

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANDRÉ LUIS SCHNEIDER

**ESTUDO NUMÉRICO DA ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA EM UM
RESERVATÓRIO DE ÁGUA DO TIPO MULTITANQUE**

PATO BRANCO

2023

ANDRÉ LUIS SCHNEIDER

**ESTUDO NUMÉRICO DA ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA EM UM
RESERVATÓRIO DE ÁGUA DO TIPO MULTITANQUE**

Numerical study of thermal stratification within multi-tank water storage

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Me. Marcio Tadayuki Nakaura

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Augusto
Aparecido Gomes

PATO BRANCO

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ANDRÉ LUIS SCHNEIDER

**ESTUDO NUMÉRICO DA ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA EM UM
RESERVATÓRIO DE ÁGUA DO TIPO MULTITANQUE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica
do Curso de Bacharelado em Engenharia
Mecânica da Universidade Tecnológica Federal
do Paraná.

Data de aprovação: 01 de dezembro de 2023

Profa. Geocris Rodrigues Dos Santos
Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco

Prof. Joviano Janjar Casarin
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco

Prof. Francisco Augusto Aparecido Gomes - Coorientador
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco

Prof. Marcio Tadayuki Nakaura - Orientador
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco

PATO BRANCO

2023

Dedico esse trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família e amigos, com profundo carinho pelo apoio fundamental que me proporcionaram ao longo desta jornada acadêmica. Em especial, agradeço à minha mãe, pai, e irmão, bem como aos amigos do DDO e Ramalas, cuja amizade e incentivo foram inestimáveis.

Também expresso minha sincera gratidão aos Professores Marcio Tadayuki Nakaura e Francisco Augusto Aparecido Gomes, cuja orientação e conhecimento enriqueceram este trabalho. Não posso deixar de agradecer à nossa instituição de ensino e a todos os colegas da universidade, cuja troca de conhecimento e apoio mútuo foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

RESUMO

A utilização de energia solar para aquecimento de água é uma importante estratégia de aproveitar energia renovável. Nesse contexto, faz-se necessário o uso de um reservatório térmico de água eficiente, uma vez que a energia proveniente do Sol não está constantemente disponível ao longo das 24 horas do dia. Estudos indicam que reservatórios térmicos com configuração na vertical apresentam melhor eficiência, quando comparados com os usuais horizontais. No entanto, reservatórios verticais podem demandar mais espaço vertical (altura), o que pode ser problemático na instalação desses tanques em ambientes urbanos ou com restrições espaciais. Este trabalho realizou um estudo numérico de reservatórios térmicos na configuração multitanque, ou seja, um reservatório mais baixo porém mantendo a proporção ideal de um tanque vertical. Os resultados obtidos mostram que o reservatório multitanque comporta-se como um reservatório vertical de mesmo volume de água. No estudo realizado, o reservatório multitanque apresentou boa estratificação térmica. A temperatura média obtida para água após 4 horas foi de 57,5 °C, para o volume de 780 litros. Observou-se também que a forma como a água quente entra no reservatório influencia no comportamento da estratificação térmica e consequentemente no tempo de aquecimento da água.

Palavras-chave: aquecimento de água; energia solar; estratificação térmica; reservatório multitanque; reservatório térmico.

ABSTRACT

The utilization of solar energy for water heating represents a significant strategy for harnessing renewable energy. In this context, the efficient use of a water thermal reservoir becomes necessary due to the intermittent availability of solar energy throughout the 24-hour cycle. Studies indicate that thermal reservoirs with a vertical configuration exhibit better efficiency compared to the typical horizontal ones. However, vertical reservoirs may require more vertical space (height), which can be problematic during the installation of these tanks in urban environments or areas with spatial restrictions. This work conducted a numerical study of thermal reservoirs in a multi-tank configuration, where the reservoir is lower, however maintaining the ideal proportion of a vertical tank. The obtained results indicate that the multi-tank reservoir behaves similarly to a vertical reservoir with the same water volume. In the conducted study, the multi-tank reservoir exhibited effective thermal stratification, raising the water temperature to an average of 57.5°C within a 4-hour period for a water volume of 780 liters. It was also observed that the manner in which hot water enters the reservoir influences the thermal stratification behavior and, consequently, the water heating time.

Keywords: multi-tank reservoir; solar energy; thermal reservoir; thermal stratification; water heating.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de aquecimento solar de água por sistema termossifão	10
Figura 2 – Diferentes camadas de estratificação térmica em um reservatório de água quente	11
Figura 3 – Arranjo estrutural de um reservatório multitanque	12
Figura 4 – Eficiência de um aquecedor solar em relação a razão L/D de um reservatório térmico.	14
Figura 5 – Reservatórios analisados por Eames e Norton.	15
Figura 6 – Distribuição de temperatura ao longo dos reservatórios térmicos estudados por Eames e Norton.	16
Figura 7 – Reservatório térmico com obstáculo em formato de coroa e sua respectiva estratificação térmica obtida através de simulação.	17
Figura 8 – Estratificação térmica em diferentes geometrias de um reservatório.	18
Figura 9 – Reservatório multitanque composto por tanques horizontais sobrepostos.	19
Figura 10 – (a) Balanço de energia em um nódulo infinitesimal de um reservatório térmico; (b) Balanço de energia na parede do reservatório.	20
Figura 11 – Fluxo de massa entrando e saindo do elemento de fluido	23
Figura 12 – Forças superficiais agindo sobre um elemento de fluido na direção x	25
Figura 13 – Dimensões (em milímetros) do reservatório multitanque.	30
Figura 14 – Vista isométrica do reservatório multitanque, com efeito de transparência.	30
Figura 15 – Vista da malha gerada para o reservatório: (a) Isométrica, reservatório fechado, (b) Isométrica, com corte transversal para vista da malha nos cilindros	31
Figura 16 – Modelo do Reservatório configurado com condições de contorno no software CFX.	32
Figura 17 – Campo de temperatura no reservatório multitanque após 4 horas.	33
Figura 18 – Gráfico da temperatura em relação à altura do reservatório, após 4 horas de aquecimento.	34
Figura 19 – Gráfico da temperatura na saída de água quente do reservatório em função do tempo de aquecimento.	34

Figura 20 – Reservatório térmico multitanque com bypass.	35
Figura 21 – Modelo do reservatório térmico multitanque com tubulação.	36
Figura 22 – Campo de temperatura no reservatório térmico após 2 horas de aquecimento.	37
Figura 23 – Campo de temperatura no reservatório térmico após 4 horas de aquecimento.	37
Figura 24 – Gráfico da temperatura em relação à altura do reservatório, com tubulação na entrada, após 4 horas.	38
Figura 25 – Gráfico da temperatura na saída de água quente do reservatório em função do tempo de aquecimento, com tubulação na entrada.	38
Figura 26 – Campo de temperatura do reservatório multitanque com tubulação, considerando efeito do <i>bypass</i> , após 15 minutos de consumo.	39
Figura 27 – Temperatura na saída de água quente do reservatório multitanque com tubulação em função do tempo de consumo.	39
Figura 28 – Comparativo entre o estudo numérico de Cunha (2019) com o reservatório multitanque.	41
Figura 29 – Comparação entre a temperatura na saída de água quente nos reservatórios multitanque.	42
Figura 30 – Comparação entre a distribuição de temperatura ao longo da altura do reservatório após 4 horas.	42
Figura 31 – Campo de temperatura no reservatório multitanque após 1hr.	48
Figura 32 – Campo de temperatura no reservatório multitanque após 2hrs.	48
Figura 33 – Campo de temperatura no reservatório multitanque após 3hrs.	49
Figura 34 – Campo de pressão no reservatório multitanque após 1hr.	49
Figura 35 – Campo de pressão no reservatório multitanque após 2hrs.	50
Figura 36 – Campo de velocidade no reservatório multitanque após 3hrs.	50
Figura 37 – Campo de temperatura no reservatório multitanque com tubulação após 1hr.	51
Figura 38 – Campo de temperatura no reservatório multitanque com tubulação após 2hrs.	51
Figura 39 – Campo de temperatura no reservatório multitanque com tubulação após 3hrs.	52

Figura 40 – Campo de pressão no reservatório multitanque com tubulação após 4hrs.	52
Figura 41 – Campo de velocidade no reservatório multitanque com tubulação após 4hrs.	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Considerações iniciais	10
1.2	Objetivos	13
1.2.1	Objetivo geral	13
1.2.2	Objetivos específicos	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Metodologia	19
2.1.1	Modelagem de um reservatório térmico	19
2.1.2	Estudo numérico em um <i>software</i> CFD	21
2.1.3	Partícula de fluido	22
2.1.4	Equação de Continuidade	22
2.1.5	Equação da Quantidade de Movimento	23
2.1.6	Equação de Energia	25
2.1.7	Condições de Contorno	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	Modelagem 3D e geração de malha	29
3.2	Setup da simulação	31
4	RESULTADOS	33
4.1	Reservatório multitanque, sem tubulação.	33
4.2	Variações internas do reservatório	36
4.3	Discussões	40
5	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	45
	APÊNDICE A RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	48

1 INTRODUÇÃO

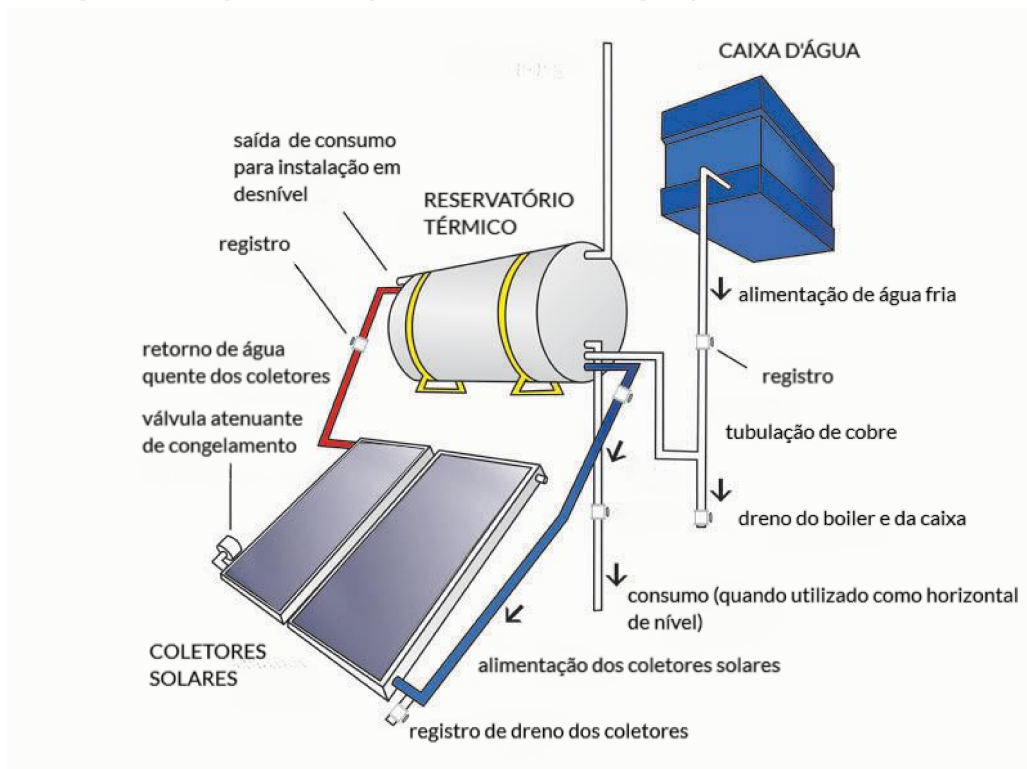
1.1 Considerações iniciais

Com o advento da tecnologia, a produção de energia renovável tem se tornado cada vez mais uma pauta fundamental no meio científico. A energia solar é, dentre outras diversas opções, a mais poderosa das alternativas de fontes de energia. Devido ao aumento da demanda por energia e o aumento do custo dos combustíveis fósseis, a energia solar é considerada uma fonte atraente de energia renovável que pode ser usada tanto nas casas quanto na indústria (JOUHRI; DHAKAR, 2019).

Um dos principais usos da energia solar é encontrado nos aquecedores solares, dispositivos utilizados para o aquecimento de água de residências e complexos industriais. Esse tipo de energia é originada pelo Sol na forma de radiação e é convertida em calor pelos coletores solares, por meio dos princípios de transferência de calor.

Os aquecedores solares podem ser divididos em três categorias: ativos, passivos, ou mistos. Os aquecedores ativos utilizam um dispositivo mecânico que transfere calor ao sistema, diferentemente do sistema passivo que tende a circular a água quando aquecido (RASHA, 2020). Esse último sistema é mais econômico e possui uma longevidade maior, sendo de maior interesse para esse estudo. A Figura 1 apresenta um processo de aquecimento passivo, por meio de um sistema termosifão.

Figura 1 – Esquema de aquecimento solar de água por sistema termosifão



Fonte: Adaptado de <https://www.soletrol.com.br>.

Os sistemas de aquecimento solar de água usam painéis ou tubos, chamados coletores solares, para captar a energia solar por meio da radiação. Os coletores solares convertem a porção infravermelha da luz visível em calor. O coletor então transfere esse calor para a água por meio da convecção natural, como pode-se observar na Equação 1.

$$\dot{Q} = \bar{h}A(t_s - t_\infty) \quad (1)$$

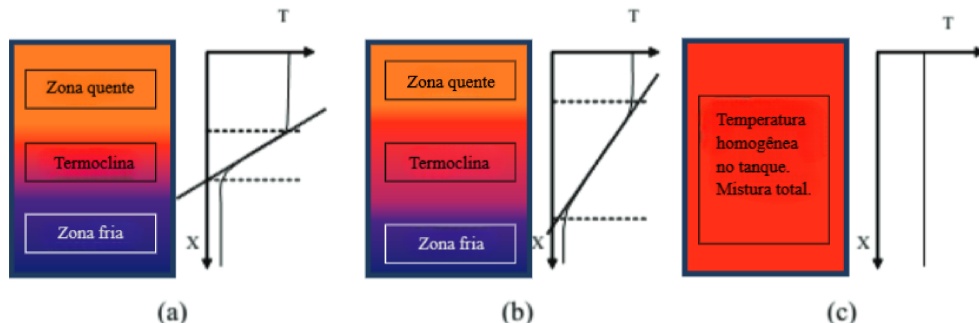
onde,

- \dot{Q} é a taxa de transferência de calor por convecção;
- \bar{h} é o coeficiente convectivo;
- A é a área da superfície;
- t_s é a temperatura da superfície do coletor solar;
- t_∞ é a temperatura do fluido suficientemente longe da superfície.

Os tipos de aquecedores requerem um reservatório térmico bem isolado. Esses tanques de armazenamento, ou *boilers*, são cilindros fabricados em aço inoxidável AISI 304 com um isolamento térmico externo em poliuretano expandido e alumínio (SANTOS, 2005). O efeito da estratificação térmica nesses reservatórios é um dos principais fatores a levar em conta no estudo do desempenho dos aquecedores térmicos.

Como se pode observar na Equação 1, quanto menor a temperatura de entrada no coletor, maior será a transferência de calor para a água. Nesse contexto, a aplicação de um sistema correto de estratificação térmica oferece um maior desempenho ao aquecedor, já que estabelece regiões térmicas não-homogêneas evitando a mistura da água quente com a fria. A Figura 2 apresenta exemplos de diferentes tipos de estratificação térmica.

Figura 2 – Diferentes camadas de estratificação térmica em um reservatório de água quente



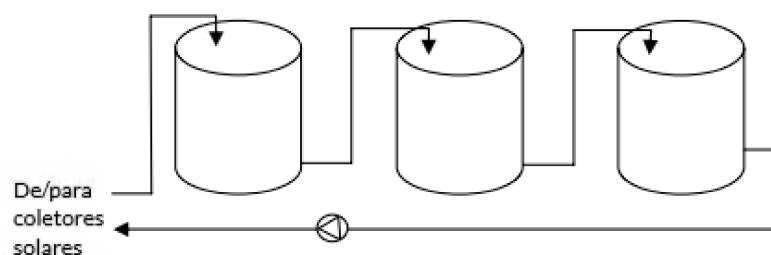
Fonte: Adaptado de Smusz, Kielan e Mazur (2017).

A análise dos campos de temperaturas dentro um reservatório térmico unitário foi realizada na monografia de Cunha (2019). O trabalho apresentou diferentes tipos de configurações internas do reservatório e, por meio de simulação computacional, apresentou quais estruturas

instituem maior estratificação térmica dentro do reservatório. No capítulo seguinte, é revisado alguns dos conceitos apresentados na monografia com a finalidade de caracterizar, de forma análoga, a análise de um reservatório multitanque.

Servindo como uma opção modular para os reservatórios térmicos, os sistemas multitanques são uma das soluções para grandes demandas em pequenos domicílios e instalações comerciais. O arranjo desse sistema é composto por tanques singulares, pré-fabricados, cuja união pode ser feita de diversas maneiras a fim de atender as propriedades exigidas. A Figura 3 demonstra três reservatórios conectados em série, formando uma única unidade hidráulica.

Figura 3 – Arranjo estrutural de um reservatório multitanque



Fonte: Adaptado de Cruickshank (2009).

Pesquisas relacionadas indicam que dentre os fatores geométricos responsáveis por uma boa estratificação térmica no reservatório, a proporção entre altura (L) e diâmetro (D) do reservatório exerce uma influência considerável. Por Lavan e Thompson (1977), a eficiência de um reservatório térmico com uma única entrada de água ultrapassa 90% quando se tem uma relação L/D acima de 3.

No entanto, essa vantagem apresentada pela relação vem com o desafio de lidar com a altura significativa do reservatório, o que pode causar problemas espaciais na instalação. Reservatórios com altura maior exigem mais espaço vertical e podem ser mais difíceis de acomodar em ambientes urbanos ou locais com restrições de espaço. Portanto, ao projetar um sistema de reservatório térmico, é essencial encontrar o equilíbrio entre a eficiência desejada e as limitações de espaço, considerando cuidadosamente a relação entre altura e comprimento para atender às necessidades específicas do projeto.

O estudo de diferentes arranjos de um sistema multitanque tem como um de seus objetivos o alcance de uma estratificação térmica adequada, permitindo o aumento considerável na eficiência do reservatório ao mesmo tempo que se leva em consideração o espaço de instalação. As configurações desse sistema variam entre direta, indireta, série, paralelo e dentre outras variações que irão ser vistas nos próximos capítulos.

Portanto, diante do exposto, esse trabalho tem por objetivo estudar e oferecer soluções para a melhora de eficiência de um reservatório térmico multitanque, analisando o efeito da estratificação térmica em relação a sua geometria modular e a configuração de distribuição de água quente e fria, que podem interferir na estratificação.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Estudar um reservatório térmico de água quente multitanque considerando a sua geometria modular, visando maximizar a estratificação térmica e conseqüentemente aumentar a eficiência do sistema de aquecimento.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar o mecanismo da estratificação;
- Idealizar o arranjo de sistema multitanque capaz de armazenar e distribuir energia térmica de forma eficiente;
- Realizar estudo numérico da estratificação térmica no reservatório de água quente multitanque.

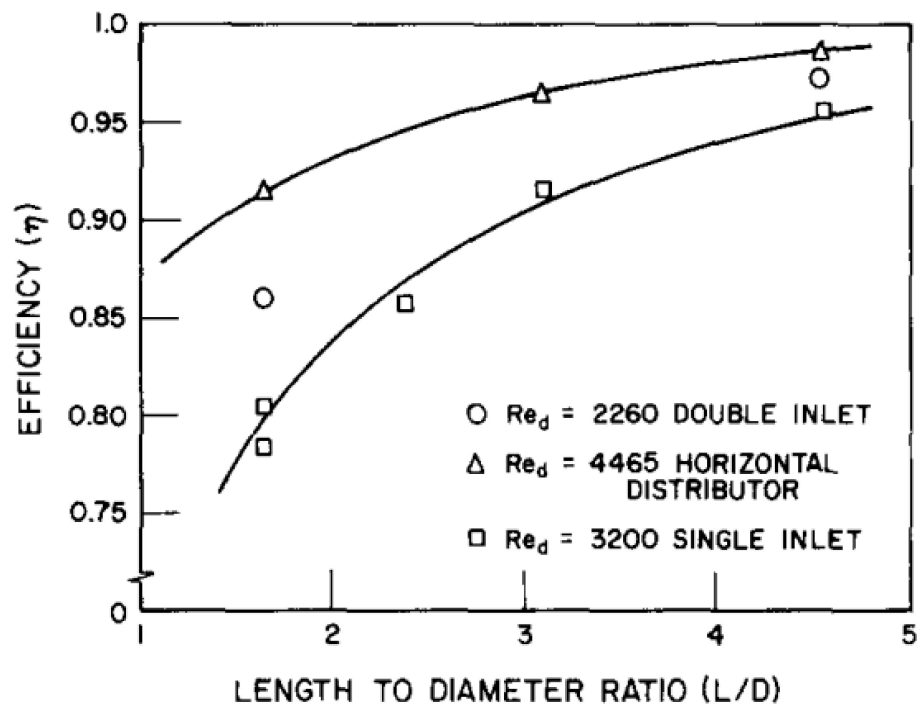
2 REFERENCIAL TEÓRICO

O estudo do efeito da estratificação térmica nos *boilers* é fundamental para o aumento da eficiência dos coletores solares. A mistura da água fria de entrada com a água quente armazenada no reservatório, diminuirá consideravelmente a eficiência do coletor. Estudos realizados por Lavan e Thompson (1977) comprovaram que a otimização desse sistema pode ser obtida por meio de uma estratificação térmica estável.

As pesquisas realizadas em torno da estratificação térmica datam da segunda metade do século XVI. Sharp M. K. e Loehrke (1979) obtiveram resultados que mostram uma melhoria significativa no desempenho do sistema (5 a 15%) com a manutenção da estratificação no tanque de armazenamento. Andersen e Furbo (1999) observaram que uma desestratificação térmica pode causar um ganho de 23% na energia solar líquida. Os efeitos da alteração de parâmetros geométricos em um reservatório térmico podem ser analisados nos trabalhos de Eames e Norton (1998) e Andersen e Furbo (1999).

O impacto do mecanismo de entrada da água fria depende das configurações do sistema e das condições de referência aplicadas e, além disso, do tipo de tanque e da relação altura/diâmetro. Como observado por Lavan e Thompson (1977), a estratificação melhora aumentando a razão comprimento/diâmetro (L/D). A Figura 4 apresenta o efeito da razão altura/diâmetro na eficiência do aquecedor térmico.

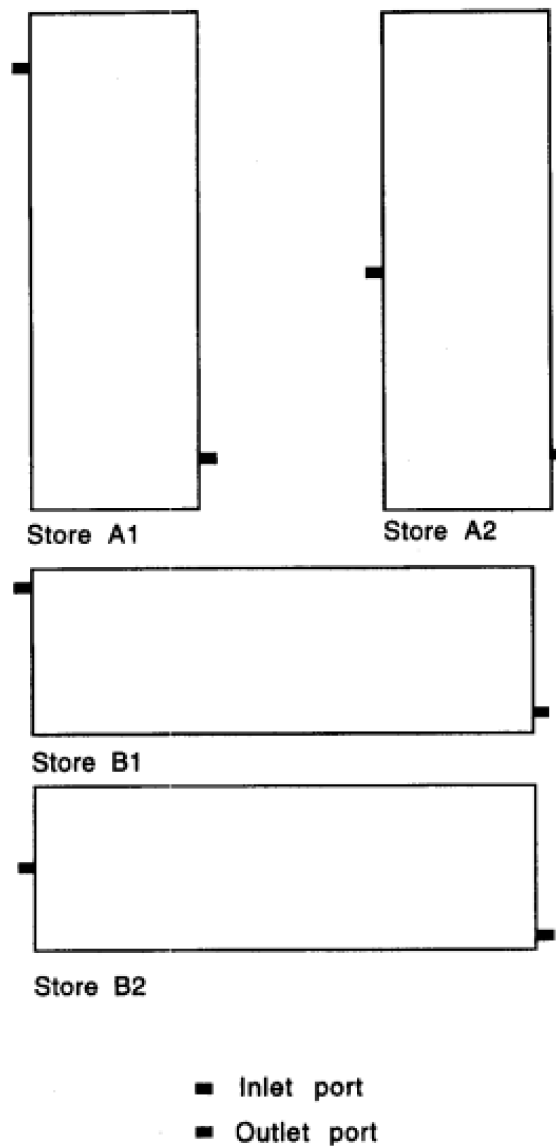
Figura 4 – Eficiência de um aquecedor solar em relação a razão L/D de um reservatório térmico.



Fonte: Lavan e Thompson (1977).

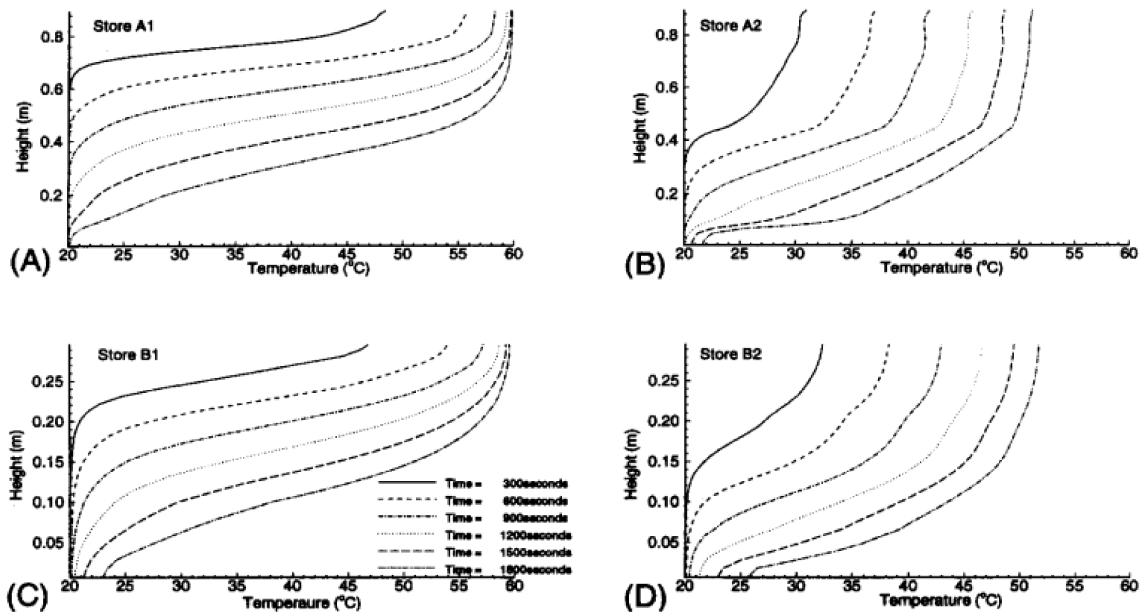
A otimização do reservatório térmico está intrinsecamente ligado com a posição deste. Alizadeh (1999) estudou o comportamento térmico de um tanque de armazenamento cilíndrico horizontal usando modelos unidimensionais de turbulência com o objetivo de estudar a distribuição verticalizada desestabilizada de temperatura. Eames e Norton (1998) revelaram que a utilização de reservatórios na posição horizontal realiza uma homogeneização da água fria e quente, prejudicando a estratificação. A Figura 5 ilustra os modelos de reservatórios simulados por Eames e Norton (1998) e a localização dos pontos de entrada e saída de fluido. A Figura 6 apresenta o comportamento de temperatura em relação a altura nos reservatórios. Pode-se observar que as maiores diferenças de temperaturas ao longo da altura estão presentes nos reservatórios A1 e A2, sendo o primeiro com o maior desempenho térmico.

Figura 5 – Reservatórios analisados por Eames e Norton.



Fonte: Eames e Norton (1998).

Figura 6 – Distribuição de temperatura ao longo dos reservatórios térmicos estudados por Eames e Norton.



Fonte: Eames e Norton (1998).

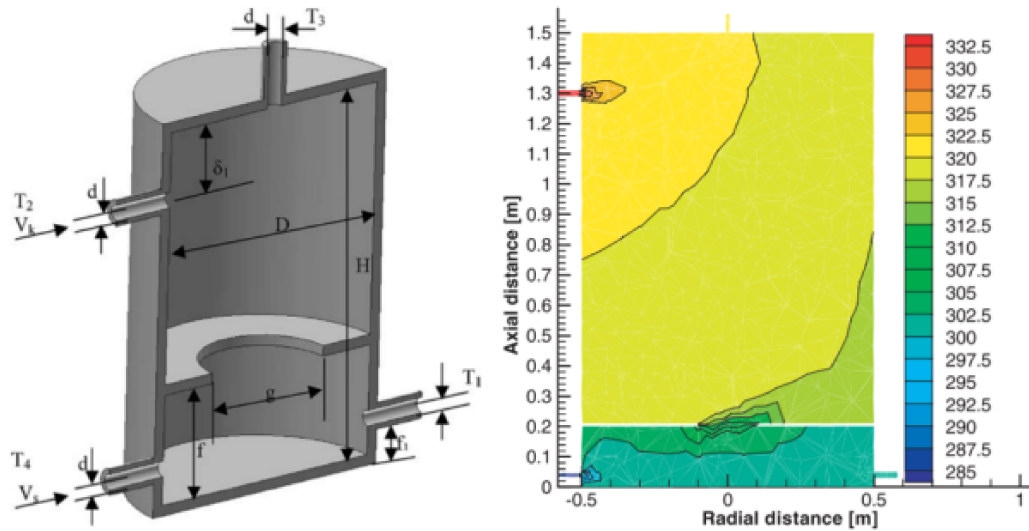
Em relação com a monografia de Cunha (2019), é possível concluir que a orientação vertical do reservatório é o fator mais importante para obter uma estratificação térmica satisfatória durante o aquecimento da água. A utilização de obstáculos em forma de labirintos verticais cria convecção natural na água, e a existência de labirintos horizontais resulta em um gradiente de temperatura suave que não favorece a estratificação térmica.

Foi notado que o uso de um difusor cônico teve um grande impacto no processo de abastecimento do reservatório com água fria, pois impediu a perturbação da estratificação pela água que entra, obtendo resultados satisfatórios, algo que não foi alcançado apenas direcionando a entrada da água fria para o fundo do reservatório sem o difusor cônico.

Altuntop *et al.* (2005) e Arslan, Altuntop e Ozceyhan (2004) estudaram o efeito do uso de diferentes obstáculos para obter maior estratificação térmica dentro de um reservatório térmico cilíndrico. Figura 7 apresenta as conclusões de Altuntop *et al.* (2005) relacionadas aos obstáculos com furo no centro (coroas) e a melhora na estratificação térmica quando comparadas com aqueles com folga perto da parede do tanque.

Yang *et al.* (2016) investigou a influência da geometria em 10 formatos diferentes de tanques de água em relação a estratificação térmica no modo estático de operação. O tanque com cantos agudos possui o maior grau de estratificação térmica, enquanto o tanque com superfície plana horizontal possui o menor. O tanque com hemisférios exibe um grau moderado de estratificação térmica em comparação com as outras duas categorias. A Figura 8 apresenta os campos de velocidade e temperatura em tanques de água de formatos diferentes durante o período de cinco horas.

Figura 7 – Reservatório térmico com obstáculo em formato de coroa e sua respectiva estratificação térmica obtida através de simulação.



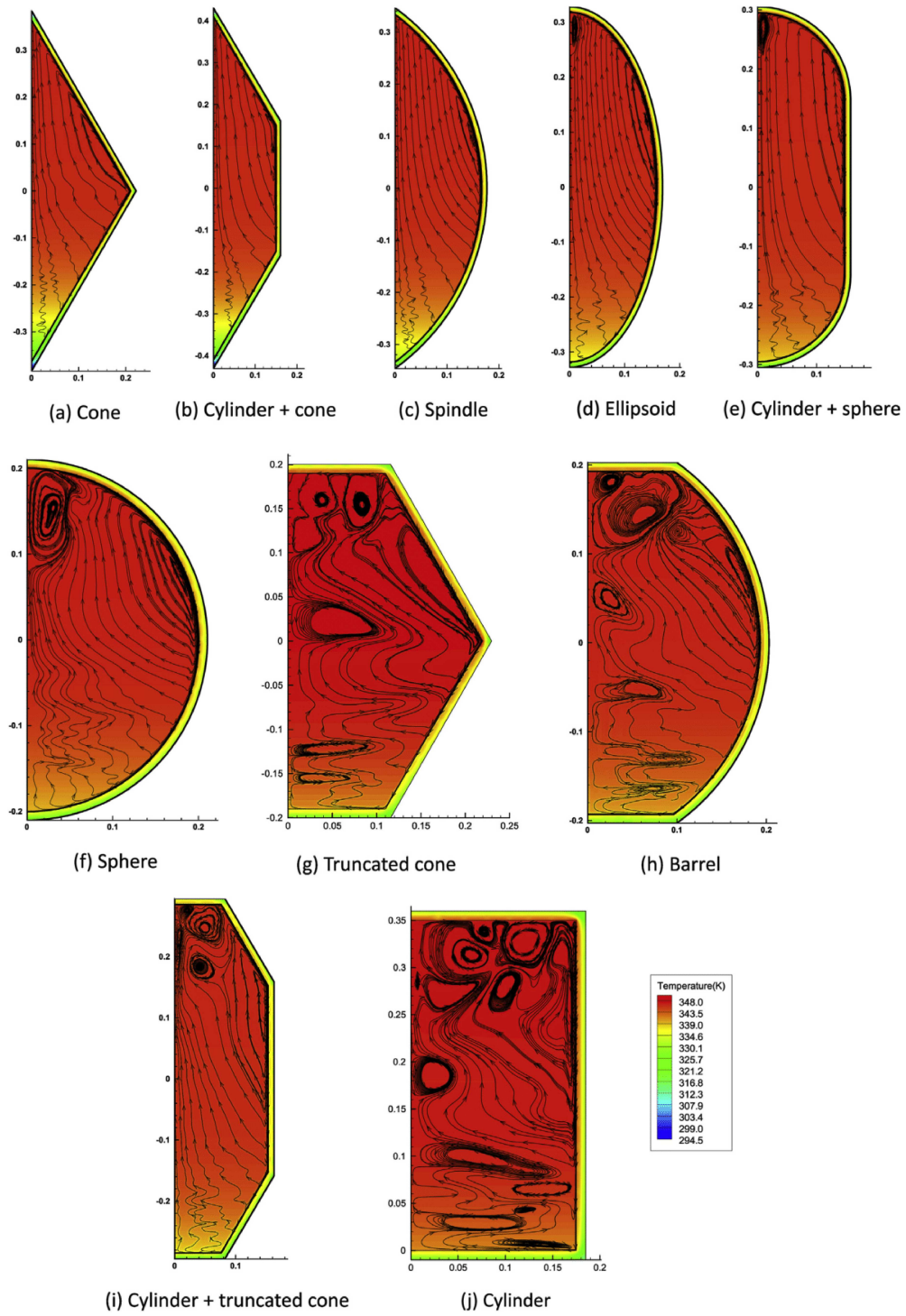
Fonte: Altuntop *et al.* (2005).

A configuração interna do sistema de um reservatório de água quente também é um ponto relevante para o estudo da estratificação térmica. A estratificação melhora com o aumento de L/D , ΔT e diâmetros das portas de entrada e saída, e diminui com o aumento das taxas de fluxo Lavan e Thompson (1977). Os melhores resultados são obtidos quando as portas de entrada e saída estão perto das paredes das extremidades e quando o escoamento é direcionado para essas paredes.

Surgindo como alternativa para os reservatórios de um tanque, os reservatórios térmicos modulares (ou multitanques) possuem como vantagem sua facilidade de instalação. Esses reservatórios podem ser arranjados de inúmeras formas e possibilitam uma alta estratificação térmica, ajudando na otimização do sistema. Arata e Winter (1991) analisaram sete tipos de reservatórios térmicos, um deles sendo composto por dois reservatórios modulares. O estudo concluiu que a utilização de vários tanques separados otimizava o sistema muito mais do que o uso de apenas um reservatório.

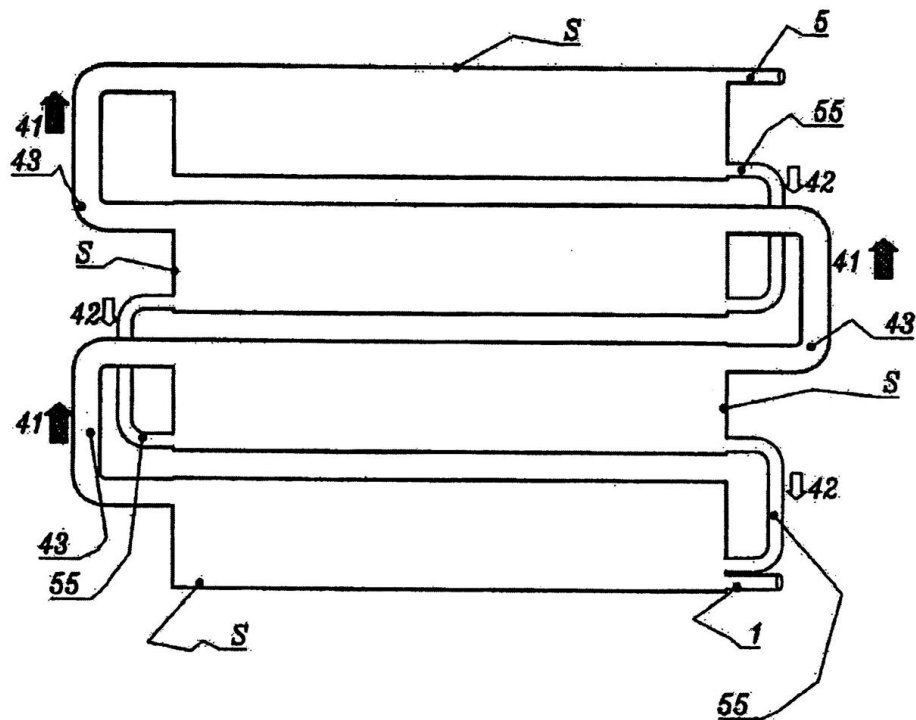
Tacchi (2003) apresentou arranjos de dois ou mais tanques dispostos horizontalmente. A conexão desse sistema foi construída de forma que a água fria é introduzida na zona inferior do tanque que está na posição mais baixa, enquanto a água aquecida é retirada da zona superior do tanque que está na posição mais alta; além disso, a água fria de cada tanque não pode fluir para cima em direção ao tanque acima dele durante o consumo de água, ao contrário da água quente. A Figura 9 apresenta um croqui desse sistema.

Figura 8 – Estratificação térmica em diferentes geometrias de um reservatório.



Fonte: Yang *et al.* (2016).

Figura 9 – Reservatório multitanque composto por tanques horizontais sobrepostos.



Fonte: Tacchi (2003).

2.1 Metodologia

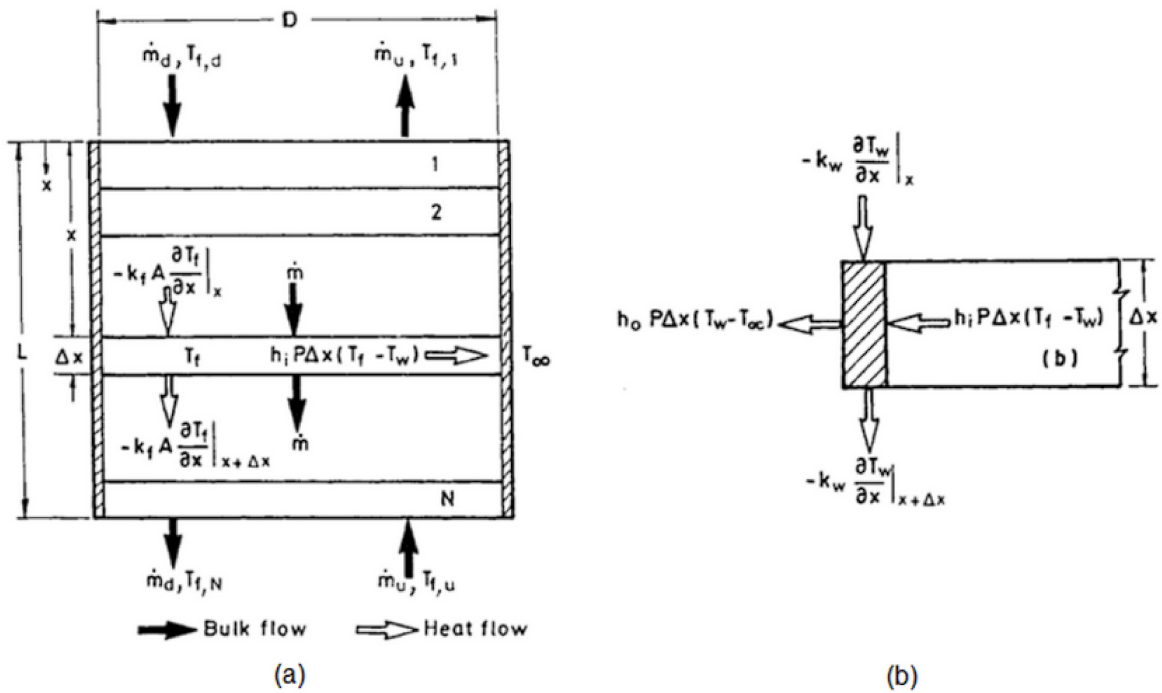
Após a análise do fenômeno da estratificação térmica, bem como o seu comportamento em relação a geometria do reservatório térmico, objetiva-se realizar um modelo numérico de um reservatório térmico multitanque.

2.1.1 Modelagem de um reservatório térmico

A maioria dos modelos de reservatórios térmicos desenvolvidos considera um tanque de armazenamento térmico com um único trocador de calor e fluxo de massa líquido direcionado dentro e para fora do tanque. O método de análise aqui apresentado fornece uma metodologia simples que descreve as equações diferenciais que governam a transferência de calor que ocorre dentro do tanque, permitindo que as previsões de temperatura sejam feitas em função do tempo.

Angrisani *et al.* (2014) modelou um sistema unidimensional de reservatórios térmicos conectados a vários reservatórios de calor. A modelagem foi realizada por meio da divisão do reservatório em N ($N < 100$) nódulos de igual volume totalmente misturados, para cada um dos quais se admite uma temperatura uniforme. Esse procedimento de discretização foi realizado de forma semelhante por Nelson, Balakrishnan e Murthy (1998) e pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 – (a) Balanço de energia em um nódulo infinitesimal de um reservatório térmico; (b) Balanço de energia na parede do reservatório.



Fonte: Nelson, Balakrishnan e Murthy (1998).

Assim, o balanço de energia para o nódulo genérico i , é expresso pela Equação 2:

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{k_f}{\rho_f C_f} \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} - \frac{\dot{m}}{\rho_f A} \frac{\partial T_f}{\partial x} - \frac{h_i P}{A \rho_f C_f} (T_f - T_w) \quad (2)$$

e

$$\dot{m} = \dot{m}_d - \dot{m}_u \quad (3)$$

onde:

- T é a temperatura;
- f denota a camada f ;
- w denota a parede do reservatório;
- t é o tempo;
- k é a condutividade térmica;
- ρ é a densidade do fluido;
- C é a capacidade calorífica (em pressão constante);
- x é a distância a partir do topo do reservatório;

- \dot{m} é a vazão mássica líquida;
- \dot{m}_d é a vazão mássica na entrada;
- \dot{m}_u é a vazão na saída;
- A a área da secção transversal do reservatório;
- h_i é o coeficiente convectivo do fluido;
- P é o perímetro total do reservatório.

O modelo a ser considerado será unidimensional por natureza, pois o grau de estratificação depende apenas de uma dimensão. As condições de contorno que influenciam o sistema e que devem ser consideradas durante a resolução do problema são as condições de entrada e saída do fluido, a parede do tanque e as condições na interface entre o líquido e o sólido presentes na entrada, saída e na parede.

2.1.2 Estudo numérico em um *software* CFD

A dinâmica de fluidos computacional, fluidodinâmica computacional ou CFD é a análise de sistemas envolvendo fluxo de fluido, transferência de calor e fenômenos associados por meio de simulação baseada em computador (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995). A técnica é muito poderosa e abrange uma ampla gama de áreas de aplicação industriais e não industriais como por exemplo motores de combustão interna e turbinas a gás.

Versteeg e Malalasekera (1995) aponta que existem vantagens consideráveis da fluidodinâmica computacional sobre as abordagens baseadas em experimentos para o projeto de sistemas de fluidos. Entre os pontos vantajosos dos CFDs sobre outros processos estão a redução no tempo do processo de desenvolvimento de novos *designs* e a capacidade de estudar sistemas onde experimentos controlados são difíceis ou impossíveis de serem realizados.

Dentro de um ponto de vista geral, o processo das simulações nos CFD comerciais se inicia pela definição de uma malha na geometria de interesse e se encerra com o fornecimento de um arquivo com todos os resultados e soluções. Pode-se dividir todo esse processo em três elementos principais:

- pré-processador;
- *solver*;
- pós-processador.

O processo de pré-processamento envolve a definição da geometria de interesse e a entrada do problema numérico. Uma malha de volumes de controle é inserida sob a geometria, além das propriedades do fluido e das condições de contorno.

Logo após, o *solver* irá produzir os resultados do problema por meio do método das diferenças finitas, elementos finitos ou métodos espectrais. A lei da conservação de massa é aplicada em cada volume de controle, gerando equações integradas que serão posteriormente convertidas em equações algébricas (discretizações). Por fim, essas equações serão resolvidas por meio de métodos iterativos.

A exposição dos resultados desses dois processos se dá através do processo de pós-processamento. A maioria dos CFDs comerciais conta com uma grande variedade de ferramentas de visualização, possibilitando ao usuário analisar e interagir com todos os resultados do problema. A interface de pós-processamento possibilita plotagens vetoriais, plotagens de superfície 2D e 3D, rastreamento de partículas, entre outras ferramentas. No capítulo seguinte são descritos todas as simulações realizadas e uma comparação entre os resultados dessas análises numéricas.

2.1.3 Partícula de fluido

É de interesse desse trabalho um estudo dentro da área do transporte de quantidade de movimento, energia e massa por meio de densas relações matemáticas, geralmente na forma de equações diferenciais. De forma sintética, são apresentadas as três bases fundamentais dos fluxos: energia, de massa e de quantidade de movimento. O fluido é considerado como contínuo e a partícula de um fluido é dado como uma porção muito pequena dessa substância.

A descrição lagrangiana de movimento considera as coordenadas da partícula de fluido no instante do tempo. Seja a , b e c as coordenadas iniciais de uma partícula; x , y , z são coordenadas da mesma partícula no instante t . Assim, a descrição do movimento no método de Lagrange é:

$$x = x(a, b, c, t); \quad y = y(a, b, c, t); \quad z = z(a, b, c, t) \quad (4)$$

Já na descrição euleriana, u , v , w são as componentes da velocidade no ponto (x, y, z) enquanto t permanece sendo o tempo. As componentes de velocidade u , v e w são as incógnitas que são funções das variáveis independentes x , y , z e t . A descrição do movimento com o método de Euler para qualquer valor particular de t é:

$$u = u(x, y, z, t); \quad v = v(x, y, z, t); \quad w = w(x, y, z, t) \quad (5)$$

2.1.4 Equação de Continuidade

A massa de um sistema não pode ser gerada nem abolida. A conservação da massa postula que a taxa de crescimento de massa em um fluido é igual ao somatório do fluxo de massa dentro de cada elemento do fluido.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (6)$$

onde,

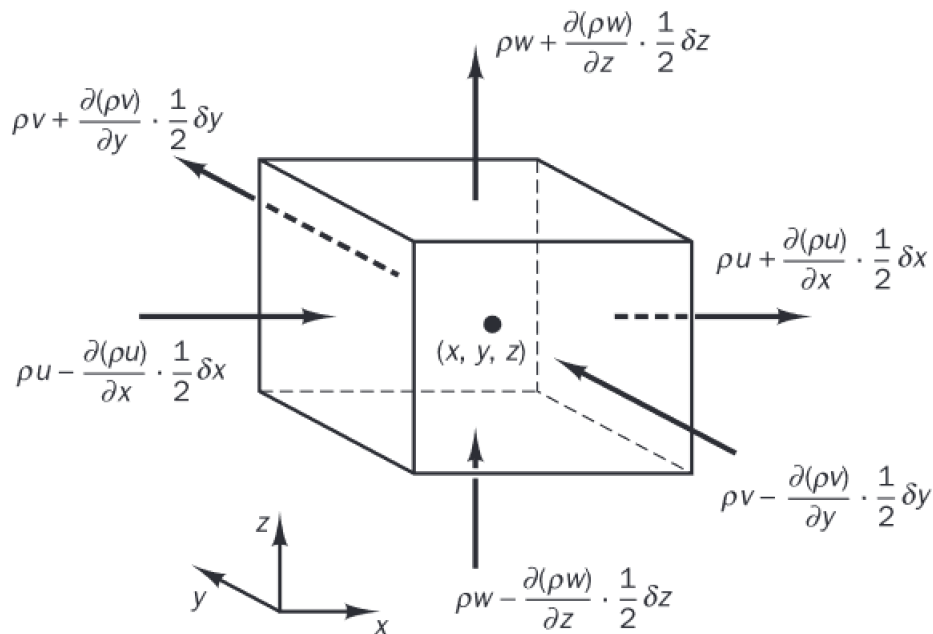
$$\vec{\nabla} = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (7)$$

A Equação 6 é a equação de continuidade ou conservação de massa para um escoamento tridimensional, na forma geral. Para o caso de fluido incompressível, como por exemplo da água, a densidade é constante. Logo:

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \longrightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

A Figura 11 apresenta um elemento de fluido e o fluxo de massa que entra e sai dele.

Figura 11 – Fluxo de massa entrando e saindo do elemento de fluido



Fonte: Versteeg e Malalasekera (1995).

2.1.5 Equação da Quantidade de Movimento

A quantidade de movimento rege as mudanças nas propriedades de uma partícula de fluido. Assim, se tem interesse em desenvolver equações para taxas de variação por unidade de volume. A taxa de variação de uma propriedade ϕ por unidade de volume para uma partícula de fluido é dada pelo produto de $D(\phi)/Dt$ pela densidade ρ , assim:

$$\rho \frac{D\phi}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial\phi}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla}\phi \right) \quad (9)$$

A equação da conservação de massa contém a massa por unidade de volume (ou seja, a densidade ρ) como a quantidade conservada. A soma da taxa de variação da densidade no tempo e o termo convectivo na equação de conservação de massa para um elemento de fluido é:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho\vec{V}) \quad (10)$$

A generalização desses termos para uma propriedade conservada arbitrária e ρ constante é:

$$\frac{\partial(\phi\rho)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho\phi\vec{V}) = \rho \frac{D\phi}{Dt} \quad (11)$$

A segunda lei de Newton afirma que a taxa de variação da quantidade de movimento de uma partícula de fluido é igual à soma das forças sobre a partícula. Assim, as taxas de aumento da quantidade de movimento nos eixos x , y e z por unidade de volume de uma partícula de fluido são dadas por:

$$\rho \frac{Du}{Dt}; \quad \rho \frac{Dv}{Dt}; \quad \rho \frac{Dw}{Dt} \quad (12)$$

É possível distinguir dois tipos de forças que atuam em uma partícula de fluido: as forças na superfície e as forças que agem sobre o corpo do fluido. O primeiro caso envolve forças relacionadas à pressão e viscosidade (cisalhamento). Já no segundo caso, existe a ação das forças do campo gravitacional, centrífugas, coriolis e eletromagnética.

A Figura 12 ilustra um elemento infinitesimal de um fluido e as forças superficiais que agem sobre ele.

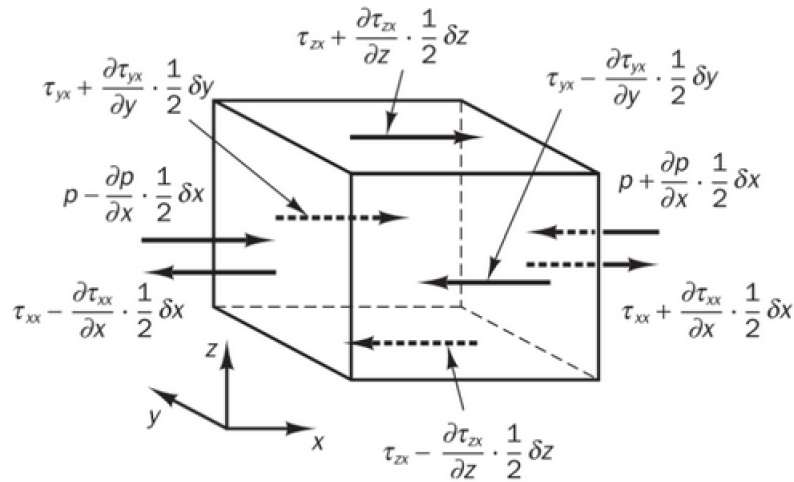
A componente x da equação da quantidade de movimento é encontrada definindo a taxa de variação da quantidade de movimento no eixo x da partícula de fluido como sendo igual à força total na direção x sobre o elemento (devido às tensões superficiais) mais a taxa de aumento da quantidade de movimento na direção x devido as forças de campo agindo no corpo (definidas de forma generalizada como SM_x):

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (13)$$

Sendo assim, para os eixos y e z , a equação surge de forma análoga:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (14)$$

Figura 12 – Forças superficiais agindo sobre um elemento de fluido na direção x



Fonte: Versteeg e Malalasekera (1995).

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial(\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (15)$$

2.1.6 Equação de Energia

A equação de conservação da energia da partícula de fluido é estruturada igualando a taxa de variação de energia da partícula de fluido à soma da taxa líquida de trabalho realizado sobre a partícula de fluido, a taxa líquida de adição de calor ao fluido e a taxa de aumento de energia devido às fontes externas. Assim:

$$\begin{aligned} \rho \frac{DE}{Dt} = & -\vec{\nabla} \cdot (p\vec{V}) + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} \right. \\ & \left. + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] \\ & + \vec{\nabla} \cdot (k\nabla T) + S_E \end{aligned} \quad (16)$$

Para o caso especial de um fluido incompressível temos $i = cT$, onde c é o calor específico e $\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0$. Isso nos permite reformular Equação 16 em uma equação de temperatura.

$$\begin{aligned} \rho c \frac{DT}{Dt} = & \vec{\nabla} \cdot (k\nabla T) + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} \\ & + \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} + S_i \end{aligned} \quad (17)$$

Pode-se descrever o estado de uma substância em equilíbrio termodinâmico por meio de apenas duas variáveis de estado. As equações de estado relacionam as outras variáveis às

duas variáveis de estado. Se usarmos ρ e T como variáveis de estado, teremos equações de estado para pressão p e energia interna específica i :

$$p = p(\rho, T) \quad \text{e} \quad i = i(\rho, T) \quad (18)$$

O campo de escoamento incompressíveis de fluidos muitas vezes pode ser resolvido considerando apenas as equações de conservação de massa e quantidade de movimento. Como nosso caso envolve transferência de calor, a equação da energia também precisa ser resolvida junto com as outras.

2.1.7 Condições de Contorno

Os *softwares* de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) são amplamente utilizados para simular o comportamento de fluidos em diferentes tipos de aplicações, como aeroespacial, automotiva, química e muitas outras áreas. No entanto, para obter resultados precisos e confiáveis, é crucial considerar as condições de contorno corretas nas simulações. As condições de contorno definem as condições físicas nas fronteiras do domínio computacional e podem incluir informações sobre a velocidade, a pressão, a temperatura e outras propriedades do fluido.

Uma escolha adequada de condições de contorno é fundamental para garantir a precisão e a validade dos resultados obtidos por meio das simulações de CFD. No contexto da simulação de um reservatório multitanque, serão utilizados valores e condições similares adotados por Cunha (2019) para fins de facilitar a posterior comparação de eficiência entre esses reservatórios.

A velocidade média de entrada e saída de água do reservatório adotados por Cunha (2019) foi estabelecida em referência com os estudos de Eames e Norton (1998) e fixada em 0,075 mm/s. No entanto, devido as particularidades estruturais do reservatório multitanque, bem como seu maior volume de água, a velocidade admitida na análise numérica foi de 150 mm/s. O valor da densidade de referência da água (ρ_{ref}) a 25°C, assim como as outras propriedades da água líquida e vapor (em função da temperatura), são determinadas dentro do *software*.

Como mencionado na seção anterior, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia serão resolvidas pelo *software*. Assim, para o primeiro caso, a condição inicial será de velocidade nula:

$$\vec{V}(t) = 0 \quad \text{para} \quad t = 0 \quad (19)$$

então,

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = u = 0 \\ \frac{dy}{dt} = v = 0 \\ \frac{dz}{dt} = w = 0 \end{cases} \quad (20)$$

A respeito das condições iniciais para a equação de quantidade de movimento, a pressão absoluta será considerada como a soma da pressão externa com a pressão realizada pela coluna de água. Assim:

$$p = p_{abs} = p_{ext} + \rho gh \quad (21)$$

$$p_{ext} = 1atm \quad (22)$$

onde,

- p é a pressão;
- p_{abs} é a pressão absoluta;
- p_{ext} é a pressão externa;
- ρ é a densidade do fluido;
- g é a aceleração do campo gravitacional;
- h é a altura da coluna d'água.

Em relação as forças que agem no corpo, consideramos a força do campo gravitacional agindo no sentido negativo do eixo z :

$$\begin{cases} S_{Mx} = 0 \\ S_{My} = 0 \\ S_{Mz} = -\rho g \end{cases} \quad (23)$$

De acordo com a lei de Newton da viscosidade, a tensão de cisalhamento (τ) aplicada em um fluido é diretamente proporcional ao gradiente de velocidade desse fluido, onde a constante de proporcionalidade é conhecida como viscosidade dinâmica (μ). Sabendo que o gradiente de velocidade de um fluido é igual a razão entre a tensão de cisalhamento e a viscosidade dinâmica(μ), considera-se:

$$\tau_{yx} = \frac{du}{dy} \mu \quad (24)$$

onde,

- τ_{yx} é a tensão de cisalhamento na direção x ;
- $\frac{du}{dy}$ é a diferença de velocidade entre as camadas adjacentes do fluido;
- μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

Em relação com a equação de energia, a parcela da equação de calor por condução fica:

$$\begin{cases} q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \\ q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \\ q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \end{cases} \quad (25)$$

onde k é a condutividade térmica do fluido. Admitindo a condição adiabática nas paredes do reservatório, o valor dessa constante é nulo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão apresentadas todas as informações relevantes sobre os materiais utilizados e as metodologias adotadas na simulação do reservatório térmico no *software* de fluidodinâmica computacional.

Inicialmente, serão apresentados os materiais utilizados na construção do modelo virtual do reservatório térmico, incluindo informações sobre as propriedades térmicas e físicas dos materiais. Em seguida, serão descritas as etapas necessárias para a construção do modelo no *software* ANSYS, incluindo a geometria e malha.

Posteriormente, serão apresentados os parâmetros de entrada utilizados na simulação, tais como temperatura inicial, vazão de entrada de fluido, taxa de transferência de calor, entre outros. Serão descritas também as condições de simulação, tais como a duração da simulação e os critérios de convergência adotados. Esses parâmetros e critérios serão semelhantes a de outros experimentos com reservatórios térmicos, para que seja possível a comparação de resultados entre esses.

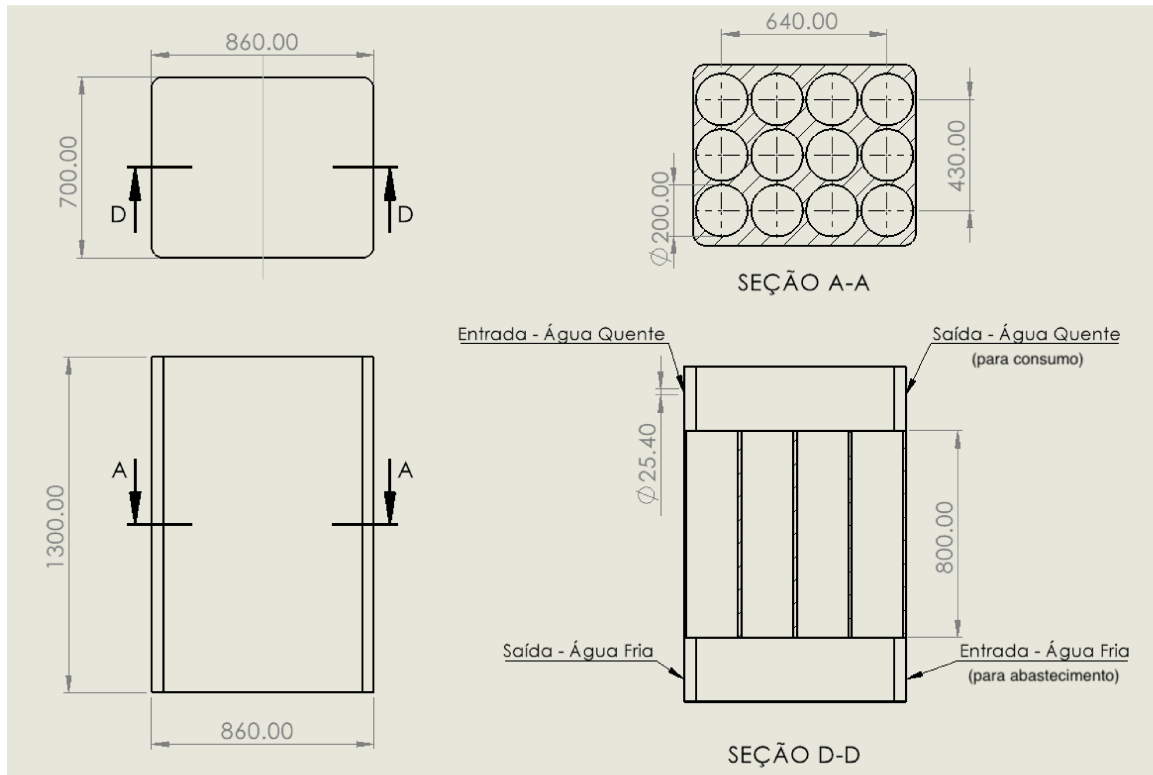
3.1 Modelagem 3D e geração de malha

O reservatório multitanque teve sua geometria desenvolvida por meio do *software* SOLIDWORKS® (2022) e posteriormente foi exportado para simulação no ANSYS® (2023) CFX. A primeira geometria desenvolvida contou com doze reservatórios tubulares internos dispostos em uma matriz retangular 3 x 4. A região de entrada e saída da água quente está localizada na parte superior, numa espécie de caixa, e a região de entrada e saída da água fria está localizada na parte inferior. O volume do reservatório, considerando os cilindros internos, totalizou 184 litros. A Figura 13 apresenta todas as dimensões principais do reservatório multitanque.

Foram realizados alguns ajustes no sólido, por meio do *software* Ansys Design Modeler®, para que a geração de malha e a posterior simulação não encontrassem problemas de compatibilidade. A Figura 14 apresenta a vista isométrica modelo 3D do reservatório multitanque com efeito de transparência para observação da estrutura interna.

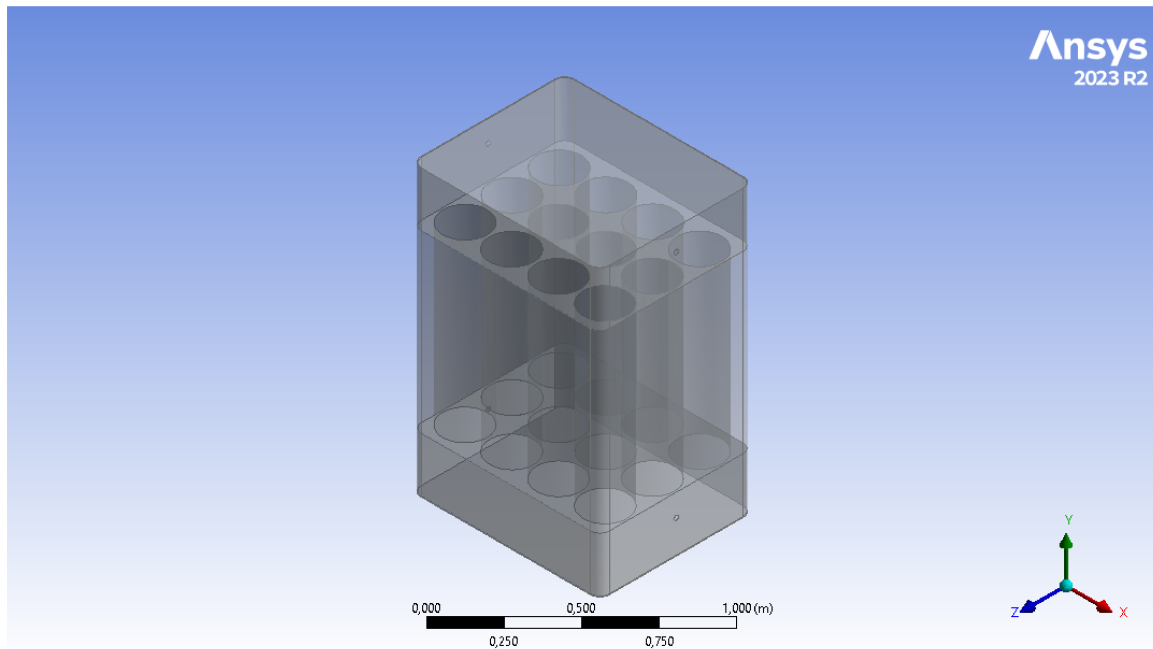
Em relação a malha, primeiro foram estabelecidas as regiões do sólido: as entradas de água quente e fria, as saídas de água quente e fria e as paredes internas e externas do reservatório. Isso auxiliará durante a configuração das condições de contorno durante a simulação no CFX. Logo após, a malha foi gerada por meio das funções *Edge Sizing*, para que o número de *nodes* não ultrapasse o limite estabelecido pela licença do *software*. A qualidade da malha também foi levada em consideração, com os valores de *skewness* e *orthogonal quality* dentro da faixa recomendável para a simulação. A Figura 15 apresenta a vista isométrica da malha gerada para o modelo 3D do reservatório com o reservatório todo fechado e com um corte transversal.

Figura 13 – Dimensões (em milímetros) do reservatório multitanque.



Fonte: Autoria própria (2023).

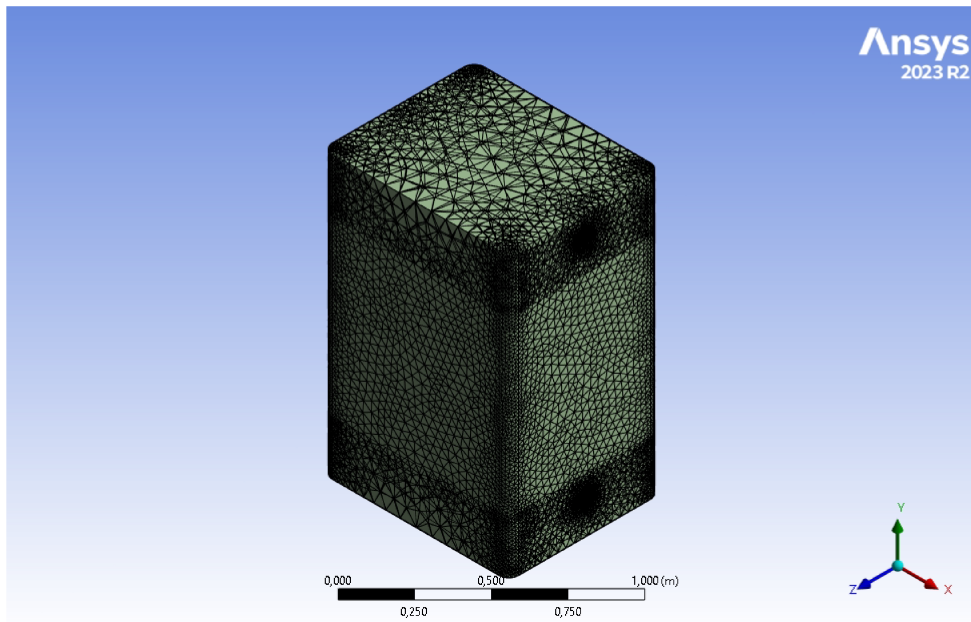
Figura 14 – Vista isométrica do reservatório multitanque, com efeito de transparência.



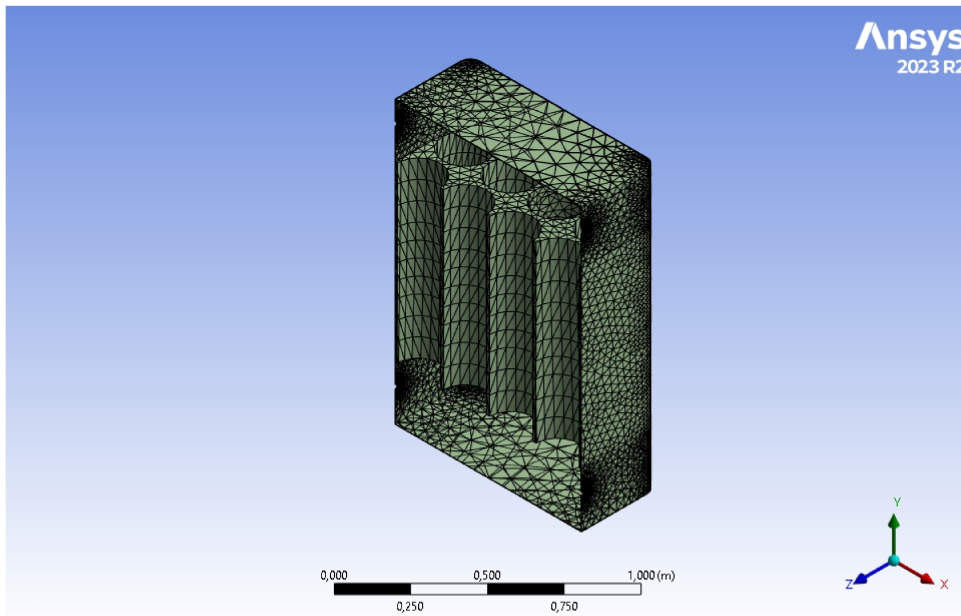
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 15 – Vista da malha gerada para o reservatório: (a) Isométrica, reservatório fechado, (b) Isométrica, com corte transversal para vista da malha nos cilindros

(a) Isométrica, reservatório fechado



(b) Isométrica, com corte transversal para vista da malha nos cilindros



Fonte: Autoria própria (2023).

3.2 Setup da simulação

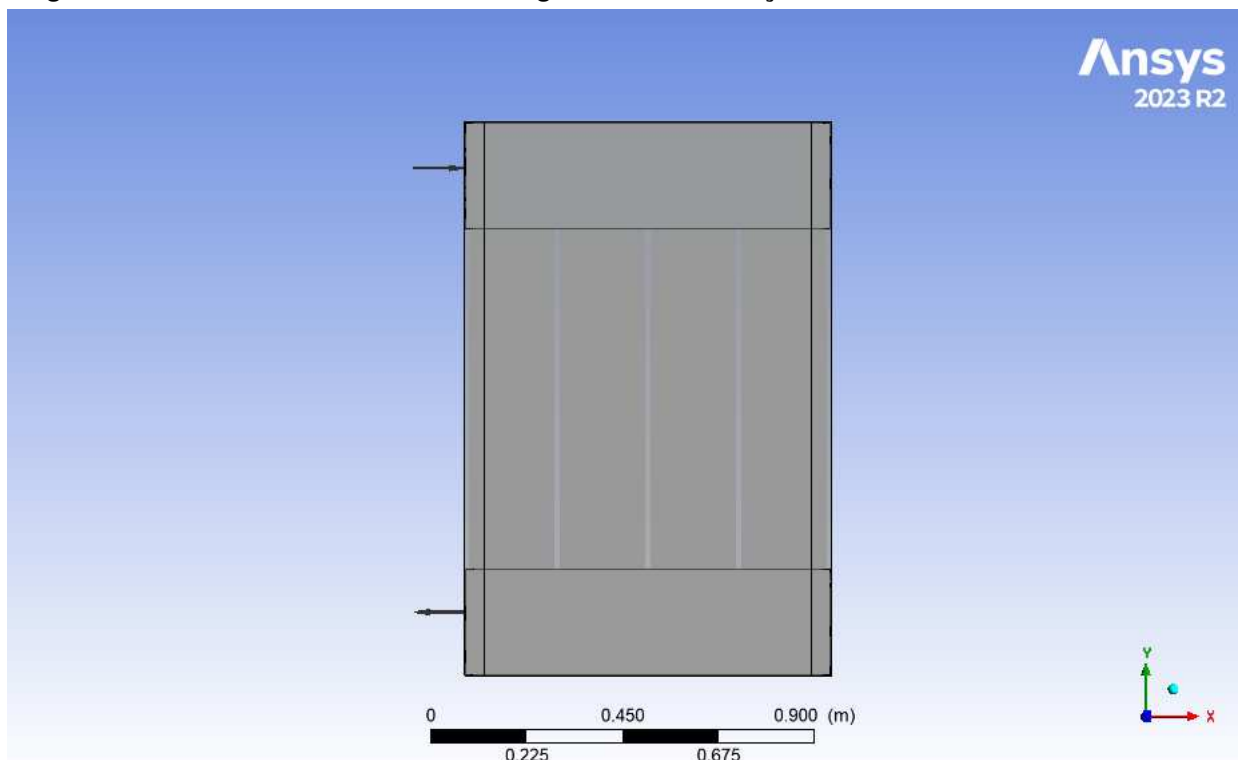
O *setup* da simulação é a etapa de configuração dos domínios da simulação, aplicação das condições de contorno e métodos de resolução das equações. Como apresentado na seção anterior, o reservatório térmico multitanque foi simulado utilizando o *software* CFX Ansys CFX®, versão 2023.

Ao importar o modelo 3D para o *software*, foi configurado a simulação para um regime transiente e com modelagem de volume de fluido e equação de energia. A respeito das condições de contorno, o *software* importou as regiões importantes do reservatório posicionadas na fase de criação da malha: entrada de água quente e saída da água quente. Foi necessário também adicionar o material do reservatório térmico, interior em aço inox revestido por material isolante térmico (neste caso, poliuretano expandido).

Ainda dentro das condições de contorno, foi preciso configurar as velocidades e temperaturas de acordo com as simulações de Cunha (2019) que, por sua vez, foram baseadas nos experimentos de Eames e Norton (1998). Foi estabelecido como condição de entrada uma velocidade inicial de 150 mm/s e uma temperatura de 65 °C. O tanque inicia totalmente cheio de água na temperatura de 20 °C. Não há trocas de calor com o reservatório e este inicia a simulação na temperatura ambiente.

O método de resolução escolhido foi o *High Resolution*, com um critério de convergência baseado em um resíduo menor que 1.00×10^{-4} . A simulação cobriu uma faixa de tempo de cinco horas, com resultados sendo gravados na *workstation* a cada trinta minutos. A Figura 16 apresenta o modelo 3D configurado no *software* CFX.

Figura 16 – Modelo do Reservatório configurado com condições de contorno no software CFX.



Fonte: Autoria própria (2023).

4 RESULTADOS

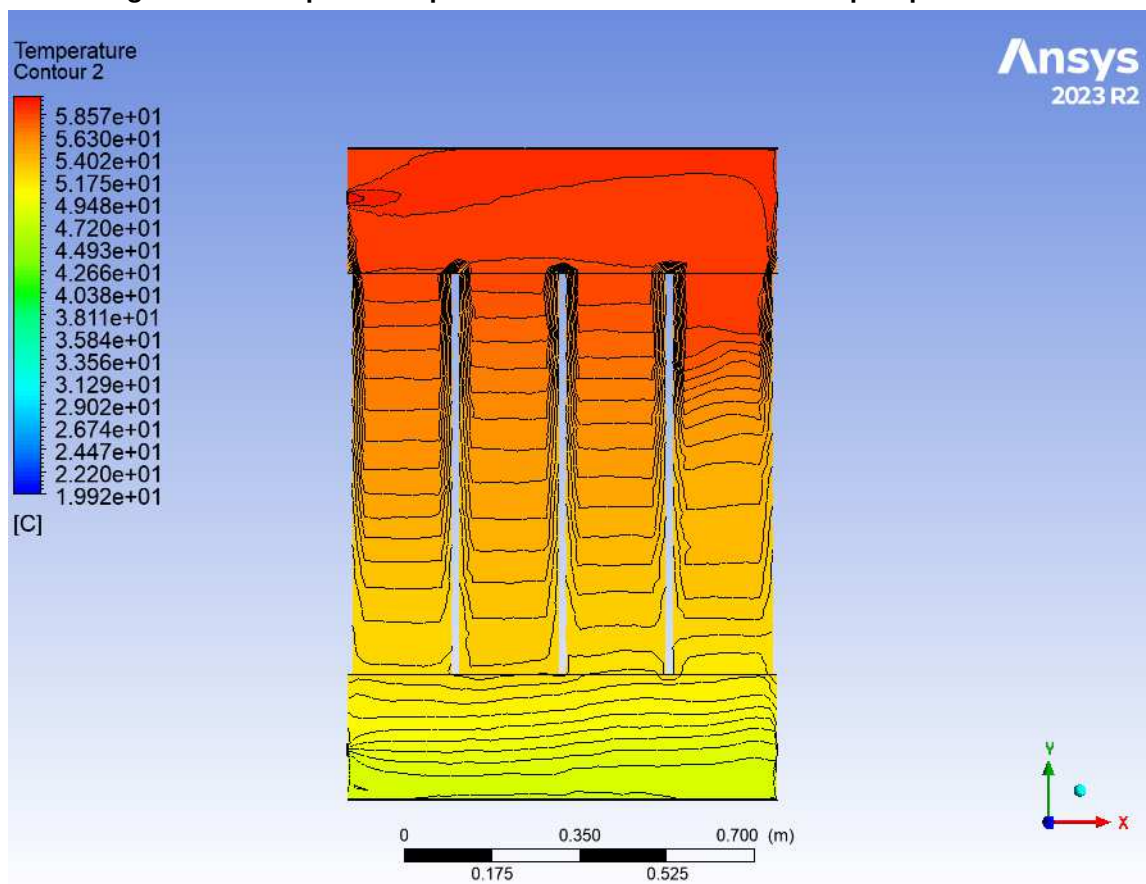
Como mencionado no Capítulo 3, a simulação do reservatório térmico foi realizada no regime transiente. A simulação foi realizada na *workstation* do laboratório do campus Pato Branco da Universidade Tecnológica Federal do Paraná em um período de trinta dias.

4.1 Reservatório multitanque, sem tubulação.

Observando a Figura 17, o reservatório multitanque atingiu uma estratificação térmica plausível após quatro horas de aquecimento contínuo. Foram gerados gráficos dos campos de temperatura, pressão e velocidade para melhor análise do comportamento da água no reservatório no final do aquecimento. As imagens gráficas podem ser observadas em detalhes no Apêndice A.

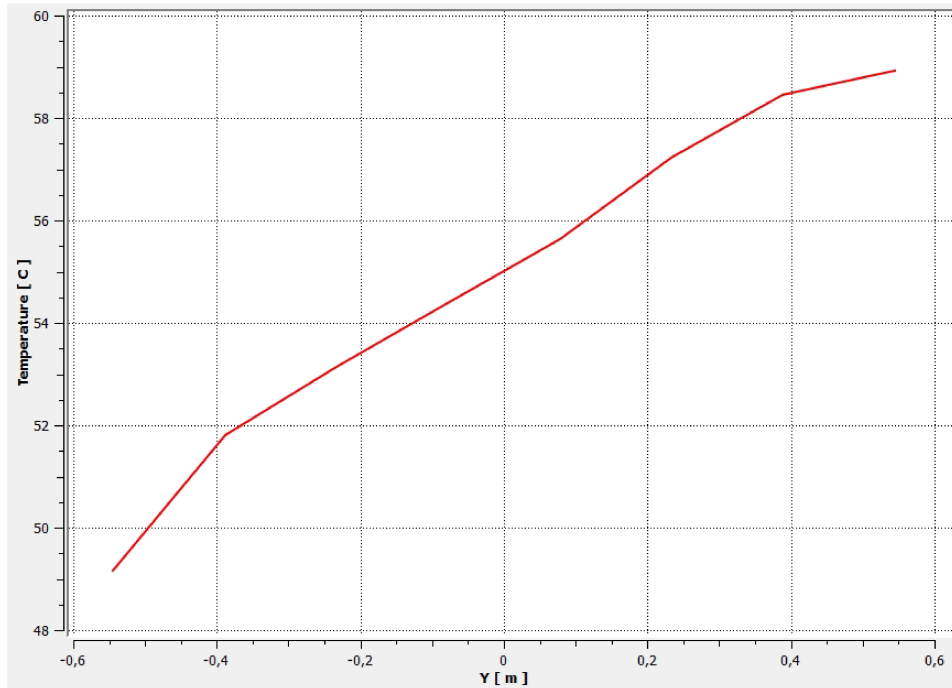
A Figura 18 apresenta a temperatura ao longo do eixo y , analisado no centro de um dos cilindros do reservatório. Uma análise da temperatura ao longo do tempo na saída de água quente do reservatório também foi realizada e o gráfico pode ser observado na Figura 19.

Figura 17 – Campo de temperatura no reservatório multitanque após 4 horas.



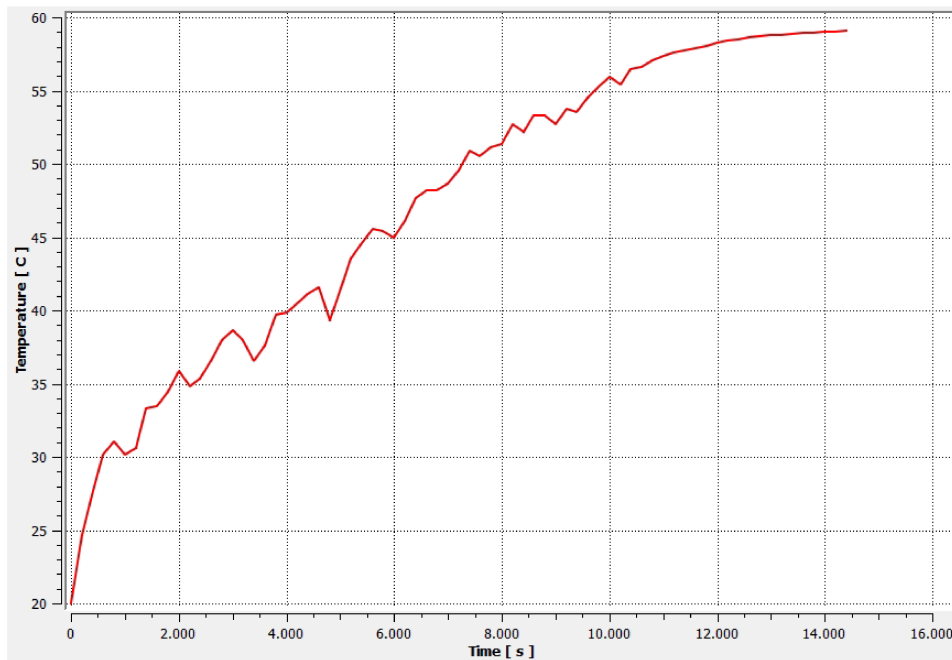
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 18 – Gráfico da temperatura em relação à altura do reservatório, após 4 horas de aquecimento.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 19 – Gráfico da temperatura na saída de água quente do reservatório em função do tempo de aquecimento.

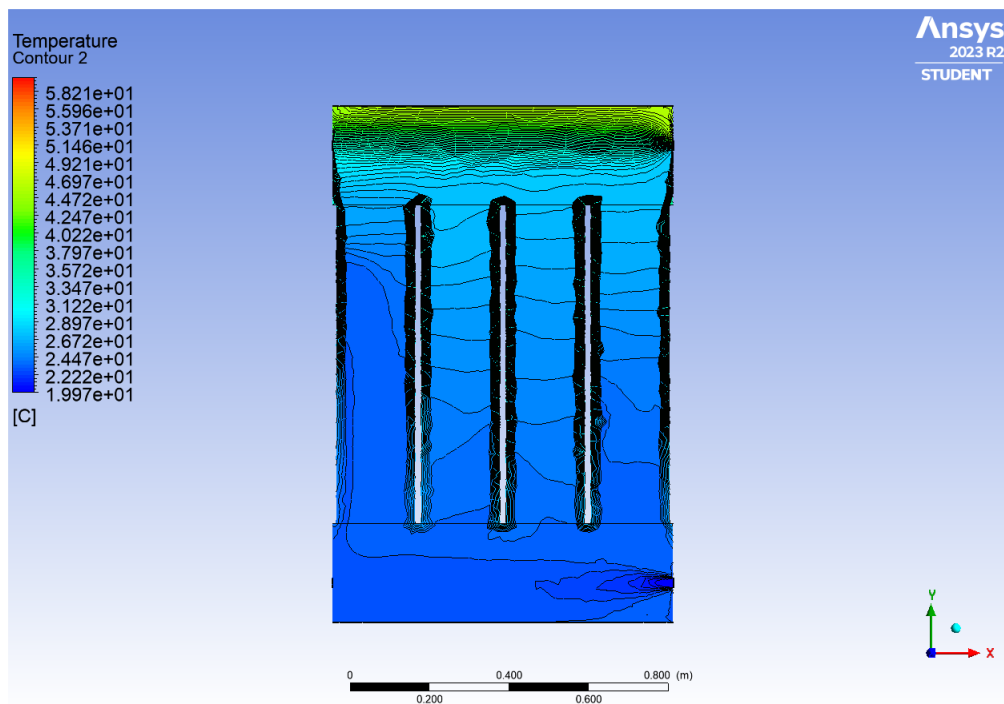


Fonte: Autoria própria (2023).

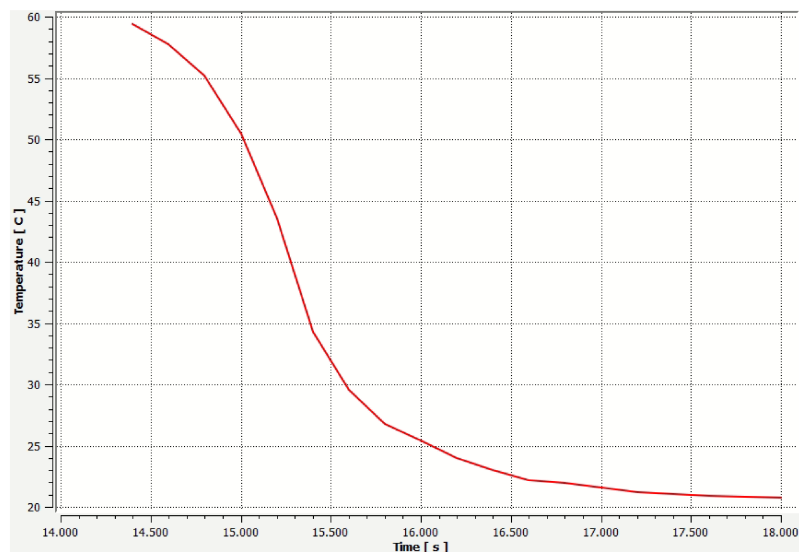
O reservatório também foi simulado considerando o efeito do *bypass*, ou seja, com a saída de água quente para consumo e entrada de água fria. O procedimento foi realizado utilizando as velocidades de entrada e saída de 1 m/s, retiradas da simulação de Cunha (2019). A Figura 20 apresenta os gráficos do campo de temperatura do reservatório após 15 minutos e a temperatura na saída do reservatório de acordo com o tempo.

Figura 20 – Reservatório térmico multitanque com bypass.

(a) Campo de temperatura do reservatório multitanque, considerando efeito do *bypass*, após 15 minutos de consumo de água quente.



(b) Temperatura na saída de água quente do reservatório multitanque em função do tempo de consumo.



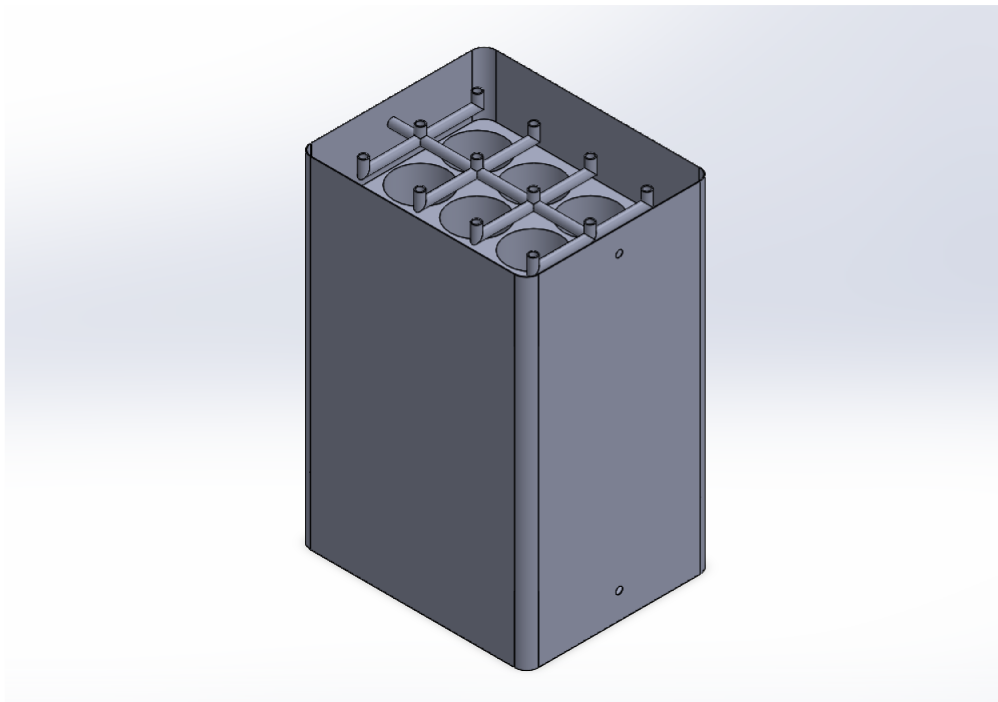
Fonte: Autoria própria (2023).

4.2 Variações internas do reservatório

Com base no que foi apresentado na seção anterior, torna-se imprescindível conduzir um estudo comparativo com outros modelos de reservatórios para avaliar sua eficiência. As imagens gráficas detalhadas podem ser observados no Apêndice A.

Uma das hipóteses que explicaria a eficaz estratificação do reservatório multitanque é a presença dos cilindros internos, que influenciam a dinâmica da turbulência. Com o intuito de investigar essa teoria, foram realizadas simulações adicionais utilizando um reservatório de estrutura idêntica, porém com um diferente tipo de entrada de água quente. Foi considerado uma tubulação que injetasse água para cima e estivesse alinhado com o centro de cada cilindro do reservatório. A Figura 21 apresenta o desenho do reservatório no *software SolidWorks*, com corte transversal na parte superior do tanque para melhor visualização.

Figura 21 – Modelo do reservatório térmico multitanque com tubulação.

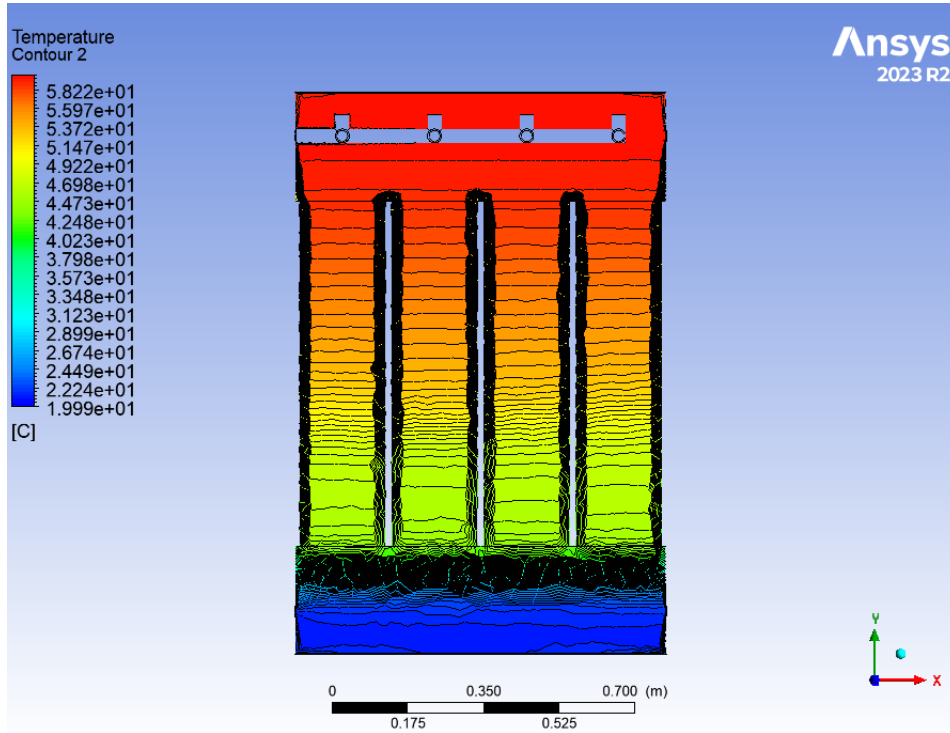


Fonte: Autoria própria (2023).

As condições de contorno inseridas no *solver* foram as mesmas dos reservatório térmico multitanque sem tubulação, com a velocidade de entrada sendo dividida igualmente entre cada ramificação da tubulação. As Figuras 22, 23, 24 e 25 apresentam, respectivamente, os gráficos do campo de temperatura após 2 horas e 4 horas, temperatura em relação à altura e temperatura na tubulação de água quente de acordo com o tempo.

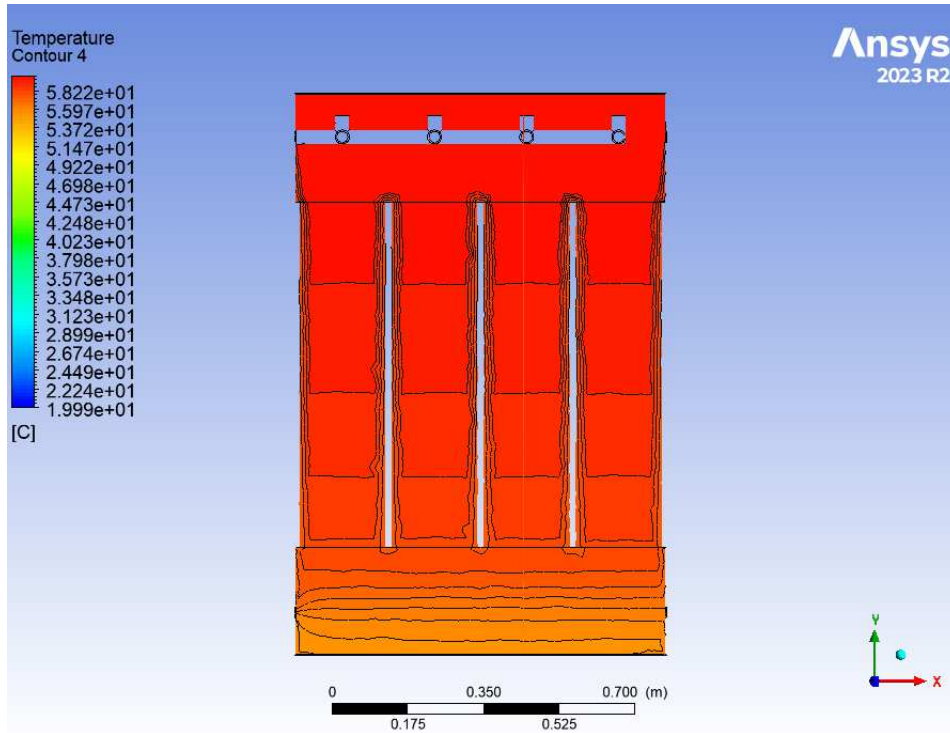
Assim como na seção anterior, o reservatório multitanque com tubulação foi simulado considerando o consumo de água quente juntamente com a entrada de água fria. A Figura 26 apresenta o campo de temperatura do reservatório após 15 minutos e a Figura 27 a temperatura na saída do reservatório de acordo com o tempo.

Figura 22 – Campo de temperatura no reservatório térmico após 2 horas de aquecimento.



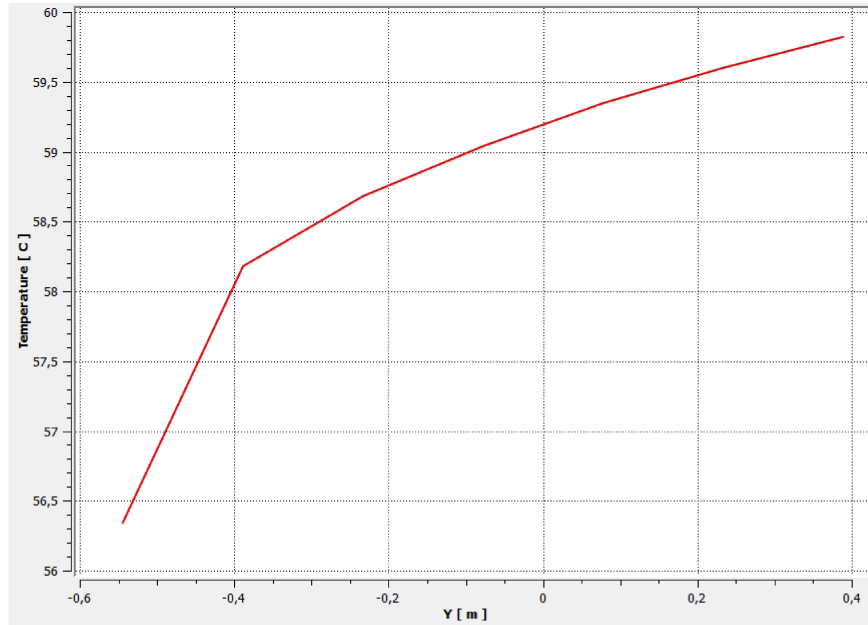
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 23 – Campo de temperatura no reservatório térmico após 4 horas de aquecimento.



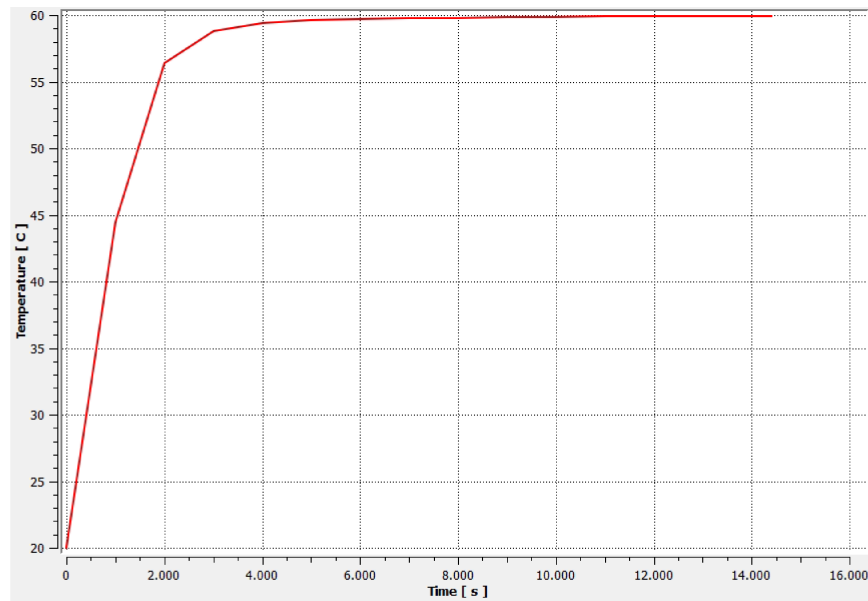
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 24 – Gráfico da temperatura em relação à altura do reservatório, com tubulação na entrada, após 4 horas.



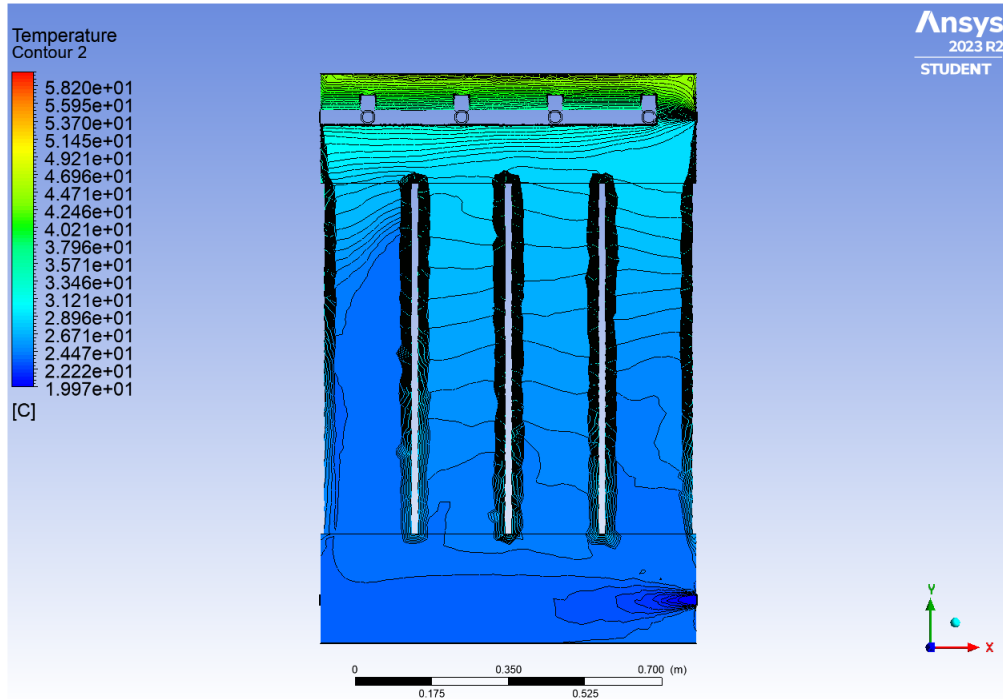
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 25 – Gráfico da temperatura na saída de água quente do reservatório em função do tempo de aquecimento, com tubulação na entrada.



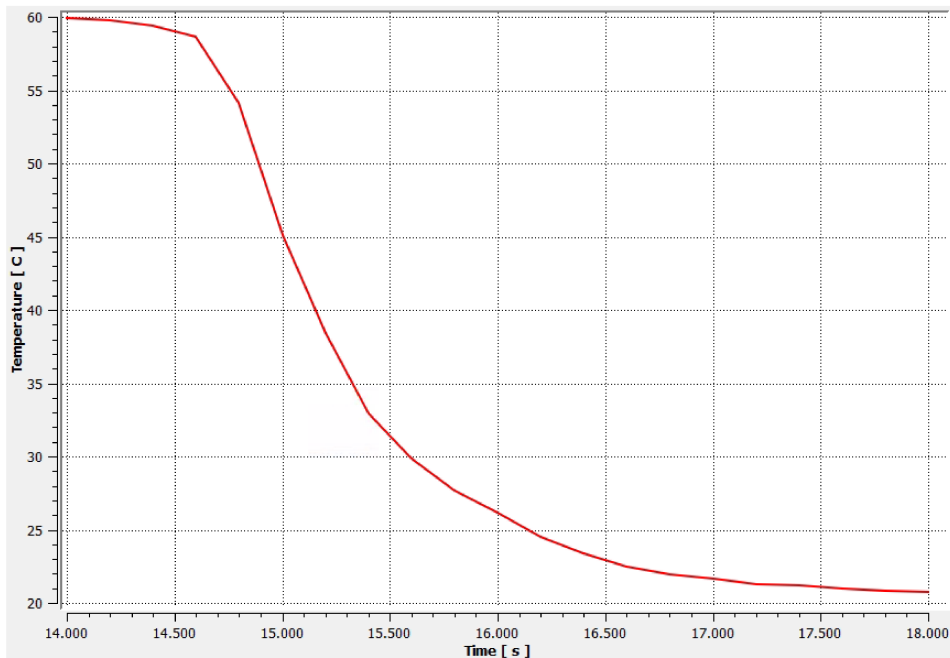
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 26 – Campo de temperatura do reservatório multitanque com tubulação, considerando efeito do *bypass*, após 15 minutos de consumo.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 27 – Temperatura na saída de água quente do reservatório multitanque com tubulação em função do tempo de consumo.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.3 Discussões

Como mencionado na seção anterior, o reservatório de água quente multitanque apresentou resultados satisfatórios após quatro horas de simulação. Comparando com as primeiras simulações realizada por Cunha (2019), percebe-se que o reservatório com cilindros atinge a temperatura adequada horas antes do reservatório comum na vertical. A mesma situação se aplica ao reservatório na horizontal de Eames e Norton (1998), dentro dos resultados obtidos por Cunha (2019) em sua análise numérica.

A diferença de aquecimento entre os reservatórios de multitanque com os de Cunha (2019) e Eames e Norton (1998) é explicado em grande parte pelo aumento de 27% no diâmetro e de 100% na velocidade na entrada de água quente. Em uma inspeção visual, baseada nas figuras apresentadas por Cunha (2019) em seu trabalho, a distribuição de temperatura após duas horas no reservatório multitanque com tubulação é mais estratificada do que nos outros dois reservatórios. A Figura 28 ilustra a comparação entre os reservatórios.

É perceptível uma discrepância no aquecimento da água entre os reservatórios com e sem tubulação. O aquecimento da água no reservatório sem tubulação na entrada ocorre mais lentamente, com a turbulência gerada pelos choques na parede afetando a distribuição da água. A Figura 29 e Figura 30 apresentam comparações entre os dois reservatórios multitanque.

Ao comparar o desempenho dos reservatórios durante o processo de consumo de água quente, nota-se que eles exibem um comportamento bastante similar. A razão provável para a falta de distinção significativa entre os resultados reside na disposição dos orifícios nos reservatórios e na configuração da rede de tubulação. A análise foi conduzida sob os mesmos parâmetros delineados por Cunha (2019), que inclui velocidades elevadas em torno de 1 m/s encontradas com frequência em reservatórios térmicos comerciais. As perturbações resultantes do impacto da água com os componentes da tubulação, bem como a inexistência de uma diferença substancial na altura entre a entrada de água fria e a saída de água quente, contribuíram para a aproximação dos resultados entre os reservatórios com e sem tubulação.

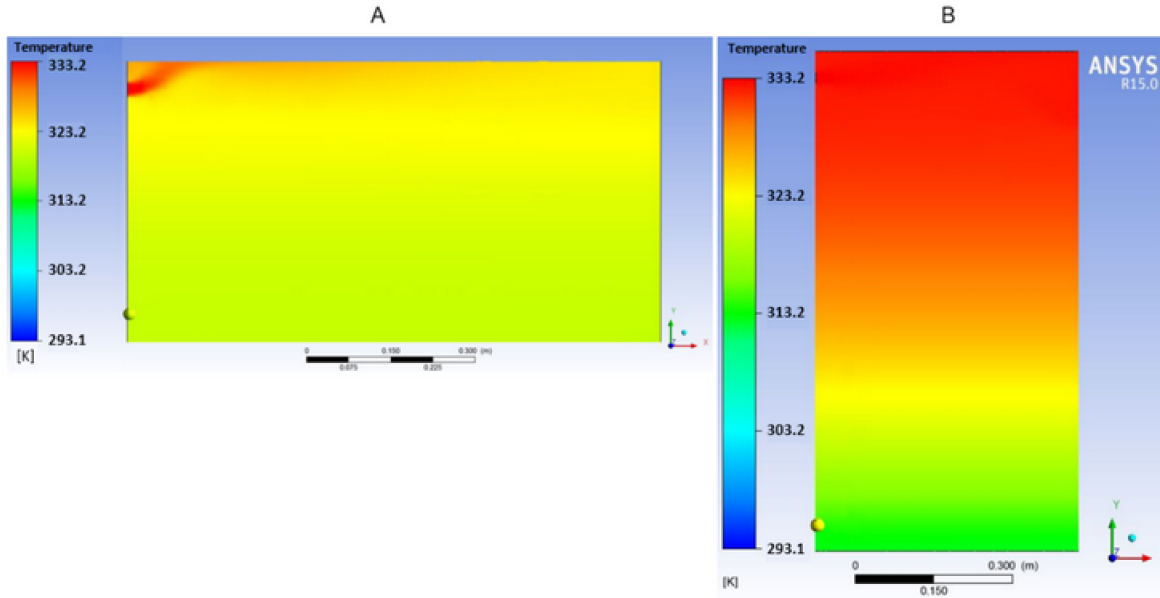
É importante ressaltar algumas considerações que foram feitas durante o processo de análise numérica. O estudo da distribuição de carga nas ramificações foi simplificado de maneira que cada uma das saídas de água quente tivesse uma vazão igual a outra. Isso foi admitido para que se pudesse ter uma noção do efeito da velocidade da entrada de água dentro do contexto da estratificação térmica, por conta das mudanças dimensionais do reservatório.

A diferença de volume entre os reservatórios multitanque desse estudo e os reservatórios na vertical de Cunha (2019) tornou inviável a escolha de uma velocidade muito baixa. Por ter quase o dobro do volume de água fria, o fluxo de água quente num diâmetro de 20 mm a 75 mm do reservatório vertical comum não possui energia suficiente para aquecer o reservatório multitanque de maneira adequada. Por isso, adequações nas condições de contorno precisaram ser realizadas.

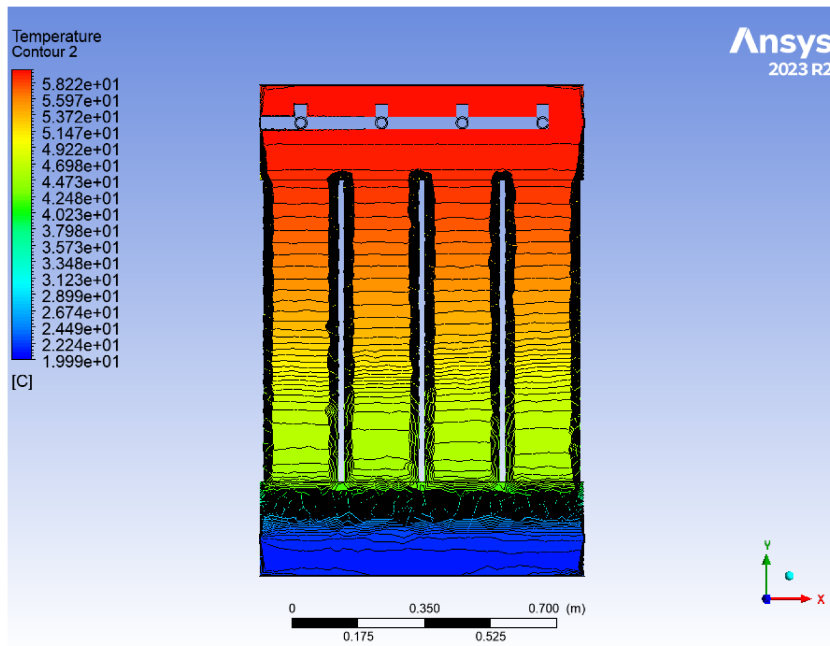
Figura 28 – Comparativo entre o estudo numérico de Cunha (2019) com o reservatório multitanque.

(a) Reservatórios simulados por Cunha (2019).

Comparativo: (A)-Campo de temperatura do reservatório na horizontal e (B)-Campo de temperatura do reservatório na vertical

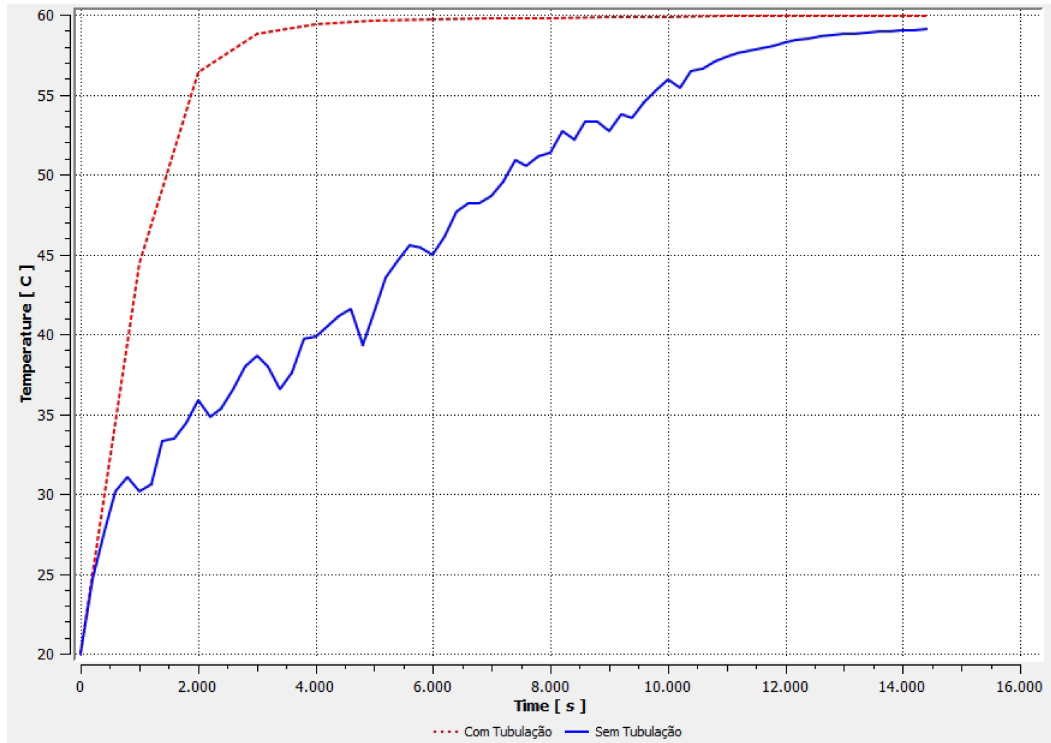


(b) Campo de temperatura do reservatório térmico multitanque com tubulação.



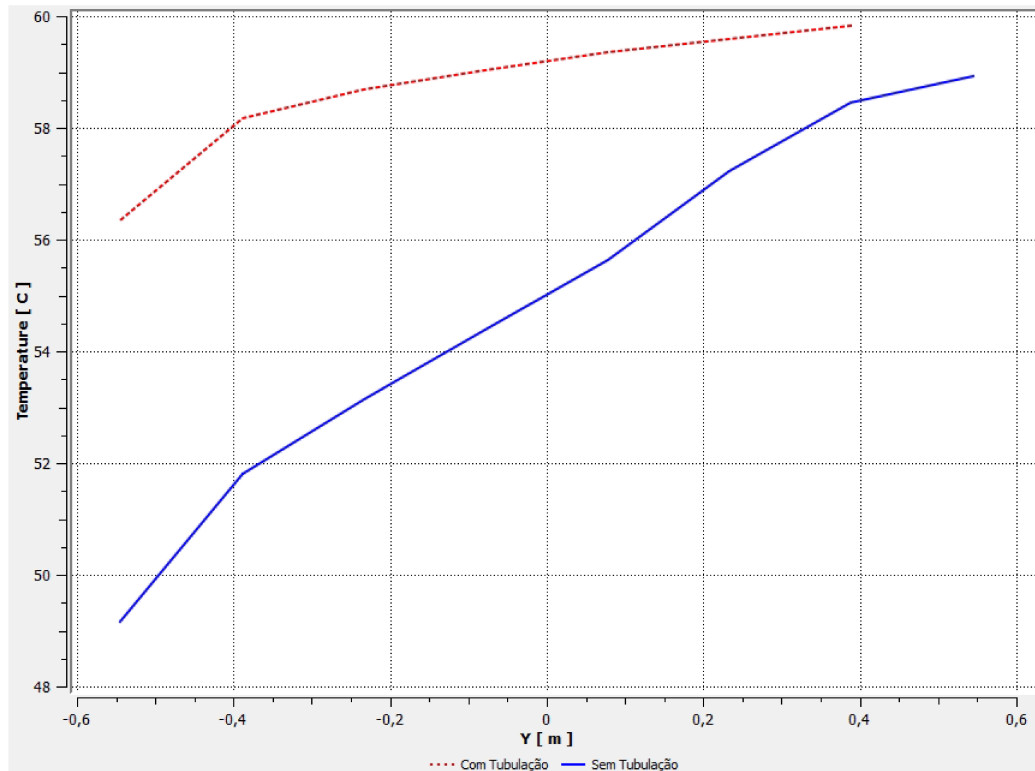
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 29 – Comparação entre a temperatura na saída de água quente nos reservatórios multitanque.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 30 – Comparação entre a distribuição de temperatura ao longo da altura do reservatório após 4 horas.



Fonte: Autoria própria (2023).

Os pequenos cilindros internos que formam o reservatório multitanque, juntamente com uma boa distribuição inicial de água quente na entrada, obtiveram um resultado satisfatório no que tange a estratificação térmica do reservatório vertical. Uma validação do estudo numérico conseguirá provar o efeito positivo das paredes do cilindro na redução da turbulência da água no reservatório térmico multitanque.

5 CONCLUSÃO

O armazenamento de energia térmica é uma importante estratégia para aproveitar a energia renovável e garantir o fornecimento de calor em sistemas de aquecimento. Nesse contexto, os reservatórios térmicos são componentes fundamentais para garantir a eficiência e a segurança do sistema. Por meio de uma análise numérica, esse trabalho mostrou que o reservatório térmico vertical apresenta uma melhor estratificação térmica aos reservatórios convencionais posicionados na horizontal, pois permite um melhor controle da distribuição do calor e reduz as perdas térmicas.

Da mesma forma, os reservatórios verticais multitanques apresentaram uma eficiência ainda maior devido às paredes dos cilindros internos que modificam o comportamento da turbulência e distribuem a água dentro do reservatório de maneira mais estratificada. É importante notar a diferença entre o reservatório sem e com tubulação na entrada de água quente, pois este último teve um desempenho superior ao primeiro.

Enquanto o campo de temperatura do reservatório multitanque sem tubulação possui diversas camadas misturadas pela turbulência, a versão com tubulação na entrada de água quente possui menos subdivisões em suas camadas e um número bem reduzido de regiões com perturbações. Considerando uma retirada de água quente a 1 m/s, os dois reservatórios multitanque retêm água quente por cerca de 13 minutos.

A adaptação de reservatórios altos, apesar de ser mais eficiente termicamente, nas residências já construídas é inviável. Por isso, o estudo demonstrou que é possível aplicar o mesmo conceito de relação altura/comprimento (L/D), porém com uma altura mais baixa, utilizando sistemas de multitanque para obter o mesmo volume de armazenamento. Essa abordagem oferece uma solução prática para contornar as limitações de espaço em residências existentes, mantendo a eficiência térmica desejada. Assim, o equilíbrio entre eficiência e viabilidade espacial pode ser alcançado, tornando essa alternativa uma estratégia promissora na busca por soluções sustentáveis de armazenamento de energia térmica em ambientes residenciais.

Como sugestão para estudos futuros, recomenda-se a validação do estudo numérico por meio de resultados experimentais. Caso seja conduzida outra análise numérica, é recomendada a modelagem de reservatórios multitanques considerando fatores que o aproximem de seu comportamento real, como o preenchimento parcial de água no tanque e diferentes posições da saída de água quente.

REFERÊNCIAS

- 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. ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X99000365>. Acesso em: 7 nov. 2023.
- ALTUNTOP, N. *et al.* Effect of obstacles on thermal stratification in hot water storage tanks. **Applied Thermal Engineering**, v. 25, n. 14, p. 2285–2298, 2005. ISSN 1359-4311. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431105000311>. Acesso em: 7 nov. 2023.
- ANDERSEN, E.; FURBO, S. Thermal destratification in small standard solar tanks due to mixing during tapping. *In: _____*. **Thermal destratification in small standard solar tanks due to mixing during tapping**. [S.l.: s.n.], 1999. ISES 1999 Solar World Congress : Solar is renewable ; Conference date: 04-07-1999 Through 09-07-1999.
- ANGRISANI, G. *et al.* Calibration and validation of a thermal energy storage model: Influence on simulation results. **Applied Thermal Engineering**, v. 67, n. 1, p. 190–200, 2014. ISSN 1359-4311. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111400177X>.
- ANSYS. **Academic Research Mechanical and CFD. Versão 15.0. License Pack Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Departamento Acadêmico de Mecânica #672590**. 2023. Disponível em: <https://www.ansys.com/>.
- ARATA, A.; WINTER, F. Design and performance of large solar water heating systems. **Proceedings of ISES 1991 Solar World Congress**, p. 1306–1312, 1991.
- ARSLAN, M.; ALTUNTOP, N.; OZCEYHAN, V. The effect of using different obstacles into thermal stratification in hot water storage tank with forced convection. 2004.
- CRUICKSHANK, C. A. Evaluation of a stratified multi-tank thermal storage for solar heating applications. Queen’s University Kingston, ON, Canada, 2009.
- CUNHA, D. F. N. D. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA EM UM RESERVATÓRIO DE ÁGUA QUENTE PROVENIENTE DE UM SISTEMA COM AQUECIMENTO SOLAR**. 2019. 57 f. Monografia (Bacharelado) — Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2019.
- EAMES, P.; NORTON, B. The effect of tank geometry on thermally stratified sensible heat storage subject to low reynolds number flows. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 41, n. 14, p. 2131–2142, 1998. ISSN 0017-9310. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931097003499>. Acesso em: 7 nov. 2023.
- JOUHRI, M.; DHAKAR, P. A review study on solar water heating systems. **Journal of Emerging Technologies and Innovative Research**, v. 6, n. 6, p. 222–224, 2019.
- LAVAN, Z.; THOMPSON, J. Experimental study of thermally stratified hot water storage tanks. **Solar Energy**, v. 19, n. 5, p. 519–524, 1977. ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X77901086>. Acesso em: 7 nov. 2023.

NELSON, J.; BALAKRISHNAN, A.; MURTHY, S. Transient analysis of energy storage in a thermally stratified water tank. **International Journal of Energy Research - INT J ENERG RES**, v. 22, p. 867–883, 08 1998. Acesso em: 7 nov. 2023.

RASHA, R. **Solar water heating systems with thermal storage for application in Newfoundland**. 2020. Tese (Doutorado) — Memorial University of Newfoundland, 2020.

SANTOS, F. G. D. dos. **Avaliação da susceptibilidade à corrosão galvânica em aços inoxidáveis ferrítico AISI 444 e austenítico AISI 304 utilizados na fabricação de reservatórios térmicos de aquecimento solar**. 2005. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

SHARP M. K. E LOEHRKE, R. I. Stratified thermal storage in residential solar energy applications. **Journal of Energy**, v. 3, n. 2, p. 106–113, 1979. Disponível em: <https://doi.org/10.2514/3.62417>. Acesso em: 7 nov. 2023.

SMUSZ, R.; KIELAN, P.; MAZUR, D. Analysis of thermal stratified storage tank. **Archives of Electrical Engineering**, v. 66, 09 2017.

SOLIDWORKS. **Solidworks Academic**. 2022. Disponível em: <https://www.solidworks.com/support/community-download>.

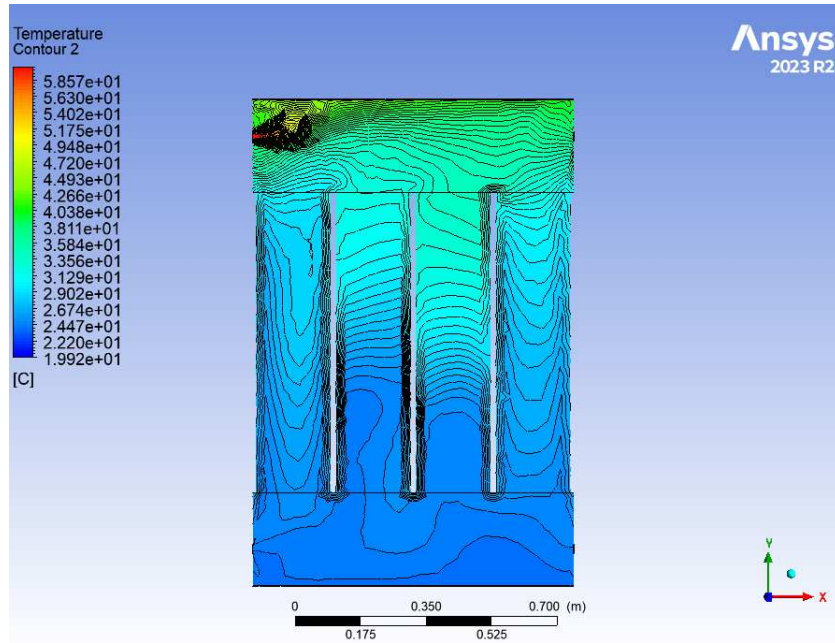
TACCHI, V. **Apparatus for heat storage through a thermovector liquid**. [S.l.]: Google Patents, 2003. US Patent 6,648,236.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics - the finite volume method**. [S.l.]: Addison-Wesley-Longman, 1995. I-X, 1-257 p. ISBN 978-0-582-21884-0.

YANG, Z. *et al.* Comparative study of the influences of different water tank shapes on thermal energy storage capacity and thermal stratification. **Renewable Energy**, v. 85, 01 2016.

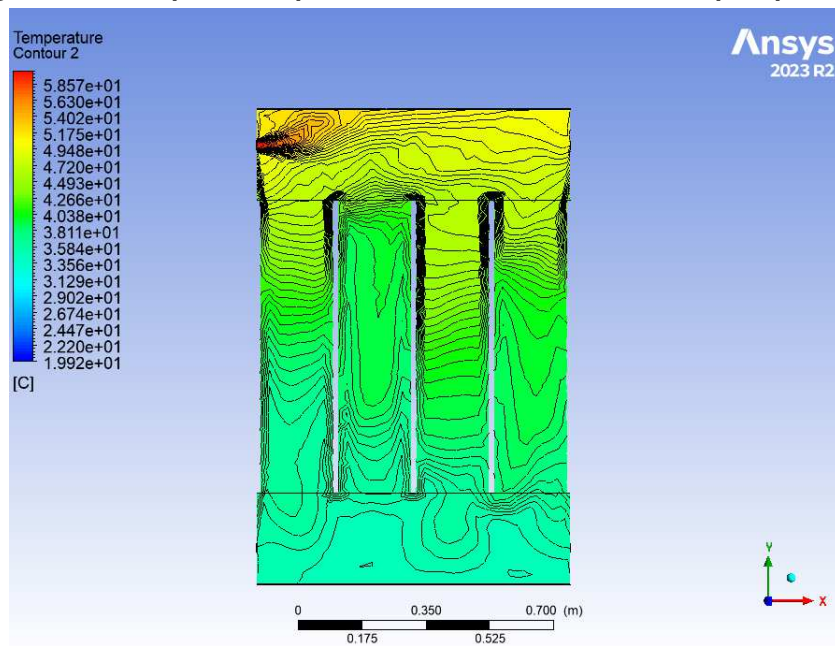
APÊNDICE A – Resultados da simulação

Figura 31 – Campo de temperatura no reservatório multitanque após 1hr.



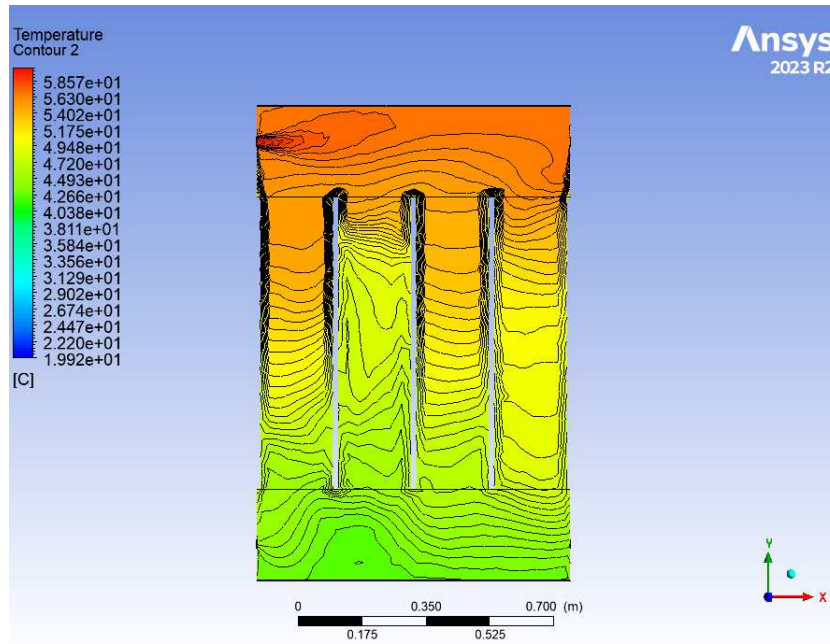
Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 32 – Campo de temperatura no reservatório multitanque após 2hrs.



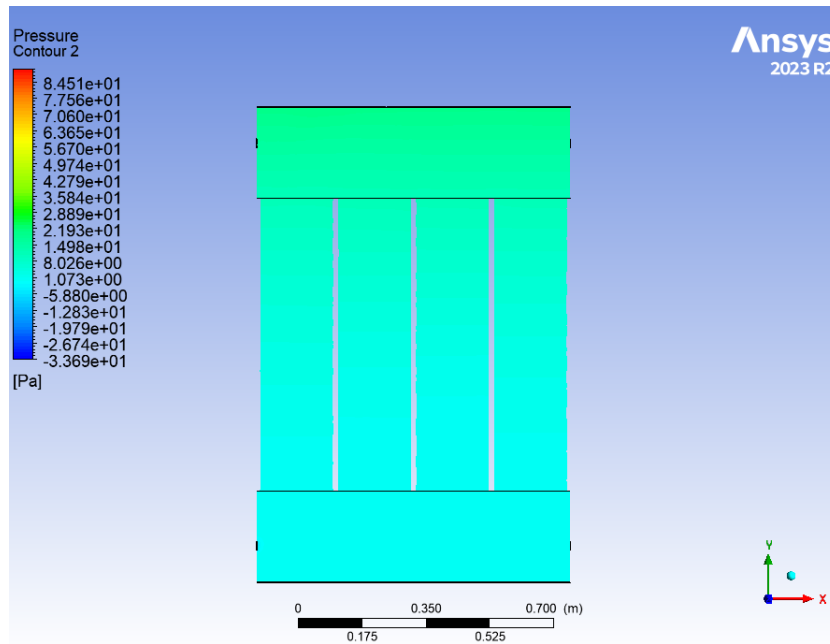
Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 33 – Campo de temperatura no reservatório multitanque após 3hrs.



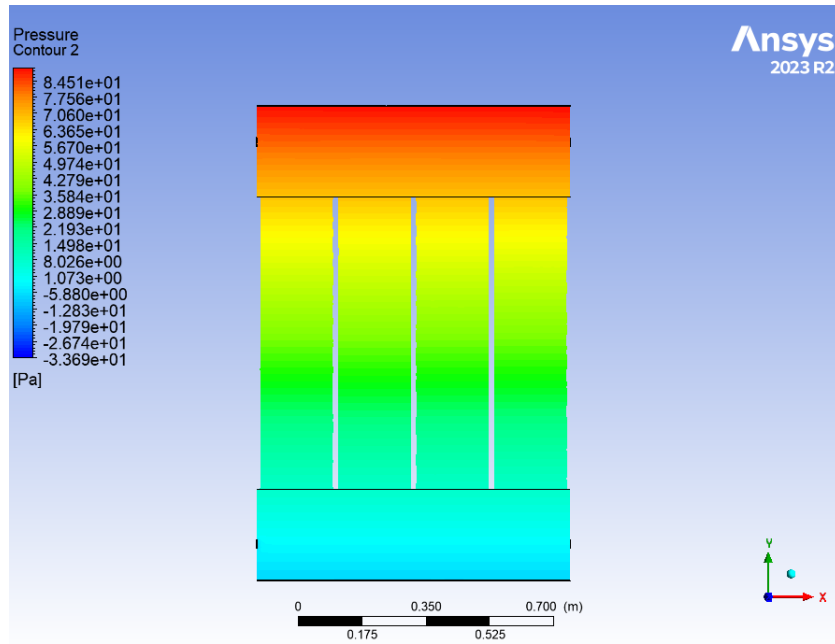
Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 34 – Campo de pressão no reservatório multitanque após 1hr.



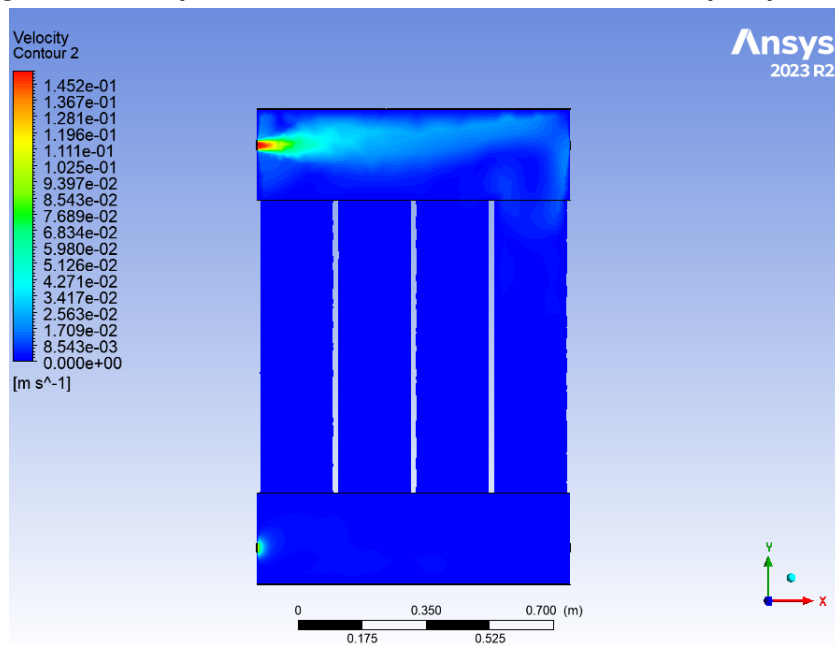
Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 35 – Campo de pressão no reservatório multitanque após 2hrs.



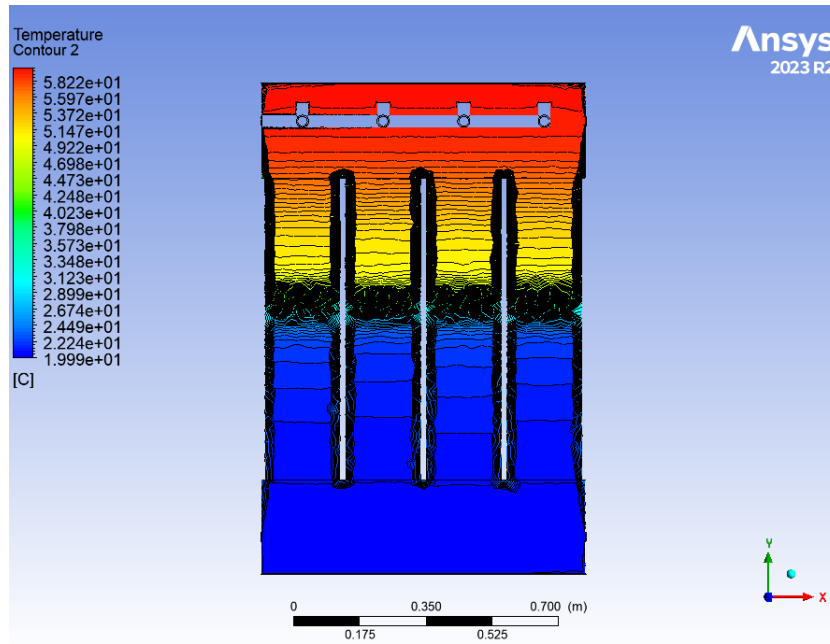
Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 36 – Campo de velocidade no reservatório multitanque após 3hrs.



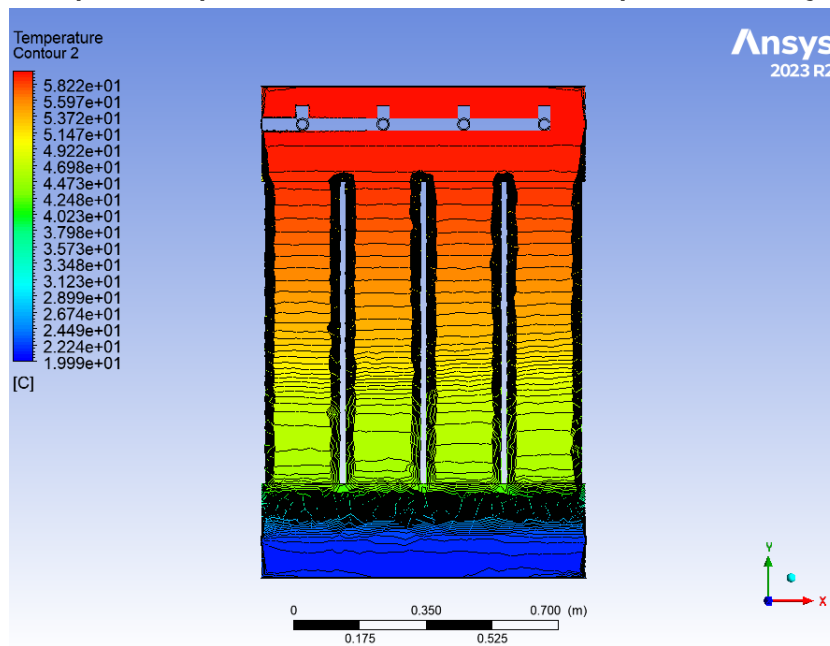
Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 37 – Campo de temperatura no reservatório multitanque com tubulação após 1hr.



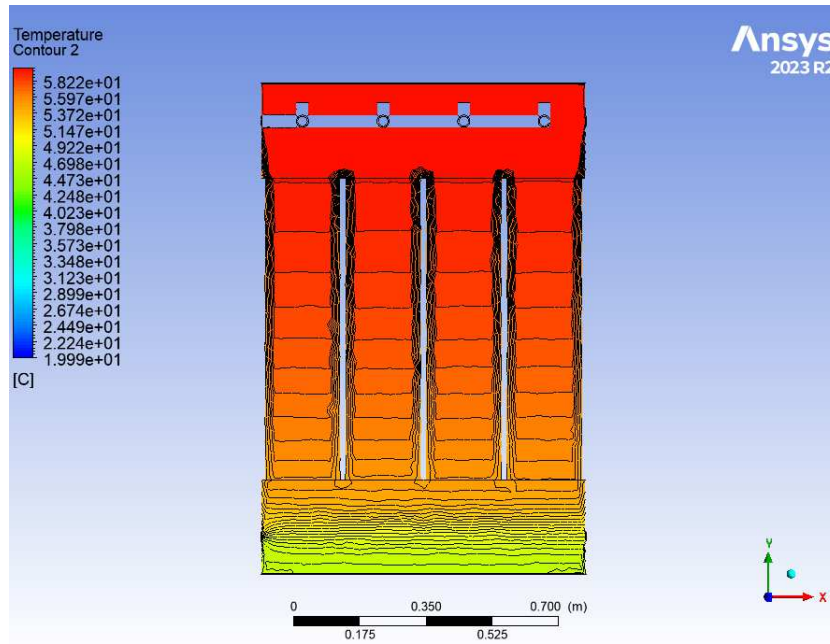
Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 38 – Campo de temperatura no reservatório multitanque com tubulação após 2hrs.



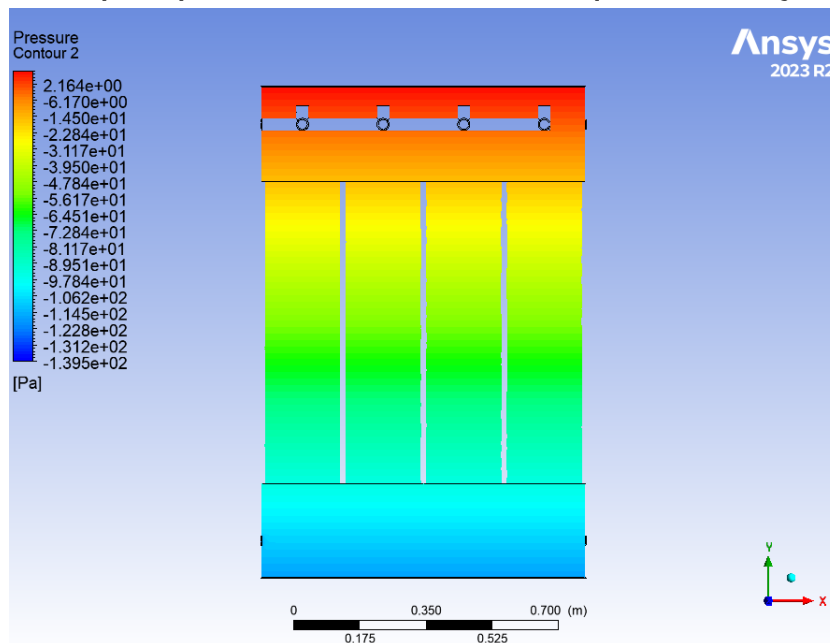
Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 39 – Campo de temperatura no reservatório multitanque com tubulação após 3hrs.



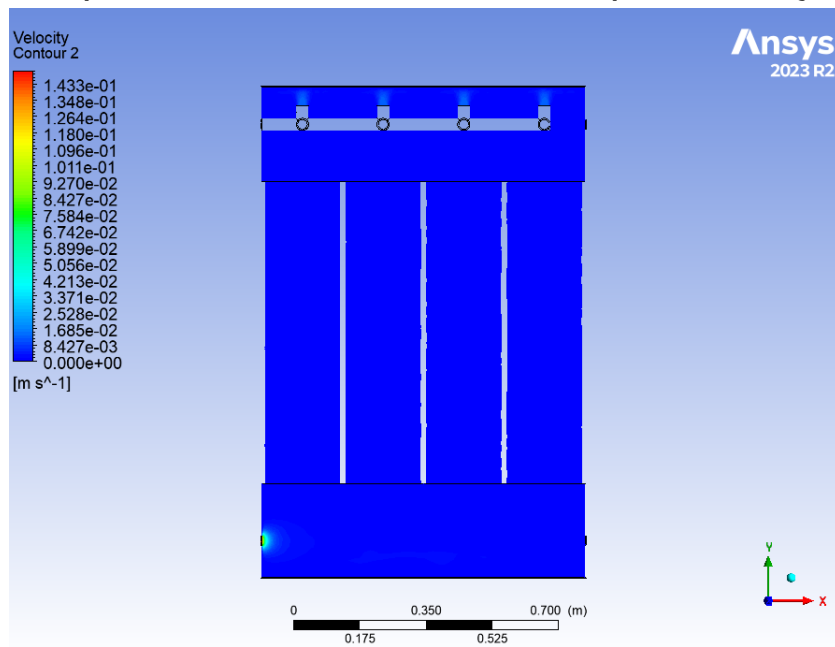
Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 40 – Campo de pressão no reservatório multitanque com tubulação após 4hrs.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 41 – Campo de velocidade no reservatório multitanque com tubulação após 4hrs.



Fonte: Autoria Própria (2023).