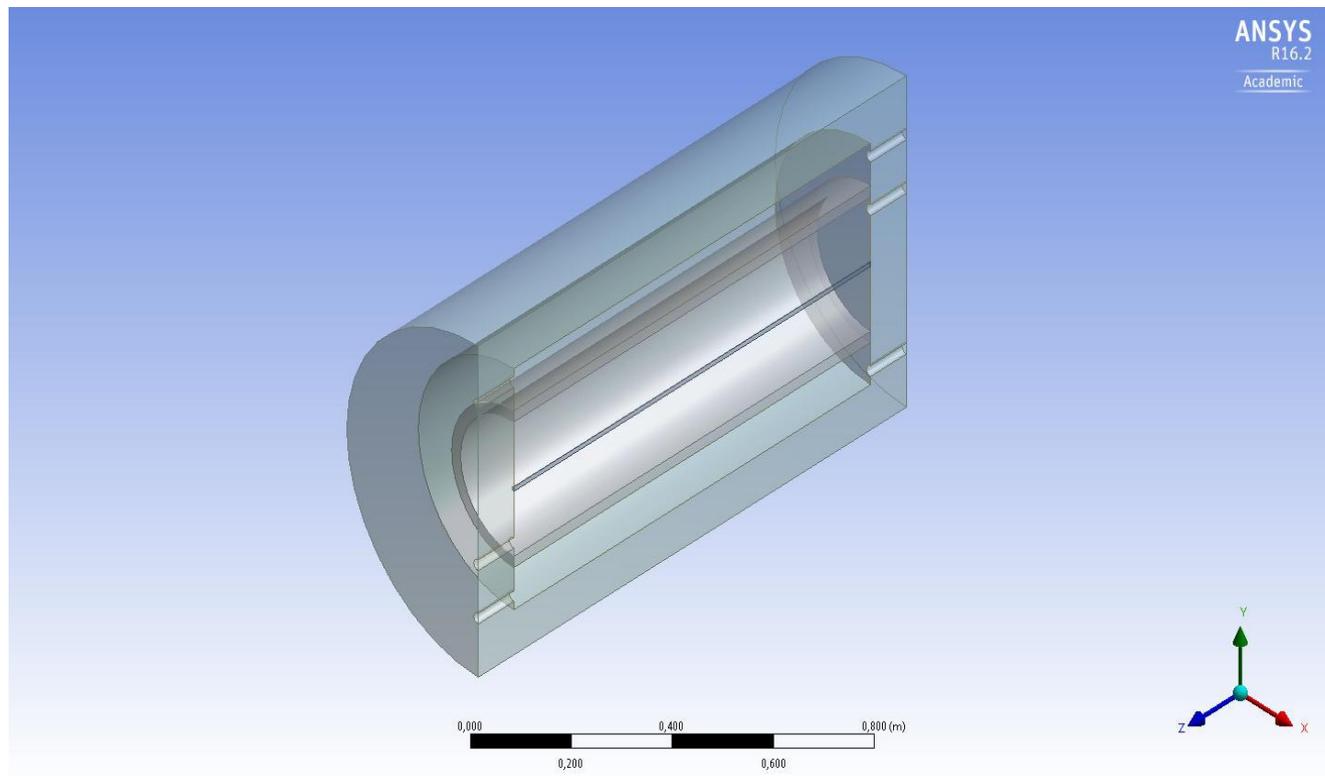


Figura 3.4 – Vista isométrica da secção longitudinal do reservatório térmico de duplo tanque.

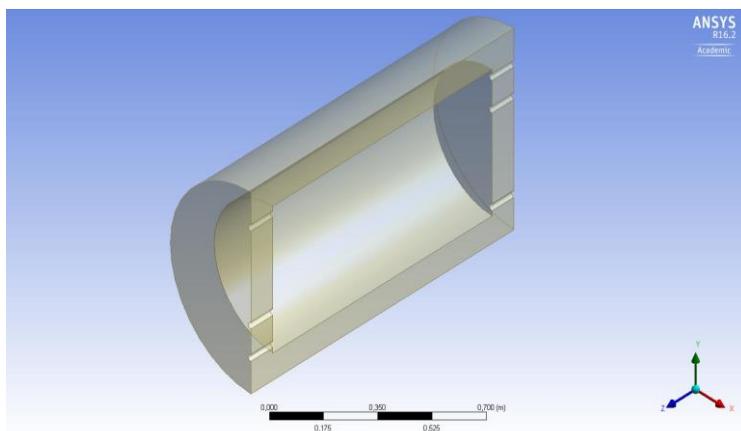


Figura 3.5 – Vista isométrica da região do tanque externo.

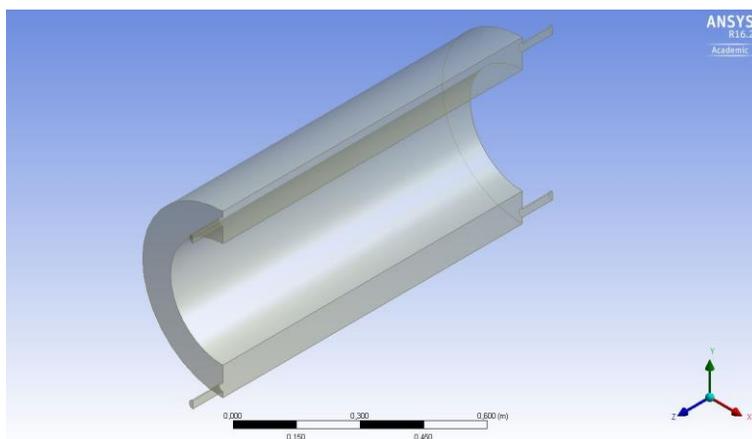


Figura 3.6 – Vista isométrica da região do fluido externo.

A terceira região, Figura 3.7, corresponde a parte sólida do tanque interno. O tanque interno não está em contato com o exterior, constitui-se apenas por uma casca cilíndrica de espessura do isolamento.

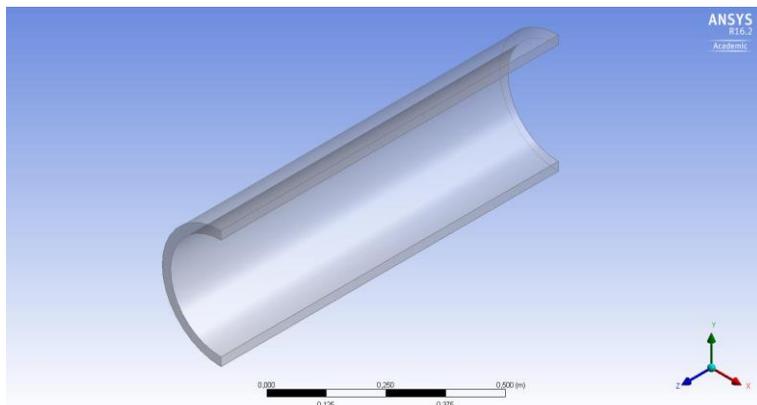


Figura 3.7 – Vista isométrica da região do tanque interno.

A Figura 3.8 corresponde ao fluido interno, com uma região de entrada do fluido de origem do tanque externo e uma região de saída do fluido para consumo. Pode ser vista, igualmente, a região onde situa-se a resistência elétrica.

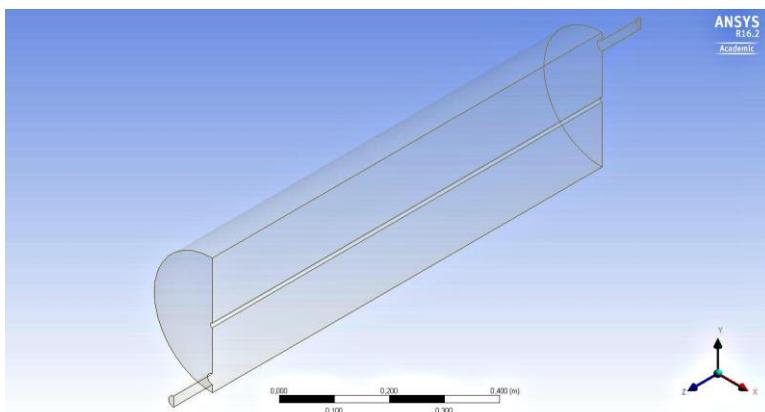


Figura 3.8 – Vista isométrica da região do fluido interno.

Finalmente a Figura 3.9 apresenta a última região de estudo, a resistência elétrica. A resistência elétrica foi modelada como um cilindro, igualmente seccionado longitudinalmente como o restante do reservatório. A resistência se apresenta no problema como um sólido de geração de calor volumétrica homogênea.

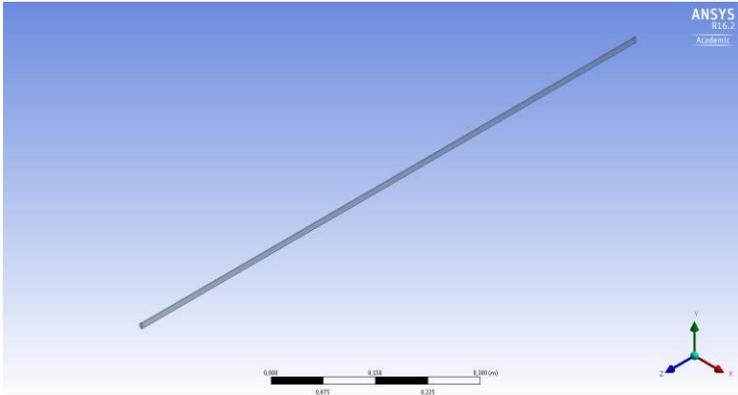


Figura 3.9 – Vista isométrica da região da resistência.

### 3.2.3 Malha

Com a finalização da geometria do reservatório, o próximo passo é a definição da malha das regiões do reservatório. Lembrando que essa etapa é importante para obter uma boa qualidade dos resultados. A malha deve ser capaz de captar as regiões onde há maiores gradientes de temperatura e pressão, sendo assim, a experiência e o conhecimento do fenômeno físico sobre o assunto, são fundamentais na escolha e refinamento da malha.

A malha foi concebida, primeiramente, com base na experiência e conhecimento sobre transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. Esses conhecimentos abrangem tomar como base a malha utilizada escoamentos conhecidos, como entre placas planas, tubulações e em cavidades. Devem receber uma maior atenção no refinamento de malha regiões onde há mudança de geometria, regiões onde o fluido é injetado ou descarregado do tanque e regiões onde existem maiores gradientes de temperatura e pressão. Porém, mesmo com esse cuidado nas regiões citadas, posteriormente a malha é analisada e refinada, se ainda for necessário, para que seja garantida sua consistência, assim como do modelo como um todo.

A malha concebida originalmente pode ser observada na Figura 3.10. A vista, utilizada para visualizar, é do plano central que secciona longitudinalmente o reservatório.

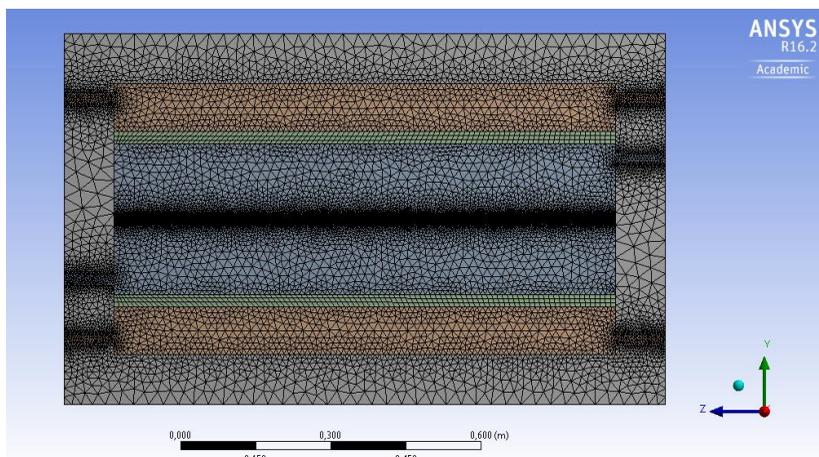


Figura 3.10 – Vista da malha da secção longitudinal do reservatório térmico de duplo tanque.

Como pode ser observado, há um maior número de elementos nas regiões de entrada e saída de fluido, regiões que aparecem mais escuras na Figura 3.8, pois essas regiões apresentam maiores gradientes de pressão, conseqüentemente variações de velocidade do fluido. Lembrando que, para uma boa avaliação do campo de temperatura, o campo de velocidade deve ser preciso, já que a advecção do fluido é fortemente presente no problema.

As regiões próximas das paredes dos tanques, contam com uma malha mais refinada. Fato que se deve à condição de não escorregamento, que influencia o perfil de velocidade, por apresentar maiores gradientes de pressão.

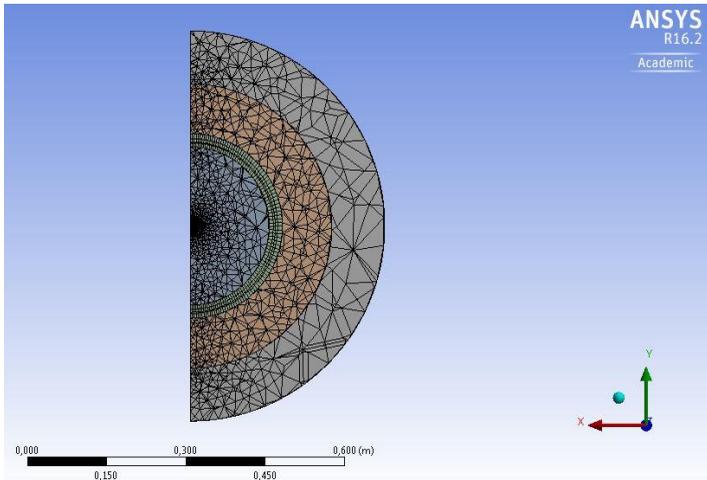


Figura 3.11 – Vista da malha da secção transversal.

Na vista transversal, Figura 3.9, as considerações de não escorregamento e regiões de maiores gradientes de pressão, são notadas nas interfaces fluido/sólido, apresentando um maior número de elementos. Já na parte central, onde situa-se a resistência elétrica, pode ser observado um alto refinamento de malha, o que se deve à troca de calor altamente difusiva na região, entre a resistência e o fluido, além da advecção gerada pelo empuxo do fluido aquecido.

A Figura 3.10, aproxima a vista da região de entrada do fluido, onde pode ser notado o refinamento de malha comentando anteriormente. Já, a Figura 3.11, ilustra as interfaces fluido/sólido das regiões de entrada e saída de fluido, como também a região central, onde situa-se a resistência elétrica. O refino de malha nessas regiões pode ser observado.

No que tange às regiões sólidas, como apresentam apenas troca de calor difusiva, suas malhas não apresentam um refino apurado, o que pode ser observado na Figura 3.10. Lembrando, que a configuração de malha apresentada nessa seção é apenas o passo inicial na obtenção dos resultados do modelo, uma extensa e detalhada análise da dependência de malha foi conduzida neste trabalho.

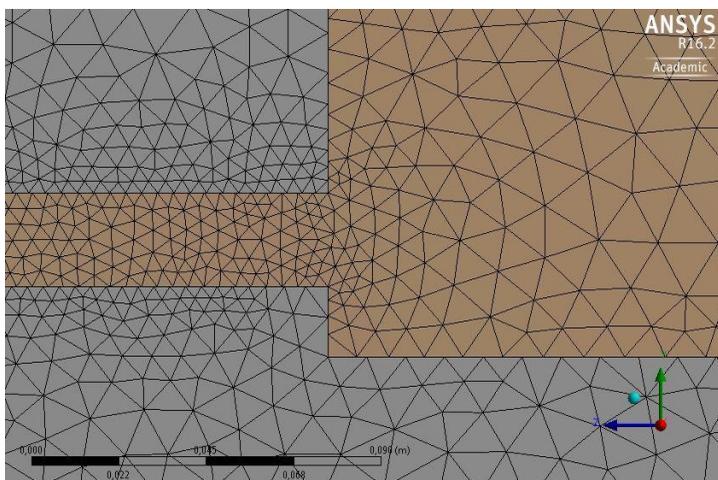


Figura 3.12 – Vista da secção longitudinal da malha de uma das regiões de entrada/saída de fluido.

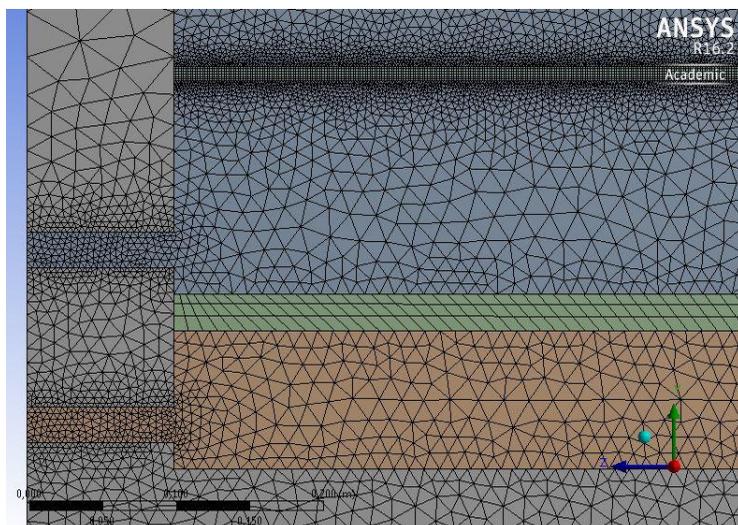


Figura 3.13 – Vista da secção longitudinal da malha de regiões de entrada/saída de fluido e da resistência elétrica.

### 3.2.4 Condições de contorno

As condições de contorno utilizadas representam a maneira como será simulado o modelo do reservatório. Buscando obter resultados que reflitam a situação de operação do reservatório, as condições de contorno tendem a ser baseadas em situações de operação do SASAD. Porém, os custos computacionais para se obter bons resultados utilizando condições de contorno reais do sistema como um todo são inviáveis para um modelo computacional do reservatório em CFD. Normalmente essas simulações são realizadas com modelos simplificados em ambiente *TRNSYS* [9], como já comentado.

Tendo em vista a dificuldade de se obter resultados utilizando condições reais de operações do SASAD, as simulações serão realizadas com condições de contorno com valores similares. Normalmente utiliza-se valores arredondados, que facilitem a leitura dos resultados e que sejam comuns em aplicações na área do estudo.

Logo, as simulações serão realizadas com base em valores de condições de operação, porém com algumas mudanças nesses valores para que o reservatório seja submetido à um teste consistente.

As considerações sobre condições de contorno se aplicam principalmente aos ganhos térmicos do circuito do coletor, nas vazões de entrada e saída de fluido do reservatório e nas condições de aquecimento auxiliar.

Como o problema em questão será simulado em regime transiente, as condições iniciais são indispensáveis para a solução. As condições iniciais se caracterizam pelo estado em que o reservatório se encontra no início da simulação, como campo de temperatura e velocidade. Logo as condições iniciais também serão descritas nessa seção.

Para uma melhor visualização do problema e suas condições de contorno, a Figura 3.12 ilustra o reservatório com indicações das regiões de entrada e saída de fluido, onde há símbolos em formato de flechas das respectivas temperaturas e velocidades.

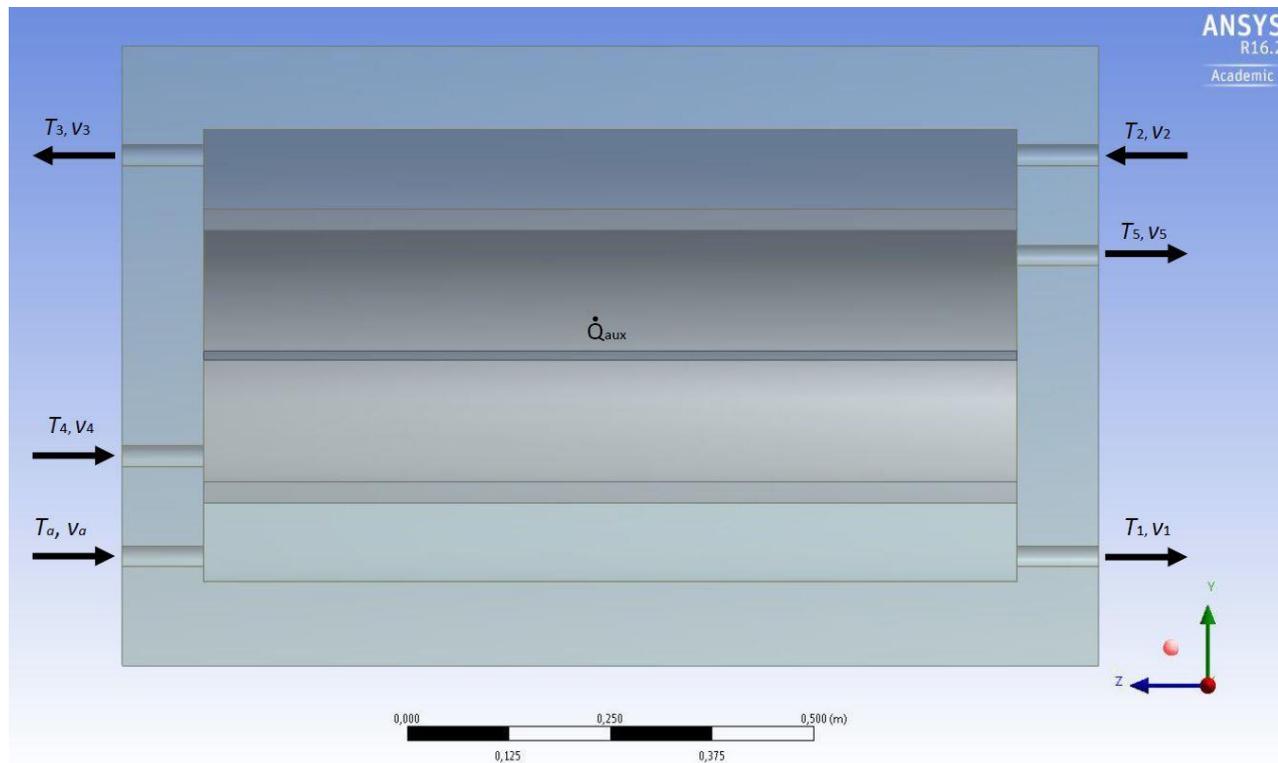


Figura 3.14 – Vista da secção longitudinal do reservatório com indicações das condições de contorno.

Primeiramente, como condição inicial o reservatório encontra-se estático e em equilíbrio térmico, o que significa que o campo de vetores velocidade é nulo e o campo de temperatura constante.

Quando a simulação se inicia, as condições de contorno são impostas, são elas: a temperatura e campo de velocidade do fluido da rede entrando no reservatório  $T_a, v_a$ , a temperatura e velocidade de saída para o coletor  $T_1, v_1$ , temperatura e velocidade do fluido do coletor retornando ao reservatório  $T_2, v_2$ , temperatura e velocidade do fluido saindo do tanque externo para o tanque interno  $T_3, v_3$ , temperatura e velocidade do fluido entrando no reservatório interno  $T_4, v_4$ , temperatura e velocidade do fluido saindo para consumo  $T_5, v_5$ . Ainda pode ser notado o aquecimento auxiliar  $\dot{Q}_{aux}$  através da resistência elétrica na parte central.

Lembrando também que o exterior troca calor por convecção com o reservatório, logo, o coeficiente de calor de troca convectiva e a temperatura externa também são condições de contorno.

Sobre as velocidades de entrada e saída e suas correspondes vazões, existem algumas ressalvas. Primeiramente, só a velocidade de fluido entrando foi usada como condição de contorno, sendo considerado de um perfil de vetores velocidade constante e perpendicular à superfície de entrada. Os perfis de saída do fluido são calculados devido aos gradientes de pressão impostos pelos perfis de velocidade de entrada e ao escoamento no reservatório em si, sendo que a condição inicial é de pressão constante igual da atmosfera. Vale ressaltar que a condição de continuidade é respeitada, portanto a massa de fluido presente no reservatório se conserva.

Os valores das condições de contorno impostas no problema são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Valores das condições de contorno.

<b>Convecção Externa:</b>		<b>Temperatura inicial:</b>		
h (W/m <sup>2</sup> K)	6		T (K)	293,15
T (K)	293,15			
<b>Entradas:</b>			<b>Aquecimento:</b>	
	v (m/s)	T (K)	Resistência	Q (W/m <sup>3</sup> )
Entrada principal	0,3	293,15		3,81E+07
Entrada fluido vindo do coletor	0,3	301,2		-
Entrada fluido no tanque interno	0,3	301,2		-

Os valores apresentados na Tabela 3.3 são valores base usados nas simulações, porém, para cada simulação essas condições podem sofrer

alterações. Logo, serão apresentados os valores utilizados em cada simulação realizada separadamente na respectiva seção.

A Tabela 3.1 apresenta, também, os valores dos parâmetros utilizados para a convecção externa. O coeficiente utilizado é normalmente aplicado para este tipo de problema e o valor de temperatura externa foi retirado dos trabalhos das referências [4] e [5].

No que tange às temperaturas, foi utilizado o cálculo de ganho de energia útil do coletor conforme [26] para definir a temperatura  $T_2$ , e foi imposta a condição da temperatura de entrada do tanque interno  $T_4 = T_2$ , que é uma simplificação razoável, tendo em vista que a parte superior do reservatório normalmente encontra-se na mesma temperatura, devido à sua estratificação. A temperatura de entrada é igual à temperatura da rede de 20° C, valor utilizado por [4] e [5]. O valor de velocidade utilizado de 0,3 m/s representa uma vazão de 8 l/min, vazão encontrada quando o chuveiro elétrico está em uso, valor normalmente encontrado nas referências bibliográficas e no uso doméstico. Finalmente, no que tange às temperaturas de saída, elas não são impostas, os valores utilizados são apenas referência caso haja refluxo.

O aquecimento auxiliar, ilustrado na Tabela 3.3, já foi mencionado na seção 2.1.4, o valor da potência é fixo para todas as simulações onde é utilizado.

### 3.2.5 *Fluent* CFD

O *software Fluent* apresenta uma interface gráfica onde é possível inserir os valores dos parâmetros utilizados na simulação. Os valores referentes às condições de contorno, propriedades dos materiais, parâmetros da simulação, como passo de tempo, número de iterações, tolerâncias e resíduos, entre outros são inseridos nesta etapa do modelo.

As informações de dimensionamento, configuração de malha, domínios do problema, enfim, todas as informações contidas nesta seção são processadas pelo *software*, que realiza os cálculos das equações de conservação apresentadas na seção 2.1.

Os resultados obtidos são primeiramente analisados em relação a sua consistência e pertinência com o fenômeno físico. Portanto, o capítulo 4, apresenta uma extensa análise a respeito da estabilidade e consistência da solução, para que enfim, possam ser validados os resultados.

### 3.2.6 Processamento de resultados

Posteriormente à realização dos cálculos pelo *software Fluent*, os resultados de campo de temperatura e velocidade, para cada passo de tempo, são conhecidos. O *software ANSYS POST PROCESSOR*, apresenta uma interface gráfica para análise dos resultados, logo será utilizado para tal tarefa. Todas as imagens dos resultados, apresentadas neste trabalho, seja de análise de malha, limites teóricos e análise da posição do tanque interno foram concebidas através do uso deste *software*. Entretanto, os resultados também foram exportados para ambiente do *software MATLAB* [27], que foi utilizado na concepção dos gráficos presentes neste trabalho.

## 4 ANÁLISE DE MALHA, CONSISTÊNCIA E ESTABILIDADE

### 4.1 Análise de malha

A análise de malha baseia-se na verificação de consistência do modelo. Quando o modelo discreto tende à solução analítica dizemos que o modelo é consistente, e para tal tendência pode-se refinar a malha até que os resultados se aproximem dos resultados analíticos. Entretanto, o refinamento incessante de malha pode resultar em custo computacional inviável. Portanto, é necessário estabelecer uma tolerância para os resultados, de forma que estes sejam aceitáveis e plausíveis para o objetivo do estudo.

Para realizar tal análise, foram simuladas quatro diferentes malhas com as mesmas condições de contorno. Desta forma, os resultados esperados são os mesmos para as diferentes malhas, porém, conforme haja refinamento os resultados devem convergir para o resultado analítico.

A Tabela 4.1 apresenta o número de nós e elementos das quatro malhas utilizadas para analisar consistência do modelo. As quatro malhas estão organizadas em ordem crescente de número de nós e elementos.

Tabela 4.1 - Número de nós e elementos das malhas.

	1	2	3	4
Nós	117.332	190.387	198.511	359.479
Elementos	524.587	715.626	757.802	1.579.126

As figuras a seguir, apresentam visualmente os resultados de temperatura para as quatro diferentes malhas, comparando duas a duas, enfatizando a diferença de valor de temperatura absoluta entre elas. Na parte superior das figuras estão ilustrados os valores de temperatura para as malhas comparadas e na parte inferior é mostrada a diferença absoluta de valor de temperatura entre as malhas para a mesma posição.

As condições de contorno utilizadas na análise de malha são semelhantes as apresentadas na seção 3.2.4, porém o valor de temperatura do fluido vindo do coletor solar foi aumentado para 310 K para que haja um maior gradiente de temperatura no reservatório. Esse gradiente maior, pela maior diferença dos valores, facilita a análise e a visualização dos valores. Os valores das condições de contorno utilizados podem ser vistos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores das condições de contorno utilizadas na análise de malha.

<b>Convecção Externa:</b>			<b>Temperatura inicial:</b>	
h (W/m <sup>2</sup> K)	6		T (K)	293,15
T (K)	293,15			
<b>Entradas:</b>	v (m/s)	T (K)	<b>Aquecimento:</b>	Q (W/m <sup>3</sup> )
Entrada principal	0,3	293,15	Resistência	3,81E+07
Entrada fluido vindo do coletor	0,3	310		-
Entrada fluido no tanque interno	0,3	310		-

A Figura 4.1 mostra as malhas 1 e 2, no tempo inicial, de forma a ilustrar como será feita a comparação, já que no instante inicial da simulação os valores de temperatura são os mesmos para as duas malhas, caracterizando mesma condição inicial. Na parte superior esquerda está ilustrada a malha 1 e na direita a malha 2. Como pode ser observado, a figura ilustra a temperatura no plano central que secciona o tanque longitudinalmente. Esse plano foi escolhido pela sua representatividade para o modelo, podendo ser vistas as regiões presumidamente de grandes variações de temperatura e velocidade.

Na Figura 4.2 é apresentado o perfil de temperatura no plano central longitudinal escolhido, no instante de 9,92 segundos. É notável a semelhança entre os perfis de temperatura para as duas malhas, podendo ser observada a tendência de as malhas apresentarem os mesmos resultados. Na parte inferior da figura é mostrada a diferença dos resultados, nota-se que eles se diferenciam por pouco valor, não passando nas regiões do fluido de 3K, apenas na região superior do fluido externo em contato com a parede externa do tanque há uma diferença maior, em torno de 4 K, fato que se deve à essa região ser uma área de contato das malhas do fluido externo com o tanque externo. As regiões de encontro de malhas tendem a apresentar maior diferença nos resultados, pelo fato que no fluido há transferência de calor por advecção e difusão, já no sólido, existe apenas difusão, além da malha do sólido ser mais grosseira.

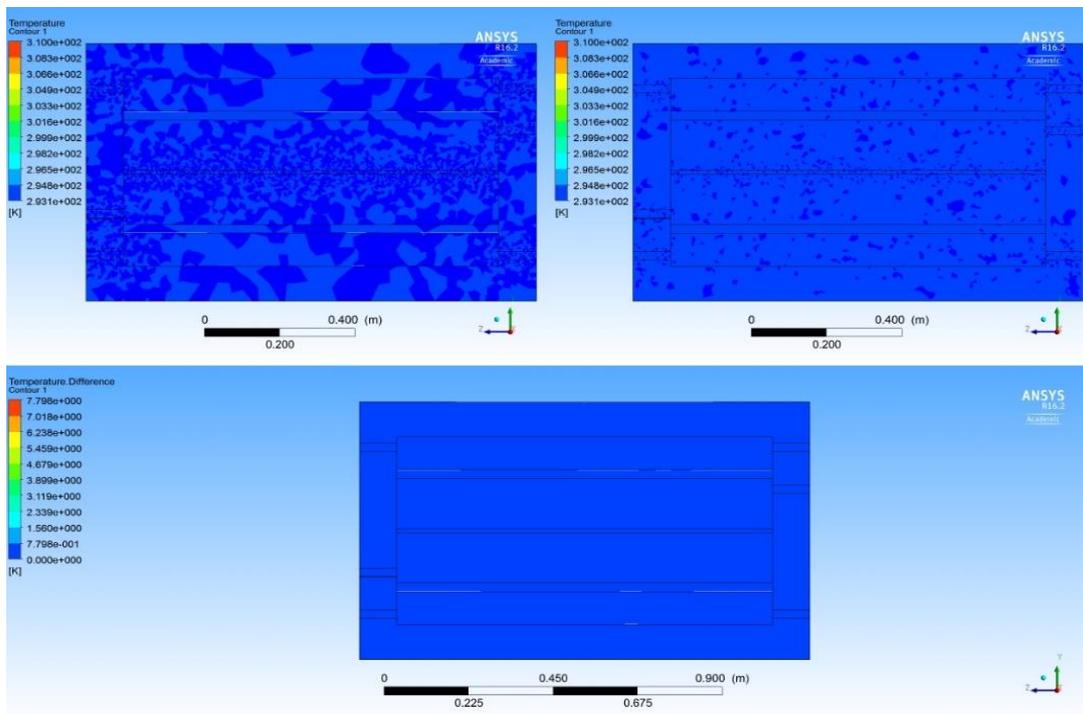


Figura 4.1 – Imagens gráficas da diferença absoluta dos valores de temperatura das malhas 1 e 2 para o instante inicial de tempo de 0 segundos.

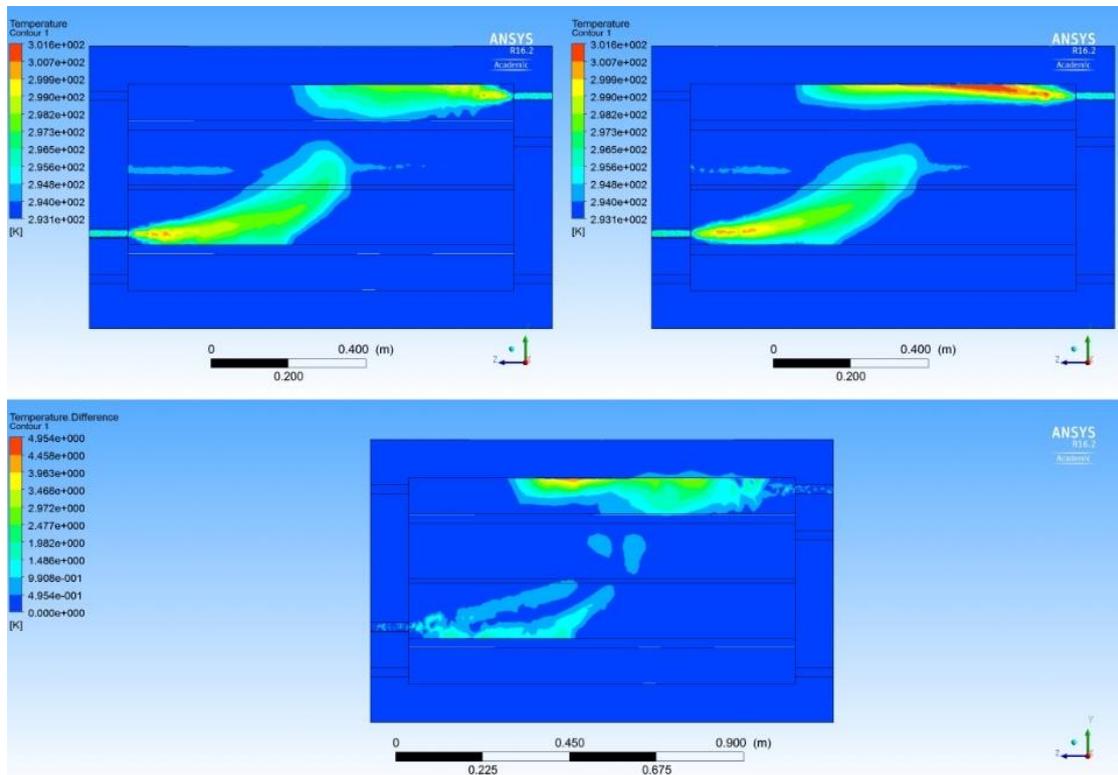


Figura 4.2 – Imagens gráficas da diferença absoluta dos valores de temperatura das malhas 1 e 2 para o tempo de 9,92 segundos.

Deve ser considerado na análise da diferença dos resultados entre as malhas o fato de que a simulação é realizada em regime transiente, logo, sua convergência é dada para cada passo de tempo. Os tempos iniciais, tendem a apresentar maiores variações nos valores, devido a mudança de um regime estático e de equilíbrio térmico para um dinâmico. Vale ainda ressaltar, que os passos de tempo das simulações são variáveis e dependem do critério de convergência, sendo que, se a convergência é obtida em poucas iterações, o passo de tempo aumenta de valor; quando o oposto acontece, o passo de tempo diminui, até a simulação atingir o tempo desejado. Isso faz com que os passos de tempo iniciais sejam diferentes e que as soluções se diferenciem mais nos passos de tempo iniciais.

Seguindo na Figura 4.3, para 190,4 segundos de simulação, a diferença entre os valores de temperatura diminui, mesmo que a penetração do fluido quente tenha aumentado, como pode ser visualizado na figura. A maior diferença de temperatura ocorre na interface fluido/sólido entre o fluido externo e o tanque externo, na parte superior do reservatório. Essa diferença deve-se ao fato dessa região situar-se no encontro de malhas, que devido à diferença de número de elementos e seus respectivos tamanhos, pode apresentar variações elevadas de temperatura. O que notavelmente ocasiona essas diferenças de temperatura, é o fato do fluido propagar calor de maneira altamente advectiva na região citada, já no sólido de maneira puramente difusiva. Espera-se que o refinamento de malha e uma melhor consistência na interface fluido/sólido, corrija essa discordância entre os valores de temperatura nessa região.

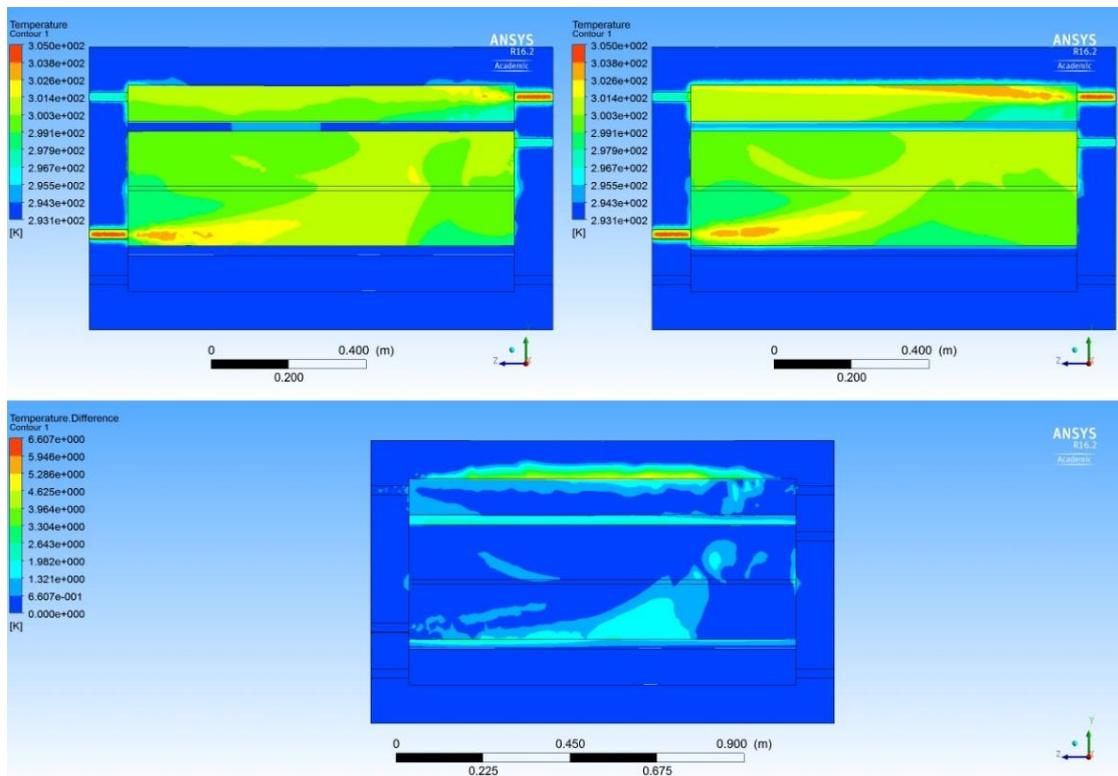


Figura 4.3 – Imagens gráficas da diferença absoluta dos valores de temperatura das malhas 1 e 2 para o tempo de 190,4 segundos.

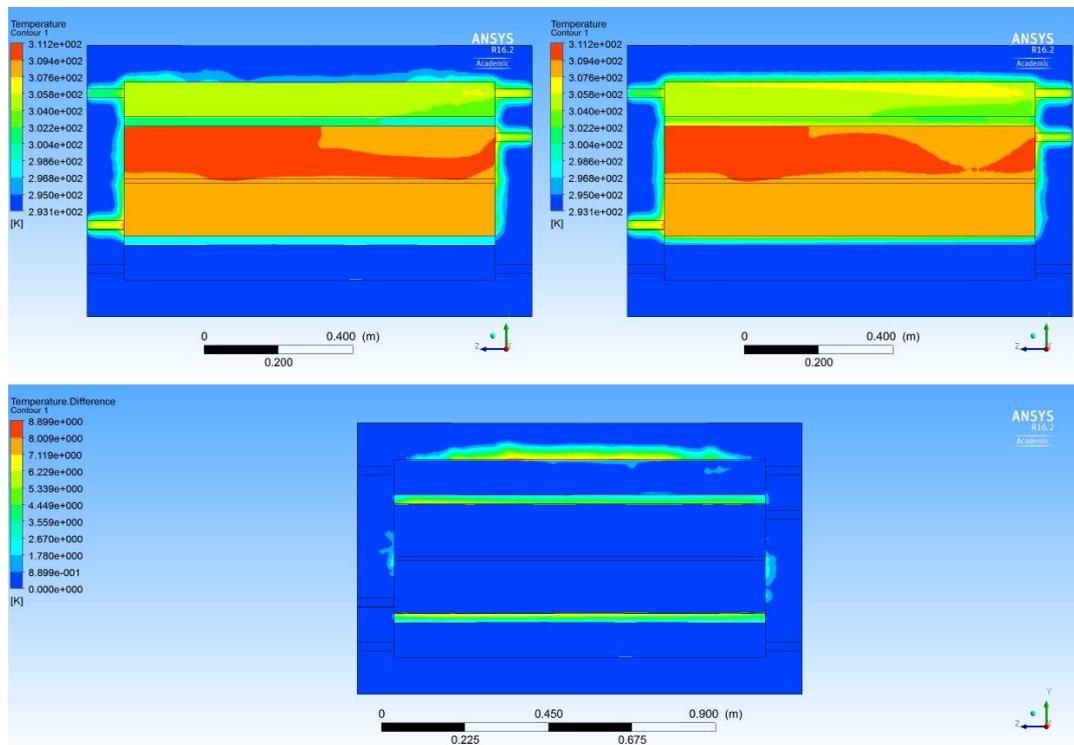


Figura 4.4 – Imagens gráficas da diferença absoluta dos valores de temperatura das malhas 1 e 2 para o tempo de 700,35 segundos.

Na Figura 4.4, para 700,35 segundos a diferença entre os resultados para as malhas diminui. Pode-se então inferir que os transientes e a adaptação do passo de tempo nos momentos iniciais apresentam uma maior diferença nos resultados. Passados mais de 700 segundos, pode ser visto que esses efeitos provocados pelo regime transiente são atenuados, e a maior diferença de temperatura ocorre na região de interface fluido/sólido, como comentado anteriormente.

Porém, uma análise em apenas um plano limita o número de elementos comparados, o que pode levar a uma análise errônea. Desta forma, é necessário analisar os demais elementos nas três dimensões do reservatório. Entretanto, em uma figura bidimensional, não é possível visualizar os elementos internos e em profundidade. Para tal visualização, adotou-se o posicionando do reservatório em perfil, cruzando três planos perpendiculares ao plano longitudinal, como pode ser visto na Figura 4.5.

Na Figura 4.5, para 510,5 segundos de simulação, torna-se notável a estratificação do tanque externo sendo que na sua parte superior encontra-se fluido em maior temperatura que na parte inferior. Porém, as regiões de maior discordância dos valores de temperatura continuam sendo as interfaces fluido/sólido, sendo que as demais regiões apresentam boa concordância de valores de temperatura, como pode ser observado na parte inferior da figura.

Tendo em vista que com o refinamento de malha houve discordâncias de valores, apesar de serem mínimas, uma nova análise comparativa é realizada a seguir. Para tal análise utilizam-se as malhas 2 e 3, sendo que a malha refinada anteriormente é comparada com outra de maior refinamento. Porém, devido ao fato das figuras anteriores apresentarem as comparações para vários passos de tempo e os resultados apresentam boa concordância, não se faz necessário refazer para esta comparação todos os passos de tempo vistos na comparação entre a malha 1 e 2. Além do mais, os resultados mais significativos, como visto anteriormente, são para um tempo maior decorrido de simulação. Portanto, simplificando a análise, a Figura 4.6 ilustra as simulações das malhas 2 e 3 para 732 segundos decorridos de simulação.

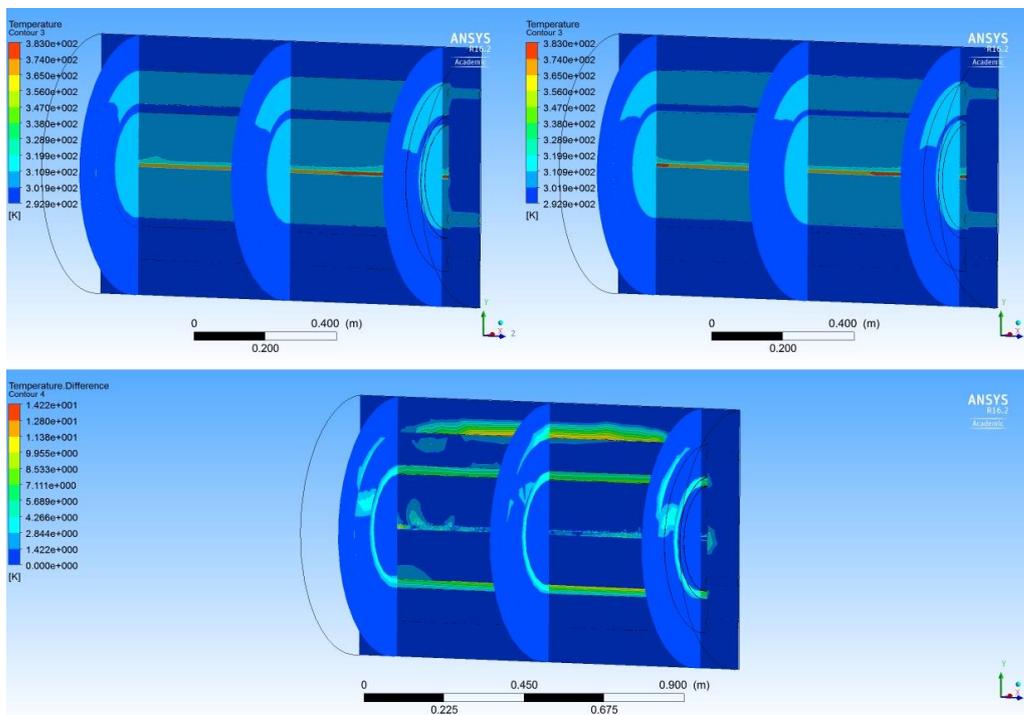


Figura 4.5 – Imagens gráficas da diferença absoluta dos valores de temperatura das malhas 1 e 2 em vista de perfil para o tempo de 510,5 segundos

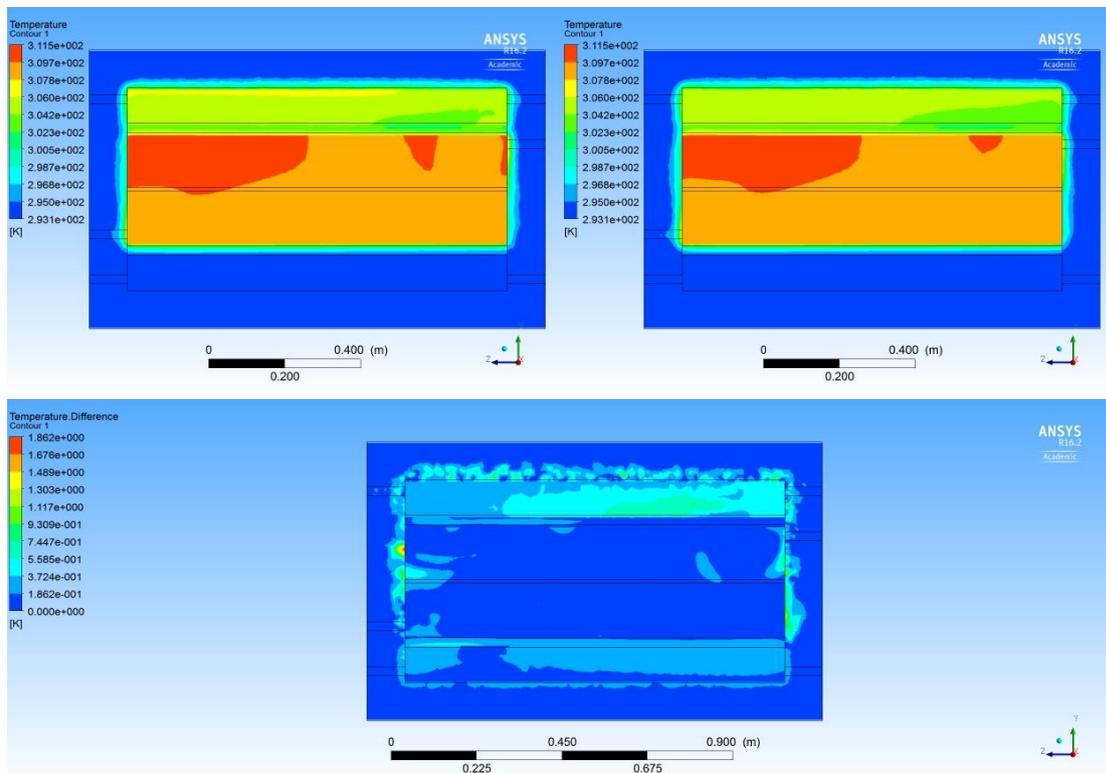


Figura 4.6 – Imagens gráficas da diferença absoluta dos valores de temperatura das malhas 2 e 3 para o tempo de 732 segundos.

Na Figura 4.6, pode ser observado que com o refinamento de malha, os valores de temperatura discordam, em praticamente todo reservatório, em menos de 1 K, o que mostra que apesar do refinamento os valores tendem ao mesmo resultado. No que tange às interfaces fluido/sólido, apesar de serem regiões de maior discordância, a diferença dos valores se reduziu em relação à comparação anterior, o que indica uma melhor consistência do modelo.

Tendo em vista a comparação entre as malhas 2 e 3, com o boa concordância entre os valores de temperatura em ambas, poder-se-ia concluir a análise de malha. Devido à complexidade geométrica do reservatório, a concordância de valores encontrada indica uma consistência satisfatória para os objetivos desse trabalho. Entretanto, para exclusão de qualquer incerteza, uma análise adicional é realizada entre as malhas 3 e 4, onde a malha 4 tem um refinamento com mais de o dobro de número de elementos que a malha 3.

Na Figura 4.7, para 10 segundos de simulação, pode-se constatar boa concordância entre os valores de temperatura entre as duas malhas, em um período de simulação curto de 10 segundos. Apesar da diferença do número de elementos da malha 4 ser o dobro da malha 3, os resultados tendem aos mesmos valores. Neste caso os resultados são discrepantes em não mais que 2 K em alguns pontos de maior gradiente térmico.

Na Figura 4.8, para 202,54 segundos de simulação, pode ser constatada uma melhor concordância no escoamento interno que no externo, indicando que a malha do fluido interno capta melhor os gradientes de temperatura no fluido, porém no geral, as diferenças são pequenas, tendo-se também em vista que a simulação está em estágio temporal intermediário. O que se torna evidente, é que a malha na interface fluido/sólido, apresenta uma melhor concordância de valores que nas comparações anteriores, concluindo-se, portanto, que para essa região o refinamento de malha é satisfatório.

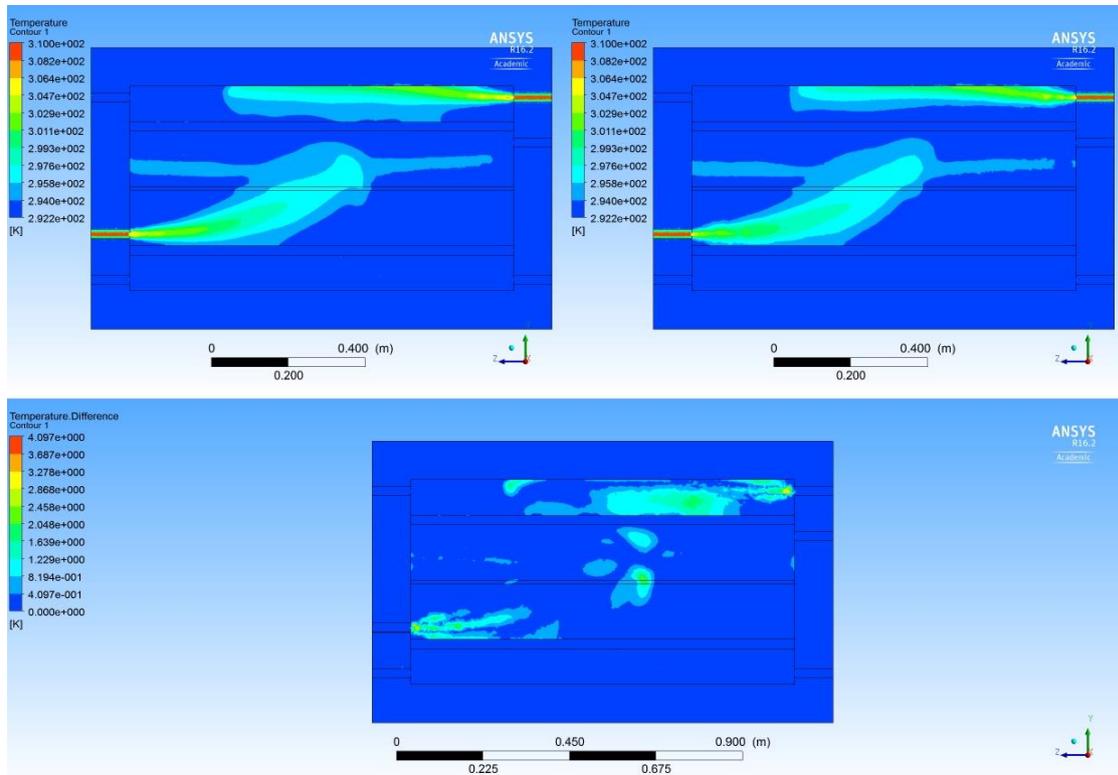


Figura 4.7 – Imagens gráficas da diferença absoluta dos valores de temperatura das malhas 3 e 4 para o tempo de 10 segundos.

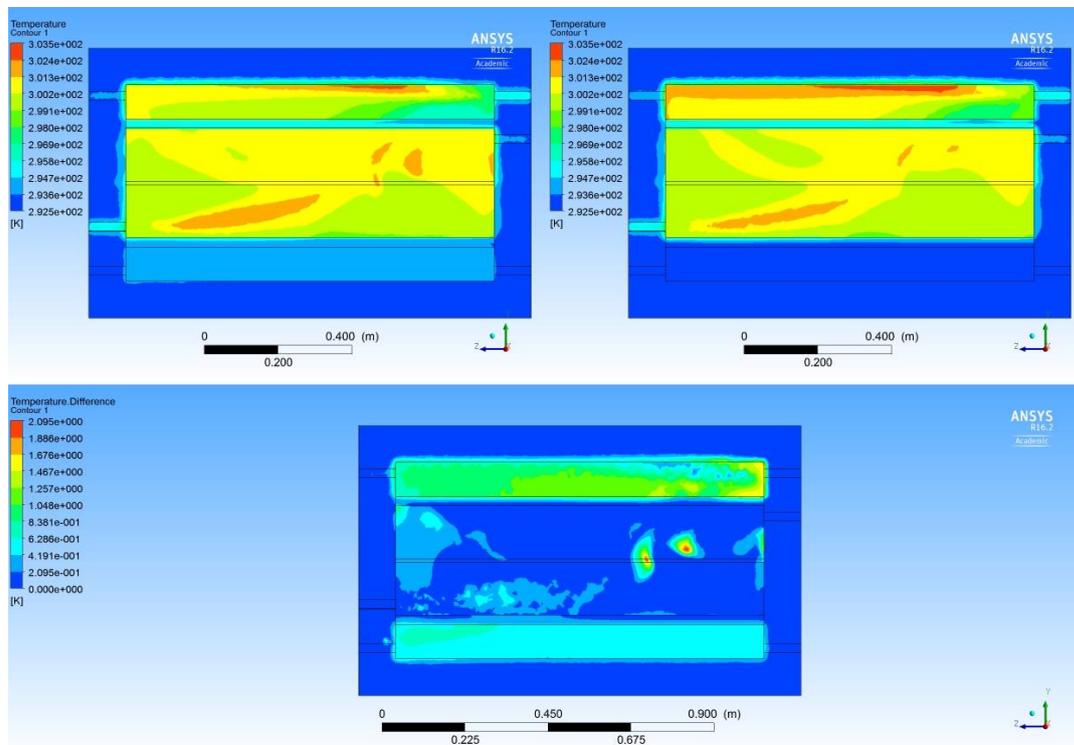


Figura 4.8 – Imagens gráficas da diferença absoluta dos valores de temperatura das malhas 3 e 4 para o tempo de 202,45 segundos.

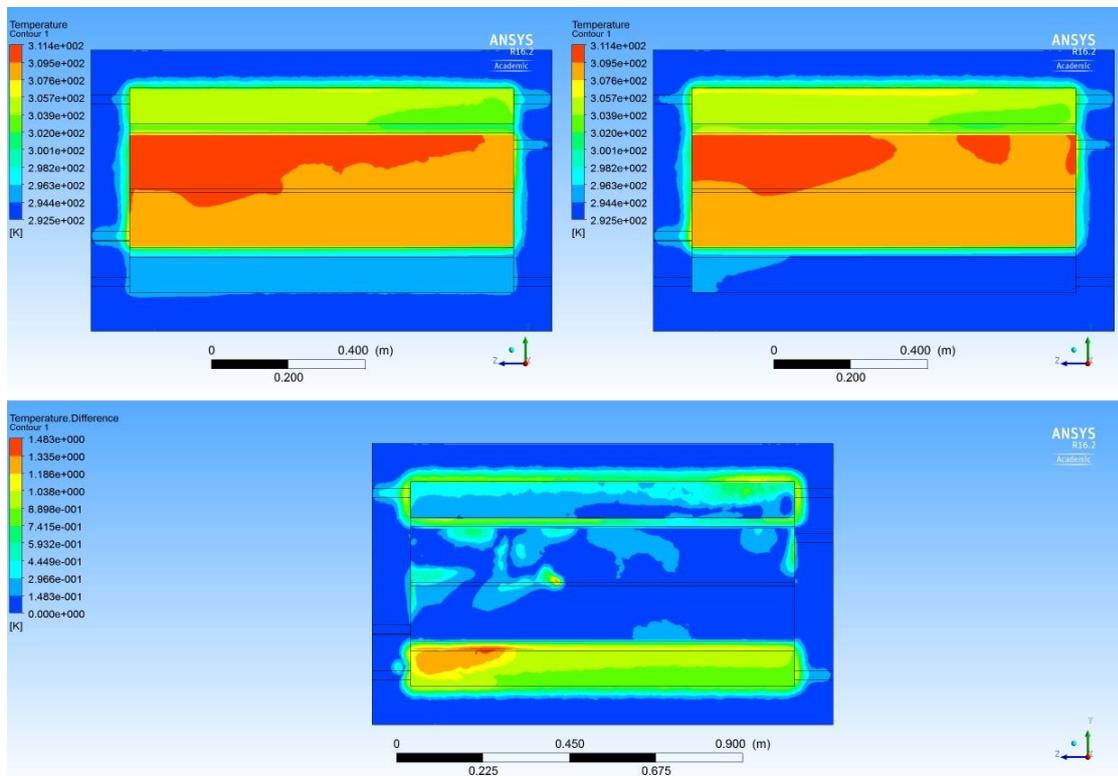


Figura 4.9 – Imagens gráficas da diferença absoluta dos valores de temperatura das malhas 3 e 4 para o tempo de 722,3 segundos.

Finalmente, na Figura 4.9 para 722,3 segundos de simulação, tem-se a última figura comparativa desta análise. Considerando que a malha 4 possui mais de o dobro de elementos da malha 3, as diferenças são pouco relevantes, mostrando um ótimo acordo entre os resultados. O escoamento interno apresenta diferenças de não mais que 1 K e no escoamento externo estas diferenças não passam de 1,4 K. Portanto, devido ao alto custo computacional da simulação da malha 4, a boa concordância entre os resultados com malha 3, conclui-se que a malha 3 é satisfatória para a realização das análises propostas neste trabalho.

## 4.2 Consistência e estabilidade

Conforme Maliska [28] as condições necessárias para a convergência de um modelo são a consistência e a estabilidade.

Um modelo é dito consistente quando a solução discreta tende à solução das equações diferenciais quando o tamanho dos elementos das malhas espaciais e temporais tendem a zero, o que pode ser constatado na seção anterior.

Estabilidade é um fator complexo dentro de um modelo. Os erros de arredondamento dos cálculos, ou mesmo a evolução mais rápida de convergência de uma das variáveis, pode levar à divergência do modelo, sendo que o modelo se torna instável. Desta forma, para verificação de estabilidade, a Figura 4.10, nos mostra os resíduos da equação da continuidade, velocidades e energia. Pode ser observado nessa figura que os resíduos são estáveis durante as iterações e atingem os valores estabelecido pela tolerância, que é de  $10^{-4}$  para a equação da continuidade e das velocidades nos eixos x,y,z e de  $10^{-6}$  para a equação da energia. Para cada passo de tempo são realizadas iterações das equações até que se atinja o valor de tolerância estabelecido, o que garante estabilidade e convergência do modelo. Portanto, pode-se afirmar, que no tocante aos resíduos e a convergência, o modelo é estável.

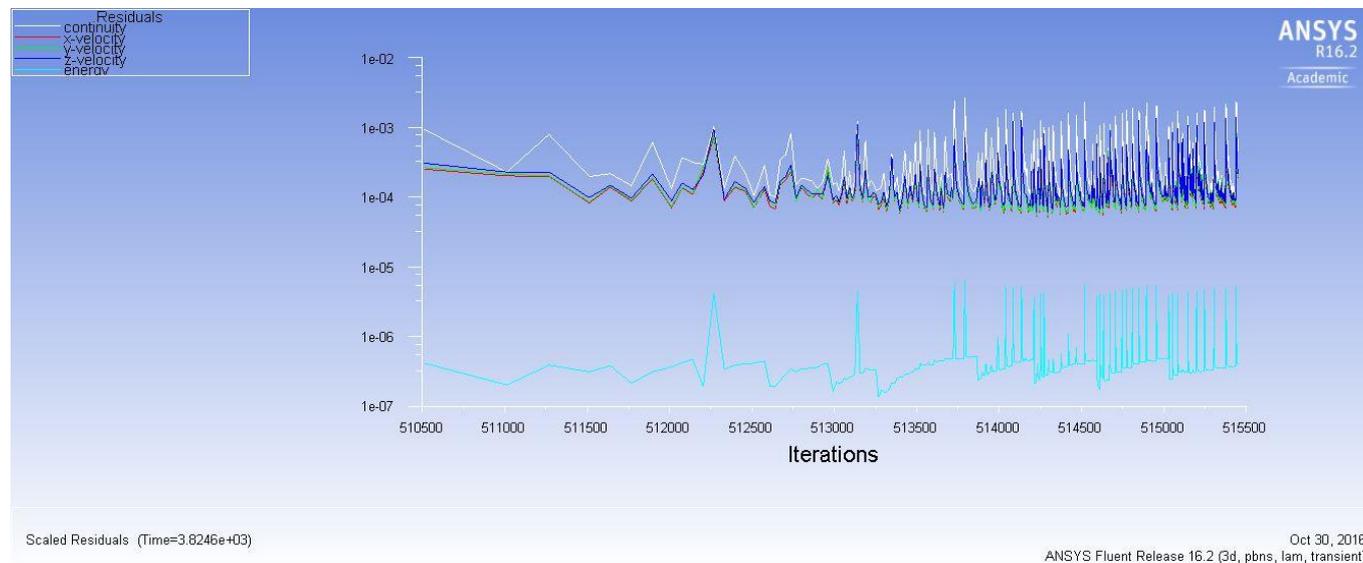


Figura 4.10 – Estabilidade dos resíduos das equações da continuidade, velocidades nos eixos x,y,z e energia..

### 4.3 Limites teóricos

Dentre os métodos possíveis de análise de um modelo CFD está a utilização da teoria fundamental para avaliar a coerência física do modelo em questão. Desta forma, foram simuladas situações limite teóricas, onde os resultados se evidenciam por serem fortemente previsíveis.

Para realizar tal análise, utilizou-se de condições de contorno estabelecidas, que de forma evidente conduzem a um resultado esperado pela teoria relacionada ao fenômeno físico. Para esse fim, é indicado que se use valores-limites, que podem ser de ordens de grandeza desproporcionais em relação a dimensão da variável de um caso real, mas que ressaltem resultados conhecidos de forma a se obter simulações fortemente convergentes.

Nesta simulação admite-se no instante inicial, que o reservatório esteja a uma temperatura homogênea e igual a 320 K e que subitamente passa a trocar calor com o exterior na temperatura de 293,15 K e um coeficiente de troca de calor hipotético de 1000 W/m<sup>2</sup>. Para promover uma maior troca de calor, a condutividade térmica do material isolante foi alterada para 500 W/(mK), sendo que as demais propriedades do material isolante e da água foram mantidas. A resistência térmica tem potência de 7000 W.

As condições de contorno para a simulação dos limites teóricos podem ser vistas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Condições de contorno para a simulação de limites teóricos.

<b>Convecção Externa:</b>		<b>Temperatura inicial:</b>		
h (W/m <sup>2</sup> K)	1000		T (K)	320
T (K)	293,15			
<b>Entradas:</b>			<b>Aquecimento:</b>	Q (W/m <sup>3</sup> )
Entrada principal	0	-	Resistência	3,81E+07
Entrada fluido vindo do coletor	0	-		-
Entrada fluido no tanque interno	0	-		-

Os resultados da simulação são mostrados nas figuras que se seguem, para diferentes tempos de simulação. É esperado que o tanque entre em equilíbrio térmico com o ambiente, tendo em vista que o meio externo se caracteriza como um reservatório térmico infinito. Porém, o fluido central, por haver geração térmica, se manterá a uma temperatura superior,

até que seja estabelecido um gradiente de temperatura em regime permanente que satisfaça o fluxo de calor imposto.

A Figura 4.11 nos mostra que o tanque perde calor para o ambiente, devido à convecção. Notoriamente, nas regiões onde há uma maior área de contato com o meio externo, como visto na cor azul nas bordas do reservatório na Figura 4.11, ocorre uma intensa variação de temperatura gerada pela perda de calor.

No que tange aos perfis de velocidade, é esperado que o fluido se movimente com a variação de temperatura, pois a variação da densidade afeta a massa específica da água sujeita à força do campo gravitacional. Observa-se na Figura 4.12 que em apenas 5 segundos após o repouso, já é notável a formação de vórtices, especificamente nas regiões próximas à entrada e à saída de fluido. Este fato deve-se ao resfriamento da porção do fluido mais próxima da superfície do reservatório, que por consequência fica mais densa e se desloca no sentido vertical, dessa forma resultando em um vórtice devido ao atrito viscoso entre as moléculas do fluido.

Conforme ilustrado na Figura 4.13, devido ao alto valor hipotético da condutividade do material sólido e do coeficiente de troca de calor entre o exterior e o reservatório térmico, após 10 segundos o reservatório manifesta drástica queda na temperatura, principalmente na superfície externa. Igualmente é notável, na região em amarelo na parte central do tanque interno, a resistência térmica em temperatura elevada, o que é esperado devido à geração térmica.

Aos 15 segundos, conforme mostrado na Figura 4.14, os efeitos comentados de resfriamento da parte sólida se intensificam, sendo possível, notar o resfriamento da parte sólida do tanque interno contrastando com a temperatura do fluido. Observando-se, na mesma figura, na parte adjacente superior da resistência, nota-se uma região de temperatura superior ao restante do fluido. Essa região, aquecida acima da resistência, apresenta menor densidade devido ao aumento de temperatura, portanto se desloca ascendentemente sob efeito de forças de empuxo.

A Figura 4.15 ilustra novamente as regiões de entrada e/ou saída, em que o vórtice formado pelo fluido por efeito de empuxo intensifica-se, sendo possível notar o fluido saindo da região na direção vertical descendente.

Na Figura 4.20, no tempo de 15 segundos, apesar deste curto período de tempo, devido à alta condutividade do sólido o fluido interno na interface fluido/sólido resfria rapidamente, deslocando-se no sentido descendente.

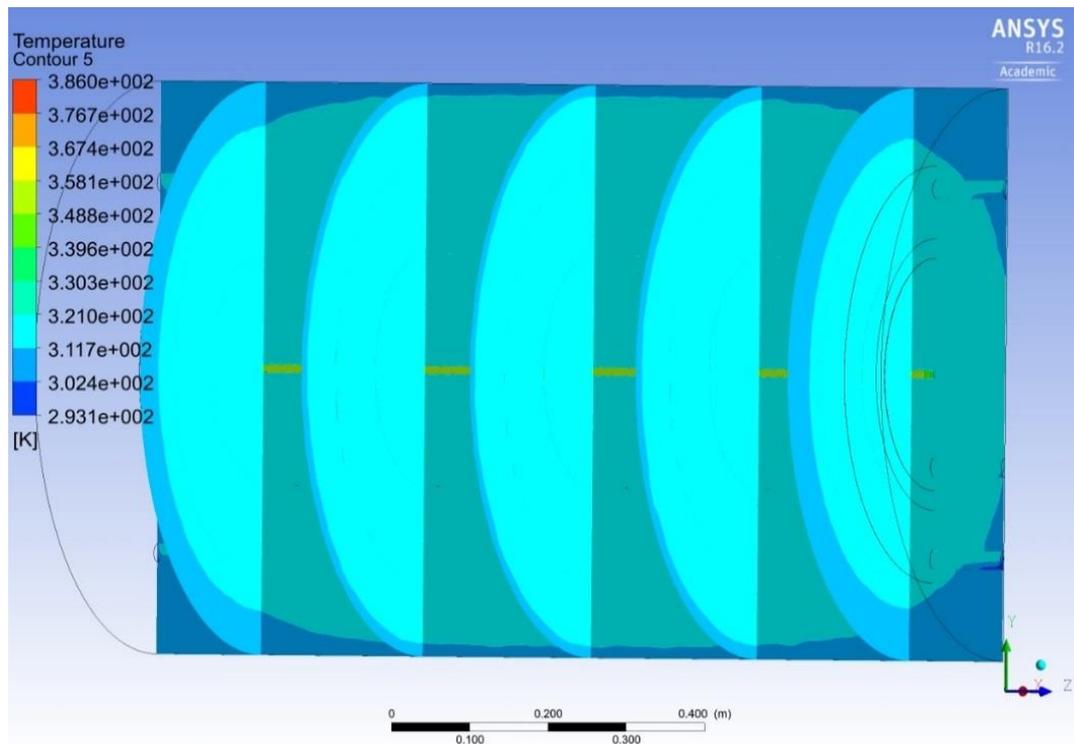


Figura 4.11 – Imagem gráfica com vista do reservatório de perfil do campo de temperatura nos planos da secção longitudinal e planos perpendiculares no tempo de 5 segundos.

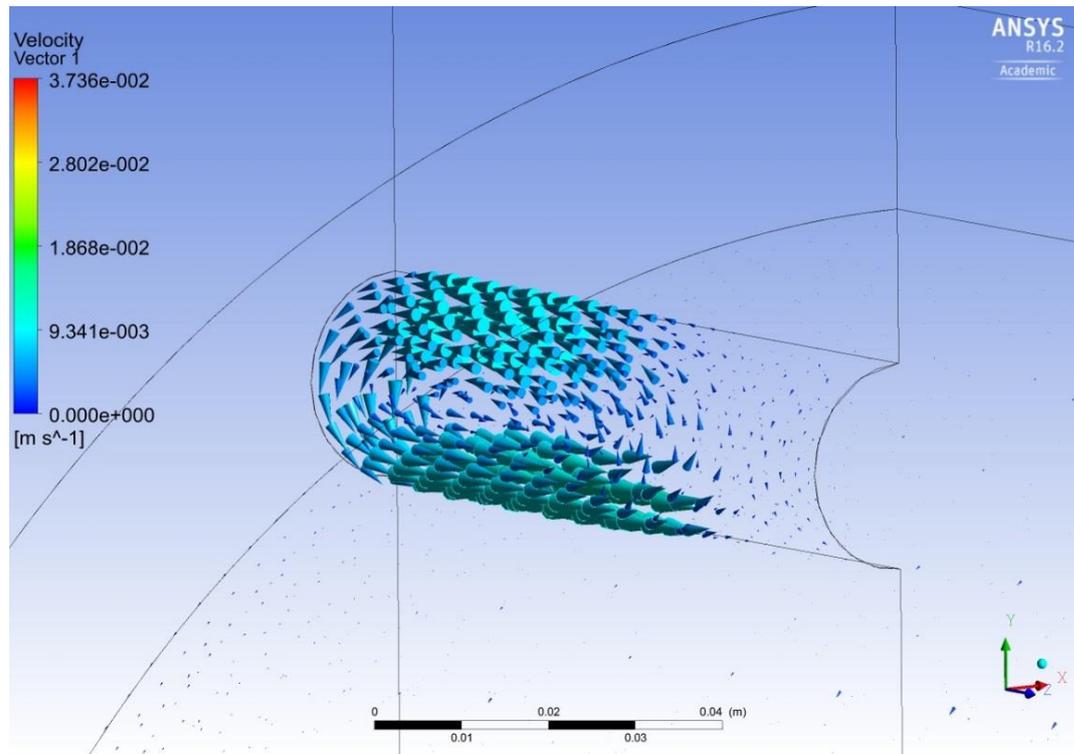


Figura 4.12 – Imagem gráfica com vista do campo de velocidade de uma das regiões de entra/saída de fluido no tempo de 5 segundos.

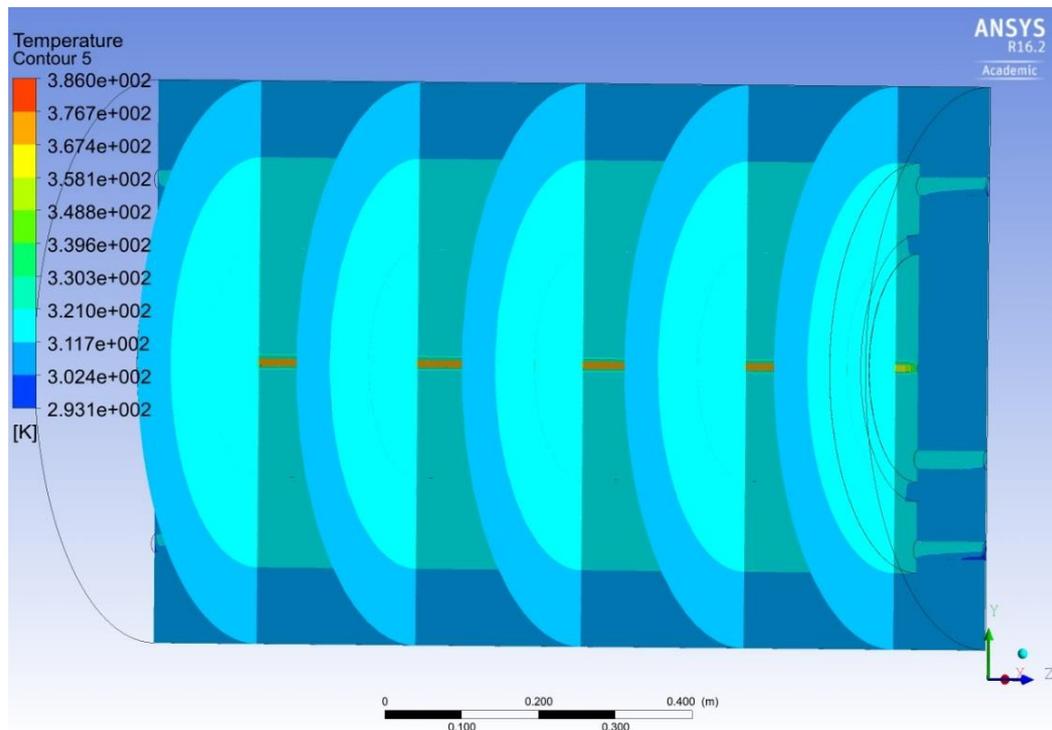


Figura 4.13 – Imagem gráfica com vista do reservatório de perfil do campo de temperatura nos planos da secção longitudinal e planos perpendiculares no tempo de 10 segundos.

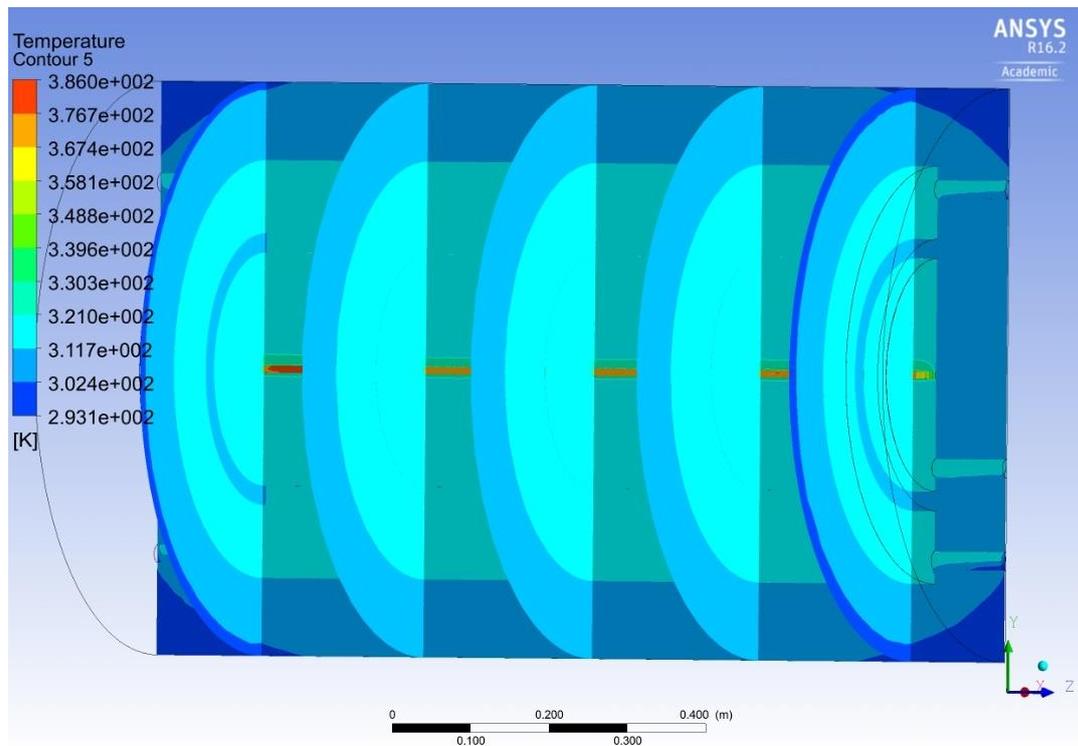


Figura 4.14 – Imagem gráfica com vista do reservatório de perfil do campo de temperatura nos planos da secção longitudinal e planos perpendiculares no tempo de 15 segundos.

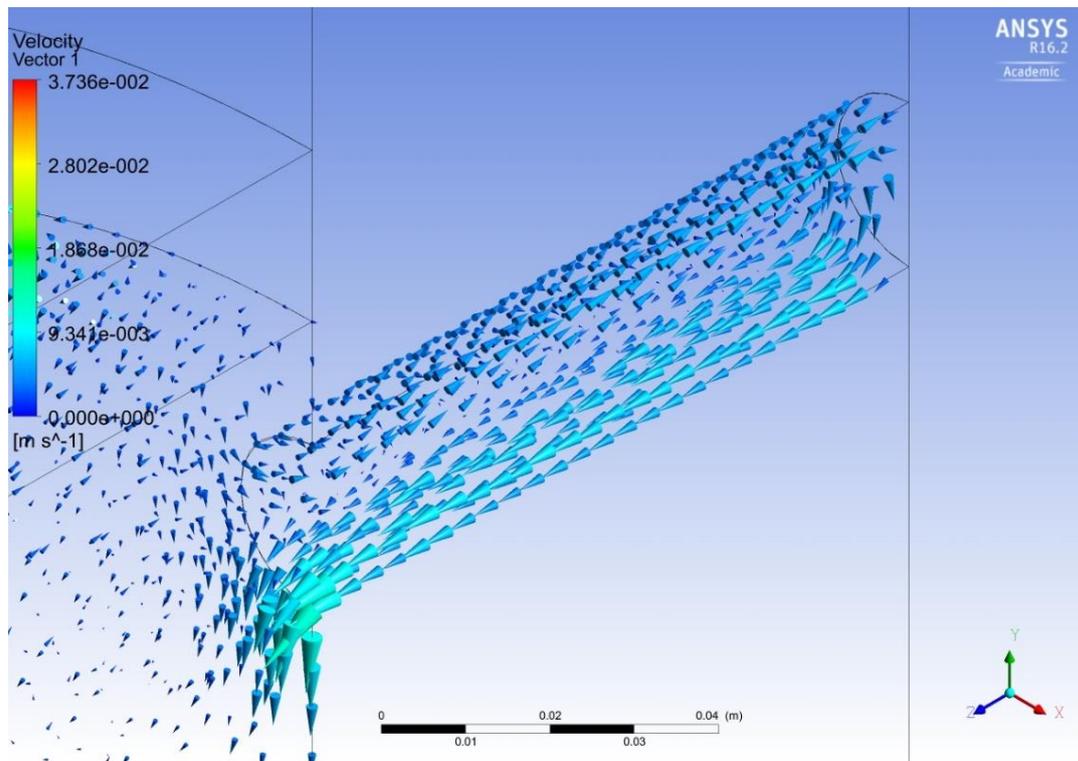


Figura 4.15 – Imagem gráfica do campo de velocidade de uma das regiões de entrada/saída de fluido no tempo de 15 segundos.

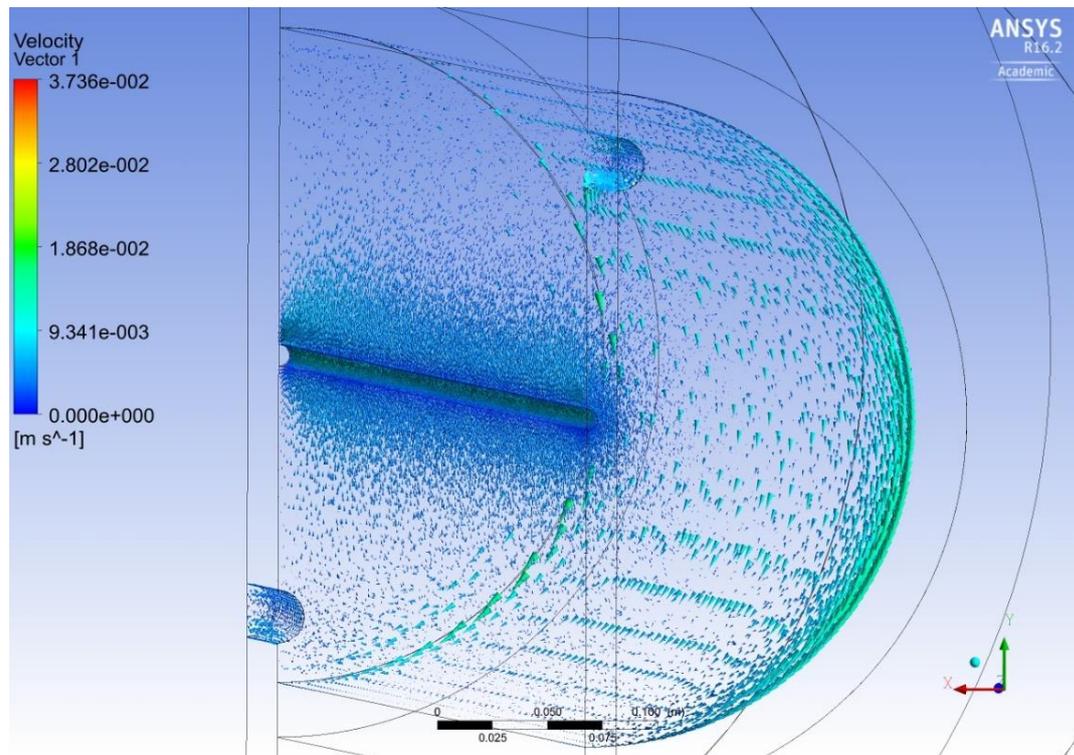


Figura 4.16 – Imagem gráfica com vista de perfil do campo de velocidade do fluido interno no tempo de 15 segundos.

No tempo de 30 segundos, conforme ilustrado na Figura 4.27, o resfriamento se intensifica, conforme esperado, porém, o fluido, por possuir menor valor de condutividade, sofre um resfriamento mais lento. No entanto, nas proximidades da resistência elétrica, é possível observar o fluido aquecido em uma região delimitada na parte superior adjacente da resistência, a formação dessa região se deve à transferência de calor do gradiente térmico estabelecido entre a resistência e o fluido interno.

Na Figura 4.18, pode ser observado no escoamento do tanque interno, o deslocamento ascendente do fluido aquecido pela resistência e o descendente do resfriado em contato com a superfície do tanque interno. A Figura 4.19 ilustra o deslocamento do fluido resfriado no tanque externo, onde evidencia-se o resfriamento na interface fluido e sólido, no qual a velocidade é maior.

Finalizando as análises de malha, estabilidade e de limites teóricos é possível concluir que o modelo do reservatório duplo tanque é consistente e quando submetido às simulações com base teórica conhecida atende aos resultados esperados. Portanto, a análise do modelo pode seguir para a parte de validação e posteriormente dos resultados com boa indicação de que o modelo não apresenta divergências ou erros em sua concepção.

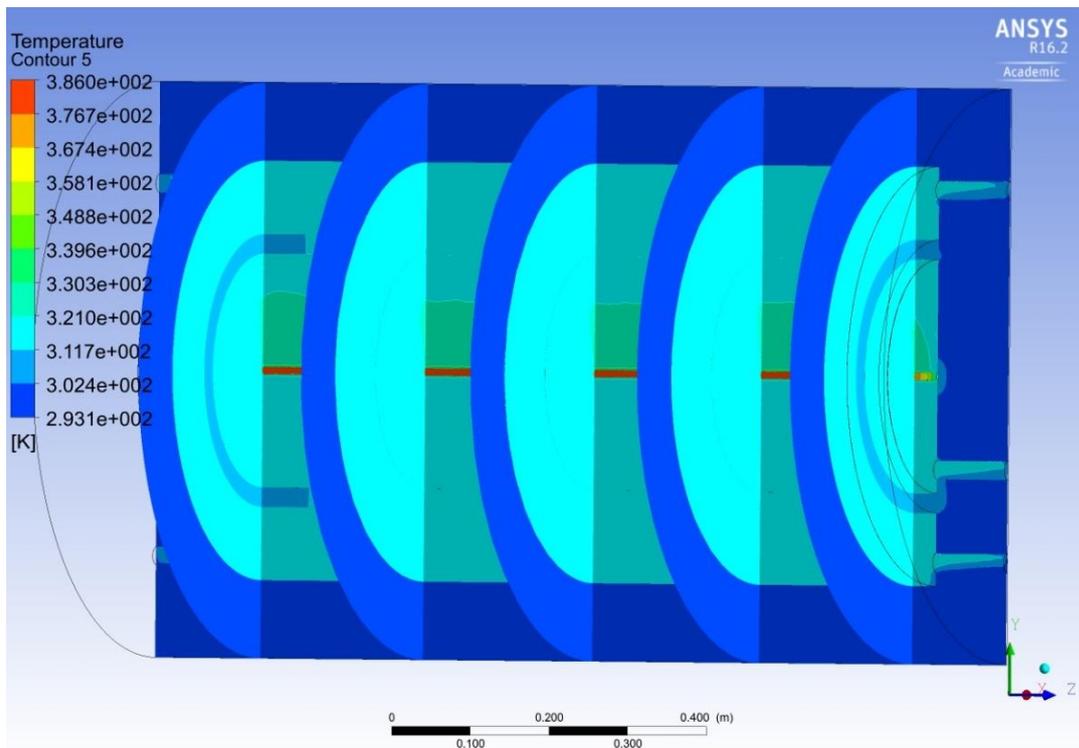


Figura 4.17 –Imagem gráfica com vista do reservatório de perfil do campo de temperatura nos planos da secção longitudinal e planos perpendiculares no tempo de 30 segundos.

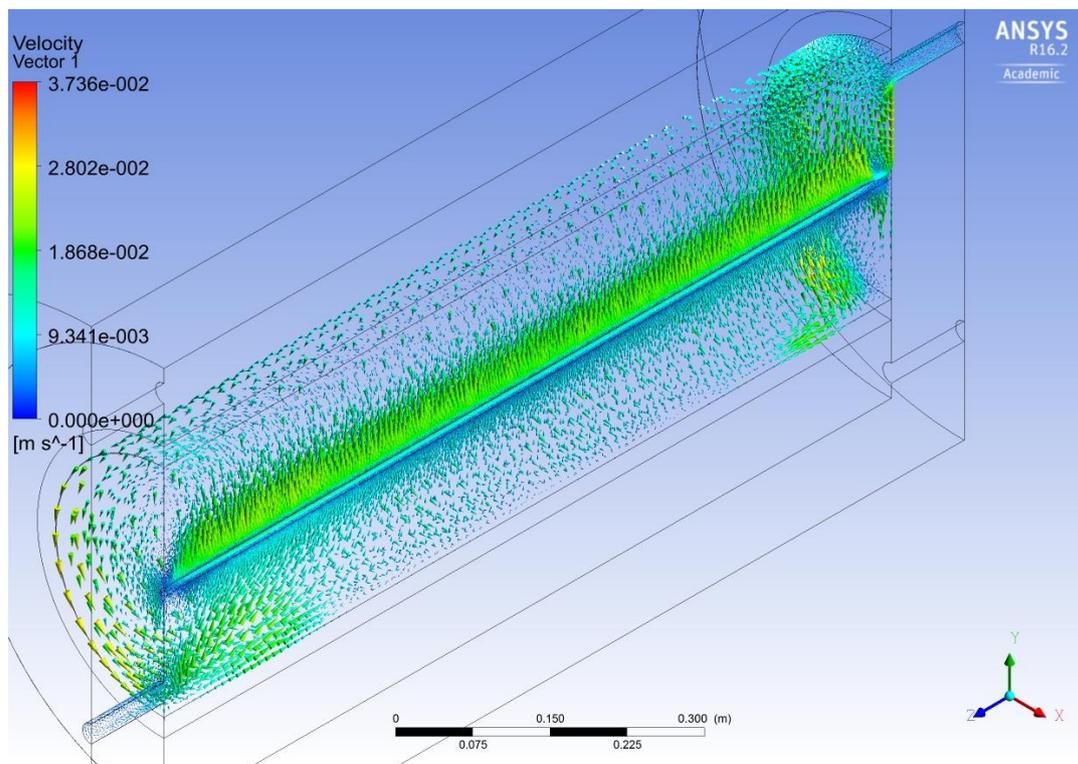


Figura 4.18 –Imagem gráfica com vista de perfil do campo de velocidade do fluido interno no tempo de 30 segundos.

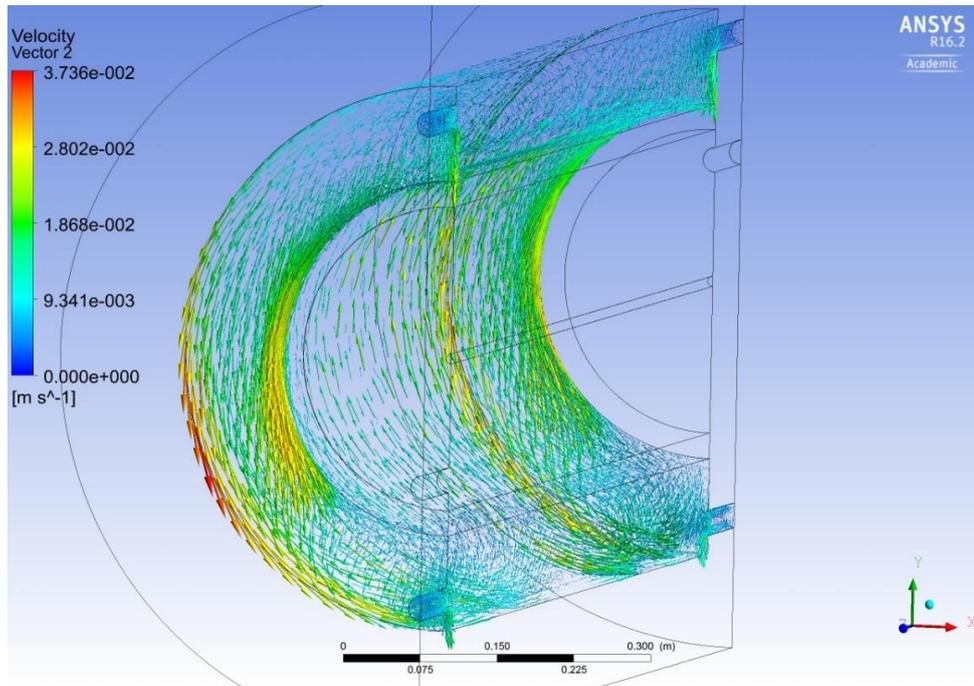


Figura 4.19 – Imagem gráfica com vista de perfil do campo de velocidade do fluido externo no tempo de 30 segundos.

## 5 VALIDAÇÃO DO MODELO

Neste capítulo é abordado o aspecto da validação do modelo de reservatório de duplo tanque utilizado. A validação pode ser realizada experimentalmente, com base em dados de experimento focado no fenômeno físico estudado ou através de dados de referência bibliográfica pertinente.

Tendo em vista a validação utilizando dados bibliográficos, não foram encontrados estudos específicos sobre o reservatório de duplo tanque em questão. No que tange a validação experimental, como discutido anteriormente, não faz parte do escopo deste trabalho o desenvolvimento de um experimento relacionado ao modelo.

Tendo em mente a não validação do reservatório de duplo tanque, optou-se pelo uso de um modelo de reservatório com as mesmas características do modelo em questão. Em outras palavras, decidiu-se por modelar e simular um reservatório de tanque simples com forma dimensional análoga ao reservatório de duplo tanque, e também posicionado horizontalmente. Essa validação é possível devido a disponibilidade de dados de referências afins.

Utilizando a validação do tanque simples, pretende-se dar credibilidade ao modelo do reservatório de duplo tanque, já que para este não é possível realizar uma validação com os dados disponíveis. Isso é possível, pois ambos os modelos contam com características similares de solução, ou seja, mesmas propriedades de materiais, estrutura de malha, similaridade de condições de contorno, mesmo método de solução numérica e domínios com semelhança dimensional.

Para realizar a validação são utilizados os dados obtidos por *S. Alizadeh* [17] de um experimento realizado com reservatório térmico de tanque simples.

### 5.1 Modelo do reservatório

O reservatório de tanque simples de Alizadeh et al.[17] consiste de um cilindro horizontal com volume de 292 litros dotado de entrada e saída de fluido cilíndricas como mostrado na Figura 5.1.

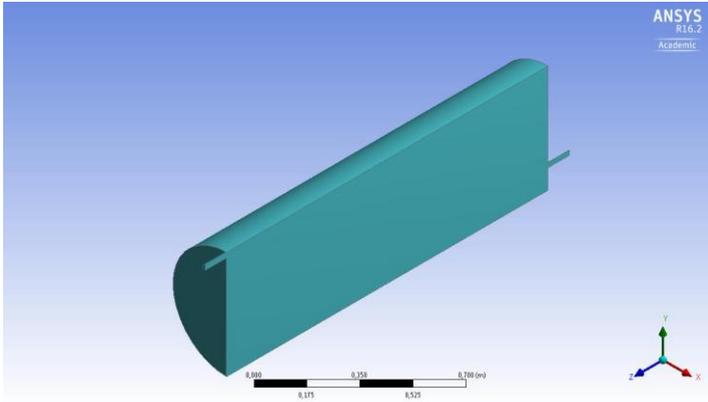


Figura 5.1 – Vista isométrica do reservatório de tanque simples seccionado longitudinalmente.

A região de entrada situa-se a 100 mm da parte inferior do tanque e a região de saída no limite superior do tanque. O diâmetro do tubo de entrada tem 19 mm de diâmetro e o de saída tem 22,7 mm, conforme visto na Figura 5.1.

O tanque foi modelado em CAD reproduzindo a geometria utilizada por [17] e simulado com condições de contorno que reproduzissem com exatidão o processo utilizado. A malha utilizada foi concebida a partir de conhecimento prévio e noções de fluidodinâmica, com 12922 nós e 61856 elementos, conforme pode ser visto na figura 5.2. Posteriormente será realizada uma análise da dependência de malha.

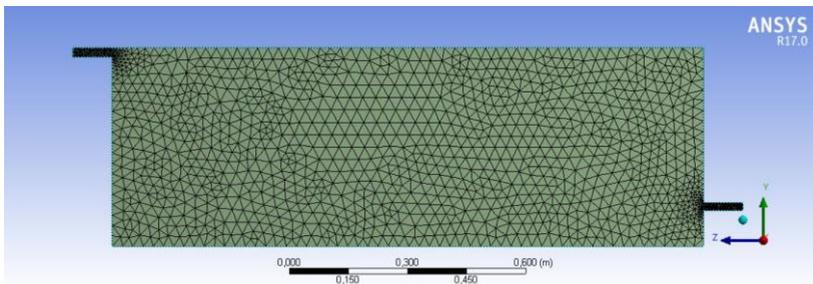


Figura 5.2 – Vista do plano de secção central longitudinal da malha inicial do tanque simples.

## 5.2 Estratificação

Em um dos experimentos conduzidos em [17], no instante inicial o reservatório é completamente carregado de água à temperatura de  $42^{\circ}\text{C}$ , quando começa a ser carregado pela parte inferior com fluido a  $20^{\circ}\text{C}$  e uma vazão de 6 l/min. Desta forma o reservatório apresenta uma determinada estratificação com o passar do tempo, sendo que foram medidos os perfis de temperatura, para três secções centrais, com termopares em linha, em três diferentes pontos longitudinais ao longo da altura. As perdas térmicas foram consideradas muito baixas, logo foram desprezadas da análise.

Esse experimento pode ser considerado ideal para validar a simulação numérica, pois além de condições de carga e descarga, mistura de fluido quente e frio, possibilita a formação da estratificação do reservatório, aspecto essencial na análise de um reservatório térmico. Na comparação de dados espera-se que a presente simulação reproduza os resultados desse experimento.

### 5.2.1 Análise de modelo e parâmetros

Primeiramente as simulações realizadas utilizaram-se do modelo de turbulência  $k-\epsilon$  com parâmetros padrões, devido ao que foi comentado na seção 1.4.2, onde foi citado que Shah et al [7] contesta o amplo uso do modelo de viscosidade laminar nesse tipo de aplicação. Com esse modelo de viscosidade verifica-se a dependência do coeficiente de expansão térmica  $\beta$  na aproximação de Boussinesq e uma correlação polinomial para a densidade em função da temperatura.

A Figura 5.3 ilustra para o tempo de quatro minutos, no eixo das coordenadas, a altura do reservatório em sua parte central, já o eixo das abscissas, ilustra a temperatura em temperatura absoluta Kelvin. Pode-se ver na Figura 5.3, que as curvas correspondentes a quatro minutos de simulação não apresentam a mesma estratificação da curva experimental, além de que nas simulações numéricas, a entrada de fluido frio afeta mais as camadas superiores do tanque. Porém, a discordância numérica e experimental deve ser relevada pelo curto tempo de simulação o que implica que é mais representativo comparar curvas em tempos em que a distribuição de temperatura já está melhor estabelecida.

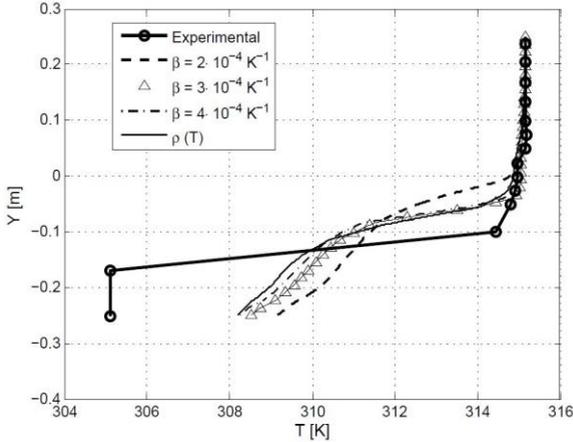


Figura 5.3 – Curvas de estratificação das simulações do modelo k- $\epsilon$  e experimental em 4 minutos.

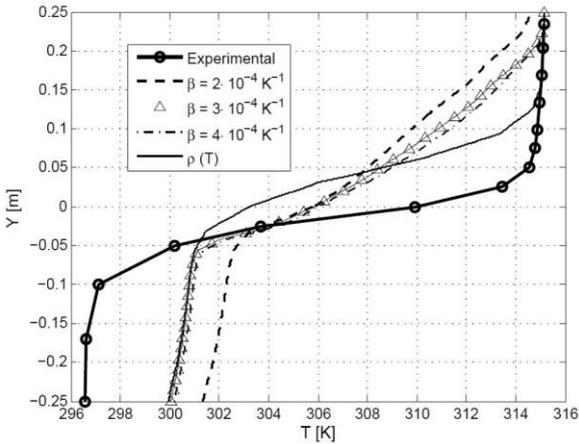


Figura 5.4 – Curvas de estratificação das simulações do modelo k- $\epsilon$  e experimental em 16 minutos.

A Figura 5.4 nos mostra os valores das curvas simuladas e experimentais para dezesseis minutos de simulação, em que pode ser visto uma maior aproximação da curva de ajuste polinomial, como também para o valor de  $\beta = 4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , o que mostra que esse ajuste tende melhor aos valores experimentais.

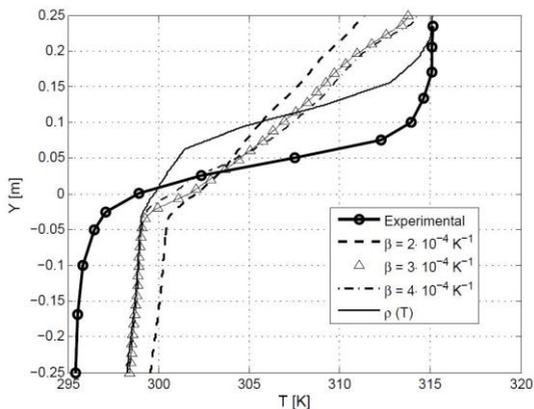


Figura 5.5 – Curvas de estratificação das simulações do modelo  $k\text{-}\epsilon$  e experimental em 28 minutos.

A figura 5.5, apresenta as curvas para vinte e oito minutos decorridos. Nota-se novamente que a curva polinomial e a curva com um coeficiente de expansão maior apresentam maior concordância com a curva experimental. Porém, os valores ainda não são suficientemente próximos para validar o modelo numérico, desta forma, as análises a seguir utilizam o modelo de viscosidade laminar, já que este apresenta melhor estratificação e menor mistura por considerar o escoamento em lâminas, logo se espera uma melhor concordância com os resultados experimentais.

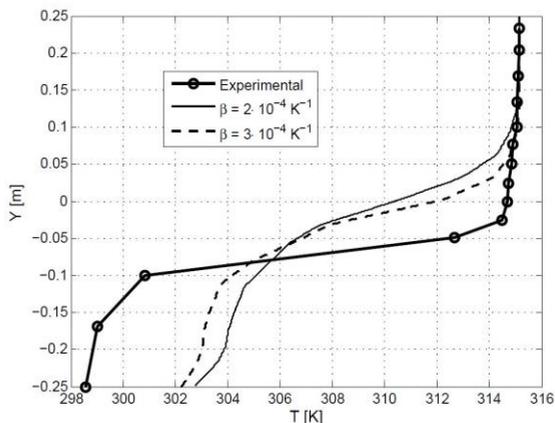


Figura 5.6 – Curvas de estratificação das simulações do modelo laminar e experimental em 12 minutos.

A Figura 5.6 apresenta as curvas de temperatura em relação à altura do tanque para o modelo de viscosidade laminar, sendo que dois coeficientes de expansão térmica são analisados. Notavelmente, pode ser vista uma melhor concordância das curvas numéricas com os resultados experimentais para o modelo de viscosidade laminar do que para o modelo  $k-\epsilon$ , logo, a possibilidade de utilizar esse modelo não é confirmada.

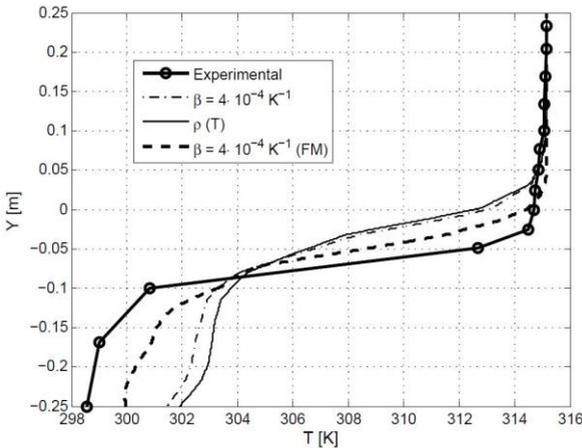


Figura 5.7 – Curvas de estratificação das simulações do modelo laminar e experimental em 12 minutos.

Na Figura 5.7 são apresentadas curvas para o mesmo tempo de doze minutos que a figura anterior, porém para o coeficiente de expansão térmica de  $\beta=4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , sendo que uma das curvas é para a malha utilizada e outra para uma malha mais refinada, que aparece com a sigla *FM*, que significa malha refinada em inglês, também é apresentada a curva de ajuste de densidade em função da temperatura. Notavelmente as curvas se aproximam melhor dos valores experimentais, o que nos leva a crer que a curva de ajuste polinomial e a curva para o valor de  $\beta=4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  apresentam resultados satisfatórios para validação do modelo numérico, especialmente a curva onde utiliza-se a aproximação de Boussinesq com refinamento de malha. A malha do modelo numérico laminar para  $\beta=4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  foi refinada pois apresenta melhores resultados, o que não poderia ser feito para todos os outros modelos devido ao custo computacional. Após esse refinamento de malha, pode ser visto que a curva de  $\beta=4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  para o modelo de viscosidade laminar apresentou boa concordância

com os resultados experimentais. Tendo essas considerações em mente, a Figura 5.8, apresenta os valores das curvas para vinte e oito minutos.

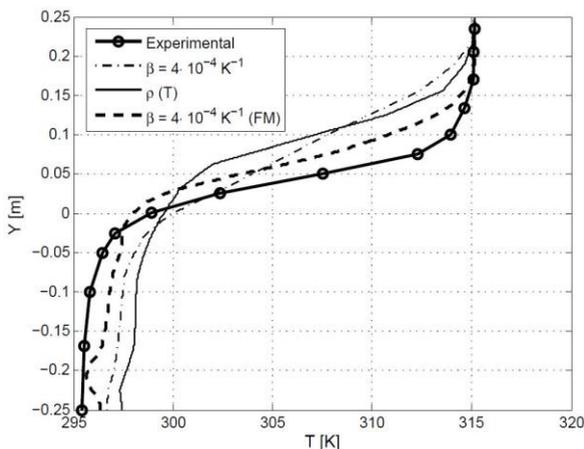


Figura 5.8 – Curvas de estratificação das simulações do modelo laminar e experimental em 28 minutos.

A Figura 5.8 para um tempo decorrido de vinte e oito minutos, concorda com as conclusões anteriores, e a curva com malha refinada para  $\beta = 4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  apresenta a melhor concordância com os resultados experimentais dentre as analisadas até esse ponto. Logo, segue-se para uma análise de dependência de malha para o modelo laminar com  $\beta = 4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ .

### 5.3 Refinamento de malha e validação

Como foi observado na seção anterior, o modelo numérico que utiliza o modelo de viscosidade laminar e a aproximação de Boussinesq, para o termo de empuxo com valor de  $\beta = 4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , apresenta resultados satisfatórios para validação. Por conseguinte, será conduzida uma análise de dependência de malha para esse modelo. Três malhas foram analisadas, em ordem crescente de refinamento, onde a malha 1(CM), que vem da sigla em inglês para malha grossa, representa a malha menos refinada, a 2(MM) para malha um pouco refinada e 3(FM) a malha refinada, os valores de números de elementos e nós das respectivas malhas podem ser observados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Malhas analisadas

Número de:	1 (CM)	2 (MM)	3 (FM)
Nós	12922	43375	71731
Elementos	61856	231718	391165

A Figura 5.9 apresenta as curvas para as três malhas analisadas e a curva dos resultados experimentais. Vale ressaltar que, devido à mistura de fluido a diferentes temperaturas na parte inferior, foi preferido realizar uma análise de estratificação em outra posição longitudinal do tanque, mais próxima da área de descarga, pois os efeitos de carga do fluido nesta região possuem menor influência. Os resultados da Figura 5.9 são referentes a 16 minutos de simulação.

A Figura 5.9 nos mostra boa concordância dos resultados das curvas, especialmente para as malhas 2 e 3. Isto deve-se ao fato de a malha 1 ser menos refinada, o que faz com que ela não capte os efeitos fluidodinâmicos no reservatório com precisão. A curva da malha 2, por outro lado, apresenta resultados bem próximos da malha com um refinamento elevado, mostrando que para essas curvas, os resultados se tornam independentes da malha.

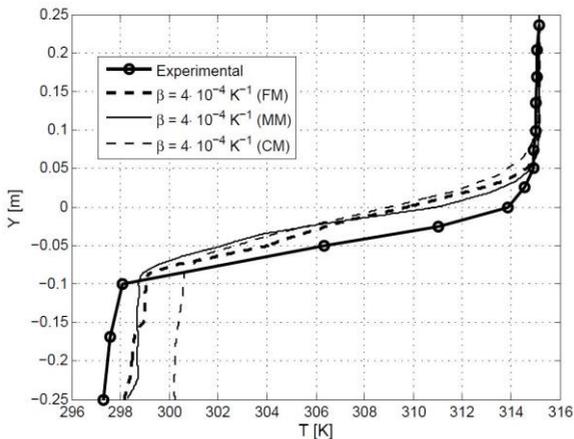


Figura 5.9 – Curvas de estratificação das simulações do modelo laminar e experimental com refinamento de malha em 16 minutos.

A figura 5.10 apresenta os resultados das curvas para vinte e oito minutos decorridos. Notadamente para este tempo, há uma boa concordância das curvas, visto que o efeito dos fenômenos transientes de início de carga é menor. As curvas das malhas 2 e 3 são praticamente idênticas, o que conclui que os resultados são independentes da malha, logo não é necessário um maior refinamento.

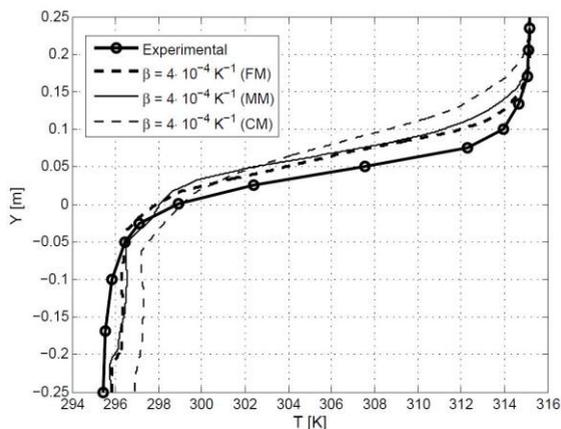


Figura 5.10 – Curvas de estratificação das simulações do modelo laminar e experimental com refinamento de malha em 28 minutos.

Tendo em vista que o refinamento da malha 2 para a malha 3 não apresenta alterações significativas nos resultados, o que foi constatado a partir da comparação das curvas, pode-se concluir que o resultado para a malha 2 é consistente e apresenta concordância com os resultados experimentais.

Como o modelo apresenta uma boa concordância com os resultados experimentais, conclui-se que o modelo de tanque simples foi validado. Portanto, utilizando os mesmos parâmetros e características desse modelo validado, se extrapola sua concordância para o reservatório de duplo tanque, conforme argumentado no início deste capítulo.



## 6 ANÁLISE DA POSIÇÃO DO TANQUE INTERNO

A análise do efeito da posição do tanque interno consiste na comparação das simulações em CFD para três diferentes posições do tanque interno no reservatório, a posição central já ilustrada anteriormente, a posição superior e a inferior. A figura 6.1 ilustra o reservatório com o tanque interno na posição superior.

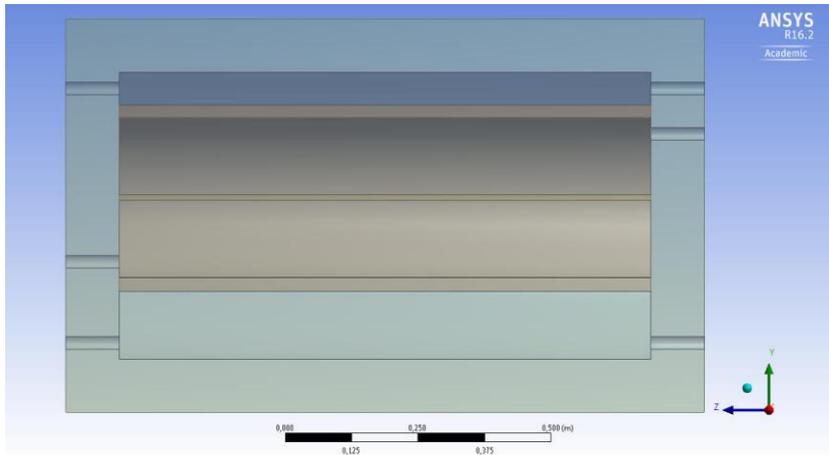


Figura 6.1 – Reservatório com tanque interno na posição superior.

O tanque interno, para a posição superior, está deslocado para cima em 3,36 centímetros em relação ao centro, já o inferior para baixo em 3,36 centímetros. O reservatório para o tanque interno na posição inferior é ilustrado na Figura 6.2.

As simulações realizadas para as três configurações de reservatório contam com as condições de contorno visualizadas na Tabela 6.1, porém o aquecimento auxiliar não foi utilizado nessa análise devido a problemas de convergência e tempo computacional com as configurações de posição superior e inferior do tanque interno.

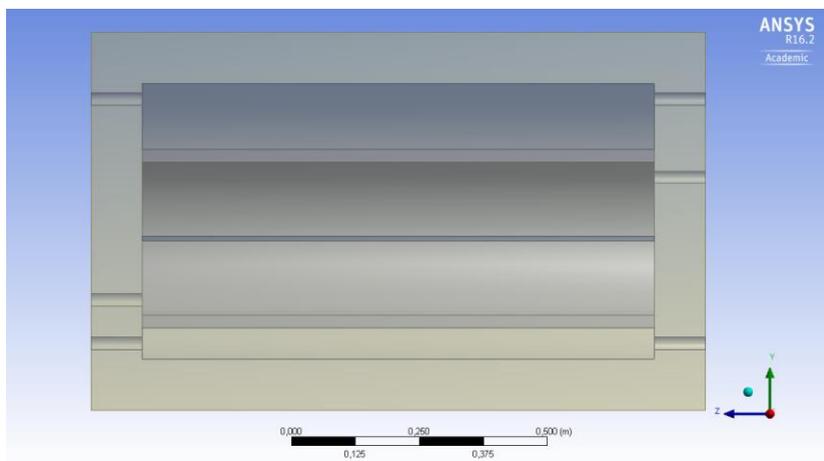


Figura 6.2 – Reservatório com tanque interno na posição inferior.

Tabela 6.1– Condições de contorno da análise da posição do tanque interno.

Convecção Externa:		Temperatura inicial:		
$h$ (W/m <sup>2</sup> K)	6		T (K)	293,15
T (K)	293,15			
Entradas:	$v$ (m/s)	T (K)	Aquecimento:	$Q$ (W/m <sup>3</sup> )
Entrada principal	0,3	293,15	Resistência	0
Entrada fluido vindo do coletor	0,3	301,2		-
Entrada fluido no tanque interno	0,3	301,2		-

## 6.2 Estratificação

A comparação entre os reservatórios com as três diferentes posições do tanque interno, devido ao fato das simulações serem transientes, leva em conta a estratificação ao longo do tempo do reservatório térmico. Para realizar essa análise, o perfil de temperatura no tanque externo é apresentado para as três diferentes configurações do reservatório. Considerando que no instante inicial o reservatório se encontra em equilíbrio térmico à 273,15 K, as curvas da Figura 6.3 ilustram a temperatura em relação à altura, na região do tanque externo, com o tanque interno na posição inferior, para diferentes tempos de simulação.

A Figura 6.3 nos mostra que as curvas tendem aos mesmos valores com o passar do tempo de simulação. A parte inferior do reservatório

apresenta uma região com temperatura praticamente constante, que se alterna em mesma proporção com o passar do tempo; vale ressaltar que essa região é influenciada pela presença do tanque interno. Já a parte central apresenta uma estratificação maior, além de ser uma região de maior mistura, sofre grande influência da presença do tanque interno.

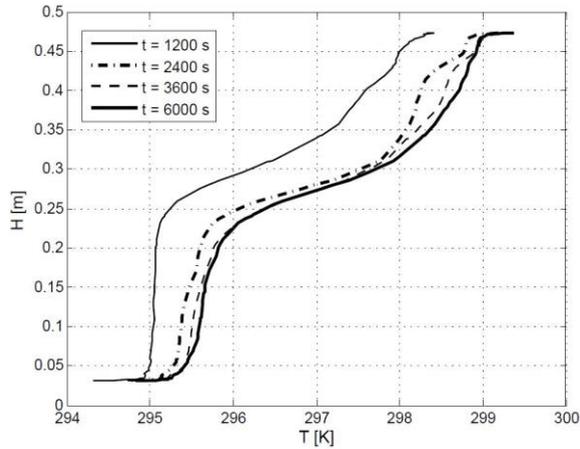


Figura 6.3 – Estratificação do tanque externo para o tanque interno na posição inferior.

Na Figura 6.4, respectiva ao caso do reservatório com o tanque interno na posição central, nota-se, pela inclinação da curva, uma maior estratificação em relação ao reservatório com o tanque interno na posição inferior. A mesma tendência de perfil de temperatura é vista com o passar do tempo nas curvas apresentadas, o que caracteriza que a simulação tende ao regime permanente. Portanto, uma boa forma de realizar uma análise comparativa entre os reservatórios, é para regimes estabelecidos, ou seja, com maior tempo de simulação decorrido.

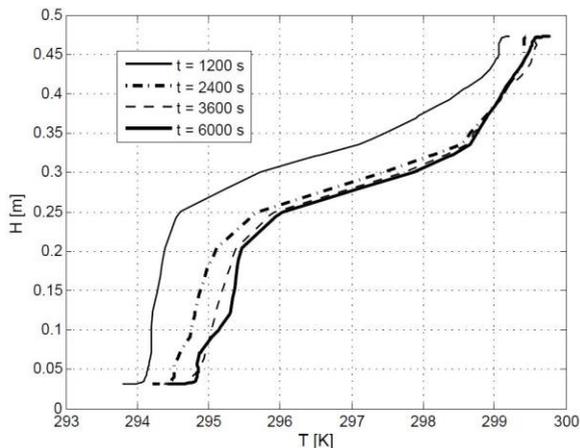


Figura 6.4 – Estratificação do tanque externo para o tanque interior na posição central.

A Figura 6.5 ilustra a estratificação do reservatório com o tanque interno na posição superior. Novamente com o passar do tempo de simulação o perfil tende aos mesmos valores, uma maior estratificação pode ser vista, como também, uma maior variação da temperatura na região inferior do reservatório. Essa maior estratificação deve à redução do volume na parte superior, deslocando o fluido para as outras regiões do tanque externo.

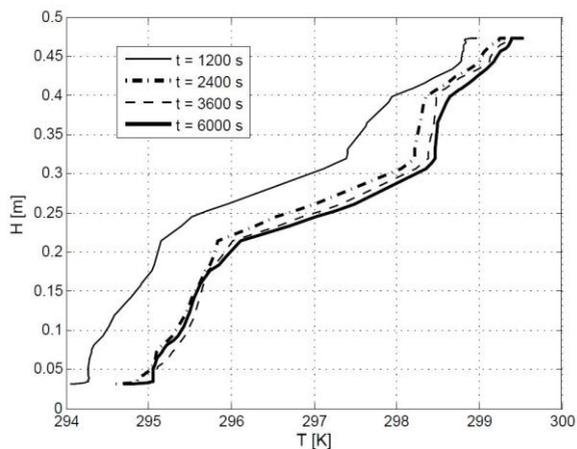


Figura 6.5 – Estratificação do tanque externo para o tanque interior na posição superior.

Levando-se em consideração a tendência de as simulações entrarem em regime, pode ser comparada a estratificação para os três reservatórios analisados, desde que para um maior tempo decorrido. Logo, a Figura 6.6, ilustra a estratificação para os reservatórios para 6000 segundos decorridos.

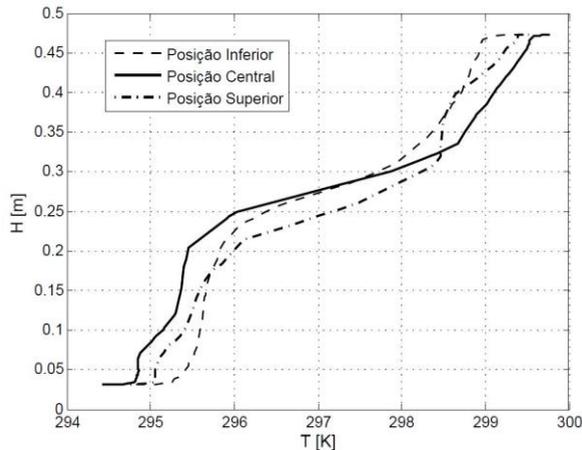


Figura 6.6 – Estratificação do tanque externo no tempo de 6000 segundos para as 3 posições do tanque interno.

A análise comparativa, Figura 6.6, indica que para a posição central, o reservatório externo apresenta menor mistura, o que pode ser visualizado, na parte inferior do reservatório, uma manutenção de menor temperatura, e na superior, o fluido é conservado quente. Já para a posição inferior o reservatório externo apresenta maior mistura em relação aos demais, porém deve ser levado em consideração a presença do tanque interno na parte inferior, fazendo com que o fluido deslocado para a parte superior se misture com o fluido quente.

### 6.3 MIX

Tendo em vista a dificuldade de uma análise qualitativa dos resultados de campo de temperatura e velocidade das simulações, devido à complexidade do reservatório, adota-se uma análise quantitativa em relação a estratificação e ao nível de mistura do reservatório. Tal análise quantitativa é abordada em relação ao número de *MIX*, que quantifica a

mistura do reservatório em uma escala de  $0 \leq MIX \leq 1$ , onde quanto mais próximo da unidade maior a mistura do reservatório.

O equacionamento do cálculo de  $MIX$  é definido conforme [29] por,

$$MIX = \frac{M_{str} - M}{M_{str} - M_{mix}}, \quad (6.1)$$

Onde  $M$  é o momento de energia, que representa a “qualidade” da energia presente no reservatório, em outra palavras, este parâmetro representa o “organização” da energia.  $M_{str}$  e  $M_{mix}$  representam o momento de energia do reservatório perfeitamente estratificado e misturado respectivamente. Esse parâmetro é calculado pela integral que se segue,

$$M = \int_V y e dV, \quad (6.2)$$

onde  $y$  é a altura do reservatório,  $V$  o volume e  $e$  a energia específica por unidade de massa, definida pela equação,

$$e = \rho c_p T, \quad (6.3)$$

onde  $\rho$  é a densidade do fluido,  $c_p$  é o calor específico e  $T$  a temperatura.

Considerando-se que as simulações realizadas estão em regime transiente, o cálculo de  $MIX$  pode ser realizado para diferentes passos de tempo. Porém, deve ser levado em conta, que o posicionamento do tanque interno com fluido aquecido, influencia diretamente o momento de energia discutido no início deste capítulo. Portanto, em uma análise global, quanto mais fluido aquecido na parte superior do reservatório mais “organizado” o reservatório vai estar, logo, apresentando menor mistura, onde o número de  $MIX$  será menor.

O cálculo do número de  $MIX$  da presente análise foi realizado levando-se em conta todo o fluido do reservatório, tanto o fluido contido no tanque externo quanto no tanque interno, para as três diferentes configurações de posicionamento do tanque interno.

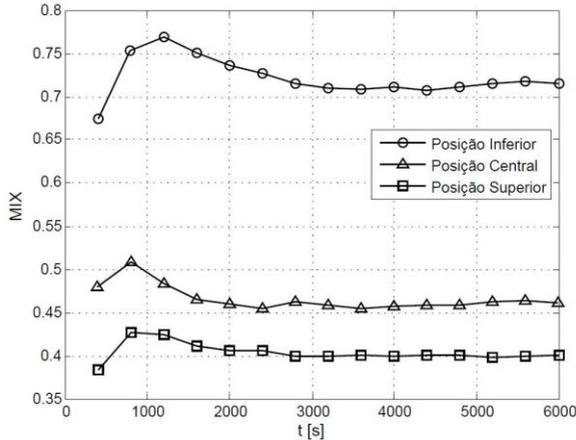


Figura 6.7 – Número de MIX para as três posições do tanque interno.

A Figura 6.7 nos mostra que a partir de um certo tempo decorrido, o número de *MIX* se mantém constante, o que indica que o parâmetro apresenta um comportamento estável, logo, indicado para uma análise comparativa. Pode ser observado que o reservatório com tanque interno na posição inferior apresenta um número de *MIX* bem superior aos demais reservatórios, o que indica que há uma maior mistura do fluido, e também reflete o fato da região de fluido quente, no tanque interno, estar na parte inferior do reservatório. Contudo, como, mesmo no começo da simulação, onde há pouco fluido quente no reservatório interno, o reservatório para a posição inferior já apresenta um número de *MIX* superior aos demais, pode-se concluir que essa posição apresenta um desempenho inferior em termos de *MIX*, o que significa que o reservatório está “menos organizado”.

No que tange aos reservatórios para a posição central e superior, seus resultados estão próximos, indicando que os dois possuem um melhor desempenho em termos de *MIX* que o reservatório para a posição inferior. No entanto, o reservatório respectivo a posição superior leva vantagem, por apresentar menor nível de mistura e, portanto, melhor desempenho. Também deve ser levado em consideração a influência da presença do tanque interno enclausurando fluido quente na parte superior, o que favorece a performance do reservatório em termos de *MIX*, pois essa porção de fluido quente à uma altura elevada apresenta maior momento de energia.

## 6.4 Comparação com um reservatório de tanque simples

Repetindo a mesma metodologia utilizada na seção anterior, um comparativo entre o reservatório de duplo tanque com o tanque interno na posição central e de tanque simples foi realizado. Para tal análise o número de *MIX* é utilizado. Os dois reservatórios foram simulados com as mesmas condições de contorno da análise da posição do tanque interno, possuem o mesmo volume e regiões de entrada e saída de fluido nas mesmas posições. A Figura 6.8 apresenta os resultados de *MIX* para os reservatórios.

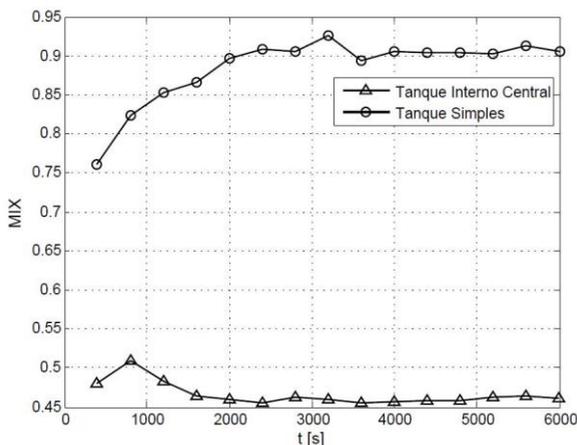


Figura 6.8 – Número de *MIX* do reservatório de duplo tanque na posição central e do reservatório de tanque simples

A Figura 6.8 nos mostra que o reservatório de tanque simples apresenta um número de *MIX* superior ao de duplo tanque ao longo de toda simulação. Esse fato nos leva a concluir que o reservatório de duplo tanque apresenta menor mistura entre os fluidos quente e frio. Também como já mencionado neste capítulo, o tanque interno age como uma barreira para o fluido quente, aumentando a “organização do reservatório”.

Os resultados indicam que o desempenho do reservatório de duplo tanque é de quase 100% maior ao reservatório de tanque simples em relação ao número de *MIX*. Como comentado, devido aos reservatórios possuírem concepções deferentes, uma comparação direta em termos de *MIX* não avalia de forma satisfatória o desempenho destes. Porém é uma indicação de que o reservatório de duplo tanque é mais adequado para utilização em sistemas de aquecimento solar de água doméstico.

## 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho apresenta uma análise térmica e fluidodinâmica de uma nova concepção de reservatórios térmicos, o reservatório térmico de duplo tanque, que consiste na inserção de um reservatório de volume menor dentro de um de maior volume, ambos cilíndricos e horizontais.

Nesse contexto, primeiramente, foi desenvolvido um modelo computacional, a consistência desse modelo foi provada, tendo sido posteriormente comparado com a literatura. Na etapa final, foram obtidos resultados coerentes e que satisfazem os objetivos deste trabalho.

No que tange o desenvolvimento, a modelagem, construção de malha e definição dos parâmetros mostrou-se eficaz. Vale ressaltar, que a análise conduzida neste trabalho, encontrou um ótimo entre refinamento de malha, qualidade dos resultados e custo computacional. Ainda, referente a análise do modelo, o estudo conduzido em termos de limites teóricos, se mostrou pertinente, agregando solidez ao trabalho e apresentado resultados esperados. Após o desenvolvimento, análise de malha, limites teóricos, foi abordado a estabilidade do modelo, que foi comprovada, finalizando por dar credibilidade a consistência do modelo.

A validação do modelo de tanque simples se mostrou um ponto crucial para o trabalho. A realização de uma validação agrega consistência e credibilidade para o trabalho, entretanto, como pode ser observado, devido ao ineditismo da concepção do reservatório, a validação foi realizada tomando por base um reservatório de tanque simples. Tendo em vista o processo adotado na validação do reservatório, é indicado que essa nova concepção seja validada experimentalmente, porém, a boa concordância da validação com os resultados experimentais bibliográficos satisfazem os objetivos deste trabalho.

Finalmente, a análise da posição do tanque interno, através da análise de estratificação, concluiu-se que o reservatório de duplo tanque para o tanque interno na posição central e superior apresentam menor mistura e melhor estratificação no tanque externo. Já em termos globais, o reservatório para a posição superior, pela análise do número de *MIX*, mostrou vantagem em termos de menor mistura, logo “melhor organização do reservatório”. Conclui-se que o tanque interno em uma posição mais elevada internamente ao reservatório, pela natureza da análise de *MIX*, tende a apresentar melhores resultados, o que enfatiza que a configuração do reservatório para a posição superior é mais indicada na concepção de um reservatório de duplo tanque.

## 7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Seguindo a análise e desenvolvimento dessa nova concepção de reservatório térmico para sistemas de aquecimento de água solar doméstico, sugere-se as seguintes abordagens:

- Validação experimental dos resultados obtidos.
- Desenvolvimento de um modelo matemático simplificado para ambiente *TRNSYS*, visando analisar o comportamento do reservatório inserido em um *SASAD*.
- Simulação em ambiente *TRNSYS* para verificar o desvio em termos numéricos no tocante à estratificação.
- Simulação em ambiente *TRNSYS* para verificar o efeito do isolamento térmico e a variação periférica de sua espessura no tanque interno.

## REFERÊNCIAS

- [1] DASOL - ABRAVA <http://www.dasolabrava.org.br/informacoes/dados-de-mercado/> acessado em junho de 2015.
- [2] ELETROBRAS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.; PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso – Ano Base 2005 – Classe Residencial - Relatório Brasil. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2007.
- [3] PASSOS, L. **Cenários de impactos da energia solar para aquecimento de água doméstico no contexto de usuários de chuveiros elétricos no Brasil**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina 2011.
- [4] KOLLER, T. **Simulation and performance analysis of a solar domestic hot water system controlled by weather forecast information**. Diploma Thesis. Technische Universität München. 2012.
- [5] CARMINATTI, H. Análise dos efeitos dos erros da previsão meteorológica em um sistema de aquecimento solar de água doméstico com duplo tanque e com sistema de controle de pré-aquecimento. **Congresso Nacional dos Estudantes de Engenharia Mecânica** 2014.
- [6] COLLE, S., STARKE, A. R., PASSOS, L. A. D. A., & VEIGA, C. E. Uma análise de sistemas de aquecimento solar de água para uso doméstico no Brasil. **In: III Congresso Brasileiro de Energia Solar**. 2010.
- [7] SHAH, L. J.; FURBO, S. Entrance effects in solar storage tanks. **Solar Energy**, v. 75, n. 4, p. 337-348, 2003.
- [8] LUNDH, M., ZASS, K., WILHELMS, C., VAJEN, K., JORDAN, U. Influence of store dimensions and auxiliary volume configuration on the performance of medium-sized solar combisystems. **Solar energy** 84 1095-1102. 2010.
- [9] KLEIN, S. A. et al., TRNSYS 16 - **A Transient System Simulation Program**. Solar Energy Laboratory, University of Madison, USA.
- [10] International Energy Agency – Solar Heating Worldwide - IEA – SHC Task 32 <http://archive.iea-shc.org/task32/> acessado em junho de 2015.

- [11] DRUCK, H., HAHNE, E. Hot water performance of solar combistores - Description of a test method and the experience gained with the application of the method on three different types of combistores. **EuroSun98** – ISES. 1998.
- [12] prEN 12977-3. Performance test methods for solar water heater stores. **European Standard**. February, 2008.
- [13] DRUCK, H. **Multiport store model model for trnsys type 340**. University of Stuttgart – ITW. March, 2006.
- [14] KNUDSEN, S. **Heat transfer in a tank-in-tank combi store**. Report BYG.DTU R – 025 Denmark, 2002.
- [15] IEVERS, S; LIN, W. Numerical simulation of three-dimensional flow dynamics in a hot water storage tank. **Applied Energy**, v. 86, n. 12, p. 2604-2614, 2009.
- [16] ARSLAN, M; IGCI, A. A. Thermal performance of a vertical solar hot water storage tank with a mantle heat exchanger depending on the discharging operation parameters. **Solar Energy**, v. 116, p. 184-204, 2015.
- [17] ALIZADEH, S. An experimental and numerical study of thermal stratification in a horizontal cylindrical solar storage tank. **Solar Energy**, v. 66, n. 6, p. 409-421, 1999.
- [18] NIZAMI, D. J., LIGHTSTONE, M. F., HARRISON, S. J., & CRUICKSHANK, C. A. Negative buoyant plume model for solar domestic hot water tank systems incorporating a vertical inlet. **Solar Energy**, v. 87, p. 53-63, 2013.
- [19] FAN, J; FURBO, S. Buoyancy driven flow in a hot water tank due to standby heat loss. **Solar Energy**, v. 86, n. 11, p. 3438-3449, 2012.
- [20] YAZDANSHENAS, E., FURBO, S. Theoretical study of solar combisystems based on bikini tanks and tank-in-tank stores. **International Journal of Numerical Methods for Heat And Fluid Flow** 22 251-262, 2012.
- [21] DAHM, J., BALES, C., LORENTZ, K., DALENBACK, J. O. Evaluation of storage configurations with internal heat exchangers. **Solar Energy** 62 407-417, 1998.
- [22] ANDERSEN, E., FURBO, S. Investigation of solar combi systems. **ISES Solar World Congress**, 2005.

- [23] JORDAN, U., VAJEN. K. Influence of the DHW Load Profile on the Fractional Energy Savings\_A Case Study of a SolarCombi\_System with Trnsys Simulations. **Solar energy** 69 197-208, 2000.
- [24] KALOGIROU, S. A. Environmental benefits of domestic solar energy systems. **Energy Conversion Management** 45 3075-3092, 2004.
- [25] ANSYS FLUENT <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+Fluent> acessado em junho de 2015.
- [26] SALAZAR, J. P. L. C. **Economia de energia e redução do pico da curva de demanda para consumidores de baixa renda por agregação de energia solar térmica**. Dissertação. 2004.
- [27] MATLAB version 7.10.0. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2010.
- [28] MALYSKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. ISBN 8521613962. 2ª Edição–2004. LTC, 1995.
- [29] ADAMS, D. E. **Design of a flexible stratification manifold for solar water heating systems**. Master Thesis Colorado State University, 1993.



## APÊNDICE A

File:Dimensionamento.EES

16/02/2017 14:41:08 Page 1

EES Ver. 10.104; #1488: For use only by students and faculty in Mechanical Engineering, FAPEU, Florianopolis, Brazil

*Domensionamento tanques*

$$e_{ie} = 0,1 \quad [m] \quad \text{espessura tanque externo}$$

$$e_{ii} = 0,025 \quad [m] \quad \text{espessura tanque interno}$$

$$L = 1 \quad [m] \quad \text{comprimento do tanque}$$

$$V_{ii} = 0,07 \quad \text{Volume interno tanque interno}$$

$$V_{ie} = 0,13 + V_{ei} \quad \text{Volume interno do tanque externo}$$

$$D_{ei} = D_{ii} + 2 \cdot e_{ii}$$

$$D_{ee} = D_{ie} + 2 \cdot e_{ie}$$

$$V_{ii} = \frac{L \cdot 3,142 \cdot D_{ii}^2}{4} \quad \text{Volume interno do tanque interno}$$

$$V_{ei} = \frac{L \cdot 3,142 \cdot D_{ei}^2}{4} \quad \text{Volume externo do tanque interno}$$

$$V_{tot} = \frac{L \cdot 3,142 \cdot D_{ee}^2}{4} \quad \text{Volume externo do tanque externo}$$

$$V_{ie} = \frac{L \cdot 3,142 \cdot D_{ie}^2}{4} \quad \text{Volume interno do tanque externo}$$

SOLUTION

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$$D_{ee} = 0,7357$$

$$D_{ei} = 0,3485$$

$$D_{ie} = 0,5357$$

$$D_{ii} = 0,2985$$

$$e_{ie} = 0,1$$

$$e_{ii} = 0,025$$

$$L = 1$$

$$V_{ei} = 0,09541$$

$$V_{ie} = 0,2254$$

$$V_{ii} = 0,07$$

$$V_{tot} = 0,4251$$

No unit problems were detected.