

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE TÉRMICA DO PROCESSO DE FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA NÃO ISOTÉRMICA  
EM FERMENTADORES CILÍNDRICOS DE FUNDO PLANO

por

Willian Marchesi Sgarbi

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2016



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE TÉRMICA DO PROCESSO DE FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA NÃO ISOTÉRMICA  
EM FERMENTADORES CILÍNDRICOS DE FUNDO PLANO

por

Willian Marchesi Sgarbi

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Fernando Pereira

Prof. Francis França

Prof. Thamy Hayashi

Porto Alegre, 08 de dezembro de 2016.

## DEDICATÓRIA

- Dedico este trabalho à minha família, ao meu pai Wilmar Sgarbi e principalmente à minha mãe Vera Lucia Marchesi que sempre esteve ao meu lado ao longo de todo percurso e sempre me deu todo o apoio necessário para encarar os desafios, permanecer em busca dos objetivos e realizar este sonho.

- Dedico também a todas pessoas que me deram força em momentos difíceis e colaboraram para que tudo isso fosse possível.

## AGRADECIMENTOS

- Agradeço ao Professor Paulo Smith Schneider pela orientação no desenvolvimento do trabalho, incentivando a procura pelo melhor resultado e a pesquisa acadêmica em geral.
- Agradeço ao mestrando Paulo Rodolfo Buffon Ortiz por todo o apoio e ajuda durante a execução do trabalho e aos ensinamentos por ele passados, os quais possibilitaram a conclusão deste trabalho.
- Agradeço à Prof. Dra. Rosane Rech pelo conhecimento nesta área de pesquisa, e por disponibilizar o laboratório sem o qual seria impossível realizar as análises presentes neste trabalho.
- Agradeço ao Batista, técnico do laboratório LETA pela disponibilidade e colaboração com ideias e sugestão de soluções para os problemas encontrados.
- Agradeço ao Me. Eng. Vitor Tumelero Valente pelo apoio dado ao longo da execução do trabalho e pelos conselhos passados.

SGARBI, W. M. “**Análise Térmica do Processo de Fermentação Alcoólica em Fermentadores Cilíndricos de Fundo Plano**”. 2016, 20. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## **RESUMO**

O objetivo deste trabalho consiste em realizar a análise térmica do fenômeno de fermentação de cerveja, a partir do cálculo dos campos de temperaturas utilizando modelos térmicos difusivos que possuíam como dados de entrada a geração térmica estimada através de modelos cinéticos adaptados da literatura. Para realizar esta análise foi construída uma bancada capaz de medir as temperaturas no interior do volume ao longo do processo de fermentação, bem como permitir a retirada de amostras para análise das concentrações de açúcar. Esta análise permitiu calcular a taxa de produção de  $CO_2$ , que serviu de dado de entrada para determinar a taxa de geração de calor. A geração de calor serviu como dado de entrada para diferentes modelos térmicos a fim de determinar o campo de temperaturas e a temperatura máxima no interior do volume. Os perfis de temperatura obtidos a partir dos modelos térmicos foram representativos, porém as temperaturas calculadas apresentaram valores superiores em relação àquelas medidas experimentalmente. Desta forma foi possível conhecer a distribuição de temperaturas no interior do fermentador, o que viabiliza trabalhos futuros no desenvolvimento de sistemas de fermentação com retirada de calor em regiões com maior temperatura, aumentando a eficiência energética do processo e a garantia de maior qualidade do produto final.

**PALAVRAS-CHAVE:** Análise térmica, Modelos difusivos, Fermentação.

SGARBI, W. M. “**Thermal Analysis of Alcoholic Fermentation in Flat Bottom Cylindrical Fermenters**”. 2016, 20. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

#### **ABSTRACT**

The purpose of this work was to carry out a thermal analysis of beer fermentation process via evaluation of the temperature field using purely diffusive thermal models. For this analysis was built a workbench capable of collecting samples to the measure sugar concentration and measuring the temperatures inside of the wort during the fermentation process. The measured sugar concentration values were used to determine the  $CO_2$  production rate, which was used as input data to determine the heat generation. The heat generation was used in different thermal models to determinate the temperature field and the maximum wort's temperature. The temperature profiles obtained were representative, however evaluated temperatures showed higher values in comparison with experimental temperatures. The knowledge of the wort's temperature distribution is essential for the development of more efficient refrigeration systems prioritizing the extraction heat at regions with higher temperature, by this increasing the energy efficiency of the process and the assurance of the final product quality.

**KEYWORDS:** Thermal analysis, Diffusive models, Fermentation.

## ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
3.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	2
3.1.	Concepção da Bancada .....	2
3.2.	Instrumentação dos Ensaios .....	3
3.3.	Características do Experimento .....	4
4.	FERMENTAÇÃO DE CERVEJA .....	4
4.1.	Modelos Cinéticos para Liberação de Energia .....	5
4.2.	Modelos Térmicos para Análise do Campo de Temperaturas .....	6
4.2.1.	Difusivo Permanente .....	7
4.2.2.	Difusivo Transiente .....	8
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	8
5.1.	Análise Cinética .....	8
5.2.	Análise Via Modelos Térmicos .....	10
6.	CONCLUSÕES E DISCUSSÕES .....	12
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	13
	APÊNDICE I .....	15

## 1. INTRODUÇÃO

A mudança no hábito de consumo dos brasileiros tem possibilitado o crescimento das microcervejarias, voltadas à produção de cervejas especiais. As demandas energéticas do processo se tornam ainda mais relevantes, visto que sua produção é feita em menor escala, se comparado às cervejarias industriais.

Nos últimos anos o setor de microcervejarias apresentou crescimento nos números o que incentivou investidores de todo o país. Segundo Becker, 2015, há uma estimativa de 300 microcervejarias em todo o Brasil, sendo 80 delas concentradas no Rio Grande do Sul e cerca de 2 mil marcas oficialmente registradas, apresentando um crescimento médio anual de 20%. Em 2013, a média anual *per capita* de consumo do brasileiro foi próxima de 67 litros, sendo produzido mais de 13,473 milhões de litros, segundo KBU, 2015. Esses números colocaram o país como o terceiro maior consumidor de cerveja no mundo, segundo Cervieri Júnior et al., 2014. Os mesmos autores também afirmam que o aumento da produção do país foi em torno de 61%, influenciando a dinâmica do setor de bebidas.

Segundo SEBRAE, 2014, as microcervejarias representam cerca de 0,15% do mercado nacional, com perspectivas de alcançar 2% nos próximos 10 anos. Cada vez mais as microcervejarias vão em busca de melhorar seu processo produtivo, de forma a oferecer cervejas de maior qualidade e atender a um público cada vez maior e com costumes de consumo refinados.

Cada estilo de cerveja exige uma série de processos de produção que devem ser cuidadosamente conduzidos, para que o produto final ofereça a qualidade esperada. Dentre estes processos, destaca-se a etapa de fermentação, na qual a temperatura exerce papel determinante no produto final. Variações elevadas na temperatura do líquido em fermentação podem causar alteração no sabor da cerveja, justificando a atenção dada a essa etapa do processo produtivo [SEBRAE, 2014].

Além disso, Ortiz e Schneider, 2016, identificaram as demandas energéticas envolvidas no processo de fabricação de 50 litros de cerveja através da instrumentação de uma bancada de laboratório. Foi identificado que as maiores demandas estavam concentradas no processo de fermentação, que tem duração média de 7 a 14 dias.

Visto que a maior demanda energética na fabricação de cerveja se concentra no processo de fermentação e neste há aumento da temperatura pela geração de calor oriunda da atividade das leveduras, este trabalho tem com um de seus objetivos propor modelos térmicos para cálculo do campo de temperatura interno do líquido em fermentação tendo como dado de entrada a estimativa de energia liberada. A verificação destes modelos é feita através da comparação com as temperaturas medidas na bancada experimental de fermentação. O conhecimento destes dados são fundamentais para o desenvolvimento de equipamentos que possibilitem um controle de temperaturas mais preciso e eficiente, no intuito de otimizar o processo de fermentação.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dois ciclos distintos definem o processo de transformação de açúcares solúveis em moléculas menores pela ação da levedura. Um deles é a respiração e o outro é a fermentação, ambos iniciam com a glicólise que tem a função de “quebrar” a moléculas de glicose até o ácido pirúvico, através de uma série de reações catalisadas por enzimas que se situam na parede celular e no interior da célula. Na ausência de oxigênio ocorre a fermentação que através da atuação das enzimas piruvato-descarboxilase e álcool-desidrogenase, produz etanol, água e  $CO_2$  a partir do ácido pirúvico. A equação de Gay-Lussac faz um balanço desta etapa. Na transformação de glicose, fosfato e adenosina difosfato em etanol, dióxido de carbono, adenosina trifosfato e água, ainda há a liberação de 238,5 kJ [FERRARI, 2013].

Segundo Kunze (2004), durante a fermentação a levedura obtém sua energia a partir da glicólise anaeróbica. A liberação de energia ocorre a partir da quebra das ligações moleculares. Em uma molécula de adenosina trifosfato (ATP) a ligação entre a molécula e o átomo de fósforo é rica em energia. Quando esta ligação é quebrada, adenosina difosfato (ADP) e fosfato



são formados, liberando 30,5 kJ/mol ATP. A quantidade de energia que é gerada na fermentação a partir da transformação de glicose é de 230 kJ/mol de glicose consumida. Desta quantidade de energia, apenas 61 kJ/mol de glicose ficam disponíveis para as células de fermento. O restante, 169 kJ/mol de glicose, é liberado em forma de calor.

Um estudo realizado por Ortiz e Schneider, 2014, teve por objetivo avaliar o consumo elétrico existente no processo de fabricação de cerveja. A análise foi feita experimentalmente, através da concepção e instrumentação de uma bancada. A partir disto, pode-se estimar o consumo energético dos equipamentos envolvidos em cada etapa do processo de fabricação de cerveja. A análise de consumo é feita pela medição das temperaturas do processo, seguido da leitura das potências reais dos dispositivos de aquecimento e os tempos de utilização para cada fase de operação. A energia total necessária para o caso analisado é de, aproximadamente, 198 MJ. Para a mosturação e fervura o consumo é de, aproximadamente, 59 MJ e para fermentação e maturação 147 MJ, sendo o valor estimado para a etapa de fermentação de aproximadamente 72 MJ, na produção de 50 litros de cerveja.

Com uma proposta semelhante ao presente trabalho, Oliveira, 2010, estudou a distribuição de temperaturas no interior de uma cavidade cilíndrica preenchida com água utilizando um modelo difusivo unidimensional ao considerar o líquido estacionário. No estudo, os dois principais objetivos foram a obtenção do perfil dinâmico de temperaturas e determinar a difusividade térmica do líquido. O modelo de difusão foi resolvido através de simulações validado através de um aparato experimental. Ao final do estudo, foi obtida a distribuição de temperaturas para diferentes posições radiais da geometria cilíndrica.

### 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O calor liberado no processo de fermentação  $\dot{q}_{fermentação}$  requer o conhecimento da taxa de produção de  $CO_2$  do processo. Essa taxa foi estimada utilizando um balanço estequiométrico a partir das concentrações de açúcar obtidas através de amostras retiradas do líquido em fermentação. O termo  $\dot{q}_{fermentação}$  serviu como dado de entrada em dois modelos térmicos de difusão de calor aplicados ao volume do fermentador, a fim de calcular o campo de temperaturas. Esses valores calculados foram posteriormente comparados às temperaturas medidas experimentalmente.

A coleta de amostras foi realizada recolhendo amostras de 15 ml a cada 3 horas durante o período de 120 horas. Essa definição foi acertada após a realização de ensaios preliminares, que resultou na escolha da melhor frequência e a duração da coleta de dados.

As amostras foram analisadas no laboratório de Bioengenharia do ICTA, através de um espectrômetro digital utilizando a metodologia descrita por Dubois *et. al.*, 1956, com o objetivo de identificar a concentração de açúcar.

As temperaturas foram medidas por meio de 12 termopares, dispostos de forma a obter as temperaturas ao longo do tempo no interior do fermentador. Além destes termopares, foi utilizado um para obter a temperatura da câmara de fermentação, um para a temperatura do ambiente e um último para obter a temperatura da água utilizada para garantir a condição de contorno. A frequência de aquisição foi de 30 segundos.

Para realizar essa sequência metodológica foi construída e instrumentada uma bancada capaz de permitir a coleta de dados e a medição de temperaturas do líquido em fermentação em vários pontos.

#### 3.1. Concepção da Bancada

Para realizar o experimento, foi desenvolvida uma bancada para a produção de cerveja em pequena escala (30L), na qual fosse possível garantir as condições de contorno estabelecidas, avaliar a distribuição de temperaturas no interior do fermentador e retirar amostras para a análise química.

A bancada experimental consiste em uma câmara de refrigeração, um fermentador instrumentado e um banho térmico. Esta bancada é apresentada na Fig. 3.1 e os equipamentos são mostrados na Tab. 3.1.

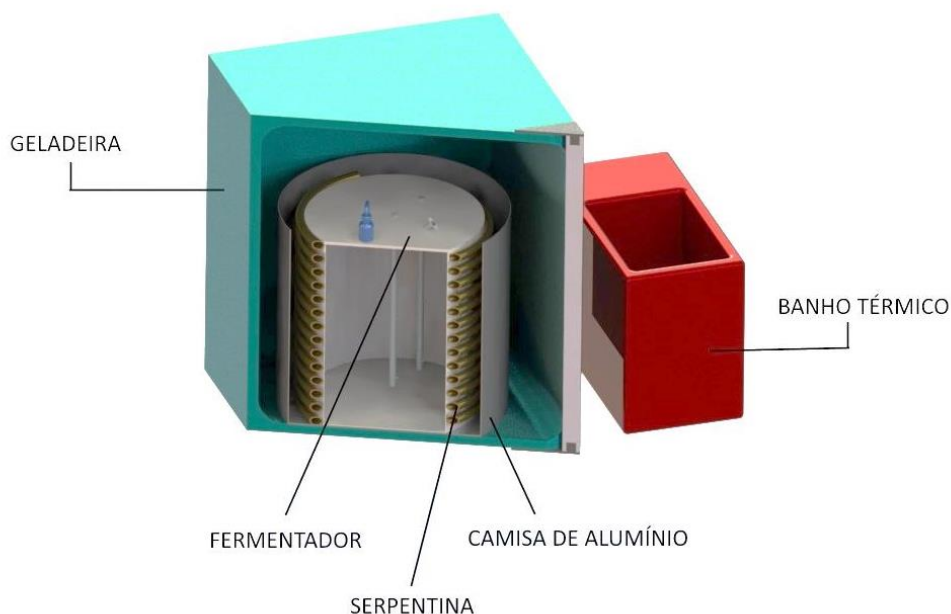


Figura 3.1 - Bancada experimental.

Tabela 3.1 - Lista de equipamentos.

<b>Equipamento</b>	<b>Fabricante e Modelo</b>	<b>Potência</b>
Banho Térmico	CIENLAB	1000 W
Geladeira	General Eletronic	500 W

A câmara de refrigeração, apresentada em verde, foi utilizada para manter o ambiente à temperatura controlada. No interior da câmara de refrigeração fica o fermentador instrumentado, envolto por uma camisa de alumínio e uma serpentina. A serpentina é alimentada por um banho térmico, garantindo a condição de temperatura prescrita na parede do fermentador.

O fermentador consiste em um recipiente cilíndrico fabricado de material polimérico com diâmetro de 350 mm e altura de 400 mm. A espessura da parede é de 1 mm e no topo do fermentador há um acesso utilizado para a retirada de amostras, assim como um “airlock” que serve como válvula de liberação do  $CO_2$  produzido ao longo do processo de fermentação.

### 3.2. Instrumentação dos Ensaios

Na Figura 3.2 apresentada abaixo é mostrado o fermentador em corte, onde foram colocadas duas hastes de 380 mm, nas quais estão dispostos doze termopares utilizados nas medições das temperaturas do processo.



Figura 3.2 – Posicionamento dos termopares.

Os equipamentos utilizados na instrumentação da bancada experimental estão descritos na Tab. 3.2 a seguir.

Tabela 3.2 - Lista de equipamentos para instrumentação da bancada.

Equipamento	Fabricante e Modelo	Resolução	Incerteza
Termopares	Tipo J	68 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	$\pm 0,75\%$
<i>Data Logger</i>	Agilent - 34970A	22 bits	$\pm 0,004\%$
Espectrômetro Digital	Athena	1200 linhas/mm	$\pm 2 \text{ nm}$

### 3.3. Características do Experimento

Para todos os ensaios foi feito o mesmo estilo de cerveja sendo produzidas bateladas de 30L. O estilo escolhido foi a *PALE ALE*, produzida por leveduras da alta fermentação, ou seja, agem no topo do mosto, líquido açucarado resultante do cozimento de maltes e cereais e que trabalham a temperaturas elevadas. O mosto possui densidade inicial (OG) de 1,047 e depois de fermentado possui densidade final (FG) de 1,014. A cerveja possui coloração de 19 EBC e amargor de 32 IBU. A temperatura de fermentação escolhida foi de 17°C.

Considerando o estilo de cerveja escolhido e suas características, o fermento que se encaixa para a sua produção é o *Lallemand Nottingham*. É uma levedura de alta fermentação, cepa única, oriunda de uma seleção de várias culturas usadas no Reino Unido. Esta cepa tem temperatura ideal de fermentação entre 17°C e 21°C.

## 4. FERMENTAÇÃO DE CERVEJA

O detalhamento do processo de fabricação de cerveja é disponível na literatura. Kunze, 2004, apresenta uma visão panorâmica do processo, envolvendo conceitos, classificações e aspectos tecnológicos, entre outros. Os aspectos energéticos da fabricação são encontrados em Kubule *et al.*, 2016, para escala industrial, e em Ortiz e Schneider, 2016, a ênfase é dada para uma planta de porte laboratorial. O presente trabalho concentra-se na fermentação, detalhado na sequência.

#### 4.1. Modelos Cinéticos para Liberação de Energia

O processo tem início assim que as leveduras são inoculadas no mosto, com a finalidade de transformar seus açúcares fermentáveis em etanol e dióxido de carbono.

Durante o processo de fermentação, as leveduras se multiplicam na presença de  $O_2$ , conforme mostrado Fig. 4.1. Com o crescimento do número de células, a taxa de consumo de açúcares fermentáveis aumenta, liberando mais energia para o meio.

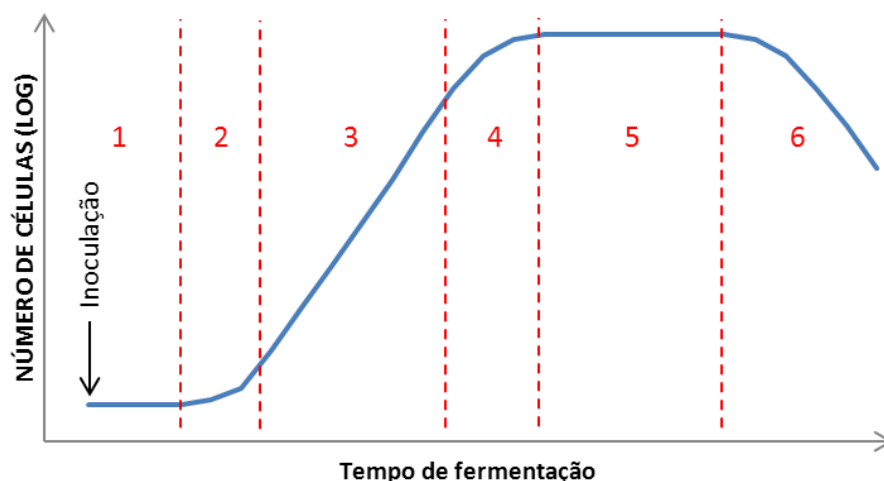


Figura 4.1 - Fases do processo de fermentação, (1) "lag", (2) aceleração, (3) exponencial, (4) desaceleração, (5) estacionária, (6) declínio (adaptado de Kunze, 2004).

A inoculação das leveduras marca a primeira fase do processo, chamada de "lag" (1), com a ativação do metabolismo celular. A primeira divisão celular dá início a fase de aceleração (2), com o aumento contínuo da taxa de divisão celular. Em seguida, ocorre a fase exponencial (3), com taxa de crescimento celular constante, sendo a mais alta de todo o processo. A fase de desaceleração (4) ocorre influenciada por diversos fatores, mas principalmente devido à redução na quantidade de oxigênio. Nesta fase, a taxa de crescimento celular se reduz gradualmente, até atingir o patamar da fase estacionária do processo (5), quando o número de leveduras permanece constante. Na última fase (6) ocorre o declínio do processo de fermentação, acompanhado pela inatividade das leveduras [Kunze, 2004].

Segundo o mesmo autor, as leveduras necessitam de energia para que se mantenha a atividade metabólica necessária para sua sobrevivência e produção de novas células. Esta energia é obtida através de processos de respiração, na presença de oxigênio, ou da fermentação, de forma anaeróbia.

Após consumir o oxigênio contido no mosto, no entorno da fase estacionária (5), as leveduras iniciam o processo de fermentação alcoólica, com a quebra das moléculas de glicose ( $C_6H_{12}O_6$ ), chamada de glicólise. Este processo libera calor, representado pela equação de Gay-Lussac (Eq. 4.1).



A quebra de 1 mol de glicose produz 2 mols de etanol e de dióxido de carbono, com a liberação de 169 kJ/mol.

Assim, a equação abaixo pode ser escrita para a dissipação de calor, considerando a taxa de consumo de  $C_6H_{12}O_6$ .

$$\dot{q}_{fermentação} = 169 \frac{dC_6H_{12}O_6}{dt} \quad (4.2)$$

A constante que multiplica o termo de taxa de consumo de  $C_6H_{12}O_6$  tem unidades de kJ/mol $_{C_6H_{12}O_6}$ .

A quantidade de calor dissipado no processo de fermentação descrito pela Eq. 4.2 é avaliada pela concentração de açúcares presentes no mosto durante o processo de fermentação, empregando-se o método fenol sulfúrico (FS). Ele consiste na desidratação dos açúcares em meio ácido concentrado, posteriormente formando complexos com fenol. Segundo Dubois et al. (1956) e Demiate et al. (2002), açúcares simples ou complexos, e seus derivados, tornam a solução amarelo-alaranjada quando tratados com fenol e ácido sulfúrico concentrado. A amostra colorida é colocada em um espectrômetro e comparada com o referencial, a fim de apresentar o valor de absorbância da solução, que é linearmente proporcional à concentração de açúcares totais [Dornemann, G.M., 2016].

Alternativamente, o calor liberado pela fermentação pode ser avaliado pelo modelo aplicado por Colombié et al., 2007, na fermentação de vinho. Segundo Malherbe et al., 2004, este é um modelo dinâmico de fermentação alcoólica que relaciona a taxa em que o dióxido de carbono é produzido com a liberação de calor  $\dot{q}_{fermentação}$ , em  $W/m^3$ . A Equação 4.3 apresenta o modelo já adaptado no presente trabalho.

$$\dot{q}_{fermentação} = 45,31 \frac{dCO_2}{dt} \quad (4.3)$$

O termo  $\frac{dCO_2}{dt}$  representa a taxa de produção de dióxido de carbono em  $mol\ m^{-3}\ s^{-1}$ , obtida pela relação estequiométrica da Eq. 4.1. A constante que multiplica o termo de taxa de produção de  $CO_2$  tem unidades de  $kJ/mol_{C_6H_{12}O_6}$ . Segundo McNaught e Wilkinson, 1997, a taxa de transformação  $r$ , em  $mol/s$ , é representada por

$$r = -\frac{d[C_6H_{12}O_6]}{dt} = \frac{1}{2} \frac{d[C_2H_5OH]}{dt} = \frac{1}{2} \frac{d[CO_2]}{dt} \quad (4.4)$$

Para a análise cinética foram consideradas como hipóteses simplificativas volume constante, concentrações uniformes ao longo do tempo e que toda a glicose presente no mosto é consumida no processo de fermentação.

#### 4.2. Modelos Térmicos para Análise do Campo de Temperaturas

A transferência de calor gerado no interior do fermentador se dá em uma situação de convecção natural, combinada com a perda de massa, devido à liberação de  $CO_2$ , além do surgimento de novas espécies no líquido.

Como hipótese simplificada o aspecto convectivo foi desprezado e o fenômeno foi considerado como sendo apenas difusivo. O campo de temperatura  $T$  é dado pela equação

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.5)$$

Os três primeiros termos representam o fluxo de calor nas direções radial  $r$ , angular  $\phi$  e altura  $z$  do domínio. A condutividade térmica do meio em análise foi considerada próxima a da água, sendo  $k = 0,58\ W/m^2K$ . O termo  $\dot{q}$  representa a geração volumétrica de calor do processo em  $W/m^3$ . O termo a direita da igualdade representa o processo transiente, onde estão presentes as propriedades termofísicas do meio que está sendo analisado, representadas por  $\rho$  e  $c_p$ , onde  $\rho = 1000\ kgm^{-3}$  e  $c_p = 875\ kJ/kgK$ .

A representação esquemática do problema em análise é apresentada na Fig. 4.2, na qual podem ser observadas as condições de contorno utilizadas.

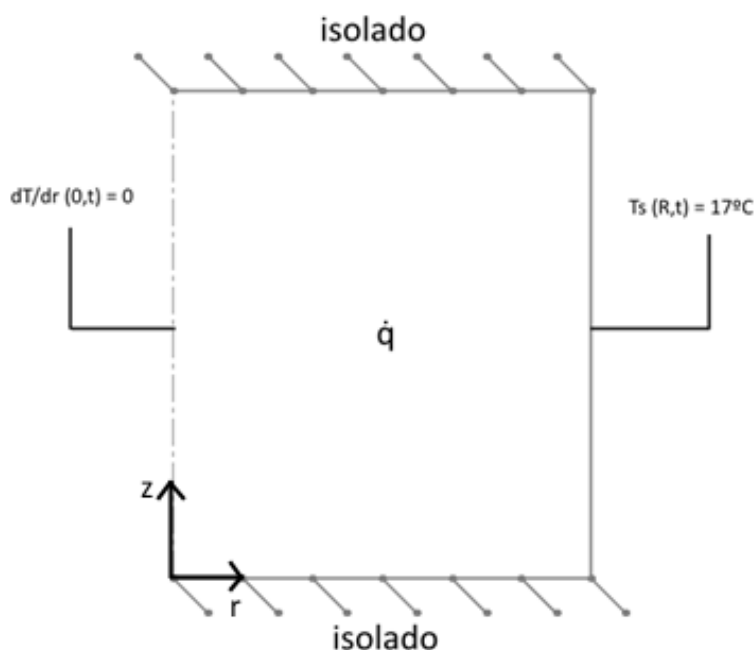


Figura 4.2 - Representação esquemática do problema térmico.

As condições de contorno utilizadas para modelar o problema foram de temperatura prescrita na parede, condição de primeira espécie (Dirichlet)

$$T(R, t) = T_s \quad (4.6)$$

e simetria no centro, condição de contorno de segunda espécie (Neumann).

$$\frac{\partial T}{\partial r}(r = 0, t) = 0 \quad (4.7)$$

Com o problema térmico definido foram propostas duas análises, a primeira propõe um modelo difusivo permanente e a segunda considera o termo transiente.

Para ambos os modelos foram consideradas as seguintes hipóteses simplificativas:

- Condução unidimensional de calor;
- Efeitos convectivos e de radiação negligenciados;
- Geração de calor uniforme em todo volume;
- Propriedades constantes;
- Líquido estacionário;

#### 4.2.1. Difusivo Permanente

Este modelo foi proposto de acordo com as hipóteses simplificativas citadas anteriormente, além de considerar regime permanente.

Desta forma a equação do calor se torna como apresentado na Eq. 4.8

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{q} = 0 \quad (4.8)$$

A partir da substituição das condições de contorno na Eq. 4.8 chegou-se à Eq. 4.9, na qual os valores de  $T_s$  representam a condição de contorno de temperatura prescrita, enquanto  $\dot{q}$  representa a geração de calor, obtida a partir do modelo cinético da Eq. 4.3.

$$T_{(r)} = \frac{\dot{q} (R^2 - r^2)}{4k} + T_s \quad (4.9)$$

A Equação 4.9 foi resolvida analiticamente para obter valores de temperatura no centro do fermentador, quando  $r = 0$ . Com os valores de temperatura no centro do fermentador, foi possível gerar um gráfico que representa a máxima temperatura ao longo de todo o processo.

#### 4.2.2 Difusivo Transiente

A fim de complementar a análise do fenômeno, um modelo difusivo transiente foi proposto utilizando as hipóteses simplificativas apresentadas anteriormente e considerando regime transiente e acúmulo de energia não nulo.

Desta forma, a equação simplificada é mostrada na Eq. 4.10

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.10)$$

A Equação 4.10 foi resolvida de modo a obter a distribuição de temperaturas no interior do domínio, assim permitindo determinar a temperatura máxima. Nesta equação  $\rho$  e  $c_p$  são tomados como constantes.

Para a solução desta equação foi utilizado o software comercial MATLAB, utilizando a ferramenta PDETool que soluciona o problema via elementos finitos através da geração da malha. Para este caso foi utilizada uma malha não-uniforme.

A malha foi considerada independente quando apresentou desvio relativo menor que 0,1%, calculado através da Eq. 4.11.

$$Desvio = \frac{|T_j^* - T_{j+1}^*|}{T_j^*} \quad (4.11)$$

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos a partir dos modelos cinéticos e dos modelos térmicos propostos, descritos nos capítulos anteriores.

### 5.1 Análise Cinética

A Figura 5.1 apresenta as quantidades totais de açúcar para 30 litros obtidas a partir da análise das amostras retiradas durante o ensaio.

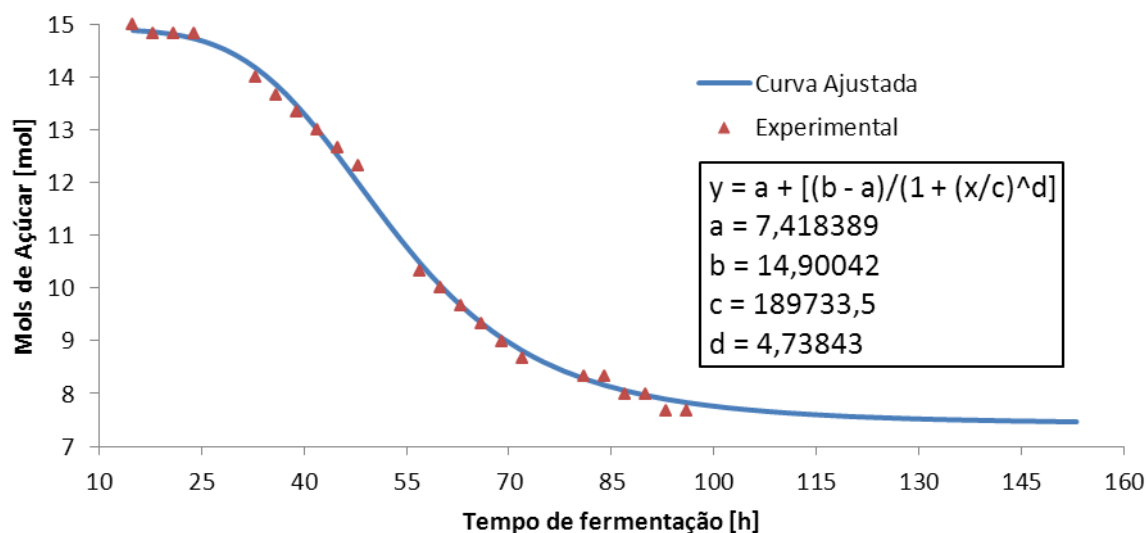


Figura 5.1 – Concentração de açúcar ao longo do tempo.

No gráfico estão apresentadas as concentrações de açúcar medidas ao longo da fermentação em vermelho e a curva azul representa um ajuste não linear utilizando uma regressão logística de quatro parâmetros. Nota-se que ao final desta curva que a quantidade

de açúcar não é nula, isto se explica pelo fato de haverem açúcares não-fermentáveis, os quais não são convertidos em álcool e  $CO_2$ . Percebe-se que inicialmente a concentração de glicose é alta e há um decaimento ao longo do tempo, à medida que as leveduras aumentam sua atividade.

Derivando a equação da curva ajustada da concentração de açúcar obtém-se a taxa de consumo de açúcar, mostrada na Fig. 5.2. O gráfico representa as taxas de consumo de açúcar e produção de  $CO_2$ . A diferença observada entre as duas curvas diz respeito à relação existente entre reagente e produto, dada pela relação estequiométrica apresentada na Eq. 4.1.

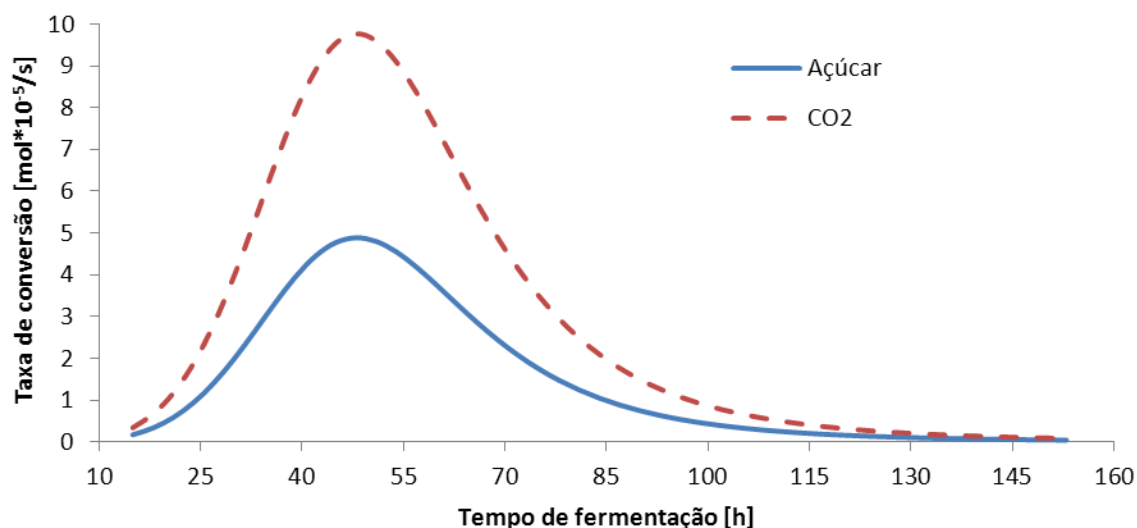


Figura 5.2 – Taxa de conversão de açúcar e produção de  $CO_2$  ao longo do tempo.

As taxas de consumo de glicose e produção de  $CO_2$  foram obtidas através da Eq. 4.4. O período de pico de produção de  $CO_2$  condiz com o pico de consumo de glicose, justificado pelo fato de que as leveduras estão no período de maior atividade, conforme descrito pela fase (3) no gráfico da Fig. 4.1.

Na Fig. 5.3 são apresentadas as curvas de dissipação térmica obtidas a partir dos dados de consumo de glicose e das taxas de produção de  $CO_2$ .

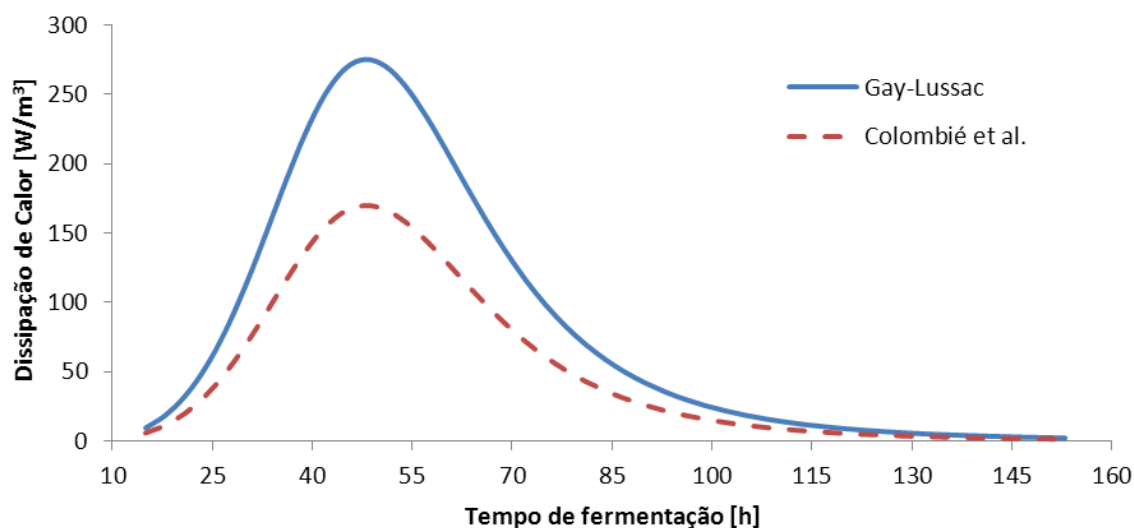


Figura 5.3 – Dissipação térmica do processo de fermentação ao longo do tempo.

É possível perceber que as curvas apresentam um crescimento exponencial no início do processo, um comportamento aproximadamente quadrático com concavidade negativa próximo ao ponto de máxima dissipação térmica e um decrescimento logarítmico ao final. Utilizando a



equação de Gay-Lussac, apresentada na Eq. 4.1, a dissipação térmica atingiu seu valor máximo de  $275 \text{ W/m}^3$  em aproximadamente 48 horas. O modelo proposto na Eq. 4.3 por Colombié et. al., 2007, apresentou comportamento semelhante, porém o valor máximo de dissipação térmica foi de  $169,87 \text{ W/m}^3$ .

A partir da integração no tempo calcularam-se os valores totais de dissipação térmica ao longo do processo para cada um dos modelos. O modelo proposto pela Eq. 4.1 apresentou dissipação total de  $1258,95 \text{ kJ}$ , enquanto o modelo proposto por Colombié et. al., 2007, para a fermentação de vinho, apresentou  $774,53 \text{ kJ}$ .

É importante salientar que a diferença existente entre os dois modelos se explica pelo fato da Eq. 4.1 considerar a conversão completa do açúcar fermentável. Já o modelo proposto pela Eq. 4.3 considera as quantidades de  $\text{CO}_2$  produzidas a partir do consumo de glicose.

## 5.2 Análise Via Modelos Térmicos

A Figura 5.4 mostra os valores de temperatura adquiridos ao longo da altura (eixo z) do fermentador durante o processo e indicam baixas diferenças relativas, mantendo-se dentro do erro associado à medição do termopar. Assim, confirmando que os gradientes de temperatura nesta direção podem ser desconsiderados.

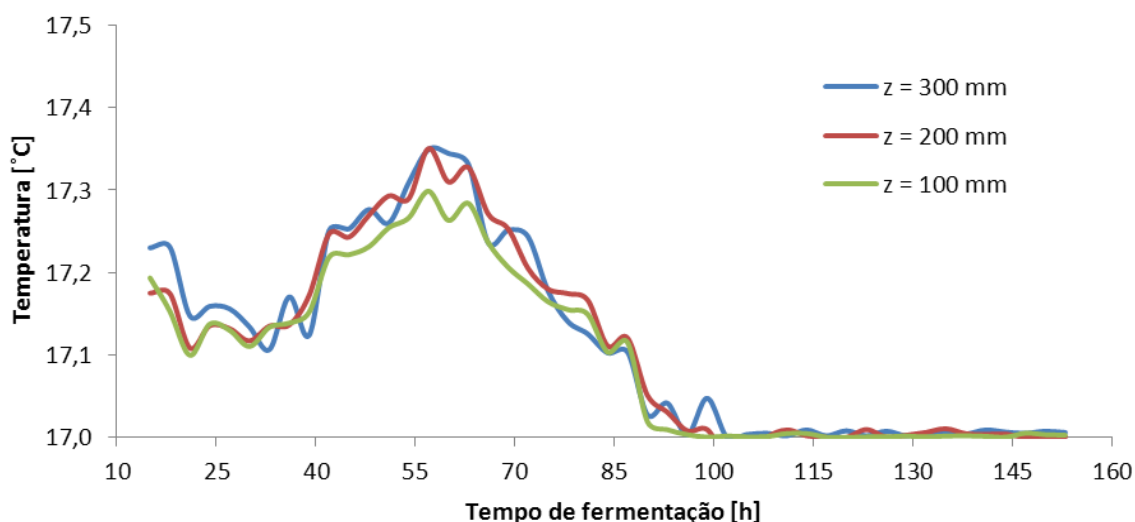


Figura 5.4 – Temperaturas centrais do fermentador em diferentes alturas ao longo do tempo.

Os dados de dissipação térmica obtidos a partir do modelo proposto por Colombié et al., serviram de entrada para os modelos difusivos propostos. O modelo difusivo permanente foi resolvido analiticamente, já o modelo difusivo transiente foi resolvido no PDETool, utilizando uma malha de 19953 elementos que apresentou desvio relativo de 0,067%, obtido através da Eq. 4.11, conforme Apêndice I. Na Figura 5.5 são mostrados os resultados das temperaturas do centro do fermentador ao longo do tempo.

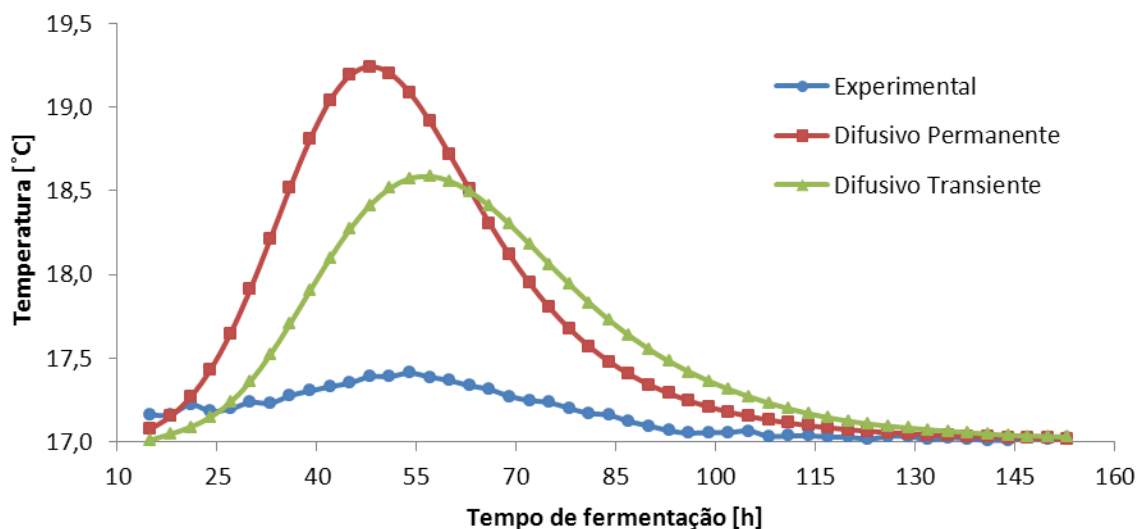


Figura 5.5 – Temperaturas no centro do fermentador ao longo do tempo.

Segundo White e Zainasheff, 2010, as primeiras 15 horas do processo de fermentação não apresentam atividade significativa das leveduras, isto pode ser verificado no gráfico da Fig. 4.1, nas fases lag e aceleração.

Após este período, o processo a dissipação térmica se torna significativa e exerce influência na temperatura do mosto. Na Figura 5.5, são apresentadas as temperaturas calculadas utilizando os dois modelos térmicos propostos, além da curva de temperaturas experimental. A linha vermelha representa o modelo difusivo permanente o qual tem a maior temperatura de 19,2°C em 48 horas de fermentação. A linha verde representa o modelo difusivo transiente o qual tem a maior temperatura de 18,5°C em 57 horas de fermentação. Por fim, a linha azul representa a curva dos dados experimentais. Esta apresenta a maior temperatura de 17,4°C em 54 horas de fermentação.

Quando observado o comportamento do modelo transiente, apresentado no gráfico da Fig. 5.4, nota-se uma aproximação com relação à curva de dados experimental. Isto decorre do fato de o termo inercial ser considerado na análise do fenômeno, suavizando as diferenças de temperatura e deslocando o ponto de máximo para a direita, o que faz com que ocorra em um tempo maior de fermentação.

Na Figura 5.6 estão apresentados os perfis de temperaturas do fermentador para os instantes de valores máximos de temperatura, sendo o ponto de máximo no centro da geometria e o ponto de mínimo na parede.

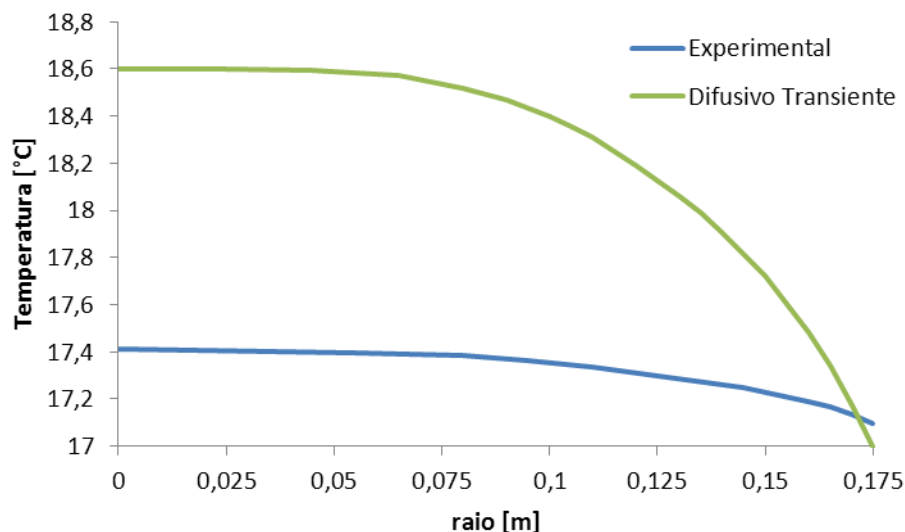


Figura 5.6 – Perfis de temperaturas experimentais e do modelo difusivo transiente ao longo do raio.

Ao comparar os perfis de temperatura é possível perceber que há uma certa semelhança no comportamento do perfil de temperaturas, sendo os dois quadráticos. No entanto se observa uma diferença nas temperaturas máximas no centro do fermentador, ao mesmo tempo em que se observa uma pequena variação na temperatura central nas medições experimentais. Esta pequena variação está associada a diversos fatores, entre eles o volume reduzido em estudo, sendo dissipada uma menor quantidade de calor, e a coluna de termopares, a qual é confeccionada em resina alimentícia e possui uma grande inércia térmica.

Os resultados dos modelos térmicos apresentaram valores superiores aos dados experimentais devido ao fato de que os modelos térmicos propostos consideram apenas transferência de calor por difusão, desconsiderando a movimentação do líquido imposta pela formação de bolhas de  $CO_2$ .

Esta movimentação intensifica a troca de calor o que resulta na diminuição das temperaturas no centro do fermentador, justificando a diferença entre os modelos teóricos e o experimental.

## 6. CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

O objetivo deste trabalho consistiu em propor modelos térmicos para cálculo do campo de temperatura interno do líquido em fermentação alimentado pela estimativa de energia liberada. Para realizar a verificação dos modelos propostos foi construída uma bancada experimental de um fermentador instrumentado permitindo a medição das temperaturas ao longo do processo de fermentação, bem como a retirada de amostras para análise do consumo de glicose e dissipação térmica.

Os valores totais de calor dissipado foram obtidos através da integração no tempo de cada uma das curvas de dissipação térmica. Primeiramente, o modelo proposto pela Eq. 4.1 apresentou calor total dissipado de 1258,95 kJ com valor máximo de dissipação térmica igual a 275  $W/m^3$  em aproximadamente 48 horas. Um segundo modelo com valores corrigidos foi adaptado de Colombié et al., 2007, apresentou 774,53 kJ para o calor dissipado, com valor máximo de dissipação térmica de 169,87  $W/m^3$  nas mesmas 48 horas.

Os valores de dissipação térmica serviram como dados de entrada para os modelos térmicos. O modelo difusivo permanente, Eq. 4.8, apresentou a maior temperatura de 19,24°C no ponto de pico de dissipação em 48 horas de fermentação. Já o modelo difusivo transiente, Eq. 4.10, apresentou a maior temperatura de 18,59°C em 57 horas de fermentação, um ponto à frente do valor máximo de dissipação térmica. Esta modificação torna clara a influência do termo acumulativo na análise, reduzindo o valor máximo de temperatura e deslocando-o.

Por fim, quando comparados à curva experimental, que apresentou maior temperatura de 17,42°C em 54 horas de fermentação, percebe-se uma diferença significativa. A explicação para isto encontra-se no fato de os modelos teóricos considerarem apenas a transferência de calor por difusão unidimensional, tratando o mosto como estacionário.

Para trabalhos futuros é pertinente a realização de uma análise considerando convecção devido à movimentação do fluido no interior do fermentador. Além disto, é de suma importância considerar as perdas de calor pelas extremidades do fermentador. Desta maneira, pode-se refinar o modelo térmico e o aproximar do real.

Outra abordagem interessante seria analisar o fenômeno em volumes maiores possibilitando a observação mais clara da distribuição de temperaturas e dos efeitos inerciais do processo, além de uma análise de dissipação térmica para avaliar a escalabilidade dos modelos.

O conhecimento dos perfis de temperatura e da quantidade de calor dissipado viabiliza o desenvolvimento de equipamentos mais eficientes para a produção de cerveja, visto que possibilita o conhecimento das regiões críticas de aumento de temperatura.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Becker, L.; “**Em expansão, produção de cervejas artesanais tem importação de matéria-prima como maior desafio**”, ZH Campo e Lavoura, 2015, zh.clicrbs.com.br, acessado em novembro de 2016.

Cervieri Júnior, O., Teixeira Júnior, J. R., Galinari, R., Rawet, E. L., Silveira, C. T. J.; “**O Setor de Bebidas no Brasil**”. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 40, p. [93]-129, set. 2014.

Colombié, S., Malherbe, S., Sablayrolles, J.; “**Modelling of heat transfer in tanks during wine-making fermentation**”, ScienceDirect, 2007.

Demiate, I. M., Wosiacki, G., Czelusniak, C., Nogueira, A.; “**Determinação de Açúcares Redutores e Totais em Alimentos. Comparação entre o Método Colorimétrico e o Titulométrico**”, PUBLICATIO UEPG – Ciências Exatas e da Terra, C. Agrárias e Engenharias, 2002.

Dornemann, G. M.; “**Comparação de Métodos para a Deteminação de Açúcares Redutores e Não-redutores**”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Química. Porto Alegre, 2016.

Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A., Smith, F.; “**Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances**”, Division of Biochemistry, University of Minnesota, St. Paul, Minn. 1956.

Ferrari, F. C. S; “**Fatores Operacionais e Cinética do Processo Fermentativo para Otimização da Produção de Etanol em Escala Industrial**”, Universidade Estadual Paulista – UNESP Campus de Jaboticabal, 2013.

Findlay JWA, Smith WC, Lee JW, Nordblom GD, Das I, DeSilva BS, Khan MN. 2000. “**Validation of immunoassays for bioanalysis: a pharmaceutical industry perspective**”. J Pharm Biomed Anal 21(6):1249–73.

Incropera, F. P., Dewit, D.P., Bergman T. L., Lavine, A.S.; “**Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**”, LTC, 6ª edição, 2008.

KBU, Kirin Beer University Report. “**Global Beer Production by Country in 2014**”. <http://www.kirinholdings.co.jp>, acessado em 01/06/2015

Kubule, A., Zogla, L., Ikaunieks J., Rosa, M.; “**Highlights on energy efficiency improvements: a case of a small brewery**”, Institute of Energy Systems and Environment, Riga Technical University. Journal of Cleaner Production, 2016.

- Kunze, W. **“Technology Brewing and Malting”**, Edição 3, Berlim, Alemanha, 2004.
- Malherbe, S., Fromion, V., Hilgert, N., Sablayrolles, J. M.; **“Modeling the Effects of Assimilable Nitrogen and Temperature on Fermentation Kinetics in Enological Conditions”**. Biotechnology and Bioengineering, Vol. 86, NO. 3, May, 2004.
- McNaught, A. D., Wilkinson, A.; **“Compendium of Chemical Terminology”**, Second edition, 1997.
- Mega, J. F., Neves, E., Andrade, C. J.; **“A Produção de Cerveja no Brasil”**, Revista CITINO, Vol. 1, No. 1, Outubro-Dezembro de 2011.
- Oliveira, A. S. D.; **“Estudo Teórico Experimental da Dinâmica de Temperatura no Interior de uma Cavidade Cilíndrica”**, Tese de Doutorado (Universidade Federal da Paraíba – Centro de Tecnologia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica), 2010.
- Ortiz, P. R., Schneider, P. S.; **“Energy Analysis of Beer Brewing under Batch Process”**. 16<sup>th</sup> Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT), 2016, Vitória, ES.
- SEBRAE, **“Potencial de Consumo de Cervejas no Brasil”**, <http://www.sebraemercados.com.br/>, 2014.
- White, C., Zainasheff, J., **“Yeast: the practical guide to beer fermentation”**. Brewers Publications, 2010.

## APÊNDICE I

Tabela A1.1 - Independência de malha.

<b>Elementos</b>	<b><math>T^*</math>(máx.)</b>	<b>Desvio</b>	<b>Desvio (%)</b>
1393	17.71028	0.0042534	0.42534
5049	17.70997	0.0017524	0.175238
19953	17.70985	0.0006733	0.067326
79329	17.70992	0.0003799	0.037987