



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia
Campus de Bauru



**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE ESTRATIFICAÇÃO
TÉRMICA DE LÍQUIDO PELO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS**

Rodrigo Romano

BAURU
2006



Número de chamada
Clas. T/UNESP
PHA R 6640
Tombo n° 1.374



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia
Campus de Bauru



ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA DE LÍQUIDO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

RODRIGO ROMANO



Dissertação apresentada à
Faculdade de Engenharia da
UNESP - Campus de Bauru, para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica.

BAURU - SP
Fevereiro - 2006





UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia
Campus de Bauru



ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA DE LÍQUIDO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

RODRIGO ROMANO

Orientador: Prof. Dr. Alcides Padilha

**Dissertação apresentada à
Faculdade de Engenharia da
UNESP - Campus de Bauru, para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica.**

BAURU – SP
Fevereiro – 2006



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia
Campus de Bauru



ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE ESTRATIFICAÇÃO
TÉRMICA DE LÍQUIDO PELO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS

**DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - BAURU**

Romano, Rodrigo.

Análise da eficiência de estratificação
térmica de líquido pelo método dos elementos
finitos / Rodrigo Romano, 2006.
67 f.

Orientador : Alcides Padilha.

Dissertação (Mestrado) - Universidade
Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia,
Bauru, 2006.

1. Estratificação térmica. 2. Convecção
natural. 3. Elementos finitos. 4. Armazenamento
de energia. I - Universidade Estadual Paulista.
Faculdade de Engenharia. II - Título.

Ficha catalográfica elaborada por Maristela Brichi Cintra - CRB 5046

BAURU - SP
Fevereiro - 2006



ATA Nº 082/2006

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE RODRIGO ROMANO, ALUNO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNESP - CAMPUS DE BAURU.

No dia vinte e um de fevereiro de dois mil e seis, às 9 horas, no anfiteatro do prédio da Pós-graduação, da Faculdade de Engenharia da UNESP, Campus de Bauru, reuniu-se à Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelo Professor Doutor Alcides Padilha do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia - UNESP - Campus de Bauru, Presidente da Banca, Professor Doutor Vicente Luiz Scalon, do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP - Campus de Bauru e o Professor Doutor Ramon Molina Valle do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, a fim de proceder à arguição pública da Dissertação do candidato RODRIGO ROMANO, intitulada "ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA DE LÍQUIDO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS". O Professor Doutor Alcides Padilha, Presidente da Banca, apresentou o candidato, que dissertou sobre seu trabalho, em quarenta minutos, após, o candidato foi argüido oralmente pelos membros componentes da Comissão Examinadora no tempo regulamentar exigido. Logo após, reuniu-se a Comissão Examinadora, tendo apresentado o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após, lida e aprovada, será assinada pelos Senhores Membros da Comissão Examinadora.

Bauru, 21 de fevereiro de dois mil e seis.

Prof. Dr. Alcides Padilha

Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon

Prof. Dr. Ramon Molina Valle

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a todos aqueles que colaboraram para a realização deste trabalho e, em particular:

Ao Prof. Dr. Alcides Padilha, pelo seu estímulo e colaboração durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon, pelo apoio em momentos decisivos durante este trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Bauru, pela atenção e colaboração como um todo.

Aos professores do curso de Pós-graduação, pela clareza de propósitos que contribuíram sobremaneira para a minha formação.



Agradeço de forma especial aos meus pais, Décio e Cristina, às minhas irmãs, Cecília e Laura, e à minha namorada, Camila, pelo incentivo nos momentos difíceis durante a realização deste trabalho.

ROMANO, R. **Análise da eficiência de estratificação térmica de líquido pelo método dos elementos finitos**. 2006. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2006.

RESUMO

Nesse trabalho foi proposto um modelo matemático que simulou o processo da estocagem de energia via estratificação térmica. Para solução desse modelo foi utilizado o método dos elementos finitos, o que permitiu análise de projeto melhorando a eficiência das dinâmicas de carga e descarga de armazenadores térmicos. Primeiramente, foi levantada uma revisão da bibliografia sobre as recentes evoluções do tema proposto e assim a obtenção de novos padrões de comparação, bem como suas dimensões características. A partir desse padrão, novos parâmetros foram definidos, variando-se a altura relativa do armazenador ao aquecedor, a razão de aspecto do armazenador e a intensidade de escoamento no interior do sistema. Após obtenção do modelo matemático e da geometria do domínio dos problemas, foi usado um algoritmo para gerar as malhas de elementos finitos para cada um deles. De posse das malhas e com um segundo algoritmo, foram obtidos dados de temperatura, velocidade e eficiência de cada modelo, para diferentes intervalos de tempo. Os resultados obtidos do modelo proposto foram convalidados com os disponíveis na literatura.

Key words: thermal stratification, natural convection, finite element, storage

Palavras-chave: estratificação térmica, convecção natural, elementos finitos, armazenamento de energia.



ROMANO, R. **Análise da eficiência de estratificação térmica de líquido pelo método dos elementos finitos**. 2006. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2006.

ABSTRACT

In this work a mathematical model was considered that simulated the process of thermal energy storage by thermal stratification. The finite elements method was used to solve this model providing new project parameters to improving the efficiency of thermal stratified storages. A revision of the bibliography was made about the recent evolutions of the considered subject and thus the attainment of new comparison standards, as well as its dimensions characteristic. From this standard, new parameters had been defined varying relative height of the storing to the heater, the aspect ratio of storage and the flow intensity in the interior of the system. After attainment of the mathematical model and the domain geometry of the problems, was used an algorithm to generate the meshes of finite elements for each one of them. With the meshes and another algorithm had been gotten temperature, speed and efficiency data of each model for different intervals of time. The gotten results of the considered model had been validated with the available ones in literature.

Key words: thermal stratification, natural convection, finite element, storage energy.



ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABELAS	viii
NOMENCLATURA	ix
NOMENCLATURA	ix
1 Introdução	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Objetivo do trabalho	3
2 Revisão Bibliográfica	4
2.1. Tipos de dispositivos	4
2.2. Princípio de funcionamento	5
2.3. Aspectos técnicos de sistemas de armazenagem de energia para refrigeração	7
2.4. Histórico das pesquisas	9
3 Modelo Matemático	18
3.1. Problema físico proposto	18
3.2. Modelamento matemático para o problema proposto	20
3.3. Eficiência de estratificação térmica	24
4 Solução do Modelo Matemático Proposto	26
4.1. Geração das malhas de elementos finitos	28
4.2. Definição das geometrias	31
5 Resultados e Discussões	37
5.1. Validação do modelo matemático	38
5.2. Operação de carga e eficiência de estratificação	39
6 Conclusões e Extensões Futuras	61
6.1. Conclusões	61
6.2. Extensões futuras	62
7 Referências Bibliográficas	63
7.1. Bibliografia Complementar	66



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação entre sistemas de armazenamentos convencionais e sistemas TES. Fonte: Dincer e Rosen (2001).....	7
Figura 2 - Esquema de disposição do aquecedor, tubos de ligação e armazenador no sistema.....	19
Figura 3 - Ilustração das condições de contorno nas paredes do modelo (dimensional).....	21
Figura 4 - Ilustração das condições de contorno nas paredes do modelo (adimensional).....	23
Figura 5 - Esboço da malha de elementos finitos.	28
Figura 6 - Disposição dos super-elementos.	29
Figura 7 - Posição relativa e numeração dos super-elementos.	30
Figura 8 - Disposição dos super-elementos sobre o modelo físico.....	31
Figura 9 - Geometria do problema: razão de aspecto $B = 3,33$	32
Figura 10 - Geometria do problema: razão de aspecto $B = 2,0$	33
Figura 11 - Geometria do problema: razão de aspecto $B = 5,0$	34
Figura 12 - Comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os resultados teóricos e experimentais de Leal (1999).	39
Figura 13 - Comportamento de carga para o Caso 1.....	40
Figura 14 - Comportamento de carga para o Caso 2.....	41
Figura 15 - Comportamento de carga para o Caso 3.....	41
Figura 16 - Comportamento de carga para o Caso 4.....	42
Figura 17 - Comportamento do grau de carregamento em relação ao desnível do tanque $B=2,0$	43
Figura 18 - Comportamento do grau de carregamento em relação ao desnível do tanque $B=3,33$	43
Figura 19 - Comportamento do grau de carregamento em relação ao desnível do tanque $B=5,0$	44
Figura 20 - Dinâmica de carga para o caso 12.	45
Figura 21 - Vetores de velocidade no interior do tanque para $\tau = 0,01$. a) $B=2,0$; b) $B=3,33$; c) $B=5,0$	46



Figura 22 - Influência da razão de aspecto na qualidade de estratificação ($\tau=0,02$)	47
Figura 23 - Influência da razão de aspecto na qualidade de estratificação ($\tau=0,03$)	47
Figura 24 - Variação da vazão em relação ao desnível ($B=2,0$)	48
Figura 25 - Variação da vazão em relação ao desnível ($B=3,33$)	49
Figura 26 - Variação da vazão em relação ao desnível ($B=5,0$)	49
Figura 27 - Eficiência de estratificação $B=2,0$	50
Figura 28 - Eficiência de estratificação $B=3,33$	51
Figura 29 - Eficiência de estratificação $B=5,0$	51
Figura 30 - Variação da eficiência de estratificação em relação ao tempo (Caso 5)	52
Figura 31 - Variação da eficiência de estratificação em relação ao tempo (Caso 6)	53
Figura 32 - Variação da eficiência de estratificação em relação ao tempo (Caso 7)	53
Figura 33 - Variação da eficiência de estratificação em relação ao tempo (Caso 8)	54
Figura 34 - Eficiência de estratificação em relação ao desnível ($B=3,33$)	55
Figura 35 - Eficiência de estratificação em relação ao desnível ($B=2,0$)	56
Figura 36 - Eficiência de estratificação em relação ao desnível ($B=5,0$)	56
Figura 37 - Efeito da razão de aspecto sobre a eficiência de estratificação (Desnível 0,15)	57
Figura 38 - Efeito da razão de aspecto sobre a eficiência de estratificação (Desnível 0,30)	58
Figura 39 - Efeito da razão de aspecto sobre a eficiência de estratificação (Desnível 0)	58
Figura 40 - Efeito da razão de aspecto sobre a eficiência de estratificação (Desnível -15)	59
Figura 41 - Eficiência em função da razão de aspecto para diferentes níveis	59



ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações da malha de elementos finitos (B=2,0 e B=3,33)..... 35

Tabela 2 - Especificações da malha de elementos finitos (B=5,0) 35

NOMENCLATURA

B :	Relação geométrica entre a altura e o diâmetro do reservatório, adimensional, $B=H/D$
D :	Diâmetro interno e externo do reservatório, respectivamente, $[m]$
D_s :	Desnível entre o topo do aquecedor e o fundo do armazenador, $[m]$
g :	Aceleração gravitacional, $[m/s^2]$
g_x :	Aceleração gravitacional na direção x , $[m/s^2]$
g_y :	Aceleração gravitacional na direção y , $[m/s^2]$
$\bar{H}$:	Altura do reservatório, $[m]$
h :	Coefficiente de transferência de calor entre a parede e o fluido no interior do reservatório, $[W/m^2K]$
i :	Índice de localização do ponto no reservatório.
K :	Condutividade térmica do fluido, $[W/mK]$
$\dot{m}$:	Fluxo de massa, $[kg/s]$
T_{max} :	Temperatura dimensional máxima do fluido, $[^\circ C]$
T_{min} :	Temperatura dimensional mínima do fluido, $[^\circ C]$
T^r :	Temperatura de referência, $[^\circ C]$
t :	Tempo dimensional, $[s]$
u :	Velocidade dimensional na direção x , $[m/s]$
U :	Velocidade adimensional na direção x
U_{sup} :	Velocidade adimensional na direção x sobre a superfície
v :	Velocidade dimensional na direção y , $[m/s]$
V :	Velocidade adimensional na direção y
V_{sup} :	Velocidade adimensional na direção y sobre a superfície
x :	Coordenada dimensional na direção horizontal, $[m]$
X :	Coordenada adimensional na direção horizontal
y :	Coordenada dimensional na direção vertical, $[m]$
Y :	Coordenada adimensional na direção vertical



p :	Pressão dimensional, [Pa]
P :	Pressão adimensional
Fo :	Número de Fourier
Nu :	Número de Nusselt, devido à convecção interna
Nu_{eq} :	Número de Nusselt equivalente
Pr :	Número de Prandtl
Ra :	Número de Rayleigh
Re :	Número de Reynolds
Gr :	Número de Grashof
α :	Difusividade térmica do fluido, $[m^2/s]$
β :	Coefficiente volumétrico de expansão térmica, $[1/K]$
τ :	Tempo adimensional
θ :	Temperatura adimensional do fluido
ν :	Viscosidade cinemática, $[m^2/s]$
μ :	Viscosidade dinâmica, $[kg/ms]$
ρ :	Massa específica do fluido, $[kg/m^3]$



1 Introdução

1.1. Generalidades

Atualmente, a condição de vida da população mundial tem exigido também diversas formas de energia, além da alta demanda, para um número cada vez maior de aplicações, seja na indústria, comércio, meio rural ou no ambiente doméstico.

Muitos pesquisadores alertam, porém, que as reservas naturais de petróleo e rios com potencial energético vêm sendo degradados rapidamente pela ação humana e que em poucos anos a disponibilidade dessas fontes de energia serão reduzidas a níveis baixíssimos ou até mesmo esgotadas.

Diante desse declínio de potencial energético, se faz necessária à busca por novas fontes alternativas de energia, além de um melhor aproveitamento das fontes ainda existentes e, principalmente, a reciclagem da energia.

O aquecimento de água há muito tempo é utilizado como forma de aproveitamento de energia em centrais termoelétricas, usinas nucleares, aquecedores solar e na indústria em geral, porém esse método pode ser utilizado a



partir da forma de reciclagem de energia em processos onde existe uma quantidade considerável de rejeito térmico, como é o caso de ciclos de refrigeração, gases quentes expelido nas chaminés de caldeiras e outros casos.

Porém esse não é o único meio de se armazenar energia e o calor não é a única forma de energia armazenável. A energia pode ser armazenada nas formas química, elétrica, mecânica (potencial ou cinética), magnética, térmica (latente ou sensível), entre outras.

Nos processos de armazenamento de energia térmica a entropia do material é aumentada em decorrência do aumento da energia interna. O material é então mantido nesse nível energético até sua utilização em outro processo, agora como fonte energética.

Quanto as formas de armazenamento pode-se citar:

- Armazenamento por Calor Sensível: quando uma determinada massa de substância tem sua temperatura variada e, assim, o nível sua energia interna para ser utilizada posteriormente.
- Armazenamento de Calor Latente: quando uma determinada massa de substância é mantida a temperatura constante, utilizando para isso, sua mudança de fase.
- Armazenamento Híbrido: quando se armazena energia térmica combinando calores sensível e latente.

A utilização de cada um dos tipos descritos depende de condições específicas e dos objetivos de cada processo.

Os armazenadores que utilizam o processo por calor sensível são ditos de temperatura homogênea quando a temperatura do fluido de trabalho é constante ao longo da sua altura do tanque. Se a temperatura variar em relação à altura, ou seja, a porção superior do reservatório apresentar temperatura maior que a porção inferior proporcionando um gradiente de temperatura, o processo é conhecido como armazenamento por estratificação térmica de líquido.

Nos armazenadores por temperatura homogênea o fluido é mantido a uma temperatura geralmente menor, que a temperatura máxima obtida em um armazenador estratificado, para a mesma quantidade de energia disponibilizada em ambas as formas de armazenamento. Esse aspecto deve ser



avaliado, tendo em vista que essa temperatura homogênea pode não ser suficiente para determinados processos.

A estratificação térmica pode ser obtida com a entrada do fluido quente na parte superior do reservatório, através de difusores ou de um material poroso que dissipam a perturbação cinética ou vorticidades.

Os armazenadores estratificados apresentam três regiões distintas do ponto de vista térmico. A região superior com as temperaturas mais altas, provenientes do aquecedor ou trocador de calor; a região inferior com as temperaturas mais baixas devido à entrada de fluido frio de uma rede de alimentação; e uma região intermediária com elevado gradiente de temperatura.

1.2. Objetivo do trabalho.

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar os parâmetros físicos e geométricos dos armazenadores de calor, via energia interna e, ainda, como seu posicionamento em relação à fonte quente influi no processo e assim, é possível analisar a melhor forma para se obter a máxima eficiência na estocagem de energia via estratificação térmica.

Além disto, busca-se neste trabalho, através do estudo da estratificação térmica, a identificação das fronteiras das camadas de fluido em diferentes níveis de temperatura no interior do reservatório, disponibilizando o seu emprego para o fornecimento de trabalho em um dispositivo. Em outras palavras: o fluido aquecido mantido em níveis distintos de temperatura em um reservatório é viável tanto como fonte de acionamento de uma máquina ou como água quente disponível para fins domésticos.



2 Revisão Bibliográfica

2.1. Tipos de dispositivos

Devido às vantagens dos armazenadores de calor sensível, previamente apresentadas na introdução deste trabalho, estudos sobre este tipo de equipamento começaram a ser intensificados e ganharam maior importância no meio científico a partir da década de 70. Os pesquisadores buscam o desenvolvimento e o aperfeiçoamento desses armazenadores, visando a reciclagem da energia térmica e o aumento da exergia dos mesmos.

Dincer e Rosen (2001), apresentaram quatro classes de substâncias armazenadoras de calor na forma de energia interna que podem ser empregadas em dispositivos armazenadores: por calor sensível, a água ou as rochas porosas como meio de armazenamento; por calor latente, o gelo ou sais hidratados e termoquímicos, que usam substâncias inorgânicas. A seleção adequada do material a ser utilizado depende principalmente do período necessário de estocagem de energia, da sua viabilidade econômica, condições de operação, etc. A escolha adequada da classe de TES (Thermal Energy Storage) a ser empregada é fundamental para a minimização das perdas de energia pela via



térmica, melhorando ainda o aproveitamento da energia térmica armazenada com uma pequena degradação na sua temperatura. Sob este aspecto, é oportuno ressaltar a atualidade do conceito de exergia, ligado à Segunda Lei da Termodinâmica como parâmetro de avaliação do sistema em estudo. Atualmente o uso de TES se apresenta como a melhor solução para se otimizar os tempos de picos de demanda e de provimento de energia, com potencial de contribuir significativamente para o preenchimento dos quesitos de maior eficiência, proteção ambiental e uso racional das fontes de energia.

2.2. Princípio de funcionamento

Para o chamado processo de armazenagem de energia térmica, de acordo com Dincer e Rosen (2001), admite-se uma massa a qual é denominada “massa de armazenamento” que tem a particularidade de reter (armazenar) calor ou frio sob a forma de energia interna.

Para ambientes quentes, a principal utilização dos equipamentos TES é gerar e armazenar energia térmica, fora dos horários de pico de energia elétrica, para uso em períodos nos quais se faz necessário. Um bom exemplo é o uso de equipamentos de condicionamento de ar em edifícios, utilizando-se central de geração de água fria, que podem consumir energia fora dos “horários de pico”, coincidindo com períodos nos quais não existe ocupação, beneficiando-se de tarifas reduzidas de eletricidade.

Para explicitar melhor o emprego desta tecnologia, deve-se lembrar que nos sistemas convencionais de arrefecimento (refrigeração) existem dois principais componentes: o chamado reservatório frio (chiller), que contém água ou outro fluido a baixa temperatura, e o sistema de distribuição, no qual o fluido à baixa temperatura circula do reservatório para o local onde se faz necessário o ar refrigerado.

Nos sistemas convencionais, o reservatório frio é acionado quando se necessita de ar refrigerado. Em sistemas que empregam a tecnologia de armazenamento de energia, o reservatório frio pode suprir as mesmas

necessidades, com a vantagem adicional quanto ao seu provimento de energia, pois o armazenamento para posterior uso é realizado fora dos “horários de pico”, geralmente durante a noite.

Uma interessante vertente no campo das pesquisas sobre armazenamento de energia é a combinação entre as fontes convencionais disponíveis, sob o aspecto da sua adequação, aos melhores períodos de utilização, ou seja, fora dos chamados “horários de pico”, onde as tarifas, particularmente as referentes à energia elétrica, são menores. Tais pesquisas contemplam a perfeita sincronização entre o consumo de energia fora do “horário de pico”, armazenando esta energia para uso posterior em horários nos quais se faça necessário.

Segundo Dincer, Dost e Li (1997), a tecnologia TES já está sendo empregada em larga escala em plantas industriais ou em prédios comerciais, no âmbito de um maior aproveitamento dos recursos energéticos disponíveis ou como elemento vital no projeto de novas construções. Para tanto, as vantagens dos chamados processos TES superam largamente as desvantagens, a saber:

- Redução no custo da energia.
- Redução no consumo de energia.
- Melhora na qualidade do ar no interior dos prédios.
- Maior flexibilidade nos horários de operação.
- Redução dos custos de implantação e manutenção dos equipamentos.

Em conjunto com estas vantagens, pode-se citar outros benefícios:

- Redução do tamanho dos equipamentos.
- Aumento da eficiência e da eficácia na utilização dos equipamentos.
- Melhor aproveitamento das fontes naturais de hidrocarbonetos (petróleo), pelo uso racional ou pela sua substituição.
- Redução na emissão de poluentes e gases que provocam o chamado “efeito estufa” (CO₂ e CFCs).

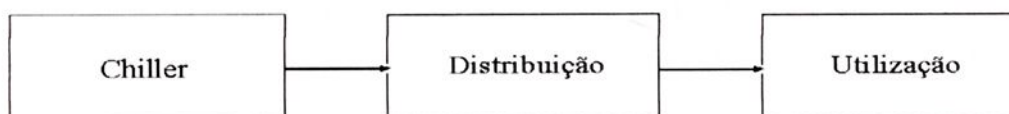
2.3. Aspectos técnicos de sistemas de armazenagem de energia para refrigeração

Em equipamentos para refrigeração, de acordo com Dincer e Rosen (2001), em particular equipamentos de condicionamento de ar, o “frio” é armazenado mediante o emprego de uma massa de armazenamento. Na Figura 1, o sistema de armazenagem de energia pode ser adicionado a um sistema pré-existente de condicionamento de ar ou de refrigeração de um edifício ou indústria. Em muitos sistemas de refrigeração convencionais, vêm-se dois importantes componentes:

- O chamado “chiller”, que refrigera um fluido como água;
- O sistema de distribuição, que transporta o fluido frio do “chiller” para o local de consumo de ar refrigerado.

Nos sistemas convencionais, o reservatório frio (chiller) trabalha de forma contínua em períodos nos quais existe demanda de ar refrigerado. Em contrapartida, sistemas que empregam a tecnologia dos TES, o chamado “chiller” trabalha em períodos diferentes dos de consumo.

(a) Sistema convencional



(b) Sistema TES

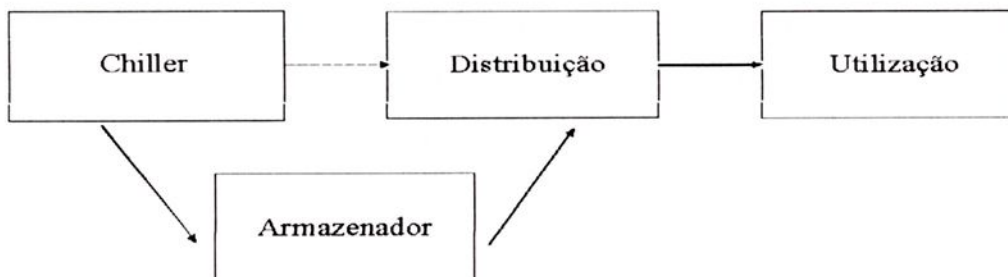


Figura 1 - Comparação entre sistemas de armazenamentos convencionais e sistemas TES.

Fonte: Dincer e Rosen (2001)

Esta tecnologia tem se desenvolvido de forma acelerada nas últimas décadas, especialmente com a finalidade de se otimizar equipamentos de refrigeração de ar. Entretanto, o período calculado de retorno do investimento (payback) comumente não se configura como um atrativo para o emprego desta tecnologia em detrimento de outras.

Algumas recomendações para a otimização do retorno do investimento em sistemas que empregam TES, para novas configurações, ou seja, o armazenamento de energia deve ser cuidadosamente planejado e integrado em todo recinto (edifício), sendo seus componentes auxiliares dimensionados em função da economia de energia proporcionada pelo emprego da tecnologia (TES). Portanto, deve-se ter especial atenção aos seguintes:

- Correto dimensionamento das tubulações e bombas;
- Correto dimensionamento dos dutos e ventiladores para distribuição do ar refrigerado.

No caso de instalações existentes a serem modificadas, as potenciais vantagens da implementação do processo de armazenagem térmica (TES) incluem:

- Modificações nos reservatórios existentes (Chillers) para a produção de gelo em oposição à compra de um novo equipamento;
- Utilização de um reservatório sobressalente (auxiliar) com capacidade de armazenar uma equivalente porção auxiliar de massa fria;
- Usar a energia armazenada no reservatório (Chiller) para aumentar a capacidade de refrigeração do ar em situações onde toda a potência do reservatório e dos sistemas elétricos estão plenamente utilizadas.



2.4. Histórico das pesquisas

Nas três últimas décadas do século passado, a estratificação térmica em reservatórios foi objeto de pesquisa teórica e experimental por parte de vários autores. Tais autores utilizaram inúmeras técnicas e artifícios construtivos e de avaliação de resultados, resultando em visíveis progressos nos aspectos construtivos e de eficiência dos sistemas de armazenamento térmico.

Nos tanques armazenadores de fluido quente (água) para uso doméstico, segundo Hobson e Norton (1989), um dos principais fatores para a manutenção (ou degradação) do fluido aquecido é a sua velocidade, pois a mesma é responsável pela manutenção do fluxo sob regime laminar de escoamento. A estratificação térmica no interior do tanque armazenador é responsável pela eficiência do equipamento e a termoclina no interior do tanque armazenador se degrada devido aos seguintes fatores:

- Correntes Convectivas: devido às diferenças de temperaturas entre os fluidos de entrada e do interior do tanque armazenador, surgindo diferenças de densidade entre os mesmos, as quais produzem movimento de partículas (fluxo), com dispersão da energia (calor) estratificada ao longo do reservatório;
- Perdas de calor devido à convecção natural existente entre o tanque armazenador e o meio ambiente;
- Perdas de calor através da parede do tanque armazenador, devido ao fluxo condutivo de calor entre as porções de fluido da maior para menor temperatura (curto circuito térmico);
- Difusão de calor condutiva devido ao gradiente de temperatura entre as porções de fluido da maior para menor temperatura.

A minimização ou eliminação destes mecanismos contribui significativamente para a manutenção da estratificação térmica por períodos de tempo maiores, melhorando a eficiência do equipamento como um todo.

Os efeitos da condução de calor ao longo da parede do tanque armazenador e a perda de calor do tanque para o meio ambiente tem sido investigada experimentalmente e com o emprego de modelos matemáticos bidimensionais. A degradação da termoclina está relacionada com a espessura da parede do tanque armazenador, bem como com a condutividade térmica do material empregado na sua construção. Valores de condutividade térmica, próximos ou menores em relação à água, conduzem a degradações da termoclina originados pelos efeitos da difusividade térmica. O aumento da condutividade térmica da parede do tanque ocasiona correntes convectivas no seu interior, resultando em um decréscimo no tempo de uniformização da temperatura ao longo do tanque armazenador.

A aplicação de material isolante, na parte interior ou exterior das paredes do tanque armazenador, foi pesquisada, com resultados práticos favoráveis à primeira opção (interior), pela redução dos efeitos de condução de calor pelas paredes, bem como na diminuição das perdas de calor para o meio ambiente.

Outra condição essencial para a manutenção da estratificação térmica é manter o fluido armazenado, assim como o fluido admitido em baixas velocidades pelo topo do reservatório, pois tal condição é fundamental para se ter fluxo laminar, com o mínimo de turbulências na entrada e saída do fluido. Para tanto, uma imensa variedade de artifícios construtivos tem sido pesquisada, contemplando desde chicanas com diferentes formas a tubos de admissão de fluido convenientemente perfurados.

Padilha (1983), estudou a estratificação térmica em um reservatório, propondo um modelo semi-empírico unidimensional e transiente para descrever o histórico percorrido pelos diferentes perfis de temperatura no interior do mesmo, em particular ao longo das paredes verticais, durante as operações de carga, descarga e resfriamento natural. Tal modelo matemático foi solucionado numericamente e verificou-se a concordância com os dados disponíveis na literatura. O citado autor ainda aprofundou os estudos sobre a



relação existente entre a altura e o diâmetro do reservatório, na manutenção da estratificação térmica.

Os coletores residenciais de energia solar para aquecimento de água (Solar Domestic Hot Water System- SDHWS) são muito utilizados na atualidade para o emprego da energia solar como fonte de energia renovável e com baixo custo. Tais coletores têm sido objeto de estudo de inúmeros pesquisadores desde a década de 50 e a estratificação térmica tem sido largamente empregada nesse tipo de coletor. Em muitos casos, a porção de água quente no interior do reservatório permanece separada da porção à menor temperatura pela ação das forças de empuxo, que se revelam de maior importância do que, por exemplo, barreiras físicas. O estudo da estratificação térmica é de particular relevância pelas vantagens econômicas em comparação com dispositivos físicos (barreiras), possuindo ainda a particularidade de disponibilizar fluido a uma temperatura maior e praticamente constante.

A manutenção da estratificação térmica no interior do reservatório, de acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica, é de grande importância para a eficácia do processo, bem como para o suprimento de água quente a temperatura mais alta. Para se entender melhor a importância da manutenção da estratificação térmica, faz-se necessário lembrar que a eficiência de um sistema coletor/armazenador se traduz pela sua capacidade de converter para o fluido, uma parcela efetiva da energia solar ou qualquer outra forma de energia disponível, a uma temperatura máxima possível. Geralmente, quanto maior a temperatura na entrada do coletor maior será a temperatura na sua saída, e, assim, sempre que possível, locar a entrada de fluido do coletor no fundo do reservatório, que geralmente possui uma temperatura maior quando comparada à temperatura de abastecimento do sistema.

Muitos estudos teóricos e práticos sob diferentes condições de operação e de arranjos físicos em tanques que se utilizam a estratificação térmica foram realizados. Nas mudanças físicas (arranjos) pode-se citar a alteração na locação das entradas e saídas de fluido, a forma do difusor de entrada, as velocidades e temperatura de entrada, etc. Dentre os parâmetros de projetos que



mais influenciam na degradação da estratificação térmica, ressaltam-se as perdas térmicas por condução de calor ao longo das paredes do reservatório, bem como a troca de calor entre o reservatório e o meio ambiente.

As citadas perdas de calor foram objeto de trabalho de Shyu, Lin e Fang (1989), ao realizarem estudos sobre estratificação térmica em um reservatório cilíndrico vertical, com comparações entre os resultados experimentais e o perfil teórico das temperaturas no interior do mesmo. Comparando os valores dos citados resultados, comprova-se que a difusão térmica, devido ao gradiente de temperatura do fluido entre o topo e o fundo do reservatório, não possui grande relevância para a queda do referido gradiente no interior de tanques verticais. Ficou comprovado também que a espessura da parede do reservatório é fundamental no processo de degradação da estratificação térmica, devido à difusão de calor, por condução térmica ao longo da mesma, do topo para o fundo do reservatório, concluindo ainda que a perda de calor para o meio ambiente é o fator de maior relevância na degradação da estratificação térmica.

Lavan e Thompson (1977), realizaram um estudo experimental sobre tanques de armazenamento de água quente estratificado termicamente. As medidas experimentais foram realizadas para várias relações de comprimento/diâmetro, diferença de temperatura entre a entrada e a saída de água e diferentes vazões mássicas. Os resultados foram empiricamente correlacionados para produzir relações úteis para o projeto de sistemas efetivos de armazenamento de água quente.

Gupta e Jaluria (1982), apresentaram um estudo experimental da queda da temperatura da água estratificada termicamente em um tanque, perfis de temperatura dependentes do tempo foram medidos para várias distribuições de temperatura iniciais e condições ambientais.

Al-Najem (1993), investigou a estratificação térmica em um tanque de armazenamento usando um modelo teórico baseado numa técnica de transformação integral. Uma comparação entre dados teóricos obtidos e

experimentais disponíveis na literatura foi usada para validar as previsões teóricas apresentadas.

Al-Najem, Al-Marafie e Ezuddin (1993), apresentaram uma investigação analítica e experimental do carregamento e descarregamento bidimensional, turbulento e transiente de um tanque de armazenamento de calor sensível. O efeito sobre a estratificação térmica do fator de mistura turbulento, razão de aspecto e convecção na parede foi também estudado.

Kleinbach, Beckman e Klein (1993), desenvolveram duas aproximações básicas para o estudo da estratificação térmica em tanques de armazenamento térmico. Os resultados teóricos dos modelos de tanques de armazenamento foram comparados com dados experimentais. Segundo os autores a estratificação depende principalmente do volume do tanque, do projeto dos mecanismos de entrada e saída do tanque e das vazões de entrada e saída.

Ismail, Leal e Zanardi (1996), apresentaram os resultados de um estudo sobre tanques estratificados termicamente para aplicações no armazenamento de substâncias a quente.

Yoo e Pak (1996), mostraram um conjunto de soluções analíticas para um modelo de domínio finito unidimensional para analisar o processo de carregamento em tanques de armazenamento térmico estratificados.

Ficek (1996), estudou os fatores necessários na seleção de tanques de armazenamento para os aquecedores de água comumente usados em edifícios comerciais. Alguns destes fatores são a demanda de volume de água, as cargas de pico, a temperatura da água desejada e a fonte combustível/energia para o aquecimento da água.

Ismail, Leal e Zanardi (1997), mostraram os resultados numéricos de um estudo comparativo sobre tanques de armazenamento térmico estratificados para armazenamento a frio.

Homan e Soo (1998), apresentaram os resultados para a eficiência de um tanque de armazenamento de água fria estratificado com uma entrada e uma saída. Eles compararam as soluções numéricas para um escoamento laminar, bidimensional e transiente durante o preenchimento do tanque



estratificado com um modelo unidimensional envolvendo somente a transferência de calor condutiva.

Bouhdjar e Harhad (2002), desenvolveram um estudo bidimensional para avaliar a influência de parâmetros físicos e geométricos (como o número de Richardson, a localização da entrada e saída de fluido) sobre o comportamento dinâmico e térmico de um fluido armazenado em um reservatório cilíndrico vertical com um eixo (imaginário) de simetria também vertical. No experimento, os citados autores empregaram um tanque armazenador provido de uma entrada e uma saída de fluido, sendo que o melhor desempenho, sob o aspecto da eficiência térmica, aconteceu onde a entrada de fluido foi feita pela parte superior e a conseqüente retirada do mesmo pela parte inferior do tanque armazenador.

Segundo este trabalho a modelagem matemática, de equipamentos de aquecimento com o auxílio de programas de computador, apresenta muitas vantagens, sendo as mais relevantes:

- Eliminação de gastos com a construção de protótipos;
- Correlações entre os diferentes fenômenos físicos envolvidos são relacionadas de forma simples e eficaz;
- Capacita o pleno entendimento do sistema em operação e suas interações;
- Possibilita a otimização dos componentes;
- Estima com precisão a parcela de energia obtida e economizada com o sistema.
- Estima as variações de temperatura no sistema;
- Auxilia no projeto de componentes do sistema, estimando o seu rendimento ainda na fase de projeto.

Entretanto, a simulação das aplicações reais do projeto, suas configurações possíveis e condições teóricas de trabalho para valores poucos usuais são pontos de excelência do emprego de tal ferramenta, pois a partir da confrontação entre dados reais de campo e seus resultados práticos, resultam avanços tecnológicos traduzidos em benefícios, como, por exemplo, a economia



de materiais, bem como a conservação de energia. Para efeitos do estudo da utilização da energia solar para aquecimento de água para uso residencial, o uso de tal ferramenta é fundamental.

Kalogirou e Papamarcou (2000), empregaram ferramentas matemáticas e técnicas computacionais no estudo e desenvolvimento de um equipamento de aquecimento de água residencial equipado com termosifão, com grande concordância entre os resultados teóricos esperados e os obtidos na prática. Como aspectos desfavoráveis a tal estudo pode-se citar a dificuldade de se familiarizar com os procedimentos computacionais, bem como o custo de tal ferramenta de trabalho.

Buscando maior rendimento em coletores solares planos, Hussein (2003), desenvolveu o projeto e construção de um coletor plano com termosifão e circulação de fluido em duas fases. Tal coletor foi equipado com um dispositivo auxiliar denominado termodiodo que, a exemplo dos diodos elétricos, permite a passagem de fluido a maior temperatura em uma única direção.

O referido autor fez uso de um programa de computador para o desenvolvimento deste projeto, visando simular o funcionamento do citado equipamento, bem como variar os diversos parâmetros construtivos. Como exemplo, podem-se citar as razões geométricas entre o volume do tanque armazenador e o volume de fluido no coletor plano, as razões geométricas entre o diâmetro e a altura do tanque armazenador, a exemplo das razões existentes entre as alturas do tanque armazenador e do coletor plano.

Os resultados teóricos (computacionais) indicaram que são importantes as relações geométricas existentes entre o volume de fluido do tanque armazenador e as dimensões, em particular a área do coletor plano, bem como as relações existentes no tanque armazenador, como altura com relação ao diâmetro, influenciando sobre seu rendimento, enquanto é de pouca relevância a relação geométrica entre a altura do tanque e a altura do coletor plano. Hussein, Mohamad e El-Asfour (1999), pesquisaram o rendimento de um coletor solar plano, submetido a um regime transiente. Para tanto, as equações que descrevem o funcionamento dos diferentes componentes do coletor foram adimensionalizadas



e, para sua solução, foi empregada a técnica das diferenças finitas através do uso de um programa de simulação em um computador. O trabalho experimental, dos referidos autores, consistiu no emprego de um coletor plano equipado com termodiodo e provido de termosifão contendo em seu interior um fluido de trabalho confinado, que, realizando um ciclo fechado de evaporação e condensação, retira calor da parte do coletor exposta à radiação solar, e o transporta para o tanque armazenador de fluido quente (água), com poucas perdas de temperatura. Dentre as vantagens adicionais, em relação aos coletores planos convencionais, pode-se citar:

- A vantagem do termodiodo, como elemento adicional de acumulação de energia, quando a temperatura no interior do coletor for menor que a temperatura do tanque armazenador;
- Baixa inércia térmica do equipamento como um todo;
- Razoável resistência à corrosão, desde que utilizado um fluido de trabalho adequado às condições de trabalho;
- Raramente necessita de bomba auxiliar para circulação do fluido de trabalho ou de água aquecida.

A partir da confrontação dos resultados teóricos e práticos, ficou comprovado que existe uma concordância entre as previsões obtidas computacionalmente e os resultados práticos, para diferentes níveis de temperatura de entrada de fluido quente e vazões associadas.

Como elemento limitador do emprego de tal tecnologia, pode-se citar o alto custo de implementação da mesma, bem como uma razoável dificuldade na escolha do material adequado a ser empregado como fluido de trabalho confinado.

Tendo em vista a importância dos aspectos geométricos de um sistema de armazenamento de energia por estratificação térmica, descrita ao longo da revisão bibliográfica, este trabalho se propõe a analisar parâmetros de projeto e detalhar as características geométricas que proporcionam melhor eficiência de armazenagem térmica, sob o aspecto da Segunda Lei da Termodinâmica. Este

aspecto é de grande relevância, pois, indica a disponibilidade de trabalho na forma de calor como fonte de acionamento para uma máquina térmica.



3 Modelo Matemático

3.1. Problema físico proposto

O modelo físico utilizado como base deste trabalho consiste de dois compartimentos interligados por tubos e preenchidos pelo fluido de trabalho (água), conforme ilustra a figura 2.

As dimensões do armazenador são representadas pelas letras “ H ” (altura) e “ D ” (diâmetro ou largura). A partir do arranjo físico estabelecido entre o aquecedor e o armazenador surge uma dimensão importante a ser observada que é o desnível existente entre o topo do aquecedor e o fundo do armazenador e que será representada pela sigla “ D_s ”.

No início da simulação, todo o sistema se encontra na temperatura mínima, isto é, todas as moléculas de fluido no interior do sistema estão numa temperatura equilibrada com o meio externo ($T = T_{\min}$) e o aquecedor tem uma de suas paredes mantida a uma temperatura constante ($T = T_{\max}$), maior que a temperatura do meio (inicial).

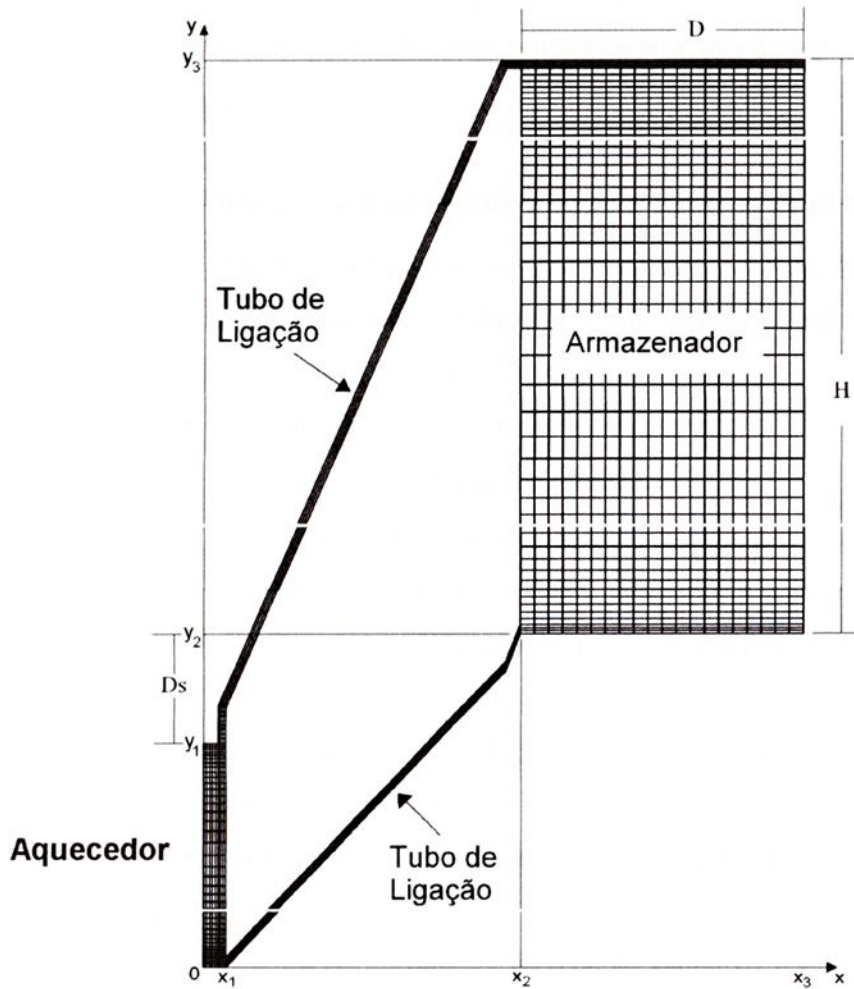


Figura 2 - Esquema de disposição do aquecedor, tubos de ligação e armazenador no sistema.

Essa diferença de temperatura gera o aquecimento das moléculas de fluido adjacentes à parede quente e induz um movimento ascendente nessas moléculas. Essa movimentação se intensifica à medida que mais moléculas se aquecem, estabelecendo assim um fluxo em sentido horário no interior do sistema de aquecimento. Ou seja, o fluido ganha calor no aquecedor e é injetado, por convecção natural (princípio da termosifão), no topo do armazenador, sendo que o mesmo volume injetado no topo é extraído pelo fundo do mesmo e retorna ao aquecedor.

Devido ao aquecimento, as moléculas de fluido de trabalho mais quentes e, por consequência, menos densas, tendem a permanecer na parte mais

alta do sistema, que no caso é o topo do armazenador. Esse comportamento provoca outro fenômeno físico, chamado estratificação térmica, o qual é objeto de estudo desse trabalho.

3.2. Modelamento matemático para o problema proposto

A partir das equações completas da continuidade, quantidade de movimento e energia, como apresentadas por Bird, Stewart e Lightfoot (1960), considera-se as seguintes hipóteses simplificadoras:

- O problema é considerado bidimensional;
- O fluido é considerado incompressível;
- As propriedades físicas do fluido são consideradas constantes;
- O calor específico do fluido apresenta um valor grande, de modo que sua temperatura não é influenciada pelo atrito existente durante o escoamento;
- O escoamento no interior do sistema se dá pelo processo de convecção natural; e
- Todo o sistema é isolado termicamente do ambiente externo.

As equações resultantes do modelo matemático simplificado que regem o problema proposto são as seguintes:

- Equação da Continuidade:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

- Equação da Quantidade de movimento em x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \beta(T - T^r) \vec{g}_x \quad (3.2)$$

- Equação da Quantidade de movimento em y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \beta(T - T^r) \vec{g}_y \quad (3.3)$$

- Equação da energia:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.4)$$

$$0 < x < x_1, \quad y = 0 \wedge y = y_1, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad u = 0, v = 0 \quad (3.7)$$

$$x = x_1, \quad 0 \leq y \leq y_1, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad u = 0, v = 0 \quad (3.8)$$

$$x = x_2, \quad y_2 \leq y \leq y_3, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad u = 0, v = 0 \quad (3.9)$$

$$x_2 < x < x_3, \quad y = y_2 \wedge y = y_3, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad u = 0, v = 0 \quad (3.10)$$

$$x = x_3, \quad y_2 \leq y \leq y_3, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad u = 0, v = 0 \quad (3.11)$$

Para facilitar a solução do sistema de equações resultantes (3.1) a (3.11), e para estendê-la a problemas similares é necessária a adimensionalização dessas equações. As variáveis pertinentes do problema são adimensionalizadas utilizando-se os seguintes parâmetros adimensionais:

$$\begin{aligned} X &= \frac{x}{H}; & Y &= \frac{y}{H}; & U &= \frac{uH}{\alpha}; & V &= \frac{vH}{\alpha}; \\ P &= \frac{p}{\rho} \left(\frac{H}{\alpha} \right)^2; & \theta &= \frac{T - T_{\min}}{\overline{\delta T}}; & \text{Pr} &= \frac{\nu}{\alpha}; \\ \tau &= Fo = \frac{\alpha t}{H^2}; & Ra &= \frac{g \beta \overline{\delta T} H^3}{\nu^2} \text{Pr} \end{aligned}$$

Onde:

$$\overline{\delta T} = T_{\max} - T_{\min} \quad (3.12)$$

$$H = y_3 - y_2 \quad (3.13)$$

Assim, as equações resultantes adimensionalizadas tornam-se:

- Equação da Continuidade:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (3.14)$$

- Equação da Quantidade de movimento em x:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) + Ra \text{Pr} \theta \frac{\bar{g}_x}{\|g\|} \quad (3.15)$$

- Equação da Quantidade de movimento em y:

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \text{RaPr} \theta \frac{\bar{g}_y}{\|g\|} \quad (3.16)$$

- Equação da energia:

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) = \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (3.17)$$

sujeitas as seguintes condições:

- Condições iniciais ($\tau = 0$):

$$\forall (X, Y), \theta = 0, U = 0, V = 0 \quad (3.18)$$

- Condições de contorno ($\forall \tau$):

As condições de contorno podem ser representadas de forma gráfica, conforme ilustra a figura 4:

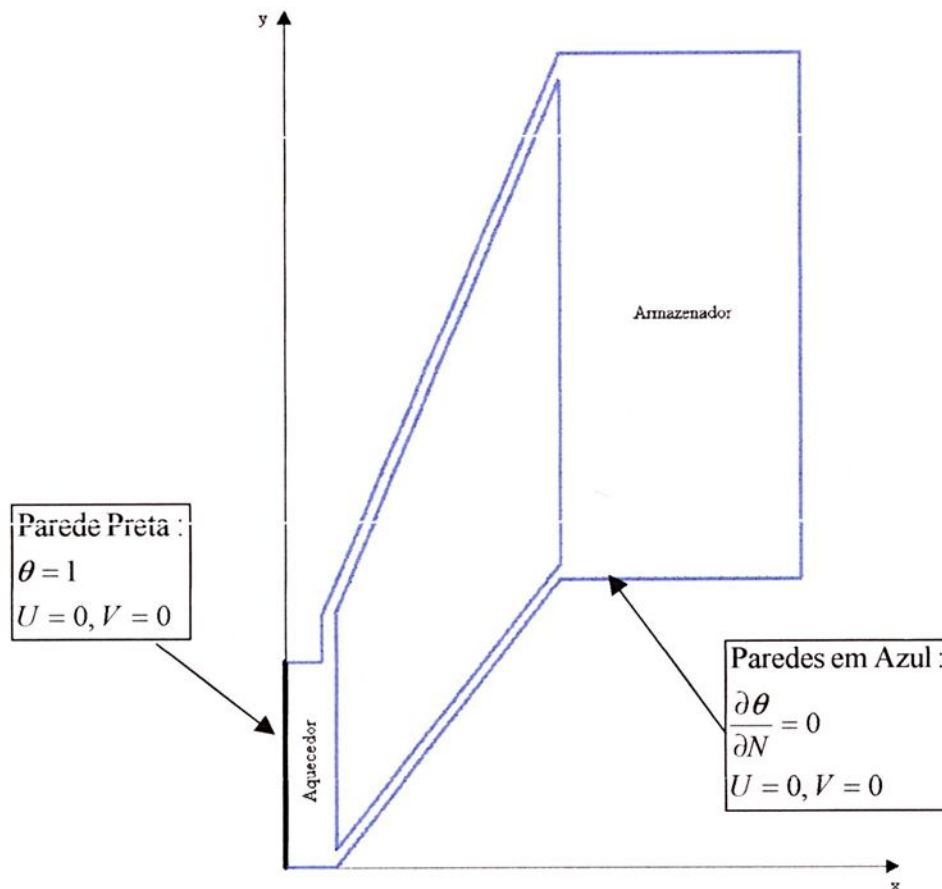


Figura 4 - Ilustração das condições de contorno nas paredes do modelo (adimensional).

$$X = 0, \quad 0 \leq Y \leq Y_1, \quad \theta = 1, \quad U = 0, V = 0 \quad (3.19)$$

$$0 < X < X_1, \quad Y = 0 \wedge Y = Y_1, \quad \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0, \quad U = 0, V = 0 \quad (3.20)$$

$$X = X_1, \quad 0 \leq Y \leq Y_1, \quad \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0, \quad U = 0, V = 0 \quad (3.21)$$

$$X_2 < X < X_3, \quad Y = Y_2 \wedge Y = Y_3, \quad \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0, \quad U = 0, V = 0 \quad (3.22)$$

$$X = X_2, \quad Y_2 \leq Y \leq Y_3, \quad \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0, \quad U = 0, V = 0 \quad (3.23)$$

$$X = X_3, \quad Y_2 \leq Y \leq Y_3, \quad \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0, \quad U = 0, V = 0 \quad (3.24)$$

A solução do modelo matemático proposto, constituído pelo sistema de equações (3.14) a (3.24), é apresentada no capítulo 4.

3.3. Eficiência de estratificação térmica

A análise de eficiência de estratificação térmica é baseada no desenvolvimento proposto por Padilha e Bastos (1982), o qual comparou as eficiências de uma máquina térmica, calculadas pelas Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica. O mesmo autor comparou ainda as eficiências de um sistema estratificado com um sistema de temperaturas homogeneizadas através da Segunda Lei da Termodinâmica.

As equações utilizadas para análise da eficiência térmica são as seguintes:

- Primeira Lei da Termodinâmica

$$\eta = \frac{\sum [T_{(y,t)} - T_{\min}] \cdot \Delta y}{H \cdot [T_{\max} - T_{\min}]} \quad (3.25)$$



- Segunda Lei da Termodinâmica – Estratificado

$$\xi = \frac{\sum \left\{ [T_{(y,t)} - T_{\min}] - T_{\min} \cdot \ln \left[\frac{T_{(y,t)}}{T_{\min}} \right] \right\} \cdot \Delta y}{H \cdot \left\{ [T_{\max} - T_{\min}] - T_{\min} \cdot \ln \left[\frac{T_{\max}}{T_{\min}} \right] \right\}} \quad (3.26)$$

- Segunda Lei da Termodinâmica – Homogêneo

$$\xi_{\text{hom}} = \frac{\left\{ \frac{\sum T_{(y,t)} \cdot \Delta y}{H} \right\} - T_{\min} - T_{\min} \cdot \ln \left[\frac{\sum T_{(y,t)} \cdot \Delta y}{H \cdot T_{\min}} \right]}{[T_{\max} - T_{\min}] - T_{\min} \cdot \ln \left[\frac{T_{\max}}{T_{\min}} \right]} \quad (3.27)$$

Estas equações foram adimensionalizadas da mesma forma como foi feito anteriormente para as equações da quantidade de movimento e da energia, resultando nas seguintes equações:

- Primeira Lei da Termodinâmica

$$\eta = \sum \theta \cdot \Delta Y \quad (3.28)$$

- Segunda Lei da Termodinâmica – Estratificado

$$\xi = \frac{\sum \left\{ \theta \cdot [T_{\max} - T_{\min}] - T_{\min} \cdot \ln \left[\frac{\theta \cdot [T_{\max} - T_{\min}] + T_{\min}}{T_{\min}} \right] \right\} \cdot \Delta Y}{[T_{\max} - T_{\min}] - T_{\min} \cdot \ln \left[\frac{T_{\max}}{T_{\min}} \right]} \quad (3.29)$$

- Segunda Lei da Termodinâmica – Homogêneo

$$\xi_{\text{hom}} = \frac{\left\{ \sum [\theta \cdot (T_{\max} - T_{\min}) + T_{\min}] \cdot \Delta Y \right\} - T_{\min} - T_{\min} \cdot \ln \left[\frac{\sum [\theta \cdot (T_{\max} - T_{\min}) + T_{\min}] \cdot \Delta Y}{T_{\min}} \right]}{[T_{\max} - T_{\min}] - T_{\min} \cdot \ln \left[\frac{T_{\max}}{T_{\min}} \right]} \quad (3.30)$$

Com a solução numérica, com um programa de geração de gráficos e dos dados obtidos, foi possível analisar a eficiência térmica pelas Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica dos armazenadores térmicos propostos sendo as análises apresentadas no capítulo 5.

4 Solução do Modelo Matemático Proposto

O modelo matemático proposto, constituído pelo sistema de equações (3.14) a (3.24), é resolvido utilizando-se o método dos elementos finitos, da mesma forma como foi proposto por Scalón (2004), o qual utiliza um método baseado em variáveis primitivas (porém com variáveis adimensionalizadas), com solução acoplada e com a utilização de uma grade co-localizada.

Os valores dos parâmetros adimensionais utilizados nas equações foram definidos para o caso em que o fluido de trabalho é a água com número de Prandtl igual a 3,5 e escoamento laminar com número de Rayleigh máximo igual a $2,0 \times 10^8$, sendo que para valores acima deste tem-se a divergência do sistema de solução.

A solução numérica das equações proporcionou novos parâmetros de projeto melhorando a eficiência da dinâmica de carga dos armazenadores térmicos.

O modelo matemático resultante do sistema proposto tem sua solução baseada na solução das equações de Navier-Stokes, por se tratar de um problema de convecção natural onde as forças de campo associadas à variação da densidade do fluido são responsáveis pela sua movimentação.

As técnicas encontradas na literatura para a solução das equações em questão são baseadas em três métodos de discretização principais. São eles método dos volumes finitos, diferenças finitas e elementos finitos. Qualquer um dos métodos citados possui diversas técnicas de solução, sendo que as principais técnicas são citadas a seguir.

Com relação à forma de resolução do sistema de equações pode-se citar o método da *solução direta*, que consiste em resolver o problema como um todo. Este método tem como desvantagem a grande capacidade de armazenamento de dados exigida, pois necessita da montagem de uma única matriz englobando as equações para todos os graus de liberdade de cada ponto. Em contraponto a esse método existe o da *solução das equações acopladas*. Nesse caso, cada equação é resolvida separadamente e seus resultados são acoplados por um processo iterativo.

Uma outra subdivisão refere-se à natureza das variáveis. Aqui, o método de *solução em variáveis primitivas* é aquele que não faz nenhum tipo de transformação de variáveis. Já o método de *vorticidade e função corrente* transforma o sistema de três equações exigido por um problema bidimensional (solucionado em variáveis primitivas) em um sistema de duas equações, uma para vorticidade e outra para função corrente. Este último, no entanto, tem as inconveniências de dificultar o estabelecimento das condições de contorno e não manter as simplificações para geometrias tridimensionais.

O método de solução em variáveis primitivas pode ainda ser analisado quanto à posição do campo de velocidades e pressão. No caso do método de *grade deslocada* a ordem de interpolação para o campo de pressões é menor que para o campo de velocidades, reduzindo a precisão da solução devido a maior quantidade de pontos para a velocidade do que para a pressão. Porém, o método mais utilizado em elementos finitos é o da *grade co-localizada*, onde pressões e velocidades ocupam a mesma posição na malha.



4.1. Geração das malhas de elementos finitos

Para que fosse possível a solução do problema proposto, foi necessária uma adaptação no código computacional gerador de malhas desenvolvido por Scalon (2004).

Esse código gera malhas genéricas baseadas na transformação de domínio e utiliza projetores bilineares para a geração de malhas quadradas. Essas malhas são então agrupadas em super-elementos para a construção da geometria desejada.

Para melhor entendimento da adaptação realizada no código gerador de malhas, é necessária a descrição do tratamento dado à geometria em estudo.

O modelo físico proposto pode ser representado por um conjunto de figuras geométricas retangulares, ou seja, não considerando as dimensões do modelo físico, o mesmo pode ser representado como na figura 5:

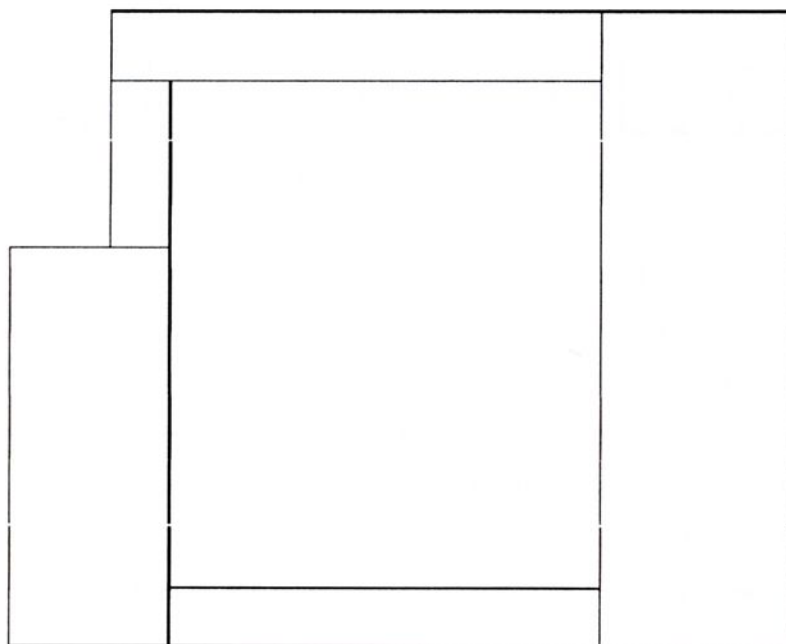


Figura 5 - Esboço da malha de elementos finitos.

Para utilizar o código computacional de Scalon (2004) é necessária a divisão do esboço apresentado na figura 5 em 20 super-elementos, pois esse código foi desenvolvido para gerar malhas contínuas. A figura 6 mostra a disposição dos super-elementos sobre o modelo apresentado.

4	8	12	16	20
3	7	11	15	19
2	6	10	14	18
1	5	9	13	17

Figura 6 - Disposição dos super-elementos.

Nota-se que foram colocados 6 super-elementos nos espaços vazios do modelo (super-elementos 3, 4, 10, 11, 14 e 15) a fim de atender à necessidade de continuidade da malha. Todos os super-elementos sofrem então outra divisão, formando os elementos finitos propriamente ditos.

A adaptação citada anteriormente consiste em retirar os super-elementos dos espaços vazios (onde não existe fluido de trabalho), retirando também os elementos finitos existentes nessas regiões e, posteriormente, numerar novamente os super-elementos e elementos finitos remanescentes.

A figura 7 representa o arranjo final e a numeração dos super-elementos restantes. A partir desse arranjo, basta alterar a dimensão e posição dos super-elementos para se obter a representação exata do modelo físico.

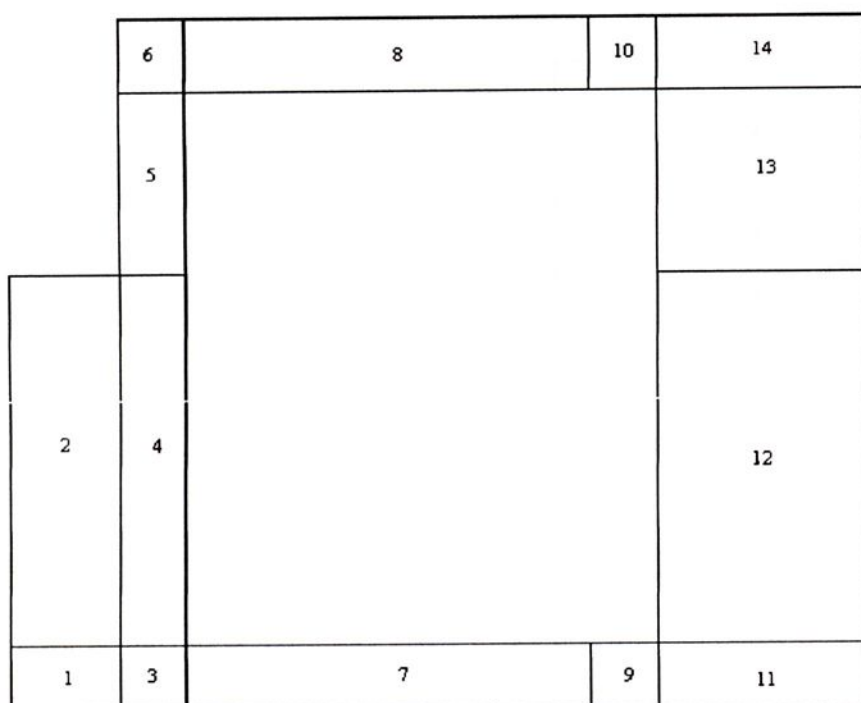


Figura 7 - Posição relativa e numeração dos super-elementos.

Obviamente, a posição relativa entre os super-elementos não deve ser alterada. Para isso, alguns dos super-elementos devem sofrer pequenas “deformações” para uma perfeita adaptação entre eles. A figura 8 mostra a disposição dos super-elementos, bem como os super-elementos já alterados.

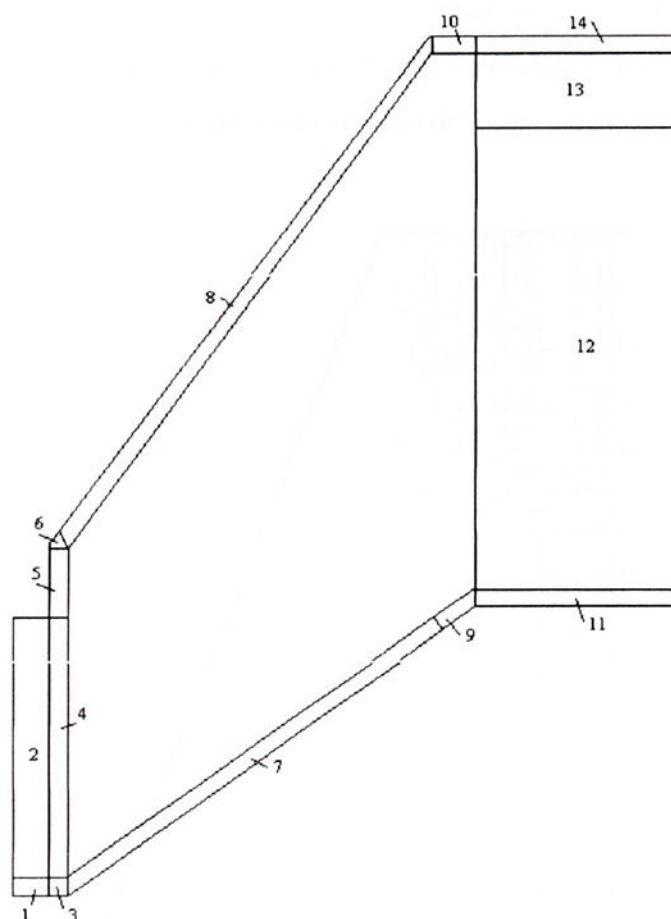


Figura 8 - Disposição dos super-elementos sobre o modelo físico.

Nota-se na figura 8 que todos os super-elementos permanecem sendo quadriláteros, porém alguns sofrem alteração na angulação de seus vértices para manter a posição relativa entre os super-elementos.

4.2. Definição das geometrias

Neste trabalho é escolhida uma geometria de base para a solução do problema, com razão de aspecto 3,33 e com a altura do tanque representando a dimensão característica. Esses valores foram escolhidos de acordo com o trabalho de Padilha (1983), o qual indica que a razão de aspecto ideal para tanques estratificados está entre 3 e 4.

As figuras 9, 10 e 11 mostram algumas das malhas de elementos finitos utilizadas para a solução dos problemas.

Nota-se que essas malhas apresentam um refinamento maior na região superior dos tanques, o que é justificado também pela busca de resultados mais precisos nessa região, onde a recirculação de fluido é evidente.

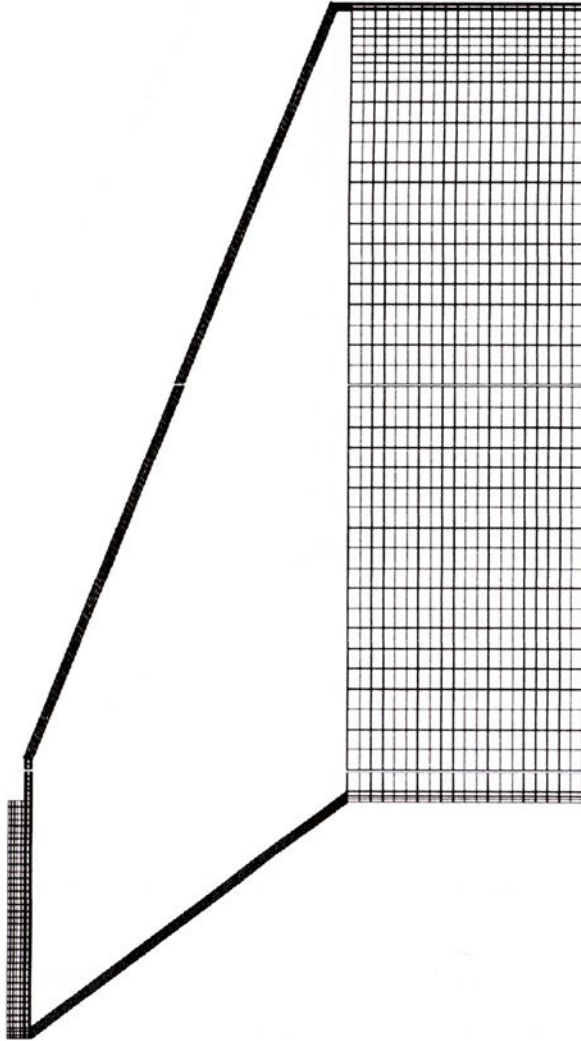


Figura 9 - Geometria do problema: razão de aspecto $B = 3,33$

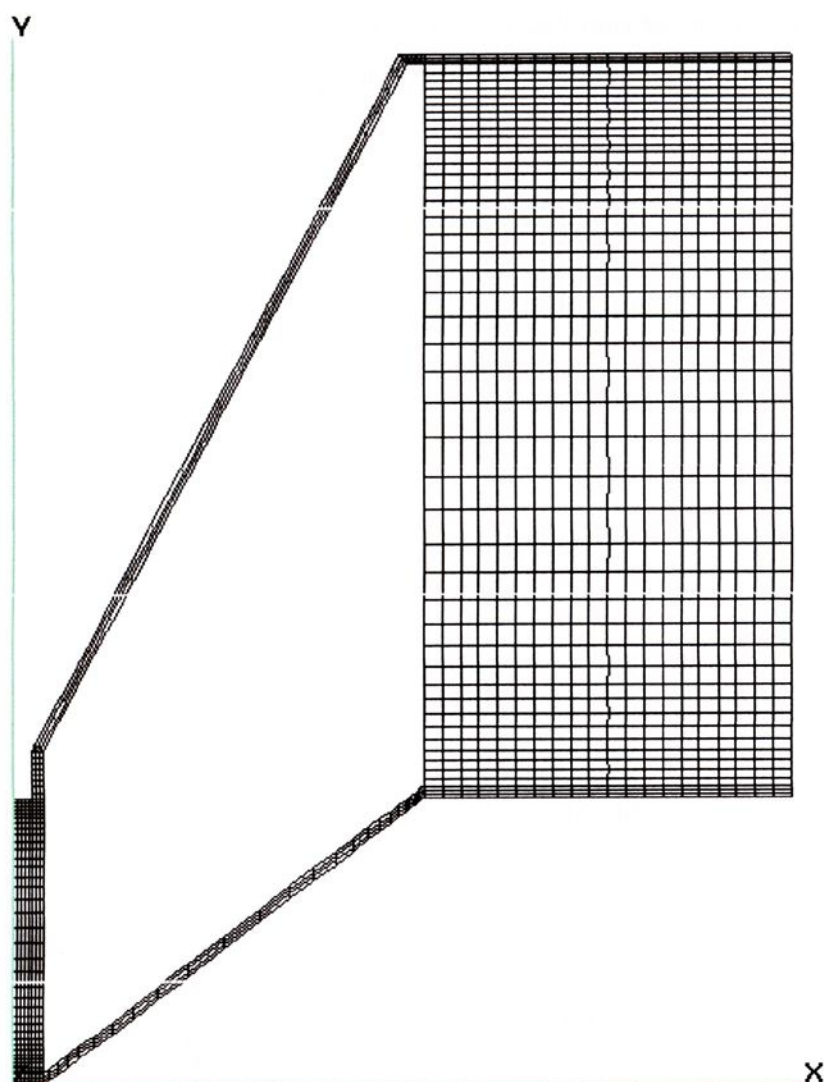


Figura 10 - Geometria do problema: razão de aspecto $B = 2,0$

Observando-se as geometrias de base para as diferentes razões de aspecto (figuras 9 a 11), nota-se que existe uma aparente concentração maior de elementos na região superior do armazenador com razão de aspecto 2,0. Isso acontece porque o número de elementos em qualquer dos casos é o mesmo, fazendo com que no armazenador mais baixo ($B=2,0$) os elementos aparentem ser menores.

A tabela 1 mostra de forma detalhada o refinamento (quantidade de elementos nas direções x e y) e a deformação da malha de elementos finitos em cada superelemento para as razões de aspecto 2,0 e 3,33, enquanto que a tabela 2

mostra de forma detalhada o refinamento e a deformação da malha em cada superelemento para a razão de aspecto 5,0.

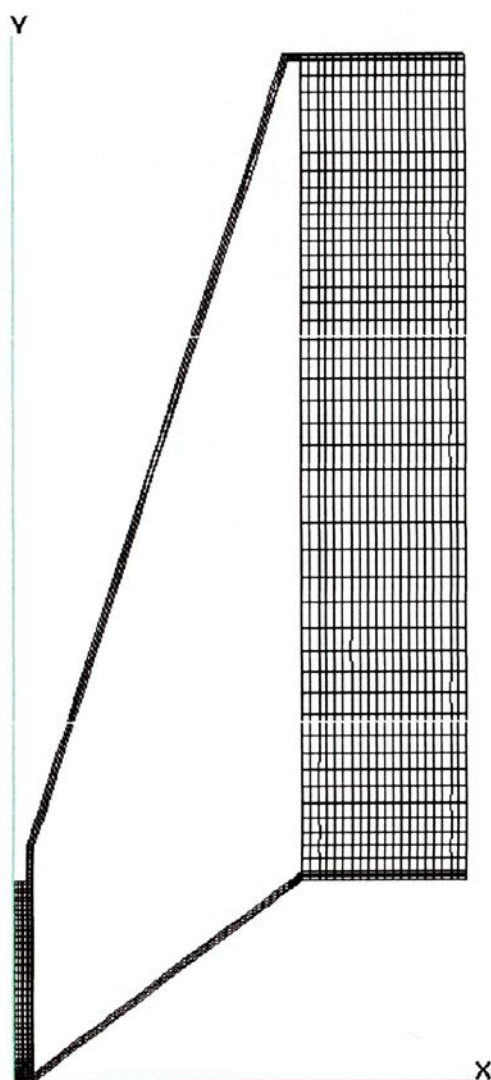


Figura 11 - Geometria do problema: razão de aspecto $B = 5,0$

Tabela 1 - Especificações da malha de elementos finitos (B=2,0 e B=3,33)

B =		2,00 e 3,33		
Superelemento	Qtde. X	Qtde. Y	Deform. X	Deform. Y
1	5	3	0%	0%
2	5	35	0%	10%
3	3	3	0%	0%
4	3	35	0%	10%
5	3	8	0%	-5%
6	3	3	0%	0%
7	20	3	20%	0%
8	20	3	20%	0%
9	8	3	0%	0%
10	8	3	0%	0%
11	20	3	0%	0%
12	20	35	0%	10%
13	20	8	0%	-5%
14	20	3	0%	0%

Tabela 2 - Especificações da malha de elementos finitos (B=5,0)

B =		5,00		
Superelemento	Qtde. X	Qtde. Y	Deform. X	Deform. Y
1	5	3	0%	0%
2	5	35	0%	5%
3	3	3	0%	0%
4	3	35	0%	5%
5	3	8	0%	15%
6	3	3	0%	0%
7	20	3	20%	0%
8	20	3	20%	0%
9	8	3	0%	0%
10	8	3	0%	0%
11	20	3	0%	0%
12	20	35	0%	5%
13	20	8	0%	15%
14	20	3	0%	0%

Dessa forma, foi possível a simulação do comportamento do sistema com maior fidelidade ao processo real.

Tendo como base as geometrias com razão de aspecto 2,0, 3,33 e 5,0, outros casos foram gerados, quando variou-se a altura relativa entre o aquecedor e o tanque de armazenamento.

Dessa forma, doze casos foram analisados, conforme relação abaixo:

- Caso 1: $B=3,33$ e $D_s=-0,15$;
- Caso 2: $B=3,33$ e $D_s=0$;
- Caso 3: $B=3,33$ e $D_s=0,15$;
- Caso 4: $B=3,33$ e $D_s=0,30$;

- Caso 5: $B=2,0$ e $Ds=-0,15$;
- Caso 6: $B=2,0$ e $Ds=0$;
- Caso 7: $B=2,0$ e $Ds=0,15$;
- Caso 8: $B=2,0$ e $Ds=0,30$;
- Caso 9: $B=5,0$ e $Ds=-0,15$;
- Caso 10: $B=5,0$ e $Ds=0$;
- Caso 11: $B=5,0$ e $Ds=0,15$;
- Caso 12: $B=5,0$ e $Ds=0,30$;

Cada caso apresentado foi solucionado e os resultados obtidos são mostrados no capítulo 5.



5 Resultados e Discussões

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos para a operação de carregamento do sistema proposto. Primeiramente, é feita a convalidação dos dados teóricos obtidos neste trabalho com os dados teóricos e experimentais de Leal (1999).

Logo após a convalidação é feita a apresentação do comportamento de carga de cada caso analisado, enfatizando as diferenças de temperatura encontradas entre cada caso.

Em seguida, é feita a comparação do grau de carregamento em função do desnível para os casos onde a razão de aspecto é a mesma. Na sequência, são mostrados a influência da razão de aspecto na qualidade de estratificação e o comportamento da vazão de fluido no interior do sistema em função do desnível existente no sistema.

Finalizando os resultados, são apresentadas as análises de eficiência de estratificação térmica em função da diferença de temperaturas no sistema, do tempo de carregamento e da razão de aspecto.

Para cada caso descrito no capítulo anterior é analisado o comportamento do campo de velocidades e do campo de temperaturas do tanque de armazenamento. Para tanto, é estipulado o tempo adimensional τ igual a 0,06 como tempo final do processo de carregamento. A determinação desse tempo é



elaborada com base no carregamento do tanque para o caso 12, ou seja, a temperatura na base do tanque sendo maior que 0,2.

5.1. Validação do modelo matemático

Com a finalidade de validar o modelo matemático os resultados teóricos foram comparados com os resultados experimentais e teóricos disponíveis de Leal (1999). A seguir apresenta-se uma breve descrição da montagem do aparato experimental, cujos resultados foram utilizados na comparação com os resultados numéricos.

O tanque do sistema tem capacidade de 4,2 litros. São usados dois tanques de alimentação, sendo um tanque para água quente e outro para água fria. O tanque da água quente é equipado com uma resistência elétrica de 1500 W, cuja temperatura é controlada por um termostato e tem capacidade para 60 litros. O tanque de água fria tem capacidade para 20 litros sendo alimentado continuamente. São utilizados registros gaveta para a saída de água dos tanques. Na tubulação feita de cobre e liga cada tanque ao armazenador, existe uma placa de orifício calibrada para o controle das vazões. Os difusores superior e inferior foram feitos de placas utilizadas em circuitos eletrônicos com pequenos furos, de modo que a operação de entrada de água não causasse grandes perturbações para preservar a estratificação do tanque. No centro do armazenador foi colocado um tubo de PVC onde foram conectados os termopares com espaçamento igual entre eles. Na parede externa foram colocados quatro termopares com espaçamento igual entre eles.

Admitiram-se 7 pontos para a obtenção da solução numérica comparativa com os resultados experimentais obtidos pela montagem descrita anteriormente. O número máximo de iteração é de 100 e o incremento de tempo utilizado, após breves testes de convergência, é de 0,015s.

Na figura 12 mostra-se graficamente os resultados numéricos obtidos por Leal (1999), representados por quadrados, os resultados experimentais obtidos pelo mesmo autor, representados por círculos, bem como os resultados numéricos obtidos neste trabalho, representados pela linha cheia mostrados na referida figura.



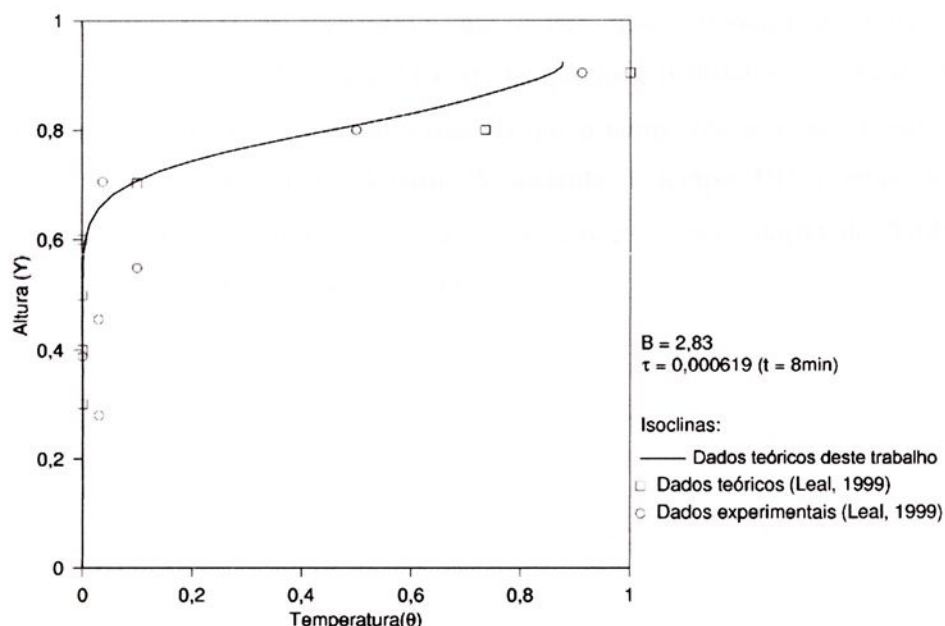


Figura 12 - Comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os resultados teóricos e experimentais de Leal (1999).

Nesse caso a operação de carregamento foi simulada para o tempo de 8 minutos, verificando-se boa concordância entre os resultados, com um erro médio de 4,5% entre os resultados teóricos obtidos nesse trabalho e os resultados teóricos e experimentais de Leal (1999), para o mesmo instante de tempo.

Observando-se os resultados da figura 12, pode-se afirmar que o modelo numérico pode ser utilizado com confiança na obtenção de outros resultados. Essa conclusão é perfeitamente aceita já que os dados teóricos de Leal (1999) apresentaram erro relativo médio em torno de 5,5%, ou seja, maior em relação ao modelo proposto, para o mesmo intervalo de tempo.

5.2. Operação de carga e eficiência de estratificação

Primeiramente, nota-se que o comportamento de carga do sistema é semelhante ao encontrado por Padilha (1983) e também por Pentagna (2004), mostrando que o modelo utilizado é compatível com esse tipo de geometria.

A figura 13 mostra a dinâmica de carga do sistema para o caso 1, através de um gráfico da temperatura no interior do tanque em função da altura

do mesmo. Nota-se claramente que existe uma diferença de temperaturas considerável entre a base e o topo do tanque para o instante de tempo de 0,01. Porém, essa diferença diminui à medida que o tempo passa, pois a frente quente atinge o fundo do tanque. A partir do instante de tempo 0,03 a temperatura no fundo do tanque começa a aumentar, indicando a recirculação de fluido com temperatura maior que a mínima (inicial).

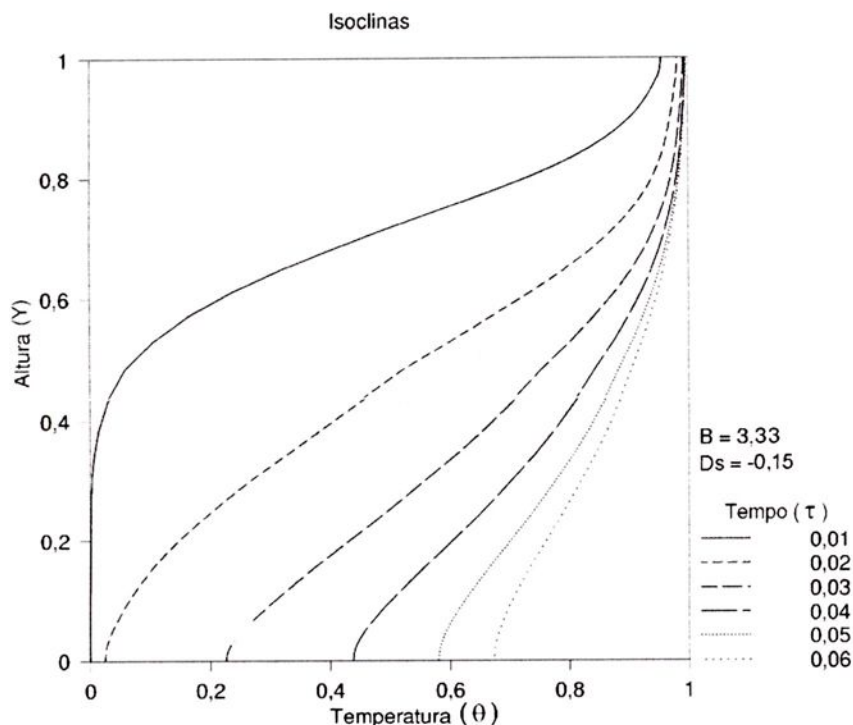


Figura 13 - Comportamento de carga para o Caso 1

Se observarmos a dinâmica de carga para os casos 2, 3 e 4 (figuras 14, 15 e 16, respectivamente), pode-se notar que o tempo de carregamento aumenta à medida que se aumenta o desnível entre o topo do aquecedor e o fundo do tanque. Esse comportamento se explica pelo fato de que as moléculas de fluido precisam absorver maior quantidade de energia térmica e transformá-la em energia cinética e potencial para vencer o desnível através do processo de convecção natural. A absorção energética descrita, demanda, então, maior tempo de aquecimento.

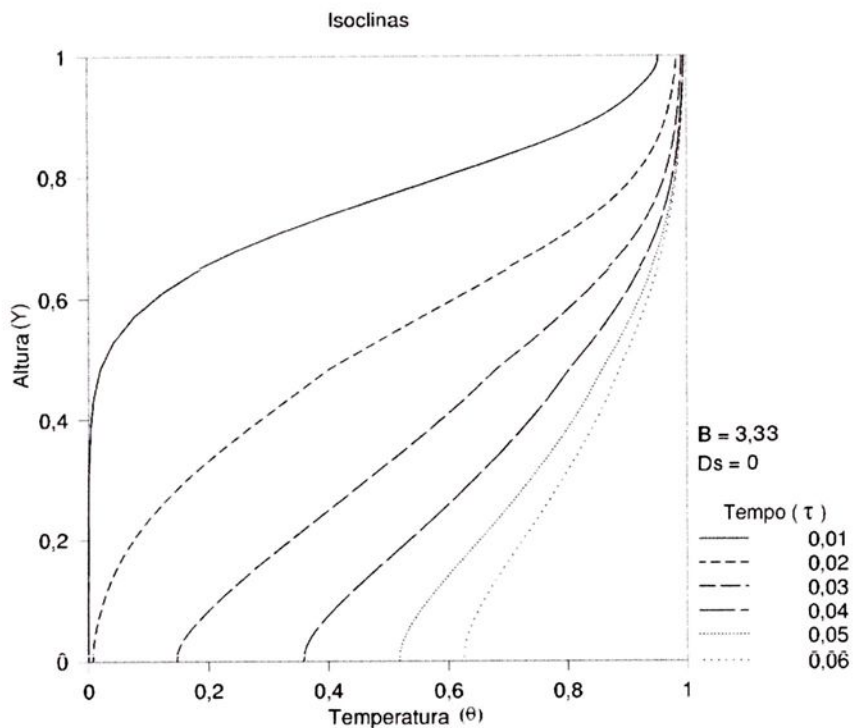


Figura 14 - Comportamento de carga para o Caso 2

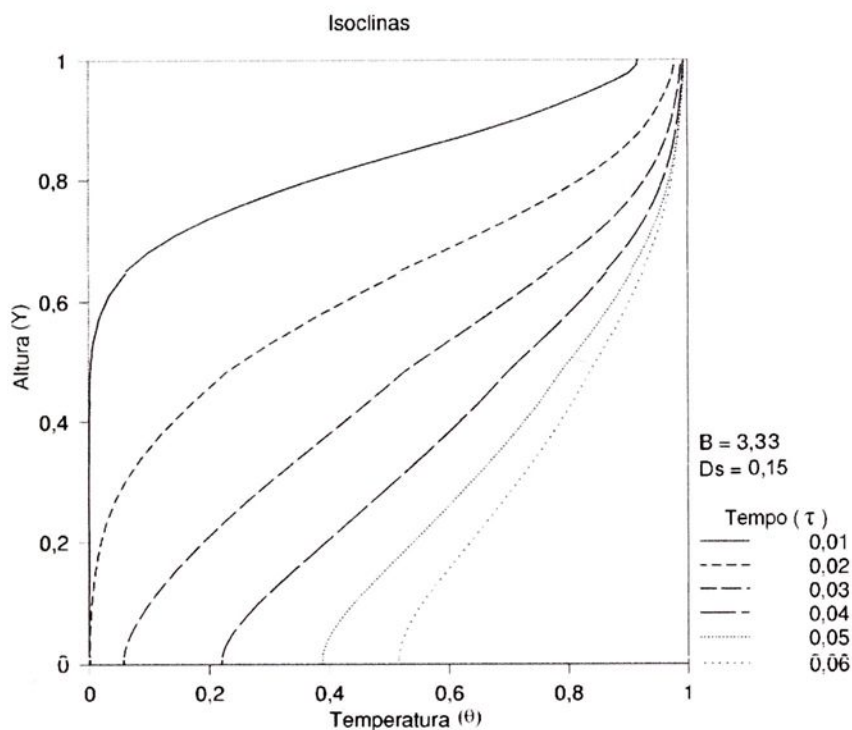


Figura 15 - Comportamento de carga para o Caso 3

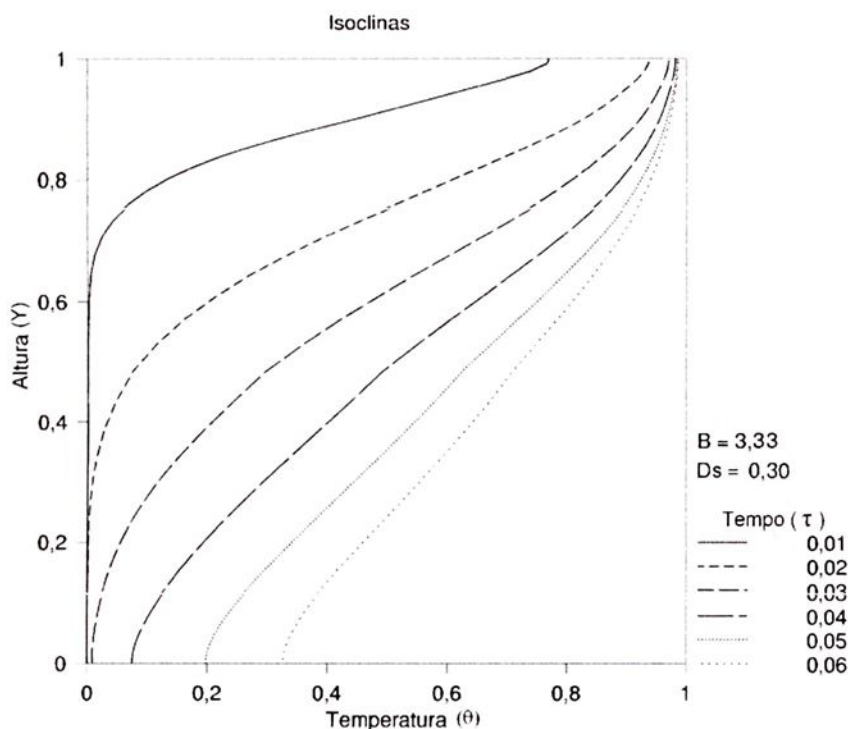


Figura 16 - Comportamento de carga para o Caso 4

O comportamento de carga do sistema para os demais casos é análogo aos casos anteriores. Porém, o tempo de carregamento também varia com a mudança na razão de aspecto. As figuras de 17 a 19 apresentam o grau de carregamento do sistema para o instante de tempo 0,01. Observa-se que quanto menor é o valor dessa razão, menor será o tempo de carregamento.

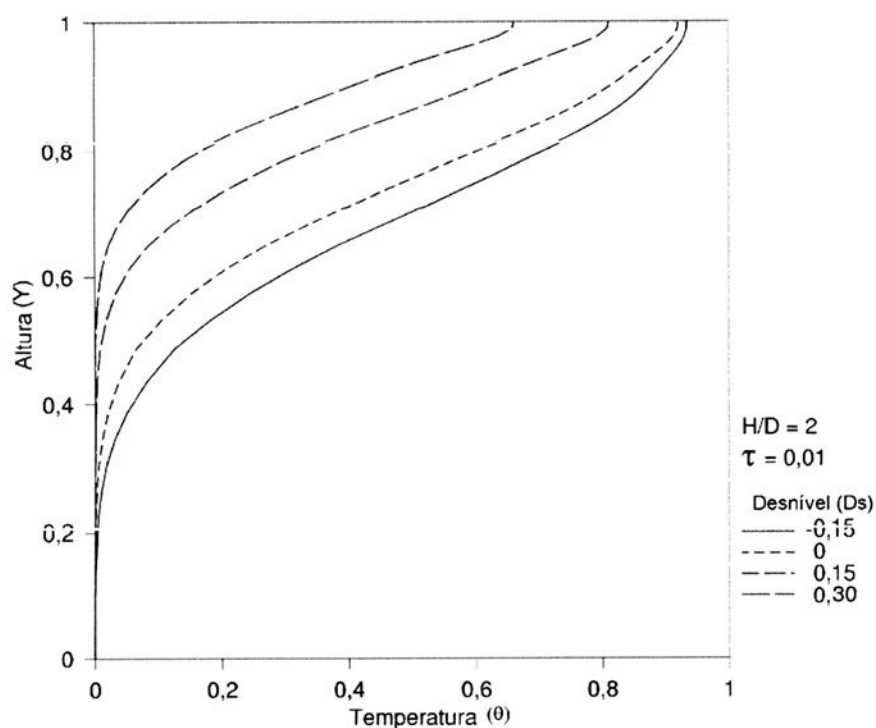


Figura 17 - Comportamento do grau de carregamento em relação ao desnível do tanque $B=2,0$.

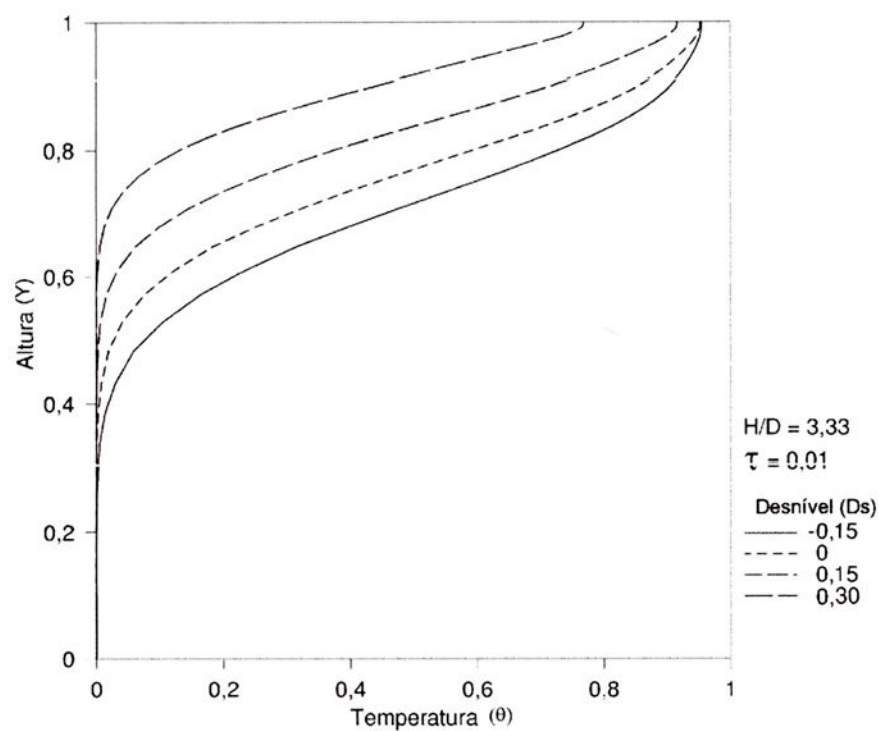


Figura 18 - Comportamento do grau de carregamento em relação ao desnível do tanque $B=3,33$.

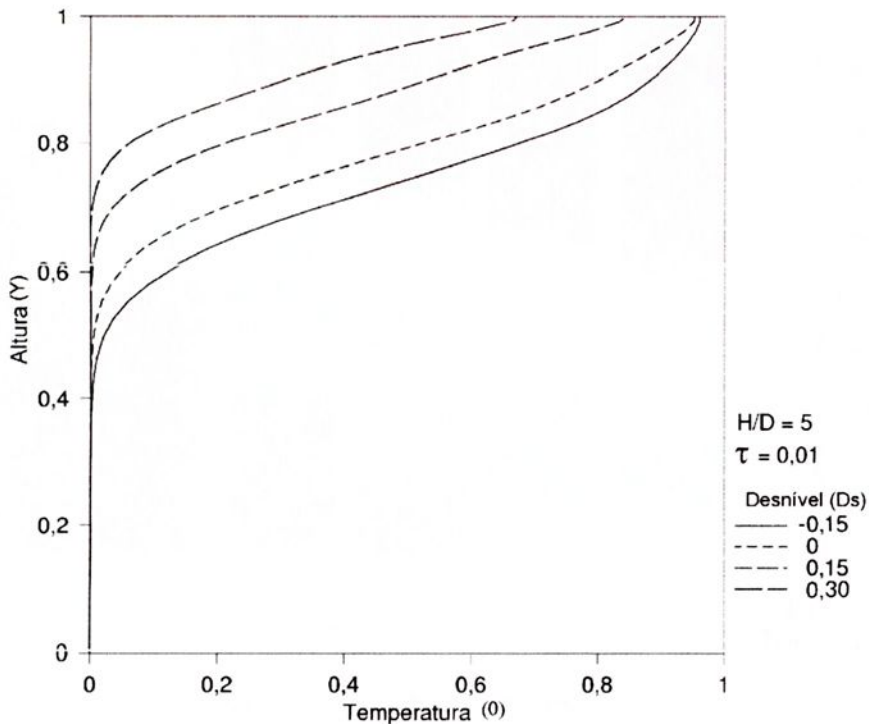


Figura 19 - Comportamento do grau de carregamento em relação ao desnível do tanque $B=5,0$.

Esta diferença de tempo de carregamento evidencia que a recirculação ou vorticidade de fluido provocada na região de entrada, devido às características geométricas de cada tanque, interfere diretamente no seu tempo de carregamento.

Para exemplificar a dinâmica de carga encontrada nas simulações, é mostrada na figura 20 uma sequência de estados do armazenador para o caso 12 nos instantes de tempo 0,01 a 0,06 com intervalos de tempo de 0,01.

O fenômeno de recirculação citado anteriormente pode ser observado na figura 21, a qual apresenta os vetores de velocidade resultante em cada nó do modelo para as diferentes razões de aspecto.

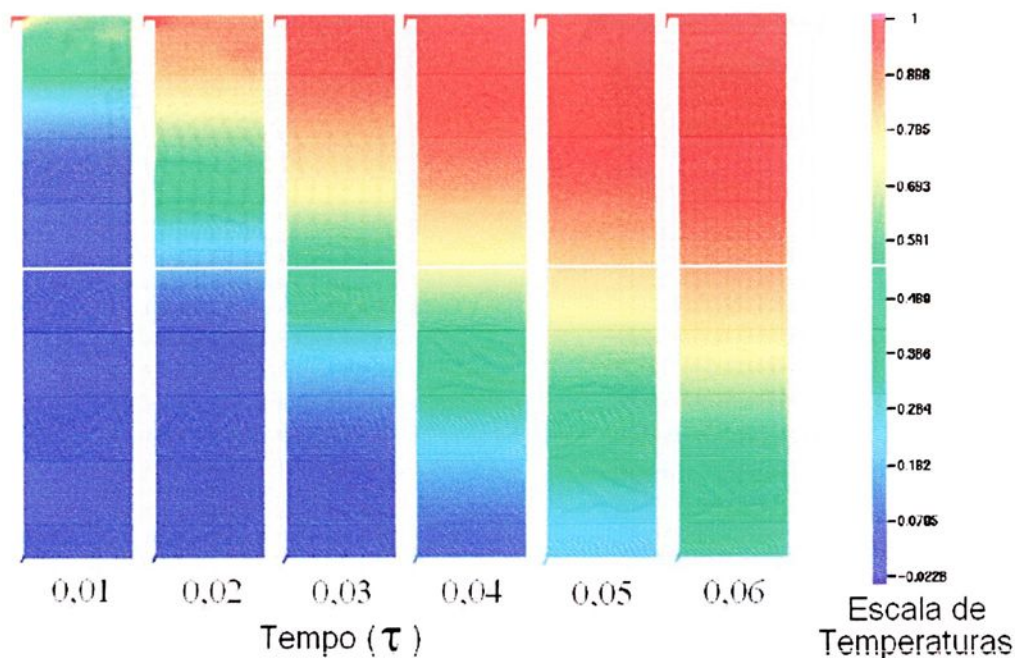


Figura 20 - Dinâmica de carga para o caso 12.

Comparando-se as temperaturas no interior do tanque entre os casos 2, 6 e 10, para um determinado instante de tempo (figuras 22 e 23), observa-se que a espessura da camada de transição da temperatura máxima para temperatura mínima diminui à medida que é aumentada a razão de aspecto.

Apesar das figuras 22 e 23 apresentarem uma comparação entre diferentes razões de aspecto com desnível constante, verifica-se o fenômeno da diminuição na vazão de fluido quente para o topo do tanque, pois a altura relativa de entrada de fluido no tanque aumenta de acordo com o aumento da razão de aspecto.

Dessa forma, a molécula de fluido que entram na parte superior do tanque (caso 10), produzem recirculação no fluido, mas mantem a temperatura dessa região mais elevada, ao passo que nos demais casos a maior velocidade presente nas moléculas de fluido carrega a energia térmica até regiões mais inferiores do tanque, aumentando a espessura da camada de transição entre a região quente e a região fria.

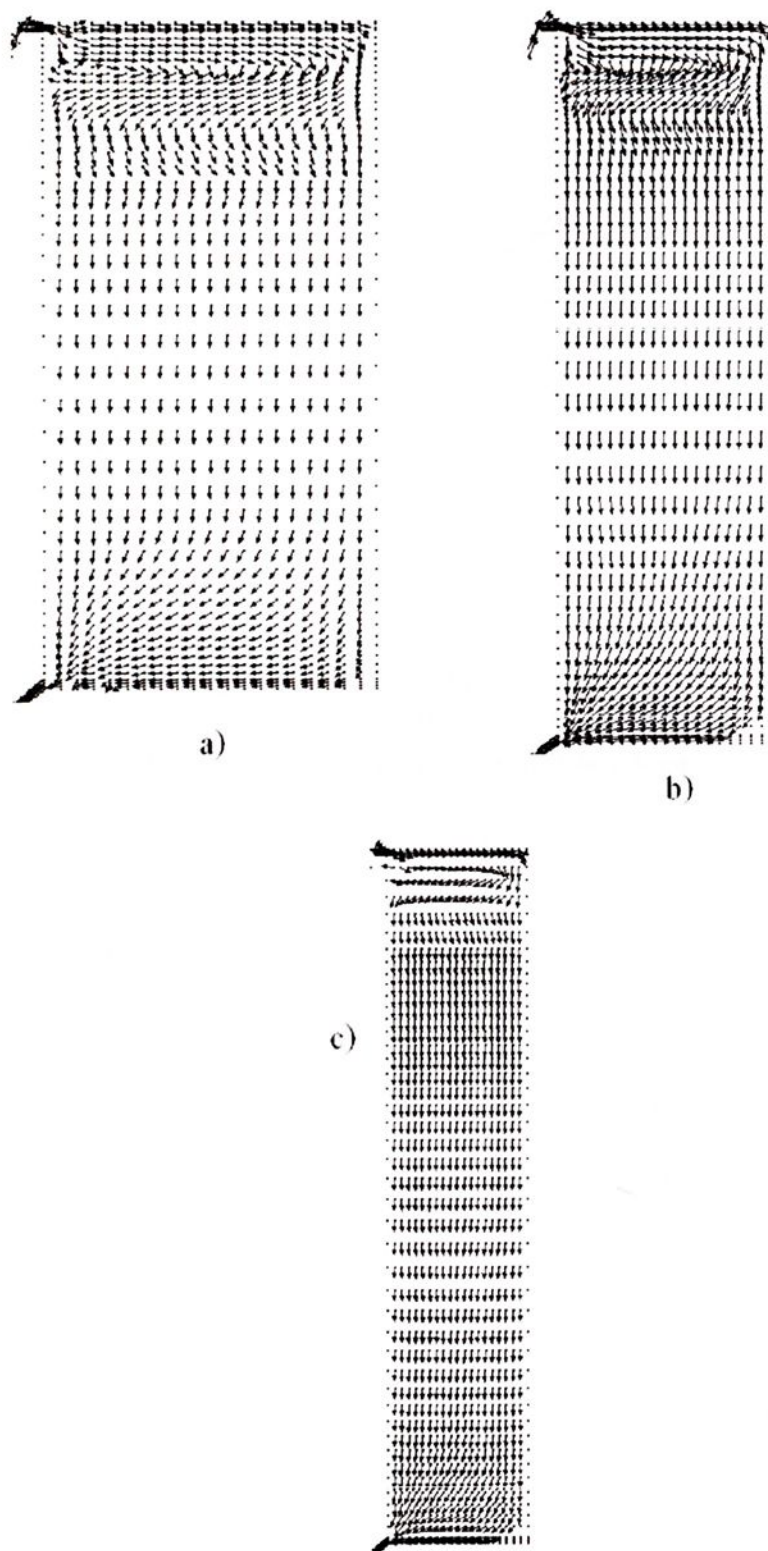


Figura 21 - Vetores de velocidade no interior do tanque para $\tau = 0,01$. a) $B=2,0$; b) $B=3,33$; c) $B=5,0$.

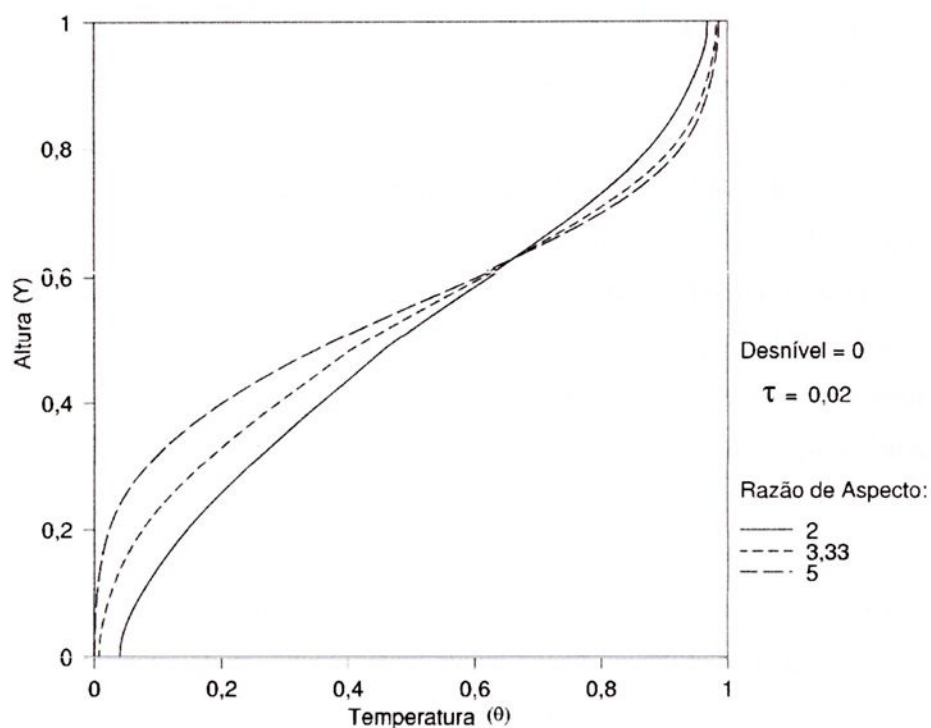


Figura 22 - Influência da razão de aspecto na qualidade de estratificação ($\tau=0,02$)

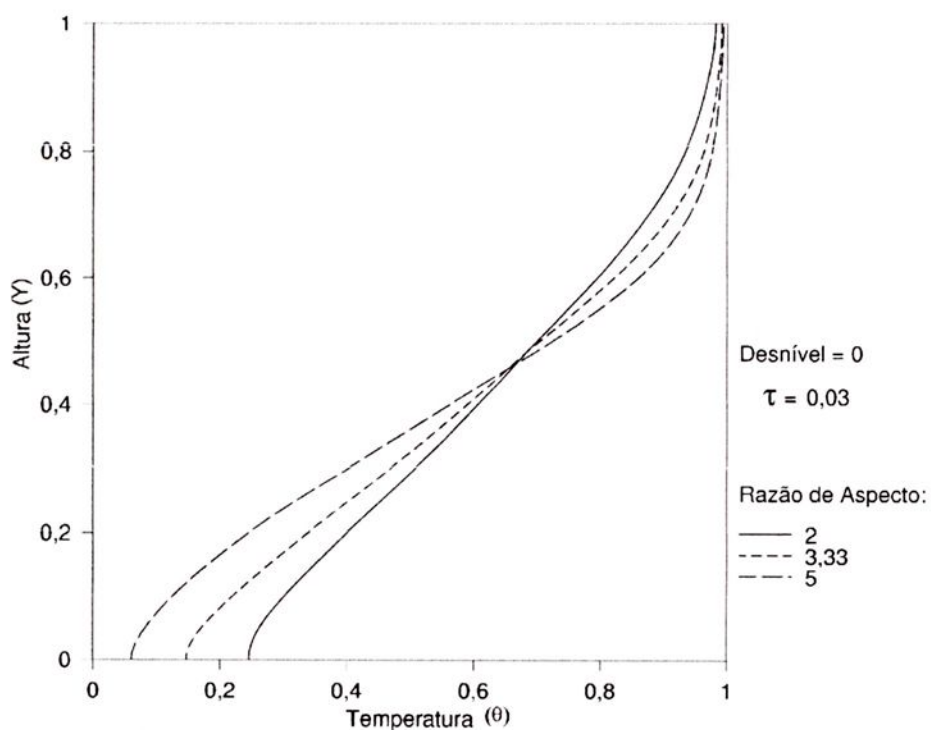


Figura 23 - Influência da razão de aspecto na qualidade de estratificação ($\tau=0,03$)

Nota-se ainda que existe um ponto de inflexão comum entre as curvas caracterizando a influência da razão de aspecto na qualidade de estratificação.

A qualidade de estratificação térmica citada é determinada pela diferença entre as temperaturas máxima e mínima no interior do tanque de armazenamento. De acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica, quanto maior a diferença de temperaturas sob as quais uma máquina térmica trabalha maior será a eficiência dessa máquina. Portanto, a qualidade de estratificação térmica é melhorada à medida que se aumenta a diferença de temperaturas entre o fluido do topo e o fundo no interior do tanque.

A diminuição da camada de transição descrita anteriormente está diretamente relacionada a outro fenômeno que ocorre durante o processo. À medida que se aumenta o desnível no sistema, a necessidade de maior acúmulo de energia térmica provoca uma diminuição na vazão do sistema, como mostram as figuras 24 a 26.

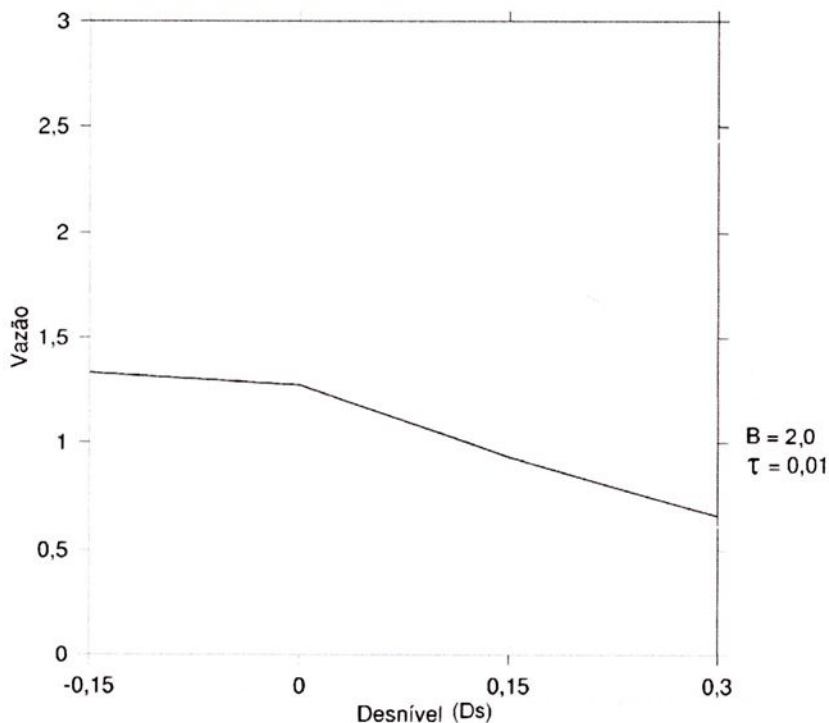
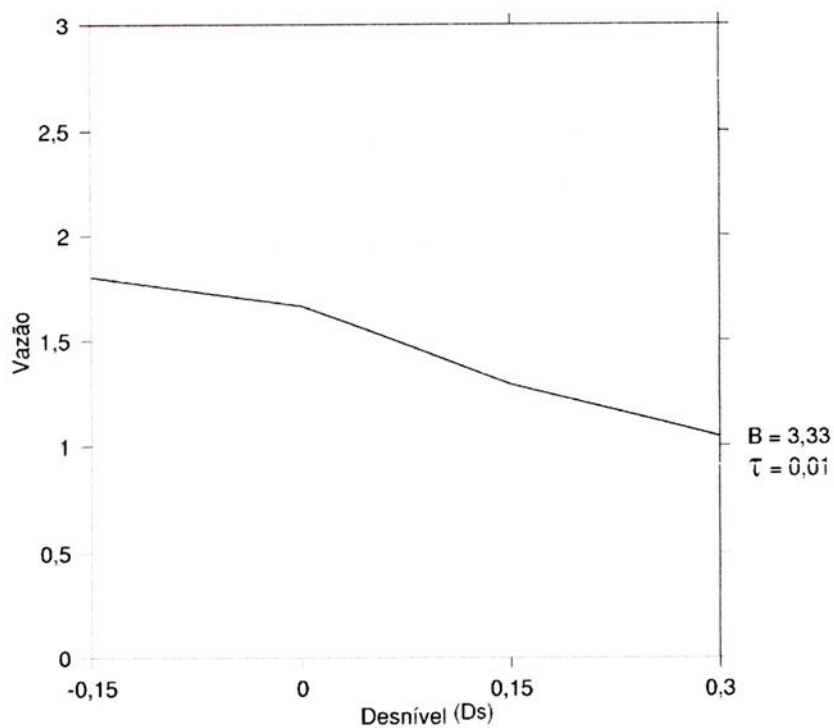
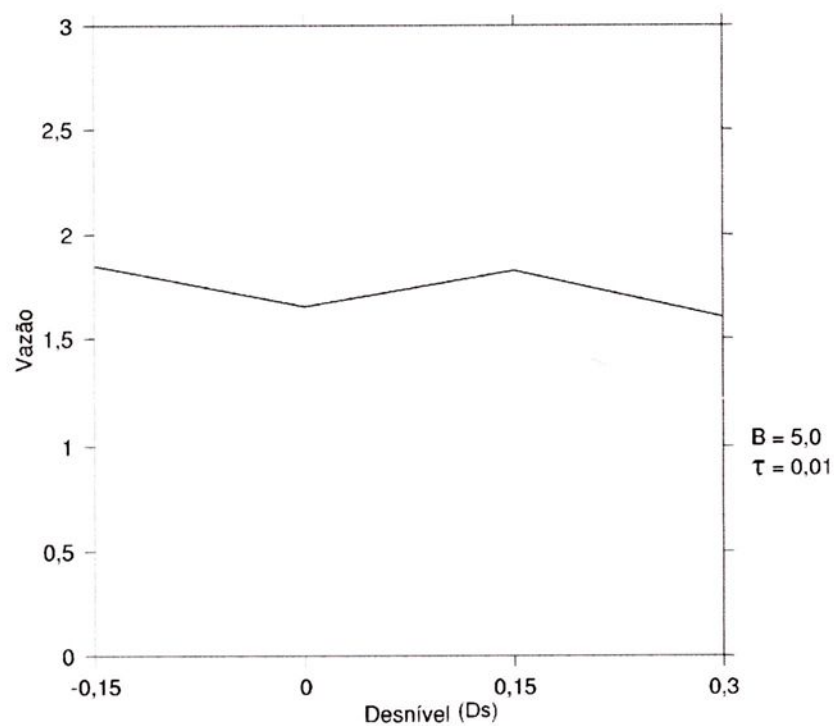


Figura 24 - Variação da vazão em relação ao desnível ($B=2,0$).

Figura 25 - Variação da vazão em relação ao desnível ($B=3,33$).Figura 26 - Variação da vazão em relação ao desnível ($B=5,0$).

As figuras 27 a 29 mostram a variação da eficiência de estratificação em função da diferença de temperaturas no interior do tanque. Nota-se que o maior nível de eficiência é encontrado nos casos onde o desnível é negativo. Verifica-se ainda, que a eficiência de estratificação térmica aumenta ligeiramente com o aumento da diferença de temperaturas.

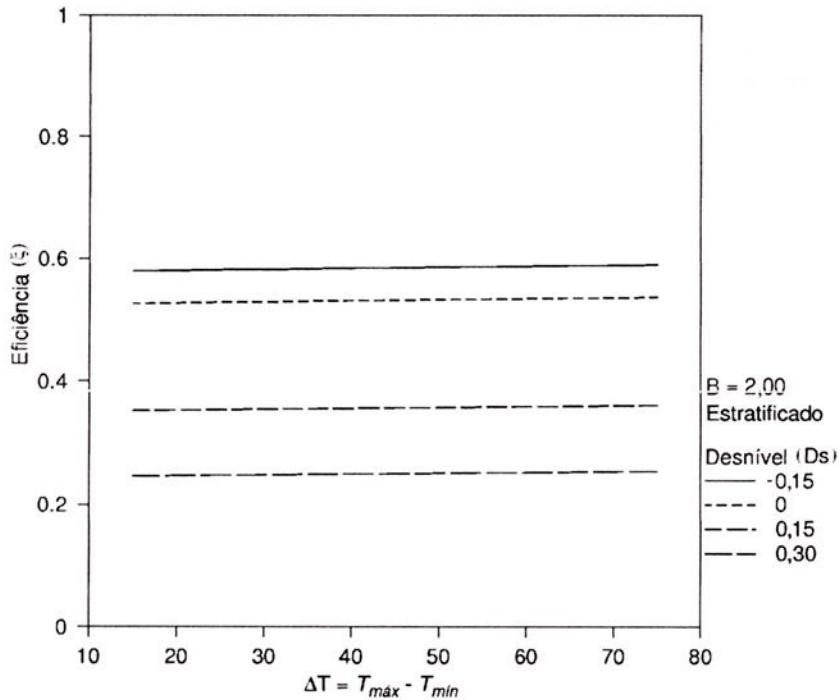


Figura 27 - Eficiência de estratificação $B=2,0$.

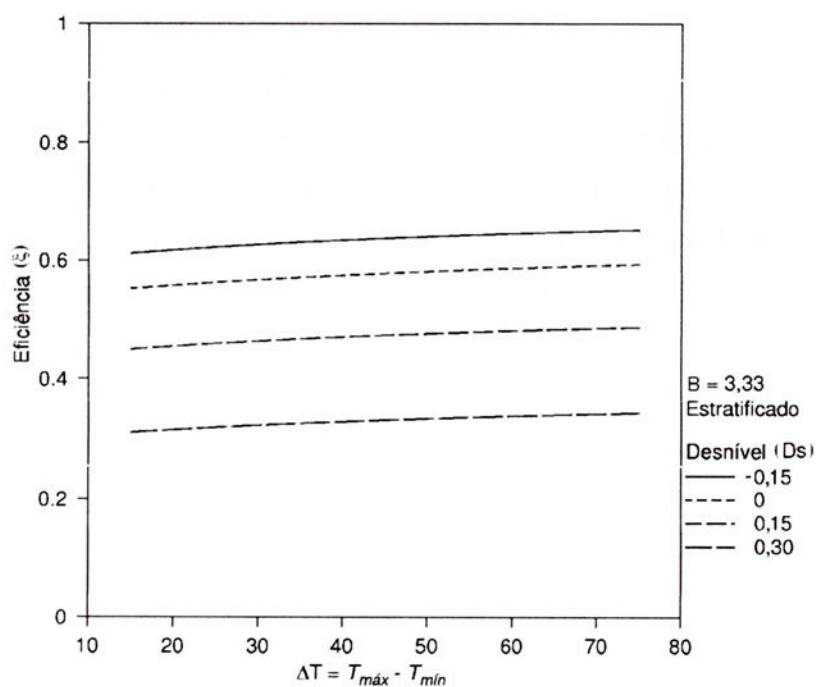


Figura 28 - Eficiência de estratificação $B=3,33$.

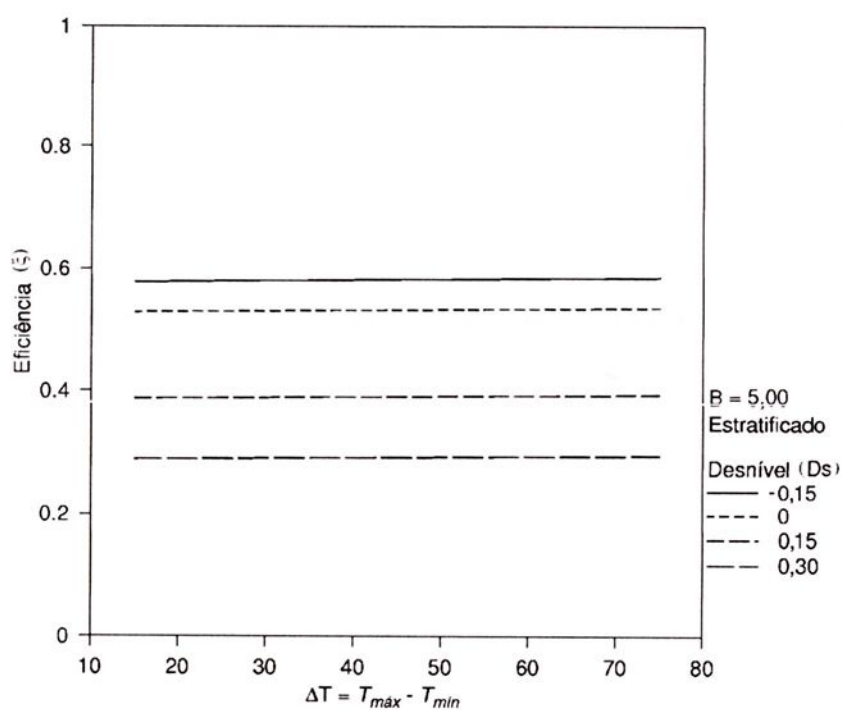


Figura 29 - Eficiência de estratificação $B=5,0$.

A eficiência de estratificação também sofre variação em relação ao tempo de carregamento. Observa-se que essa eficiência aumenta com o passar do tempo, indicando que quanto maior é o nível de temperaturas no interior do tanque maior será a eficiência térmica do sistema. Porém, o aumento de eficiência está limitado ao carregamento total do tanque, já que a curva de eficiência tem uma tendência de estabilização, como mostram as figuras 30 a 33.

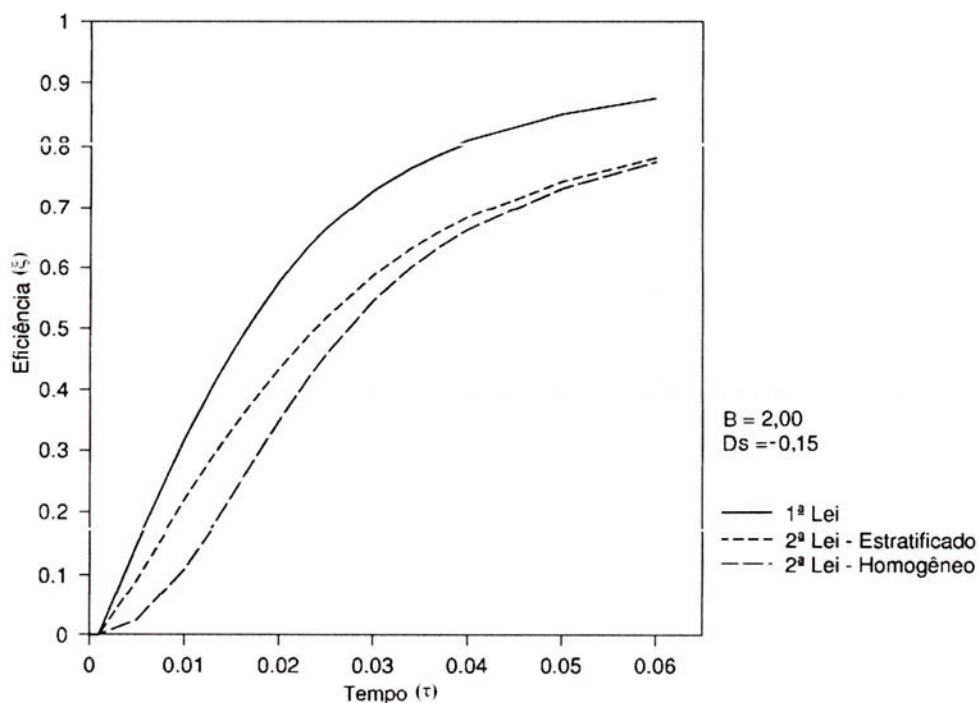


Figura 30 - Variação da eficiência de estratificação em relação ao tempo (Caso 5).

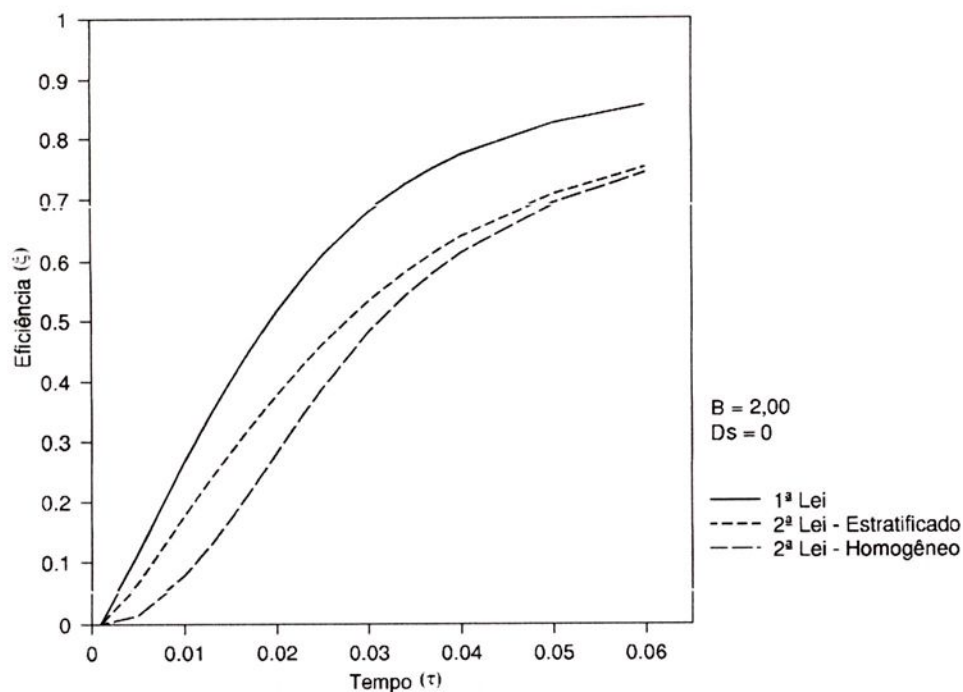


Figura 31 - Variação da eficiência de estratificação em relação ao tempo (Caso 6).

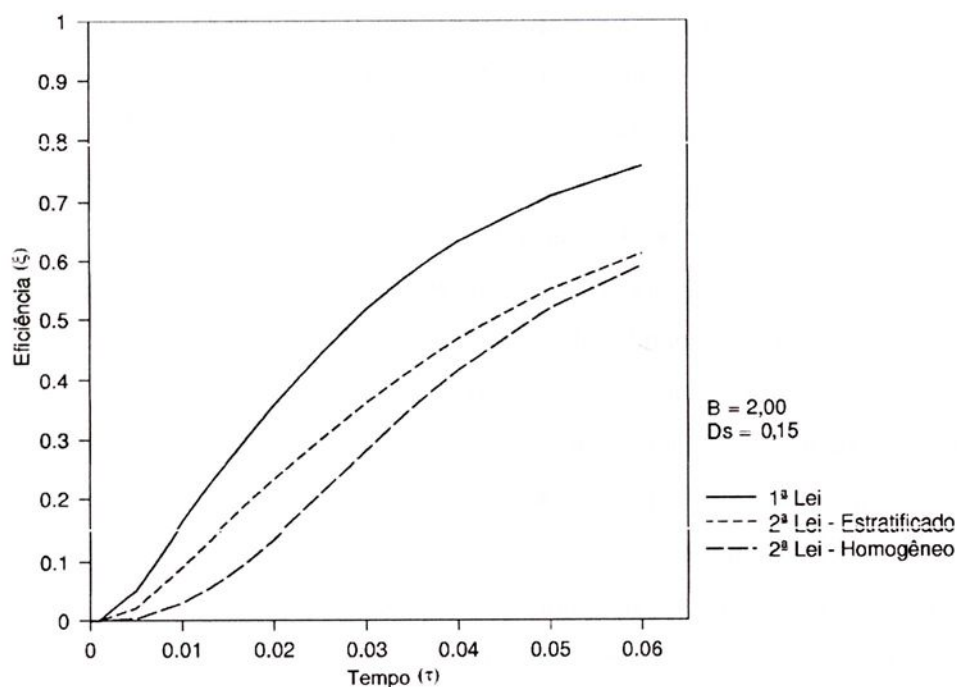


Figura 32 - Variação da eficiência de estratificação em relação ao tempo (Caso 7).

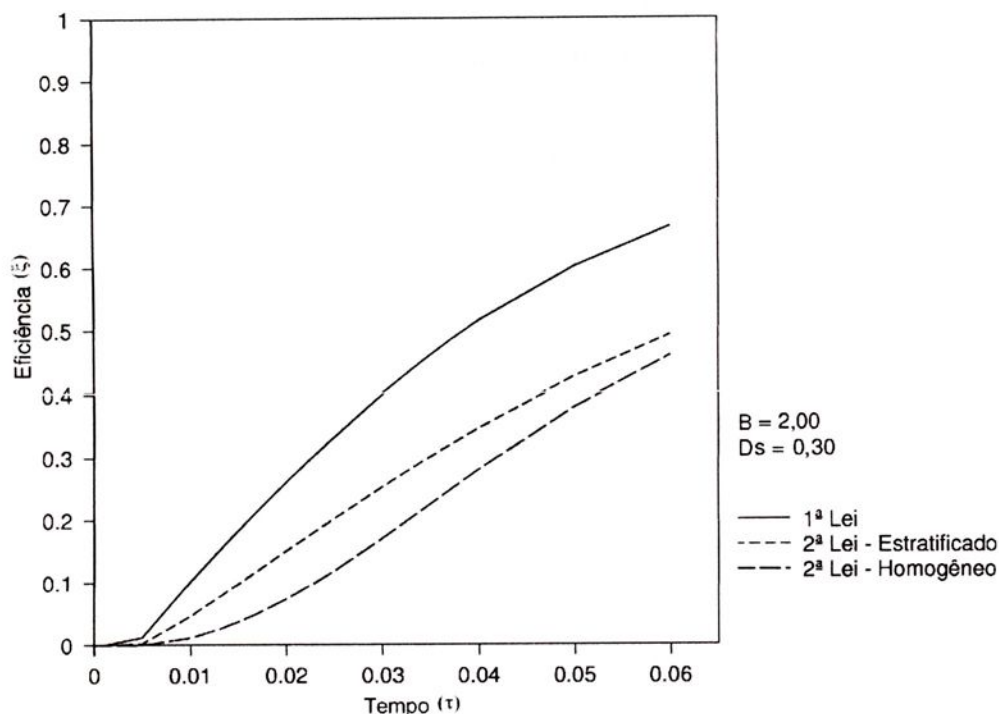


Figura 33 - Variação da eficiência de estratificação em relação ao tempo (Caso 8).

O mesmo comportamento de estabilização pode ser observado nos casos de mesma razão de aspecto. Porém, o tempo necessário para que isso aconteça varia de acordo com o desnível existente em cada caso. Nas figuras 30 a 33 podem ser observados esses fenômenos.

Para os demais casos, com razão de aspecto $B=3,33$ e $B=5,0$, a eficiência de carregamento se comporta de forma análoga ao apresentado até aqui. Comparando-se, pela Segunda Lei da Termodinâmica, a eficiência de estratificação entre os casos 1, 2, 3 e 4 nota-se que a eficiência é maior para o caso onde o desnível é negativo, ou seja, onde o fundo do tanque está abaixo do topo do aquecedor. Nota-se também que o ganho de eficiência nesse caso é menor que o ganho de eficiência encontrado nos casos onde o desnível é positivo.

A figura 34 mostra esse comportamento, que é explicado pelo fato da vazão não sofrer grande variação nesse caso. Voltando a atenção para a figura 24, nota-se que a inclinação da curva da vazão é muito menor entre o desnível $-0,15$ e o desnível 0 se comparada à inclinação da curva entre o desnível

0 e o desnível 0,15. Ou seja, a vazão no caso 1 é muito próxima da vazão no caso 2, evidenciando a grande influência da vazão de fluido na eficiência do sistema.

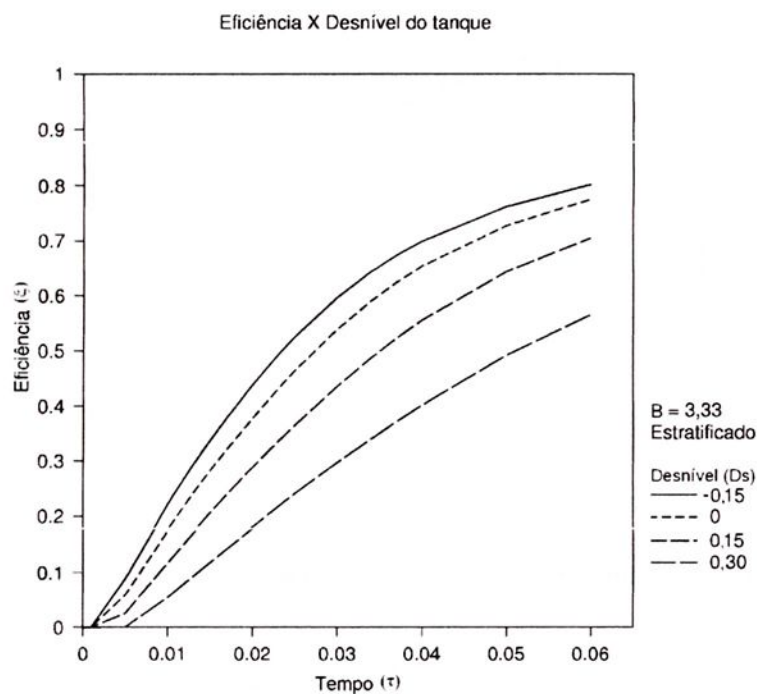


Figura 34 - Eficiência de estratificação em relação ao desnível ($B=3,33$).

As figuras 35 e 36 mostram o comportamento da eficiência de estratificação nos casos onde B é igual a 2,0 e 5,0, respectivamente.

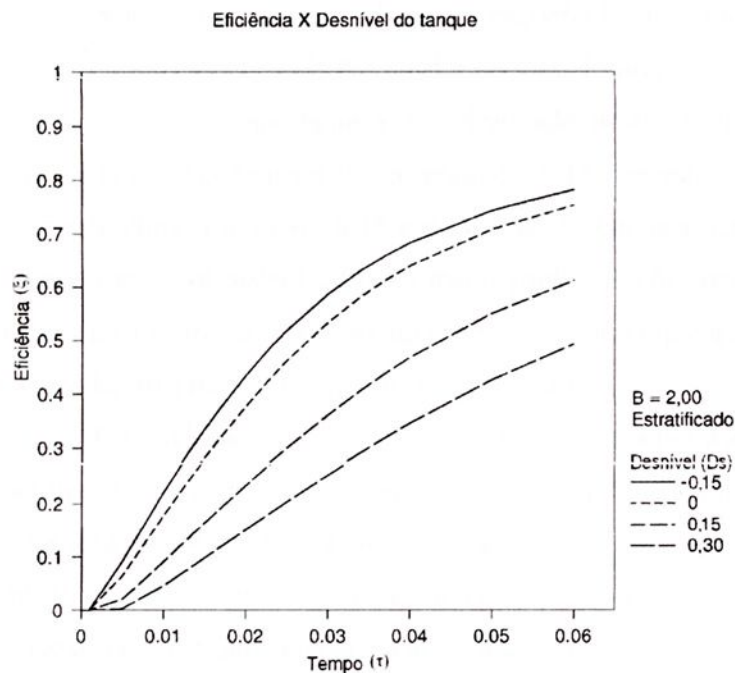


Figura 35 - Eficiência de estratificação em relação ao desnível ($B=2,0$).

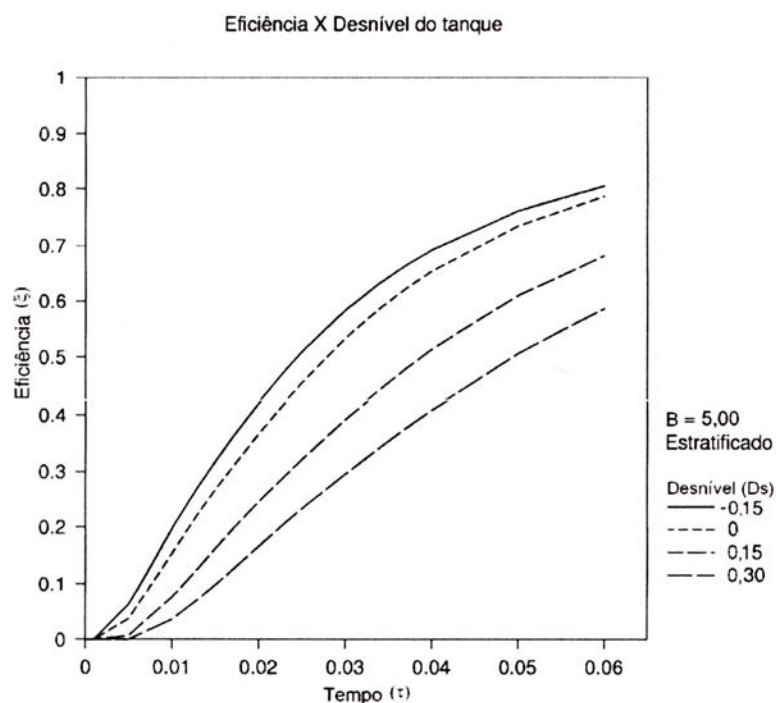


Figura 36 - Eficiência de estratificação em relação ao desnível ($B=5,0$).

Nota-se que a maior eficiência encontrada entre todos os casos analisados recai sobre o caso 1, onde B é igual a 3,33 e o desnível é igual a $-0,15$.

Um fator importante a ser observado nessas figuras é que o ganho de eficiência entre o desnível 0 e o desnível $-0,15$ é menor se comparado ao ganho existente entre o desnível $0,15$ e o desnível 0. Ou seja, para a mesma diferença de nível entre os sistemas houve maior ganho de eficiência nos casos onde o tanque estava acima do nível do aquecedor, indicando que a diferença de nível é mais significativa na região superior ao aquecedor.

Com relação ao efeito da razão de aspecto sobre a eficiência de estratificação térmica no interior do tanque, observa-se que o comportamento foi semelhante ao descrito por outros autores citados anteriormente, para os casos onde o desnível é positivo, isto é, o desnível igual a $0,15$ ou $0,30$. As figuras 37 e 38 foram tomadas como argumentos dessa afirmação, pois se nota claramente que a eficiência é maior nos casos onde B está entre 3,0 e 4,0.

Porém, nos casos onde o fundo do tanque é nivelado com o topo do aquecedor ou o desnível é negativo, a eficiência é ligeiramente maior no caso onde $B=2,0$, o que pode ser observado nas figura 39 e 40.

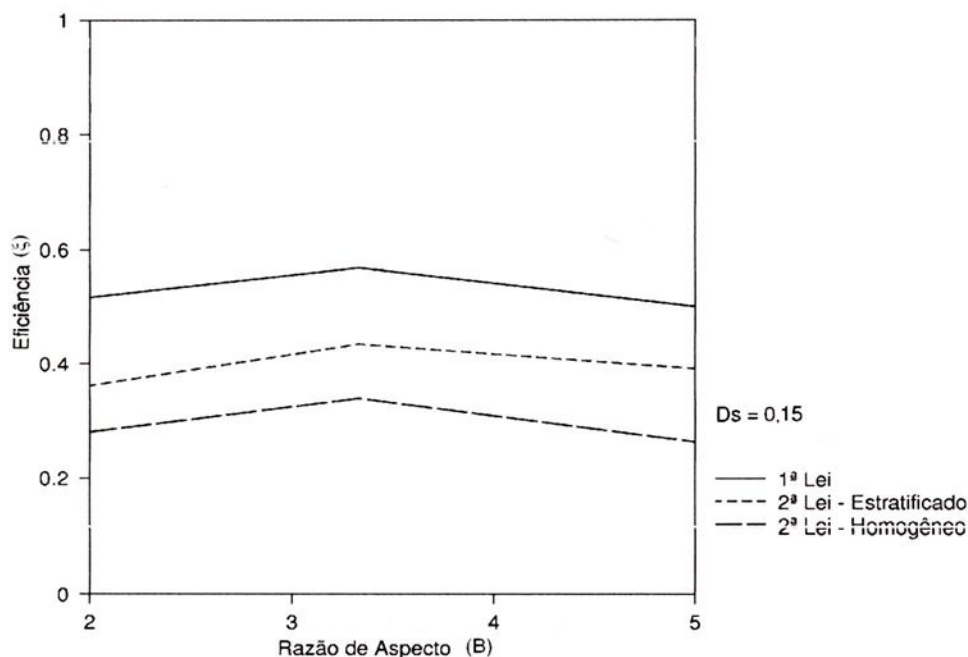


Figura 37 - Efeito da razão de aspecto sobre a eficiência de estratificação (Desnível 0,15).

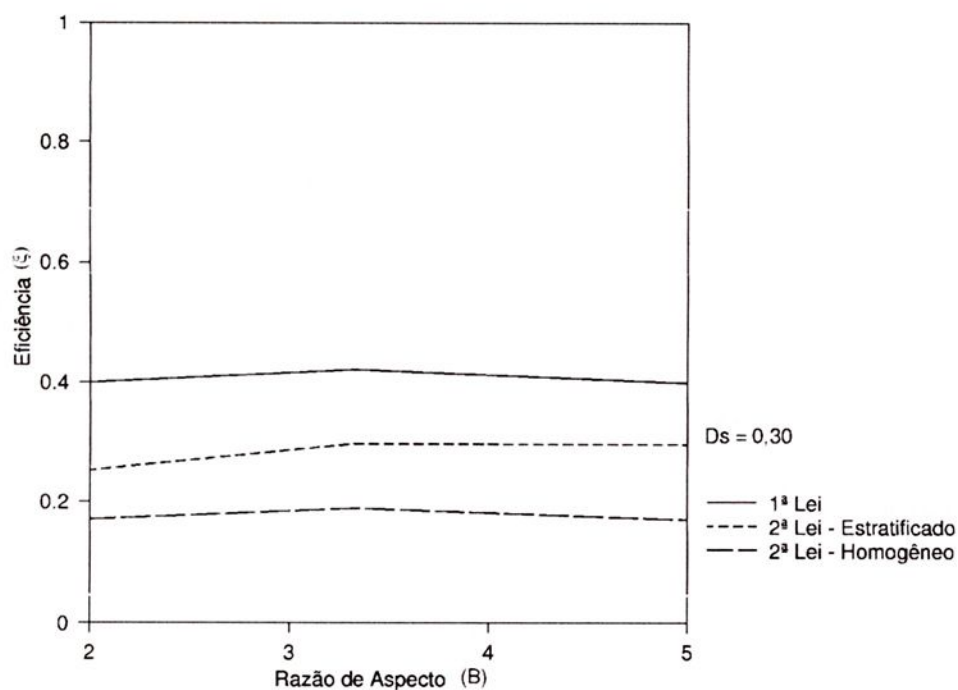


Figura 38 - Efeito da razão de aspecto sobre a eficiência de estratificação (Desnível 0,30).

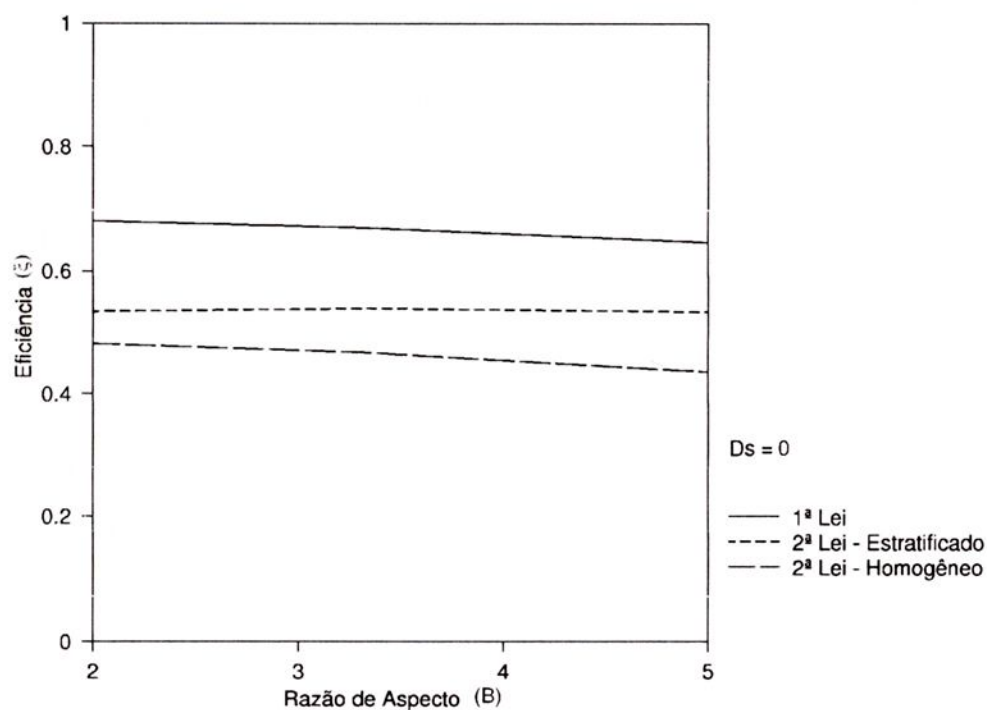


Figura 39 - Efeito da razão de aspecto sobre a eficiência de estratificação (Desnível 0).

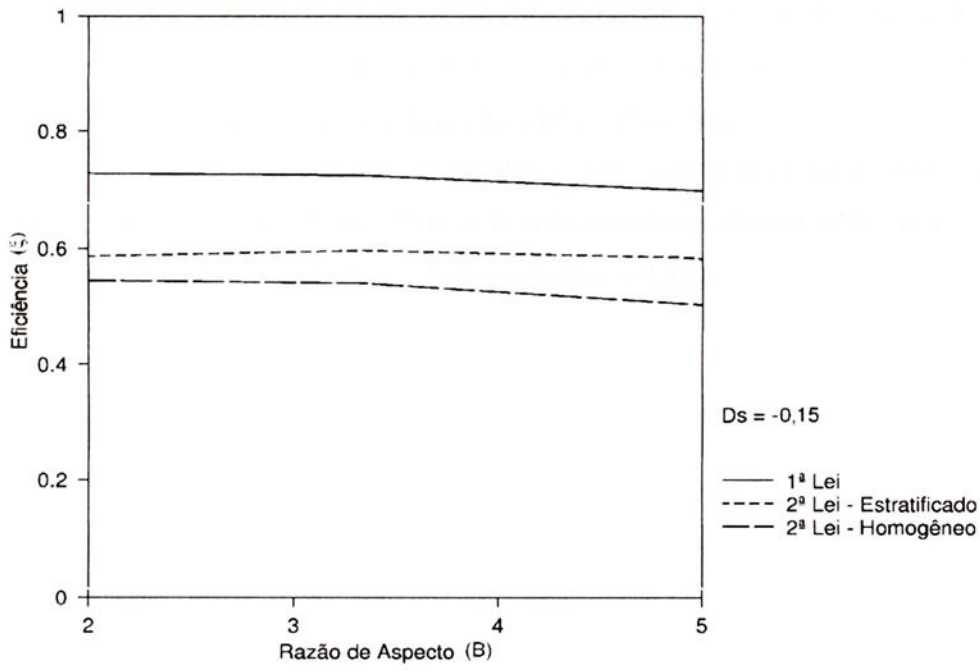


Figura 40 - Efeito da razão de aspecto sobre a eficiência de estratificação (Desnível -15).

A figura 41 mostra a comparação entre as três figuras anteriores, utilizando a 2ª Lei da Termodinâmica. Por essa figura pode-se observar que a maior eficiência se estabelece quando o desnível é negativo.

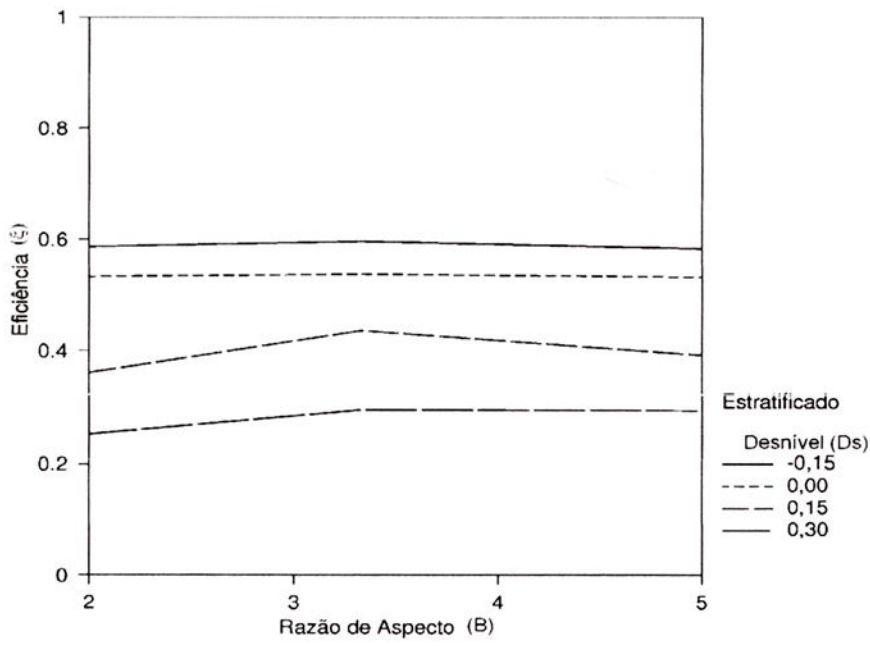


Figura 41 - Eficiência em função da razão de aspecto para diferentes níveis.

Tendo em vista os aspectos apresentados até aqui, nota-se que o comportamento de carga e a eficiência de cada sistema simulado se mostraram semelhantes aos fenômenos físicos conhecidos na atualidade.

Os resultados apresentados têm importância fundamental no projeto e desenvolvimento de sistemas de aproveitamento de energia térmica, pois sugerem parâmetros construtivos ideais para estes sistemas.



6 Conclusões e Extensões Futuras

6.1. Conclusões

Os resultados expostos e analisados no capítulo anterior mostram a capacidade de solução de problemas de armazenamento de energia por estratificação térmica do modelo matemático utilizado.

Esse modelo pode apresentar pequenas diferenças de resultados em relação à trabalhos experimentais, em decorrência das simplificações adotadas durante sua formulação. Porém, pode-se observar que os resultados obtidos pelo modelo matemático proposto neste trabalho apresentam um erro relativo médio de 4,5% em relação aos resultados experimentais de Leal (1999) que é menor que o erro relativo proposto pelo mesmo autor, o qual apresenta erro relativo médio de 5,5%.

Dessa forma, é perfeitamente aceitável o uso desse código computacional elaborado em linguagem de programação C para a solução de problemas de mesma natureza física.

Através do processo de solução utilizado, alguns fatores de dimensionamento geométrico de sistemas compostos por aquecedor e tanque armazenador podem ser determinados, facilitando o projeto de sistemas reais.

Segue abaixo algumas conclusões obtidas de acordo com os resultados apresentados:



1. Com relação ao tempo de carregamento, o melhor resultado foi obtido com o caso 5, onde $B=2,0$ e desnível $-0,15$. Isso implica que o carregamento mais rápido ocorre no caso em que o desnível a ser vencido é o menor possível.

2. Para melhor qualidade de estratificação, a razão de aspecto deve ser a maior possível, pois quanto maior é o valor dessa razão mais próxima de função degrau se torna a isoclina no interior do tanque. Essa consideração só pode ser avaliada em casos onde não existe perda de calor através das paredes do armazenador.

3. Os efeitos mais significativos sobre a eficiência de estratificação térmica são decorrentes da vazão de fluido no sistema e da razão de aspecto do tanque armazenador.

4. A razão de aspecto ideal é aproximadamente 3,33, ou seja, o ponto que apresenta melhor eficiência térmica.

6.2. Extensões futuras

Em vista dos aspectos analisados nesse trabalho, foram identificados alguns temas para análise futura, com o propósito de avançar no desenvolvimento do tema.

Um aspecto que poderia ser estudado futuramente é a adição de um mecanismo de laminação do fluxo na entrada do tanque armazenador, objetivando a eliminação da vortividade nessa região.

Outro aspecto importante a ser estudado seria o comportamento do sistema quando o fundo do tanque está abaixo do nível do topo do aquecedor, pois como foi analisado nesse trabalho existe uma tendência de aumento da eficiência para essa situação.

Um terceiro aspecto seria fazer as mesmas simulações mantendo a vazão do sistema constante.



7 Referências Bibliográficas

AL-NAJEM, N.M., Degradation of Stratified Thermocline in Solar Storage Tanks. **Int. J. Energy Res.**, v 17, p 183-191, 1993.

AL-NAJEM, N.M.; AL-MARAFIE, A. M.; EZUDIN, K. Y., Analytical and Experimental Investigation of Thermal Stratification in Storage Tanks. **J. Energy Research** , v.17, p 77-88, 1993.

BIRD, P. R.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N., Transport Phenomena, New York, **John Wiley**, 1960. p.780.

BOUHDJAR, A., HARHAD, A., Numerical analysis of transient mixed convection flow in storage tank: influence of fluid properties and aspect ratios on stratification. **Renewable Energy**, Vol. 25, p. 555-567, 2002.

DINCER, I.; DOST, S.; LI, X. Performance Analyses of Sensible Heat Storage Systems for Thermal Applications. **International Journal of Energy Research**, v 21, p 1157-1171, 1997.



DINCER, I.; ROSEN, M. A., Energetic, Environmental and Economic Aspects of Thermal Energy Storage Systems for Cooling Capacity. **Applied Thermal Engineering**, v.21, p 1105-1117, 2001.

FICEK, J., Selection and sizing of storage tank water heaters, **HPAC Heating, Piping, Air Conditioning**, v. 68, n. 10, Out, 3p., 1996.

GUPTA, S. K.; JALURIA, Y., An Experimental and Analytical Study of Thermal Stratification in an Enclosed Water Region due to Thermal Energy. **Energy Conversion Management**, v 22, p 63-70, 1982.

HOBSON, P.A.; NORTON, B., A Design Monogram for Direct Thermosyphon Solar Energy Water Heaters, **Solar Energy**, v. 43, p. 89-95, 1989.

HOMAN, K. O.; SOO, S. L., Laminar flow efficiency of stratified chilled-water storage tanks, **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v.19, n.1, Feb., p.69-78, 1998.

HUSSAIN, H. M. S., Optimization of a Natural Circulation Two Phase Closed Thermosyphon Flat Plate Solar Water Heater. **Energy Conversion and Management**, Vol. 44, p. 2341-2352, 2003.

HUSSEIN, H. M. S., MOHAMAD, M. A., EL-ASFOURI, A. S., Transient Investigation of a Thermosyphon Flat-Plate Solar Collector. Vol. 19, p. 789-800, 1999.

ISMAIL, K. A. R.; LEAL, J. F. B.; ZANARDI, M. A., Models of liquid storage tanks, **Energy**, v.22, n.8, p.805-815, 1996.



ISMAIL, K. A. R.; LEAL, J. F. B.; ZANARDI, M. A., A Parametric study on stratified cold storage tanks, **Heat Transfer 97, Swasea. Proceedings: Advanced Computational Methods in Heat Transfer**, 1997, p.234-241.

KALOGIROU, S. A., PAPAMARCOU, C., Modelling of a Thermosyphon Solar Water Heating System and Simple Model Validation. **Renewable Energy**, Vol. 21, p. 471-493, 2000.

KLENINBACH, E.M.; BECKMAN, W.A.; KLEIN, S.A., Performance Study of One Dimensional Models for Stratified Thermal. **Solar Energy**, v.50, p.155-166, 1993.

LAVAN, Z.; THOMPSON, J., Experimental Study of Thermal Stratified Hot Water Storage Tanks. **Solar Energy**, v 19, p 519-524, 1977.

LEAL, J. F. B., **Estudo Numérico e Experimental de Fenômeno de Estratificação Térmica em Armazenamento de Calor e Frio**. 1999. 103 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

PADILHA, A.; BASTOS, L.E.G., Estocagem por Estratificação Térmica de Líquido em Reservatório, **I Congresso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia**, La Plata , Argentina, 31/Out. a 04/Nov., p 934-949, 1982.

PADILHA, A., Estocagem por Estratificação Térmica de Líquido em Reservatório, **Dissertação de Mestrado**, COPPE/UFRJ, 1983.

PENTAGNA, R. P. P. **Modelo matemático para análise de problemas de estocagem de líquidos que apresentam estratificação térmica** . 2004. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2004.



SCALON, V. L., Estudo Numérico da Convecção Natural em Geometria Trapezoidal Típica de Sistemas com Coletor Solar-Tanque Armazenador Acoplados, Ilha Solteira, **Tese de Livre Docência**, 2004.

SHYU, R.J.; LIN, J.Y.; FANG, L.J., Thermal Analysis of Stratified Storage Tanks. ASME. **J. Solar Energy Eng.**, v.111, p.54-61, 1989.

YOO, H., PAK, E., Analytical Solutions to a One-Dimensional Finite-Domain Model for Stratified Thermal Storage Tanks. **Solar Energy**, Vol. 56, p. 315-322, 1996.

7.1. Bibliografia Complementar

AHERN, J. E., The energy method of energy systems analysis, New York, **John Wiley**, 1980, p.295.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A.; Solar Engineering of Thermal Processes, Second Edition, New York **John Wiley and Sons**, 1991.

DUMOND, R., Énergie solaire et storage d'énergie. Paris, **Masson**, 1977.

GROSS, R. J., Thermocline thermal energy storage, In: **Proceedings of the Lincfocus Solar Thermal Energy Technology Development: a seminar for industry**. Albuquerque, New Mexico, Sep. 9 to 11, 1980. p 205-212.

HOTTEL, A.; WHILLIER, A., Evaluation of Flat Plate Collector Performance. **Conference on the Use of Solar Energy University**, v. 2, p.1-74, 1958.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Third edition, New York **John Wiley and Sons**, 1990.



ISMAIL, K. A. R., Bancos de Gelo: fundamentos e modelagem, **Editora do autor**, Campinas, SP, 1998,400p.

KOEFOED, J., Thermal energy and its storage. **Energy**, New York, v. 2: 55-58, 1977.

MATRAWY, K. K.; FARKAS, I., Comparison Study for Three Types of Solar Collectors for Water Heating, **Energy Conversion Management**, v.38, p.861-869, 1997.

PATANKAR, S. V., Numerical heat transfer, **Hemisphere Publishing Corporation**, 1998,197p.

ROGERS, G., MAYHEW, Y., Engineering Thermodynamics Work and Heat Transfer, England, **Longmann Scientific & Technical**. 4° ed. 1994

SIEGEL, R.; HOWELL, J. R., Thermal radiation heat transfer, Tokyo, **McGraw-Hill Kogakushab**, 1972. (International Student Edition). P.814.

TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y.; YIANOULIS, P., Integrated Collector-Storage Systems with Suppressed Thermal Losses, **Solar Energy**, Vol.48, p.31-37, 1992.

TURNER, R. H.; BONNIN, J., Accumulation d'énergie thermique à haute température Paris, **Editions SCM**, 1979. (Collection Énergie Solaire).

WILLIER, A., Prediction of Performance of Solar Collectors. **Applications of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings**. ASHRAE, 1977.



0810001374

