

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO TÉRMICA E DO CAMPO DE TEMPERATURAS NA
FERMENTAÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL

por

Paulo Rodolfo Buffon Ortiz

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, junho de 2017

AVALIAÇÃO DA DISSIPACÃO TÉRMICA E DO CAMPO DE TEMPERATURAS NA
FERMENTAÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL

por

Paulo Rodolfo Buffon Ortiz
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Aprovada por:

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira.....PROMEC / UFRGS

Prof^a. Dra. Rosane RechICTA / UFRGS

Prof. Dr. Mario Eduardo Santos Martins..... DEM / UFSM

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 23 de junho de 2017

*Dedicado à minha família, em especial
minha mãe Rejane e minha avó Marlene.*

AGRADECIMENTOS

A minha namorada Bruna, pelo apoio incondicional, pela compreensão, dedicação e amor.

Ao professor Paulo Smith Schneider, que além de orientador se tornou um grande amigo.

Aos colegas e amigos do LETA e do GESTE.

Aos demais professores do PROMEC pelo conhecimento adquirido.

A CAPES pelo apoio financeiro através da bolsa de mestrado e ao PROMEC pelo apoio e estrutura fornecidos.

RESUMO

O presente trabalho apresenta a análise térmica do fenômeno de fermentação de cerveja com o objetivo de quantificar a energia liberada durante o processo e avaliar o comportamento do campo de temperaturas do fermentando. É adotada uma metodologia que reúne abordagens teóricas e experimentais, aplicadas a um processo completo de fermentação. O calor dissipado durante a fermentação é calculado por equações presentes na literatura, tendo como entrada a taxa de conversão de glicose e produção de CO_2 . Essas taxas são calculadas pelas concentrações de glicose medidas de amostras retiradas durante ensaios planejados. A dissipação é usada como entrada em dois modelos térmicos para o cálculo do campo de temperaturas do fermentando. As temperaturas calculadas são superiores às aquelas monitoradas experimentalmente, com diferenças de até 78%. Esse comportamento embasa a proposta de uma equação de ajuste do calor liberado durante a fermentação. A equação proposta indica que é liberado 38 kJ por mol de glicose convertido, neste estudo a taxa de dissipação térmica atinge valor máximo de $11,41 \text{ Wm}^{-3}$ e a energia total dissipada é de 385 kJ para produzir 40 litros de cerveja. O ajuste mostrou-se satisfatório, as temperaturas máximas e os campos de temperaturas calculados apresentaram valores equivalentes aos valores experimentais.

Palavras-chave: Fermentação de cerveja; Microcervejaria; Geração de calor; Campo de temperaturas; Modelo matemático.

ABSTRACT

The present study carry out a thermal analysis of beer fermentation process which aims to quantify the energy released during the process and evaluate the temperature field, using a methodology that brings together theoretical and experimental approaches. The heat dissipated during the fermentation is calculated by equations reported in the literature, with the conversion rates of glucose and CO_2 production as input. These rates are calculated using the glucose concentrations measured of samples taken during tests. The dissipation is used as input in two thermal models for the calculation of temperature field. The calculated temperatures are higher than those monitored experimentally, with differences up to 78%. It supports the proposal of an adjusted equation for heat release of beer fermentation. The proposed equation indicates that 38 kJ per mol of converted glucose is released. In this study, the thermal dissipation rate reaches a maximum value of 11.41 Wm^{-3} and the total energy dissipated is 385 kJ for producing 40 liters of beer. The adjustment is satisfactory, the maximum temperatures and the temperature fields calculated are equivalent to the experimental values.

Keywords: Beer fermentation, microbrewer; Heat dissipation; Temperature field; Mathematical model.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	1
1.2	Revisão bibliográfica.....	2
1.3	Objetivos	4
1.4	Organização do texto.....	4
2	FERMENTAÇÃO	5
2.1	Introdução.....	5
2.2	Processamento de cerveja.....	5
2.3	Processo de Fermentação	6
2.3.1	Energia liberada na fermentação alcoólica.....	10
2.3.2	Subprodutos da fermentação	11
2.4	Equipamentos de fermentação.....	13
2.4.1	Controle do processo de fermentação	14
3	ANÁLISE TÉRMICA DO FERMENTANDO	16
3.1	Introdução.....	16
3.2	Problema físico matemático	16
3.3	Análise térmica.....	18
3.3.1	Modelagem do termo fonte temporal	19
3.4	Modelos térmicos propostos.....	21
3.4.1	Modelo difusivo permanente unidimensional, M1.....	21
3.4.2	Modelo difusivo transiente unidimensional, M2.....	23
3.4.3	Modelo difusivo transiente bidimensional, M2.....	25
3.5	Metodologia teórico-experimental	17
3.6	Conclusões parciais	27
4	EXPERIMENTO.....	29
4.1	Introdução.....	29
4.2	Estilo e características da cerveja produzida	29
4.3	Concepção da bancada de ensaios	29
4.4	Método experimental para medição da concentração de glicose	31
4.5	Instrumentação dos Ensaios	32
4.5.1	Incerteza de medição	33
5	RESULTADOS.....	38
5.1	Introdução.....	38
5.2	Medição da concentração de glicose ao longo do tempo	39
5.3	Cálculo da taxa de conversão de glicose e da taxa de produção de CO_2	40
5.4	Análise das temperaturas medidas nos ensaios	42
5.5	Cálculo do campo de temperaturas do fermentando	43
5.6	Comparação dos resultados	47
5.7	Ajuste do modelo de liberação de calor	49
5.8	Conclusões parciais	52
6	CONCLUSÕES	53

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
---	-----------

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Etapas do processamento de cerveja (Adaptado de Venturini Filho, 2000).....	6
Figura 2.2 - Fases da fermentação, (1) “lag”, (2) aceleração, (3) crescimento, (4) desaceleração, (5) estacionária, (6) declínio [adaptado de Kunze, 2004].	7
Figura 2.3 - Sequência de reações da glicólise [adaptado de Kunze, 2004].....	8
Figura 2.4 - Fermentadores Cilindrocônicos [Slowbeer, 2017].	13
Figura 3.1 - Representação esquemática do domínio do problema térmico.....	17
Figura 3.2 - Representação esquemática do volume de controle.	22
Figura 3.3 - Malha gerada pelo PDETools do Matlab para o cálculo das temperaturas do fermentando.....	24
Figura 3.4 - Representação esquemática do volume de controle.	26
Figura 3.5 - Placa com superfície superior aquecida (Adaptado de Incropera, 2008).	26
Figura 4.1 - Bancada experimental.....	30
Figura 4.2 - Disposição esquemática dos termopares no interior do fermentador.	32
Figura 4.3 - Disposição esquemática dos termopares no interior do fermentador (adaptado de Ávila et al., 2004).	34
Figura 5.1 - Valores de concentração de açúcar das amostras retiradas durante os ensaios com suas respectivas incertezas de medição.	39
Figura 5.2 - Curva ajustada da concentração de açúcar ao longo do tempo com confiança de 68% e 95%, equação de ajuste com a incerteza expandida dos parâmetros e fator de correlação da curva ajustada.....	40
Figura 5.3 - Taxa de conversão de açúcar e produção de CO ₂ ao longo do tempo com intervalo de confiança de 95%.	41
Figura 5.4 – Médias das temperaturas ao longo dos ensaios medidas no eixo central do fermentando e na superfície interna da parede do fermentado.....	42
Figura 5.5 - Valores de liberação e de perda de calor ao longo do tempo com intervalo de confiança de 95%.	43
Figura 5.6 - Termo fonte calculado pelo modelo de Colombié et al. e por Gay-Lussac ao longo do tempo.....	44
Figura 5.7 – Perfil de temperatura para seção $0 \leq r \leq 0,2$ m ao longo do tempo calculado pelo modelo térmico M2.	45

Figura 5.8 – Perfil de temperatura para seção $0 \leq r \leq 0,2$ m m ao longo do tempo calculado pelo modelo térmico M3.	45
Figura 5.9 - Comparativo entre a temperatura média no eixo central do fermentador ao longo do tempo a partir dos modelos térmicos propostos.	46
Figura 5.10 - Comparação das temperaturas na parede do fermentador com a temperatura utilizada na condição de contorno dos modelos térmicos.	47
Figura 5.11 - Comparação das temperaturas médias do centro do fermentador calculadas pelos modelos propostos e as temperaturas medidas experimentalmente com sua incerteza.	48
Figura 5.12 - Valores de dissipação térmica calculada pelo modelo ajustado e perda de calor pela liberação de CO ₂	50
Figura 5.13 - Comparação das temperaturas no eixo central com as temperaturas calculadas pelo modelo M3 com termo fonte ajustado.	50
Figura 5.14 - Comparação do perfil de temperaturas calculado pelo modelo difusivo transiente bidimensional com termo fonte ajustado e temperaturas medidas experimentalmente.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Condições de contorno e iniciais dos modelos térmicos propostos	22
Tabela 3.2 - Roteiro de cálculo para avaliação da dissipação térmica e do campo de temperaturas do fermentando	18
Tabela 4.1 - Lista de equipamentos utilizados na bancada experimental.....	30
Tabela 4.2 - Lista de equipamentos para instrumentação da bancada.....	33
Tabela 5.1 - Temperaturas do fermentando medidas no eixo central do fermentador, segundo esquema apresentado na Figura 4.2.	42
Tabela B.1 - Teste de independência de malha.	25

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ATP	Trifosfato de Adenosina
ADP	Difosfato de Adenosina
° BRIX	Escala de concentração de açúcar
Krausen	Espuma gerada pela fermentação
Mosto	Extrato rico em açúcares
NADH	Dinucleotídeo de Adenina Nicotinamida

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas

A	Resposta da curva de calibração
B_l	Coeficiente angular
C	Concentração de glicose, mol l^{-1}
\bar{C}	Valor médio das diferentes diluições
c_p	Calor específico, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
k	Condutividade térmica, $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
K	Fator de abrangência
p	Número de medições para determina a concentração inicial
\dot{q}	Dissipação térmica, W m^{-3}
R	Raio do fermentador, m
r	Raio, m
S	Desvio-padrão
T	Temperatura, $^{\circ}\text{C}$
u	Incerteza de medição
z	Altura, m

Letras Gregas

α	Coeficiente de dilatação térmica, $\text{ml } ^{\circ}\text{C}^{-1}$
Δ	Varição de propriedade, adimensional
ρ	Massa Específica, kg m^{-3}
σ	Desvio-padrão
φ	Ângulo, $^{\circ}$

Subscritos

t	Função temporal
$f(t)$	Fermentação em função tempo
$p(t)$	Perda de calor em função tempo

<i>s</i>	Superfície
<i>j</i>	Indicador de iteração
<i>pip</i>	Pipeta
<i>temp</i>	Temperatura

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A análise térmica de processos alimentícios é uma importante ferramenta na avaliação da qualidade do produto final. Na produção de cervejas especiais, o controle da temperatura em diversas etapas da fabricação é determinante no resultado esperado. Um cuidado especial deve ser tomado no processo de fermentação, pois a falta de controle da temperatura pode influenciar negativamente na qualidade do produto final.

A fermentação é o processo de maior demanda energética no processo de fabricação de cervejas especiais, além de ser crítico à qualidade do produto final pois neste há aumento da temperatura pela geração de calor oriunda da atividade das leveduras. Assim, conhecer a energia liberada na fermentação e o campo de temperaturas do mosto em fermentação, daqui para frente chamado de fermentando, é importante para garantir a qualidade do produto e projetar equipamentos de fermentação para cervejarias.

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 uma escala que dificulta a integração de processos, 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 melhoras em seus processos produtivos, 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].

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. Também ressaltam que, em países de clima quente, a energia investida no processo de fermentação e maturação corresponde a 73% da quantidade total da energia investida do processo de fabricação de cerveja.

Com o aumento da conscientização da sociedade mundial sobre práticas sustentáveis, vários pesquisadores têm buscado novas fontes de energias limpas e renováveis aplicadas a fabricação de cerveja [Muster-Slawitsch, 2011, Olajire, 2012, Fadare, 2010]. Em paralelo, as ações de racionalização de consumo e produção representam avanços importantes, e colaboram no mesmo sentido de conservação e eficiência energética [Kubule, 2016].

1.2 Revisão bibliográfica

O estudo de Ortiz e Schneider, 2016, avaliou o consumo energético do processo de fabricação de cerveja por batelada em escala laboratorial. Uma bancada experimental foi construída utilizando duas resistências com 6 kW de potência elétrica para a parte quente do processo e uma geladeira com 209 W operando com um controlador de temperatura para a parte fria. O estilo de cerveja produzido foi *Pale Ale*, na parte quente do processo a mosturação foi conduzida com dois patamares de temperatura, 55 e 70 °C, sendo mantidos por 20 e 40 minutos seguidos por 60 minutos de fervura. Na parte fria, o tempo de fermentação foi de 7 dias, seguidos de mais 7 dias de maturação. Foi estimado o consumo energético dos equipamentos envolvidos em cada uma das etapas de cada parte do processo de fabricação de cerveja, e os autores relatam que a energia total necessária para o caso analisado foi de

aproximadamente 198 MJ para 50 litros, ou, 4 MJ por litro, sendo 73% dedicados à fermentação e maturação.

Uma modelagem de transferência de calor em tanques de fermentação de vinho foi realizada por Colombié et al., 2006, que ressaltam a temperatura como sendo um dos principais fatores que afetam a fermentação. Foi desenvolvido um modelo para avaliar a taxa de transferência de calor necessária para realizar o controle da temperatura de um tanque de fermentação. O modelo proposto considera variações nas propriedades físico-químicas do mosto durante a fermentação e os resultados mostraram que a energia térmica a ser retirada foi de 2 MJ por litro.

Com a proposta de solucionar de problemas envolvendo o campo de temperaturas em meios líquidos, 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 e validado através de um aparato experimental. Ao final do estudo, foi obtida a distribuição de temperaturas para diferentes posições radiais da geometria cilíndrica.

A questão de pesquisa proposta no presente trabalho é de quantificar a energia liberada durante o processo de fermentação para possibilitar o dimensionamento de equipamentos de refrigeração acoplados aos fermentadores e avaliar o comportamento do campo de temperaturas do fermentando afim de identificar zonas de maior temperatura críticas ao processo. Com base nos trabalhos relatados nesta revisão bibliográfica, conclui-se que há necessidade de realizar uma investigação específica no assunto.

Questão de pesquisa:

Qual a energia dissipada durante o processo de fermentação e como se comporta o campo de temperaturas do fermentando?

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal quantificar a energia liberada durante o processo de fermentação e estimar o campo de temperaturas do fermentando.

Os objetivos específicos são:

- Propor uma metodologia para quantificar a energia liberada durante o processo de fermentação;
- Propor um modelo analítico para estimar o campo de temperaturas do fermentando em regime permanente;
- Propor um modelo numérico para estimar o campo de temperaturas do fermentando em regime transiente.

1.4 Organização do texto

Neste texto, os capítulos subsequentes estão organizados da seguinte forma:

O Capítulo 2 traz a fundamentação teórica do processo de fermentação, onde são apresentadas as etapas da quebra do açúcar, são identificadas as quantidades de calor liberadas durante o processo, características gerais da fermentação e os equipamentos utilizados para realizar o processo.

O Capítulo 3 descreve a metodologia utilizada para realizar este estudo, mostrando os modelos de dissipação térmica utilizados e os modelos térmicos para cálculo do campo de temperaturas.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia experimental, que inclui as características dos ensaios, a concepção da bancada e uma discussão sobre as incertezas de medição.

O Capítulo 5 mostra os resultados do estudo, estes dados são apresentados seguindo o roteiro metodológico em forma de resultados parciais de cada etapa e termina com um ajuste do modelo utilizado.

O Capítulo 6 finaliza o presente trabalho com as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 FERMENTAÇÃO

2.1 Introdução

O presente capítulo apresenta uma breve fundamentação sobre o processo de fermentação. Inicia-se apresentando um panorama geral do processamento de cerveja, seguido pelas principais reações que ocorrem durante a quebra das moléculas de açúcar, as fases da fermentação e seus sub-produtos, e por fim apresenta os equipamentos utilizados para realizar a fermentação na indústria e nas microcervejarias.

2.2 Processamento de cerveja

Venturini Filho, 2000, divide o processamento de cerveja em três fases: 1) produção de mosto, envolvendo moagem do malte, mosturação, filtração, fervura e clarificação do mosto; 2) processo fermentativo, subdividido em fermentação e maturação; 3) acabamento ou pós-tratamento, com operações como filtração, carbonatação, modificação de aroma e sabor, padronização de cor, pasteurização. Estes passos de fabricação são mostrados e detalhados na Figura 2.1.

Microcervejarias geralmente têm a fase de acabamento da cerveja reduzida, com carbonatação natural ou forçada e sem clarificação, filtração e pasteurização. O detalhamento do processamento de cerveja está 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.

Este trabalho concentra-se no processo de fermentação, que inicia após o mosto ser preparado, clarificado e resfriado. Este processo é considerado como o principal, pois é quando, de fato, ocorre a produção de cerveja através da transformação do mosto em cerveja [Santos, 2005].

Segundo o mesmo autor, o processo de fermentação tem duração de 6 a 9 dias, e ao final do processo obtém-se a cerveja, além de uma grande quantidade de CO₂ que após ser purificado pode ser utilizado em etapas posteriores da fabricação de cerveja.

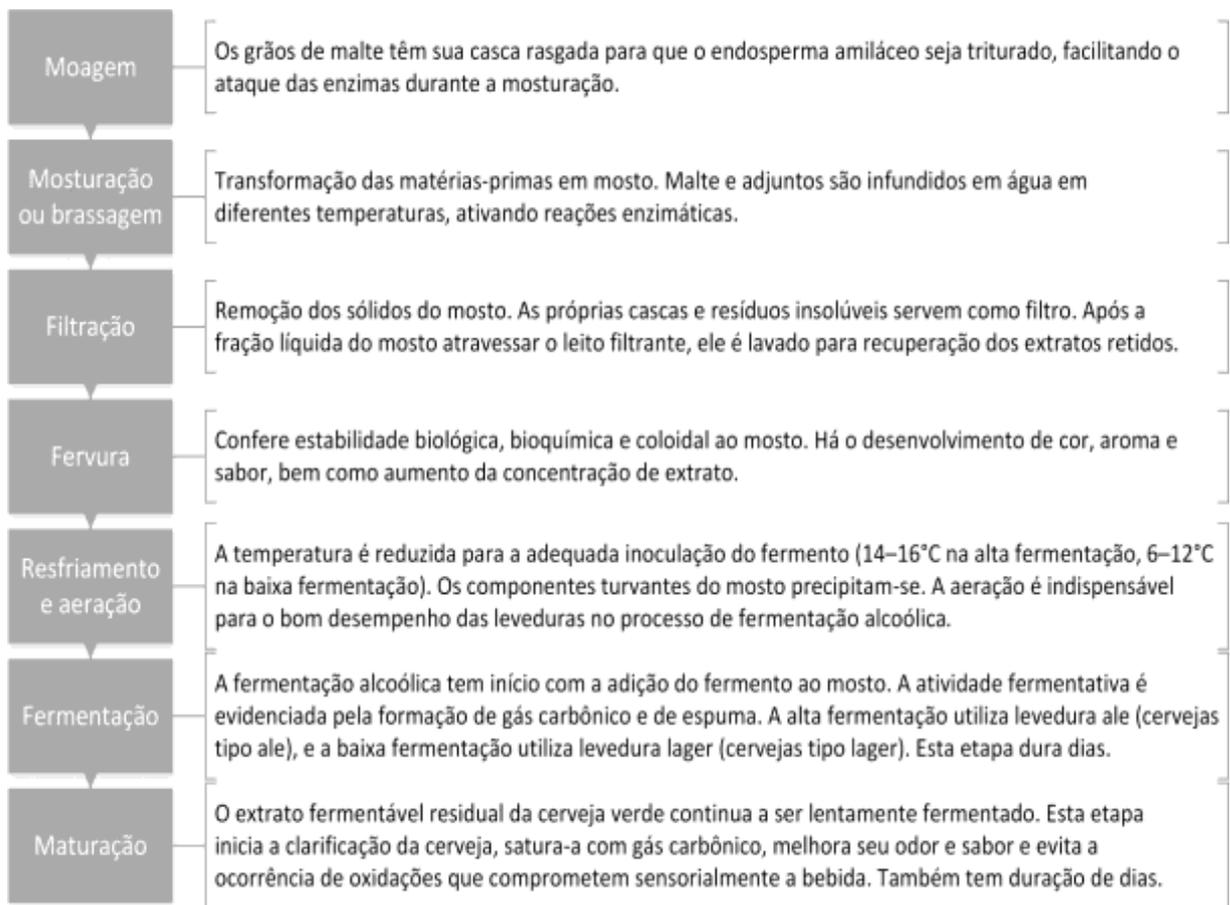


Figura 2.1 - Etapas do processamento de cerveja (Adaptado de Venturini Filho, 2000).

2.3 Processo de Fermentação

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

As leveduras são microorganismos unicelulares pertencentes ao reino Fungi que obtém a energia necessária para sobreviver através da respiração, na presença de oxigênio, e fermentação, na ausência de oxigênio.

A principal espécie utilizada é a *Saccharomyces cerevisiae*, que é processada em forma de uma pasta espessa ou seca. As células de levedura podem ser ovais ou redondas com tamanho na volta de 9 μm .

Durante o processo de fermentação, as leveduras se multiplicam na presença do oxigênio, conforme mostrado na Figura 2.2. Com o crescimento do número de células, a taxa de consumo de glicose aumenta, liberando mais energia para o meio.

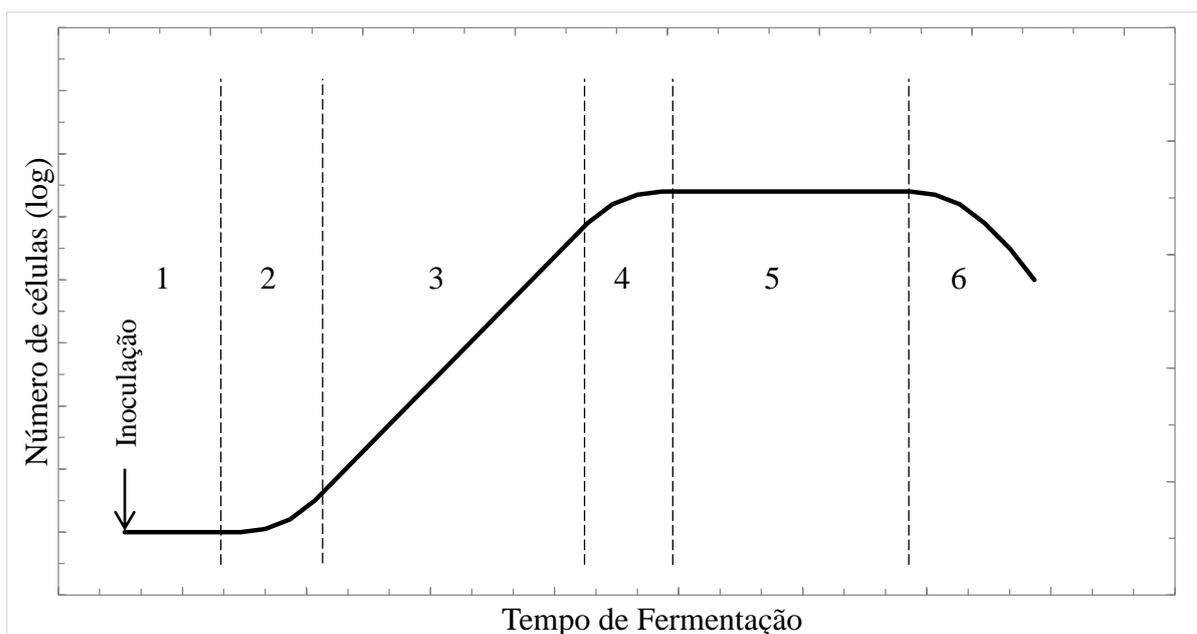


Figura 2.2 - Fases da fermentação, (1) “lag”, (2) aceleração, (3) crescimento, (4) desaceleração, (5) estacionária, (6) declínio [adaptado de Kunze, 2004].

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 de crescimento (3), com velocidade específica 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 fonte de carbono ou acúmulo de um produto tóxico, como o álcool. 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 inativação das leveduras (Kunze, 2004).

As diferentes fases da fermentação são acompanhadas pela formação de espuma no topo do mosto. Durante a fase de aceleração (2) forma-se uma fina camada de espuma branca com pequenas bolhas, em seguida durante a fase exponencial (3) a camada de espuma se torna mais espessa com as bordas marrons e passa a ser chamada de *low Krausen*. Durante a fase de desaceleração (4) e a fase estacionária (5), as bolhas se tornam grosseiras e grandes e é denominada de *high Krausen*. Na transição da fase estacionária para a fase de declínio (6) ocorre o colapso do Krausen, quando a fermentação começa a se atenuar, a espuma se torna

marrom e lentamente diminui por falta de CO_2 , avançando para o colapso da espuma restando apenas uma fina camada marrom conforme a fermentação continua a diminuir.

Durante as três primeiras fases do processo de fermentação as leveduras estão realizando principalmente o processo de respiração celular, até que todo o oxigênio livre no mosto seja consumido. A partir deste momento inicia-se o processo de fermentação anaeróbia.

Tanto na respiração celular quanto na fermentação anaeróbia as células processam a glicose presente no mosto. Para isso, as organelas celulares das leveduras realizam uma série de reações que quebram as moléculas, a primeira reação é chamada de glicólise.

A glicólise é um processo anaeróbio que degrada a molécula de glicose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) através de 10 reações intermediárias e produz duas moléculas de piruvato ($\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3$), duas moléculas de ATP (Trifosfato de Adenosina), dois equivalentes reduzidos de NADH^+ (Dinucleotídeo de Adenina Nicotinamida) e dois íons H^+ , mostrado na Equação (2.1).



A figura a seguir mostra a sequência de reações na glicólise.

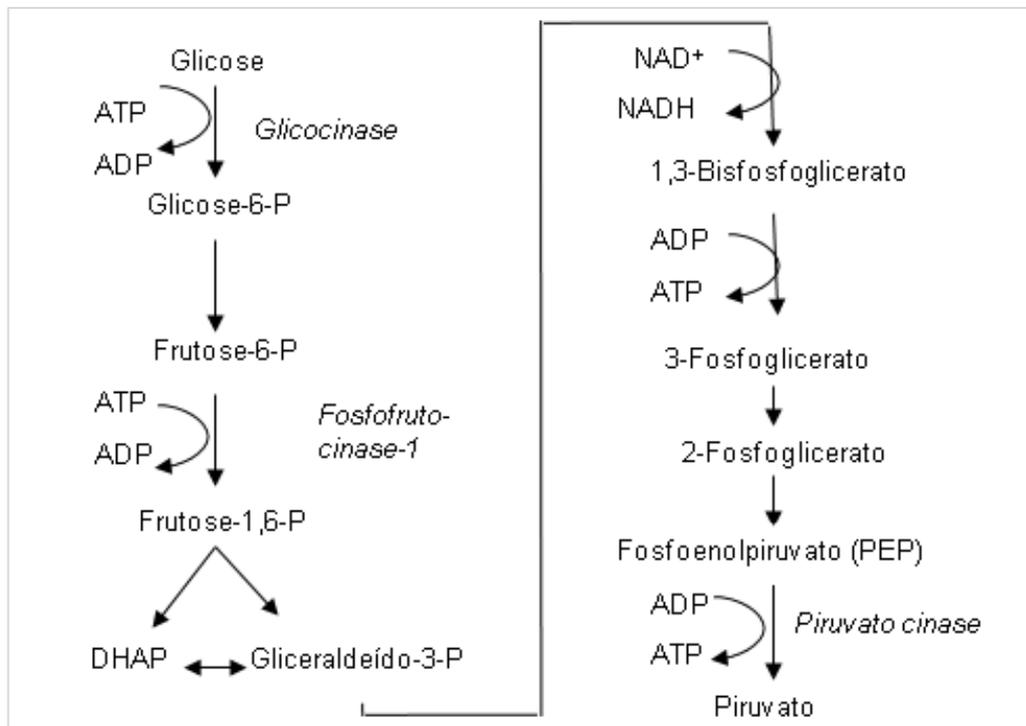


Figura 2.3 - Sequência de reações da glicólise [adaptado de Kunze, 2004].

Na primeira reação, a glicose que entra nos tecidos é fosforilada, com o gasto energético de uma molécula de ATP, dando origem a glicose-6-fosfato e ADP (Difosfato de Adenosina) [Lieberman & Marks, 2009].

Na segunda reação, catalisada pela enzima glicosefosfato-isomerase (também chamada de fosfoexose isomerase), a glicose-6-fosfato é convertida em frutose-6-fosfato através de um processo de isomerização reversível [Nelson & Cox, 2000].

Na reação número 3, a célula investe outra molécula de ATP para fosforilar a frutose-6-fosfato e convertê-la em frutose-1,6-disfosfato. Esta é também uma reação irreversível e de controle desta via metabólica, catalisada pela enzima fosfofrutoquinase [Nelson & Cox, 2000].

Na reação 4, a frutose-1,6-bisfosfato é clivada em duas trioses: gliceraldeído-3-fosfato e dihidroxiacetona fosfato. Esta reação é catalisada pela enzima aldolase. O gliceraldeído-3-fosfato e a dihidroxiacetona fosfato são isômeros facilmente interconvertíveis pela enzima triosefosfato isomerase. Ocorre então a quinta reação que converte a dihidroxiacetona P em gliceraldeído 3P, a única triose que pode continuar sendo oxidada.

Na reação 6 cada gliceraldeído-3-fosfato é oxidado (desidrogenado) pelo NAD^+ (e o NAD^+ passa a NADH) e fosforilado por um fosfato inorgânico, dando origem a 1,3-Bifosfoglicerato (1,3 BPG). Esta reação é catalisada pela enzima Triose fosfato desidrogenase.

Na reação 7, catalisada pela enzima 1,3 BiP glicerato cinase, a 1,3 BPG transfere um grupo fosfato para uma molécula de ADP dando origem a uma molécula de ATP e a 3-fosfoglicerato. Esta é a primeira etapa da glicólise que sintetiza ATP diretamente na via.

Na reação 8, a enzima fosfogliceromutase reaposiciona a posição do grupo fosfato 3-Fosfoglicerato, dando origem a 2-fosfoglicerato (grupo fosfato ligado ao carbono 2), preparando o substrato para a próxima reação.

A reação 9 é uma reação de desidratação catalisada pela enzima enolase. O 2-fosfoglicerato é desidratado formando uma molécula de água e fosfoenolpiruvato (PEP), um composto altamente energético.

A reação 10, última desta via metabólica, catalisada pela enzima piruvato cinase, há transferência do grupo fosfato do fosfoenolpiruvato para uma molécula de ADP, formando-se então uma molécula de ATP e piruvato. Tendo em conta que por cada molécula de

gliceraldeído-3-fosfato produz-se duas moléculas de ATP, na glicólise são produzidos ao todo 4 ATPs e gastos 2 ATPs. O saldo energético é de 2 moléculas de ATP e 2 NADH por molécula de glicose.

Ao final da glicólise, caso haja oxigênio livre disponível, o piruvato é transportado até a mitocôndria e é completamente quebrado (respirado), através de várias reações intermediárias definidas pelo ciclo de Krebs que converte o piruvato em dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O). Neste processo não há formação de álcool e permite que a levedura recupere uma grande quantidade de energia (36 ATP por mol de glicose convertida).

As leveduras iniciam o processo de fermentação alcoólica quando todo oxigênio livre é consumido. Neste processo apenas uma pequena parcela de energia é recuperada pelas leveduras e o restante é liberado para o meio de forma irreversível.

Este é o processo mais importante pois as leveduras estão produzindo CO_2 , etanol e diversos subprodutos. A produção destas espécies depende diretamente do tipo de levedura e da temperatura do meio.

2.3.1 Energia liberada na fermentação alcoólica

Na fermentação alcoólica o piruvato, produto da glicólise, é dividido em CO_2 e etanal, através da enzima piruvato descarboxilase. Com a presença de zinco o etanal é convertido em etanol (C_2H_5OH) pela enzima denominada álcool desidrogenase (ADH). Esta é reação fornece apenas 2 ATP por mol de glicose consumido para a célula.

A fermentação alcoólica é expressa através Gay-Lussac que apresenta de forma simplificada e estequiométrica da conversão de glicose em etanol e dióxido de carbono. Esta equação é apresentada abaixo.



Segundo Kunze, 2004, a quebra de um mol de glicose produz dois mols de etanol e de dióxido de carbono, com a liberação de 169 kJ por mol de $C_6H_{12}O_6$. Este valor ainda é discutido, segundo ASHRAE, 2014, ele varia de 83,7 a 100,5 kJ por mol de glicose. Bouffard, 1985, afirma que o valor de 99,6 kJ é geralmente aceito para cálculos de dissipação térmica pela fermentação.

Essa dissipação térmica pode ser determinada levando em consideração a energia contida nas ligações químicas obtidas experimentalmente em uma bomba calorimétrica e a energia absorvida pela célula.

A energia contida nas ligações da glicose é de 2870 kJ/mol, já a energia contida no álcool é de 2640 kJ/mol. Desta forma a quebra de uma molécula de glicose libera 230 kJ de energia.

Esta energia corresponde à entalpia livre da reação, deste valor apenas uma pequena quantidade é disponibilizada para a levedura em forma de 2 ATPs o restante é perdido irreversivelmente para o meio e é responsável pelo aquecimento do mosto.

A variação na temperatura do mosto altera o metabolismo das leveduras de fazendo com que seja alterado a cinética química da formação e degradação dos subprodutos da fermentação.

2.3.2 Subprodutos da fermentação

Durante a fermentação subprodutos metabólicos das leveduras são transferidos para a cerveja, alguns deles interagem entre si alterando sua quantidade e composição.

A qualidade da cerveja é influenciada por estes subprodutos, podendo alterar o sabor e o aroma de forma positiva ou negativa, esta segunda pode levar ao seu descarte. O metabolismo das leveduras, a formação e remoção dos subprodutos devem ser tratados de forma conjunta, mesmo que o cervejeiro queria tratar algum subproduto em específico.

Os principais subprodutos tratados são o diacetil, álcoois superiores, ésteres, aldeídos, e compostos sulfúricos. Ainda há uma divisão clara destes subprodutos, o primeiro grupo composto pelo diacetil, aldeídos e compostos sulfúricos tornam a cerveja turva, desbalanceiam o aroma e o sabor, conferindo características de cerveja ainda em processo de fermentação, e em altas concentrações podem estragar a cerveja. Os compostos deste grupo podem ser removidos bioquimicamente pelas próprias leveduras durante o estágio de maturação.

O segundo grupo é composto pelos álcoois superiores e ésteres, estes compostos essencialmente determinam o aroma da cerveja e sua presença em quantidades específicas são altamente desejados em cerveja de alta qualidade. Em contraste com o primeiro grupo, caso

haja concentrações elevadas estes compostos não podem ser removidos em processos normais de fabricação de cerveja.

Estudos mostram a influência da temperatura na formação e remoção destes subprodutos [Yilmaztekin et al., 2013, Kunze, 2004, Torija et al., 2003, Mallouchosa et al., 2003]. O diacetil em altas quantidades confere aroma de manteiga e sabor adocicado desagradável à cerveja e a capacidade de remoção deste composto pela levedura é reduzida com temperaturas baixas. Os aldeídos são responsáveis por conferir sabor de cerveja jovem, também referenciado como aroma de mofo, a formação destes compostos é aumentada pela elevação da temperatura do mosto durante a fermentação. Os álcoois superiores podem conferir um aroma frutado ou ainda lembrando solvente dependendo do tipo de álcool formado e da concentração, a formação destes álcoois é aumentada pela inoculação das leveduras em temperaturas elevadas e pelo aumento da temperatura do mosto durante a fermentação. Os ésteres são os componentes de maior importância no aroma do produto final, porém altas concentrações podem dar à cerveja um sabor desagradável frutado e amargo, a formação destes compostos é influenciada por temperaturas altas durante a fermentação. Os compostos sulfúricos mesmo em baixa concentração podem ser percebidos dando à cerveja um aroma de esgoto, sua formação é aumentada com o aumento da temperatura durante a fermentação.

Como durante a fermentação alcoólica ocorre uma intensa liberação de calor, a temperatura tende a se elevar. Por isso, os recipientes de fermentação devem estar equipados com instalações de refrigeração para o correto controle da temperatura [Ehrhardt & Sassen, 1995]. Neste período é necessário a temperatura exata, para obter estas temperaturas são utilizados termômetros na parede do fermentador situados na posição inferior e superior do mosto.

Além da temperatura outros fatores que também afetam a fermentação são a composição química e a concentração do mosto, a cepa da levedura e seu estado fisiológico, a aeração do mosto e da própria levedura, a quantidade e o modo de inoculação da levedura no mosto (homogeneidade da mistura levedura/mosto), a geometria e as dimensões dos tanques fermentadores (Nakano, 2000). Estes fatores não fazem parte do escopo deste trabalho.

2.4 Equipamentos de fermentação

O processo de fermentação ocorre geralmente em tanques cilíndricos verticais construídos em aço inoxidável, como o da Figura 2.3. Industrialmente, as capacidades variam de 500 a 13000 hL, podendo atingir a altura de 22 metros e diâmetros de 2 a 8 metros, já para cervejarias artesanais este valor varia de 500 a 5000 L. A base cônica possui angulação de 60 a 75 graus e não altera significativamente as características da fermentação nesta área [Cervesia, 2003].



Figura 2.4 - Fermentadores Cilíndricos [Slowbeer, 2017].

Os tanques cilíndricos são constituídos de uma parte cilíndrica superior e uma parte cônica inferior. Como resultado deste formato, os produtos da fermentação são completamente removidos. Os processos de esvaziamento e limpeza também são facilitados.

Atualmente os tanques são feitos quase exclusivamente de aço cromo-níquel. Porém não somente o material do vaso que tem grande importância, mas também a rugosidade interna do vaso. Esta deve ser polida e não conter reentrâncias de dimensões microscópicas.

Uma superfície de rugosidade reduzida é essencial em particular no fundo do vaso e das saídas de produto para prevenir o depósito de microorganismos [Kunze, 2004].

Os tanques para armazenamento de cerveja não podem ser preenchidos completamente pela fermentação devido ao enorme volume de espuma gerado pela emissão de CO_2 .

Por esta razão, o volume do espaço acima da altura do mosto nos tanques de fermentação deve ser de no mínimo 25% do volume total de mosto [Kunze, 2004].

2.4.1 Controle do processo de fermentação

O controle de temperatura do processo de fermentação é importante tanto do ponto de vista físico-químico como para o controle da atividade biológica (Silveira, 2009).

Em função disso, o resfriamento controlado é promovido, e destacam-se os seguintes fatores

- O agente refrigerante empregado;
- O arranjo do resfriamento;
- As zonas de resfriamento;
- O isolamento térmico no fermentador, caso seja colocado no ambiente externo.

O calor não é gerado a uma taxa constante durante a fermentação, e por este motivo também ele não é retirado a uma taxa constante. O tempo e a quantidade de calor dependem da massa específica inicial do mosto, do estilo de cerveja, da cepa de levedura utilizada e da temperatura de fermentação.

É importante salientar que a levedura é sensível a mudanças rápidas de temperatura e mostra sinais de distúrbios em resfriamentos inesperados, provocando efeitos adversos na fermentação e na multiplicação. Durante as fases iniciais e de crescimento, rápidos resfriamentos devem sempre ser evitados, e se outra quantidade de mosto é adicionada esta deve estar à mesma temperatura do fermentando.

Diversos métodos de controle da fermentação são utilizados, dentre eles destacam-se:

- Controle semiautomático de temperatura, o equipamento tenta manter uma temperatura pré-selecionada ao longo de todo processo;

- Controle automático, através de um conjunto de sensores o processo é controlado em tempo real, podendo inclusive conter diferentes rampas de temperatura durante o processo;
- Medição da quantidade de CO_2 produzido, que em conjunto com medições de temperatura e controle do tempo de processo podem ter tomadas decisões;
- Medição da diferença de pressão, este método baseia-se na consideração de que o mosto é mais pesado que a água por conter açúcar dissolvido na mistura. Durante a fermentação a maioria destes açúcares é convertida em CO_2 e álcool, este é mais leve que a água. Assim, a massa específica naturalmente diminui e através de equipamentos sensíveis pode-se calcular a etapa de fermentação.

3 ANÁLISE TÉRMICA DO FERMENTANDO

3.1 Introdução

Neste capítulo descreve-se como foi realizada a análise térmica do fermentando. São definidos o domínio do problema, o volume de controle aplicado, os modelos térmicos para análise térmica, o cálculo do termo fonte e a metodologia utilizada para quantificar o calor liberado e o campo de temperaturas do fermentando.

3.2 Problema físico matemático

A quantificação da energia liberada durante o processo de fermentação de cerveja envolve uma abordagem experimental seguida de modelagens analítica e numérica. Um fermentador de bancada foi montado com o propósito de produzir amostras de fermentando, retiradas regularmente ao longo dos ensaios para serem enviadas para análise química, além de permitir a medição das temperaturas no interior do fermentando.

A fermentação foi conduzida no interior de um recipiente cilíndrico à temperatura controlada para evitar que suas variações durante o processo prejudiquem o produto final.

O fermentador escolhido para este estudo é cilíndrico fabricado em poliestireno com diâmetro de 400 mm, altura de 400 mm e espessura de parede de 1 mm. Seu volume total é de 40 litros. A representação esquemática do domínio estudado é mostrada na Figura 3.1

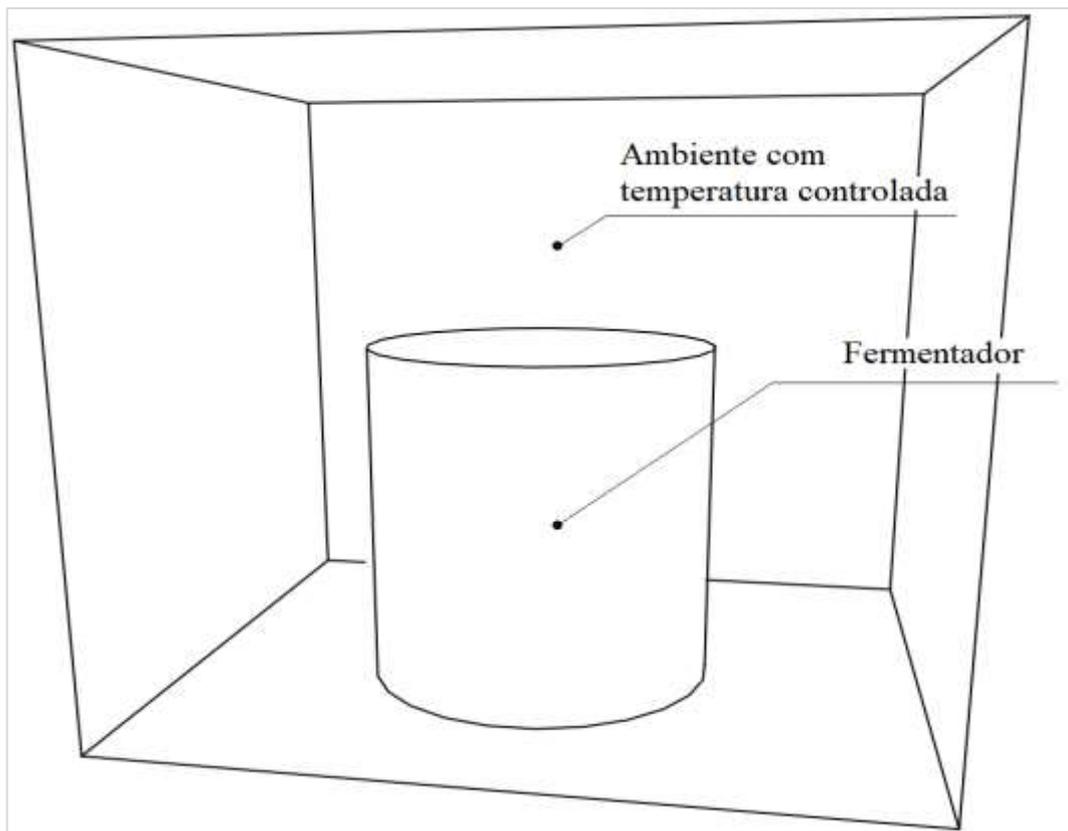


Figura 3.1 - Representação esquemática do domínio do problema térmico.

Considerou-se que o fundo do fermentador está térmicamente isolados, pois está em contato com a parede inferior da câmara de controle de temperatura, que é revestida com uma camada de 80 mm de poliestireno expandido. Também considerou-se que as paredes do fermentador se mantêm a temperatura constante, mesmo com a liberação de calor realizada pelas leveduras. Esta condição foi imposta nos modelos numéricos e a bancada de ensaios foi construída para tal.

3.3 Metodologia teórico-experimental

A metodologia desenvolvida para realizar a análise térmica utiliza como dados de entrada a medição da concentração de glicose de amostras retiradas durante os ensaios, que a partir destes valores são realizados cálculos para obter as taxas de conversão de glicose e estimar o calor gerado. O calor gerado é calculado utilizando em modelos de geração de calor, e o valor calculado serve de entrada para modelos térmicos que estimam os campos de temperatura do fermentando. Este roteiro metodológico é mostrado na Tabela 3.2.

Nas seções a seguir é mostrado o equacionamento utilizado para quantificar a geração térmica e avaliar o campo de temperaturas.

Tabela 3.1 - Roteiro de cálculo para avaliação da dissipação térmica e do campo de temperaturas do fermentando

Passo	Atividade	Observação
1	Medição da concentração de glicose das amostras do fermentando simultâneo à aquisição do campo de temperaturas do fermentando.	Ajuste de curva Entrada: Amostras Saída: $[C_6 H_{12} O_6]$
2	Cálculo da taxa de conversão de glicose a partir da derivada da evolução da concentração de glicose no tempo.	Derivada da curva Entrada: $[C_6 H_{12} O_6]$ Saída: $\frac{d[C_6 H_{12} O_6]}{dt}$
3	Conversão da taxa de consumo de glicose em taxa de produção de CO_2 .	Equação 3.11 Entrada: $\frac{d[C_6 H_{12} O_6]}{dt}$ Saída: $\frac{d[CO_2]}{dt}$
4	Cálculo da dissipação térmica a partir das taxas de conversão de $C_6H_{12}O_6$ e de produção de CO_2 por meio de modelos de literatura.	Equação 3.8 Entradas: $\frac{d[C_6 H_{12} O_6]}{dt}$, $\frac{d[CO_2]}{dt}$ Saída: $\dot{q}(t)$
5	Cálculo do campo de temperaturas do fermentando por meio de modelos térmicos.	Equações 3.14 e 3.15 Entrada: $\dot{q}(t)$ Saída: $T(r, t)$
6	Comparação entre as temperaturas do fermentando adquiridas em 1 e calculados em 5.	
7	Ajuste do modelo do termo fonte.	

3.4 Análise térmica

Este trabalho propõe a utilização da equação da difusão do calor para aproximar os resultados numéricos aos resultados experimentais, esta proposta tem base no estudo de Oliveira, 2010, que desprezou os efeitos de convecção e radiação na transferência de em um cilindro preenchido com líquido.

A equação da difusão do calor, em coordenadas cilíndricas, foi utilizada e é apresentada na Equação 3.1.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}_t = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

Os termos à esquerda da igualdade apresentam o fluxo de calor nas direções radial r , angular φ e altura z do domínio e a geração térmica. A condutividade térmica do meio em análise foi considerada próxima a da água, $k = 0,58 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. O termo \dot{q}_t representa a geração volumétrica de calor dependente apenas do tempo, expressa em Wm^{-3} . À direita da igualdade, no termo transiente estão presentes as propriedades termofísicas do meio que está sendo analisado, representadas por ρ e c_p , com $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ e $c_p = 4,182 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

A equação do calor foi resolvida a partir das seguintes hipóteses simplificativas:

- 1 - Gradientes na direção φ foram desprezados, devido a geometria do fermentador;
- 2 - Propriedades termo-físicas constantes e independentes da temperatura;
- 3 - A fermentação ocorre a volume constante;
- 4 - Concentrações das espécies são uniformes ao longo do domínio.

3.4.1 Modelagem do termo fonte temporal

O termo fonte temporal \dot{q}_t , em Wm^{-3} , é o resultado do seguinte balanço

$$\dot{q}_t = \dot{q}_{f(t)} - \dot{q}_{p(t)} \quad (3.2)$$

onde $\dot{q}_{f(t)}$ é a dissipação térmica do processo de fermentação, e $\dot{q}_{p(t)}$ é a perda de calor pela saída do CO_2 .

As seguintes hipóteses simplificativas foram consideradas para realizar esta modelagem:

- Dissipação de calor pelo termo fonte uniforme em todo o domínio;
- Todo calor gerado pelo termo fonte é entregue ao domínio;
- Retirada de calor pela saída do CO_2 é uniforme em todo o domínio;
- Não há perdas na retirada de calor pelo sumidouro.

O termo $\dot{q}_{f(t)}$ foi calculado através de dois modelos encontrados na literatura, o modelo de Gay-Lussac e o modelo aplicado por Colombié et al., 2007.

O modelo de Gay-Lussac estima a dissipação térmica $\dot{q}_{f(t)}$ diretamente da conversão de uma molécula de glicose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), como segue.

$$\dot{q}_{f(t)} = 169 \frac{d[C_6H_{12}O_6]}{dt} \quad (3.3)$$

A constante que multiplica o termo derivativo tem unidades de kJ por mol de $C_6H_{12}O_6$.

Alternativamente, o modelo apresentado na Equação 10 aplicado por Colombié et al., 2007, para a fermentação de vinho pode ser usado. Segundo Malherbe et al., 2004, este é um modelo semi-empírico de fermentação alcoólica que relaciona a taxa em que o dióxido de carbono é produzido com a dissipação térmica, $\dot{q}_{f(t)}$.

$$\dot{q}_{f(t)} = 45,31 \frac{d[CO_2]}{dt} \quad (3.4)$$

A constante que multiplica o termo de taxa de produção de CO_2 tem unidade de kJ por mol de CO_2 convertido. O termo derivativo representa a taxa de produção de dióxido de carbono em $\text{molm}^{-3}\text{s}^{-1}$, e foi calculado pela equação abaixo que é baseada no balanço estequiométrico apresentado na Equação 2.2 e tem como entrada a taxa de consumo de glicose.

$$-\frac{d[C_6H_{12}O_6]}{dt} = 2 \frac{d[C_2H_5OH]}{dt} = 2 \frac{d[CO_2]}{dt} \quad (3.5)$$

A taxa de consumo de glicose foi calculada como a derivada da curva de ajuste traçada a partir das medições de concentração de açúcar de amostras retiradas ao longo dos ensaios.

O termo $\dot{q}_{p(t)}$ da Equação 3.8, foi calculado através da equação a seguir,

$$\dot{q}_{p(t)} = 44 \frac{d[CO_2]}{dt} c_p \Delta T \quad (3.6)$$

onde $c_p = 0,835 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ e ΔT é igual a diferença entre a temperatura de fermentação e a temperatura do ambiente. A constante que multiplica os termos da equação representa o peso molar da molécula de CO_2 , em gmol^{-1} .

A solução da Equação 3.12 depende da temperatura no interior do fermentador, assim, o problema foi resolvido de forma iterativa. Inicialmente o termo $\dot{q}_{p(t)}$ foi desprezado, e o campo de temperatura no interior do fermentador foi calculado. Com o conhecimento das temperaturas foi possível determinar o termo ΔT , e recalculer a temperatura interna. Este

procedimento foi realizado para cada instante de tempo em cada um dos modelos térmicos apresentados a seguir.

3.5 Modelos térmicos propostos

Três modelos térmicos foram utilizados para calcular o campo de temperaturas no interior do fermentador. O primeiro modelo, denominado M1, realiza a análise em regime permanente, e segundo modelo, M2, considera o termo transiente desta equação da Equação 3.1. Ambos consideram condução unidimensional e foram previamente desenvolvidos e apresentados no trabalho de Sgarbi, 2016. O terceiro modelo, M3, considera condução bidimensional como consequência da condições de contorno impostas.

3.5.1 Modelo difusivo permanente unidimensional, M1

Este é o modelo mais simplificado deste trabalho e permite encontrar a solução de forma analítica utilizando como dados de entrada a aproximação experimental pelo termo fonte, além disso, como hipótese simplificativa considera-se regime permanente em cada instante de tempo.

Trata-se de uma abordagem permanente, aplicada para cada passo de tempo, o que o caracteriza como sendo um modelo *Quasi-estático* [Buchdal, 2009]. Nele a variação do termo fonte faz com que as temperaturas do fermentando mudem e entrem em regime permanente instantaneamente. A resposta do campo de temperaturas de cada instante serve de condição inicial para o instante seguinte.

A representação esquemática do volume de controle é apresentada na Figura 3.2, na qual podem ser observadas as condições de contorno utilizadas.

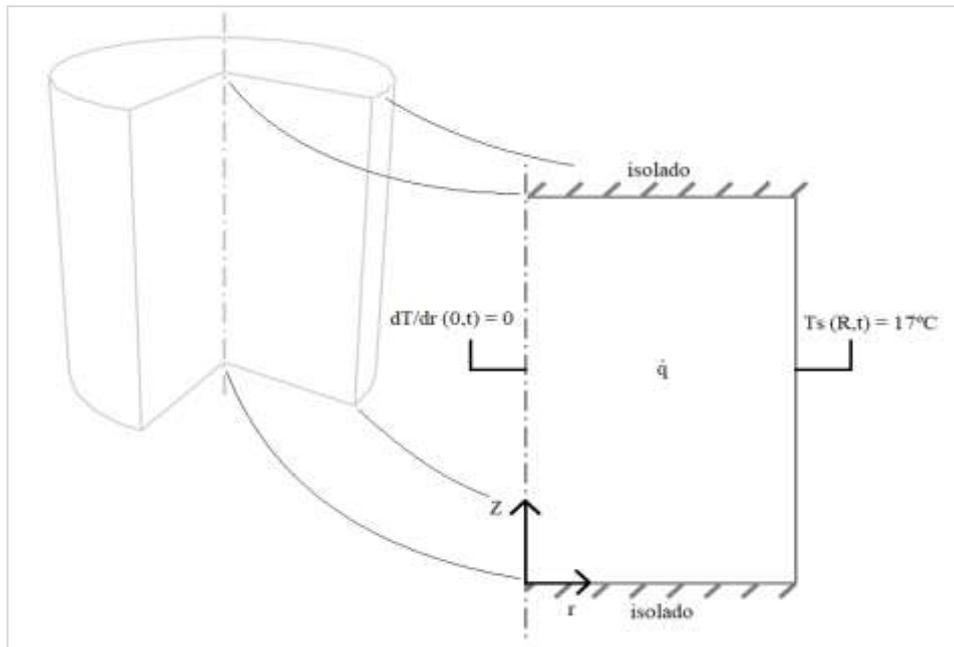


Figura 3.2 - Representação esquemática do volume de controle.

Na Tabela 3.1 são mostradas as condições de contorno e as condições iniciais da modelagem. As condições de contorno utilizadas para modelar o problema foram de temperatura prescrita na parede do fermentador e condição de simetria no centro. Como condição inicial foi utilizada temperatura uniforme em todo domínio e o termo fonte com valor nulo.

Tabela 3.2 - Condições de contorno e iniciais dos modelos térmicos propostos

Condições de Contorno

$$T(r = R, z, t) = 17 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r}(r = 0, z, t) = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}(r, z = 0, t) = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}(r, z = Z, t) = 0 \quad (3.10)$$

Condições iniciais

$$T(r, z, t = 0) = 17 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.11)$$

$$\dot{q}_t(r, z, t = 0) = 0 \quad (3.12)$$

A condição de contorno de temperatura prescrita na parede, Equação 3.2, é imposta a fim de manter a temperatura do fermentando dentro da faixa ideal de operação das leveduras ao longo de todo o ensaio e facilita a solução da equação da difusão. A condição de contorno

no eixo de simetria, Equação 3.3, é uma abordagem clássica para esse tipo de problema (Ozisik, 1993). As Equações 3.4 e 3.5 representam a condição de parede isolada, a superfície inferior é considerada isolada devido às camadas de isolamento térmico da própria câmara de controle e a superfície superior devido à formação de espuma durante a fermentação.

Desta forma a equação do calor pode ser reescrita como mostrado na Equação 3.13.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T_{(r,t)}}{\partial r} \right) + \dot{q}_t = 0 \quad (3.13)$$

A partir da substituição das condições de contorno na Equação 3.13 chegou-se à Equação 3.14, na qual os valores de T_s representa a condição de contorno de temperatura prescrita, enquanto \dot{q}_t representa a geração de calor.

$$T_{(r,t)} = \frac{\dot{q}_t (R^2 - r^2)}{4k} + T_s \quad (3.14)$$

Essa equação foi resolvida analiticamente para obter o campo de temperaturas no interior do fermentador, com ênfase nos valores de temperatura no eixo central onde verificasse a máxima temperatura do fermentando.

3.5.2 Modelo difusivo transiente unidimensional, M2

O campo de temperaturas foi calculado utilizando novamente a solução do termo fonte como entrada. Neste modelo foram consideradas as mesmas hipóteses simplificativas aplicadas no modelo M1, porém admitiu-se que o processo todo ocorre em regime transiente, como é mostrado na próxima equação.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T_{(r,t)}}{\partial r} \right) + \dot{q}_t = \rho c_p \frac{\partial T_{(r,t)}}{\partial t} \quad (3.15)$$

Esta equação foi resolvida através de um código de elementos finitos, com base em elementos triangulares. O código foi implementado no MATLAB utilizando a ferramenta de solução de equações diferenciais parciais PDETool.

O software resolve problemas a partir de condições iniciais para sistemas de equações diferenciais parciais (PDEs) parabólicas e elípticas, considerando variáveis espaciais e

temporais. Para encontrar a solução, as PDEs são convertidas em equações diferenciais ordinárias utilizando uma discretização espacial de segunda ordem baseada em um conjunto de parâmetros. O método de discretização está descrito em Skeel, 1990.

Após a discretização, as equações elípticas dão origem às equações algébricas. Com a malha adequada, o algoritmo de solução consegue encontrar condições iniciais próximas àsquelas impostas e a solução é encontrada.

A malha adotada é não uniforme triangular e o tamanho de malha apropriado foi determinado por refinamentos sucessivos com aumento do número de elementos de aproximadamente quatro vezes o tamanho da malha corrente para o tamanho de malha seguinte. A malha é apresentada na figura abaixo.

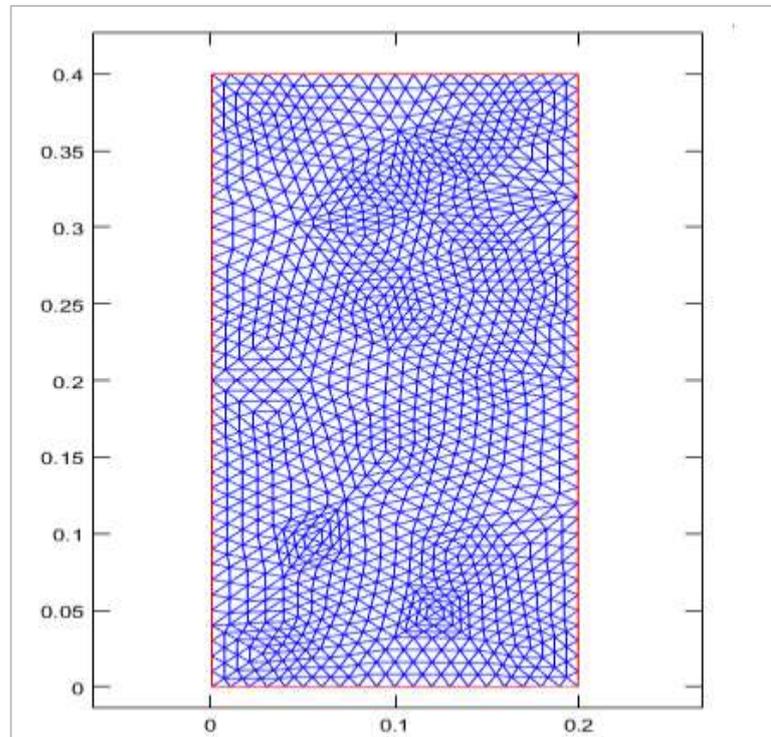


Figura 3.3 - Malha gerada pelo PDETools do Matlab para o cálculo das temperaturas do fermentando.

A malha foi considerada independente quando apresentou desvio relativo menor que 0,1%, calculado através da Equação 3.16.

$$Desvio = \frac{|T_j - T_{j+1}|}{T_j} \quad (3.16)$$

na qual T_j representa a máxima temperatura atingida em regime permanente para uma dada malha e T_{j+1} a máxima temperatura em regime permanente com ao aplicar um refinamento de malha. Na tabela a seguir estão apresentados os valores encontrados para cada refinamento de malha.

Tabela 3.2 - Teste de independência de malha, resultados obtidos a partir da Equação 3.16.

Elementos	$T^*(\text{máx.})$	Desvio	Desvio (%)
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

3.5.3 Modelo difusivo transiente bidimensional, M3

O campo de temperaturas foi calculado utilizando novamente a solução do termo fonte como entrada, além de considerar as mesmas hipóteses simplificativas aplicadas no modelo M2. Assim, a seguinte equação descreve o processo térmico.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T_{(r,t)}}{\partial r} \right) + \dot{q}_t = \rho c_p \frac{\partial T_{(r,t)}}{\partial t} \quad (3.17)$$

A representação esquemática do volume de controle é apresentada na Figura 3.2, na qual podem ser observadas as condições de contorno utilizadas.

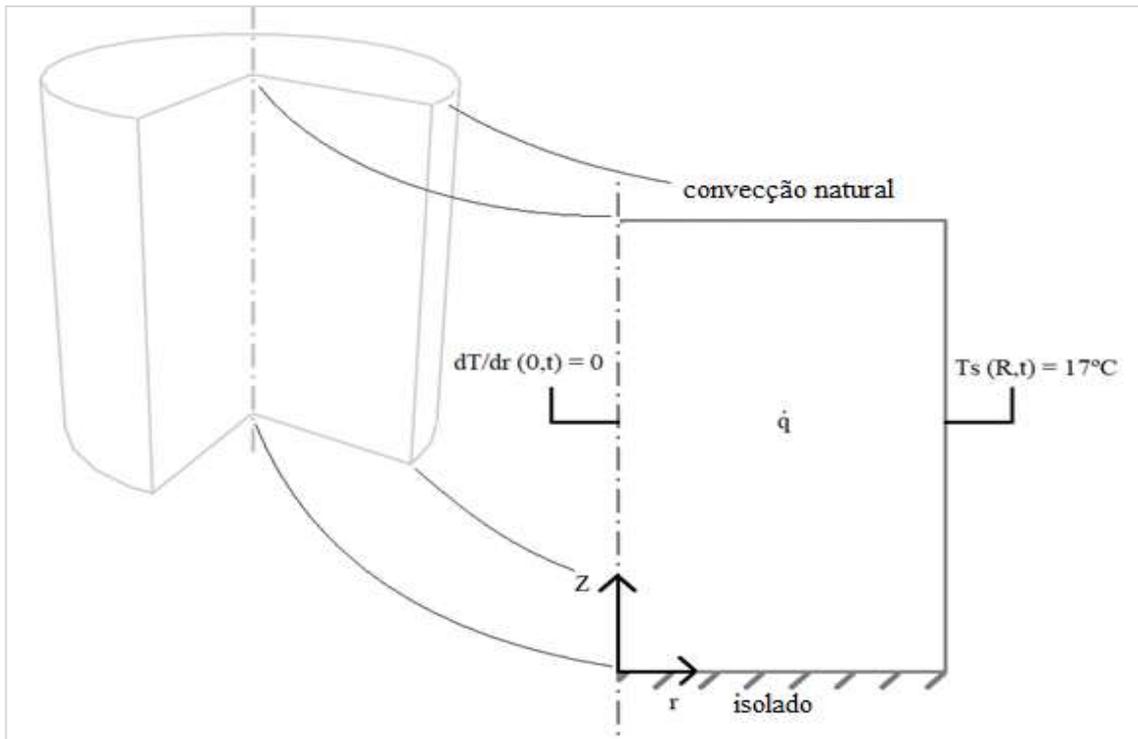


Figura 3.4 - Representação esquemática do volume de controle.

Na condição de contorno de convecção natural é considerada uma superfície quente voltada para cima, assim o fluido tem a tendência de mover-se no sentido ascendente e descendente (Figura 3.5), mas é impedido pela placa. O escoamento tem de ser horizontal antes de possa mudar de sentido, assim a transferência de calor por convecção, de certa forma, não é efetiva [Incropera, 2008].

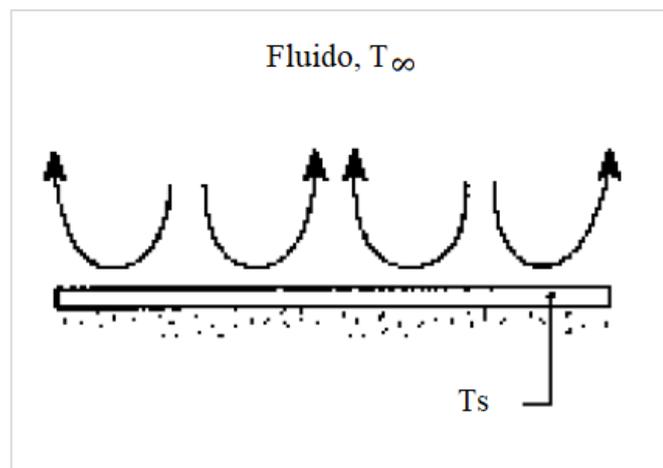


Figura 3.5 - Placa com superfície superior aquecida (Adaptado de Incropera, 2008).

Para os cálculos envolvendo convecção natural, a correlação utilizada é apresentada na equação a seguir.

$$\overline{Nu}_L = \frac{hL}{k} = CRa_L \quad (3.17)$$

O número de Rayleigh é definido por

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (3.18)$$

onde g é a gravidade, com valor de $9,81 \text{ m s}^{-2}$, β é o coeficiente de expansão térmica, T_s é a temperatura da superfície, T_∞ é a temperatura do ar no interior da câmara, L é o comprimento característico, ν é a viscosidade cinemática e α é a difusividade térmica. As propriedades do fluido ν , α e β são valoradas na temperatura de película T_p .

$$T_p = \frac{(T_s + T_\infty)}{2} \quad (3.19)$$

Para aumentar a precisão, foi inserido o conceito do comprimento característico no cálculo, definido por

$$L \equiv \frac{A_s}{P} \quad (3.20)$$

A Equação 3.19 apresenta uma correlação amplamente para placas horizontais aquecidas, sugerida por McAdams, 1954.

$$Nu_L = 0,54Ra_L^{1/4} \quad (3.21)$$

3.6 Conclusões parciais

Neste capítulo foi descrita e discutida a modelagem utilizada para avaliar a dissipação térmica e o campo de temperaturas de um fermentador. Uma formulação geral foi proposta a partir de hipóteses simplificativas, condições iniciais e condições de contorno convenientes

para o experimento. A partir destas condições foram apresentadas duas equações para cálculo da dissipação térmica, ambas presentes na literatura, e dois modelos térmicos para cálculo das temperaturas do fermentando.

4 EXPERIMENTO

4.1 Introdução

O presente capítulo destina-se a apresentar uma visão geral sobre os ensaios realizados, descrevendo o estilo e características da cerveja produzida, a concepção da bancada de ensaios, a instrumentação utilizada e a avaliação da incerteza das medidas obtidas.

4.2 Estilo e características da cerveja produzida

Neste estudo foi produzido o mesmo estilo de cerveja em três ensaios completos sendo o processo de fermentação realizado em bateladas de 40 litros. O estilo escolhido foi Ordinary Bitter, produzido por leveduras da alta fermentação, que agem no topo do mosto. O mosto possui densidade inicial (*OG*) de 1,037 (12 °BRIX) e depois de fermentado possui densidade final (*FG*) de 1,014, as densidades são tomadas em relação a massa específica da água. 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 utilizado para a sua produção foi o Lallemmand Nottingham. Trata-se 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.

O número inicial de células viáveis foi de 110 bilhões, este valor foi estimado de acordo com informações fornecidas pelo fabricante e o mosto foi aerado durante a trasfega para o fermentador.

4.3 Concepção da bancada de ensaios

Para realizar o experimento, foi desenvolvida uma bancada de 30 litros para a produção de cerveja em pequena escala, na qual fosse possível garantir as condições de contorno estabelecidas, avaliar a distribuição de temperaturas no interior do fermentador e

retirar amostras para realiza uma análise química avaliando a quantidade de açúcar presente na amostra.

A bancada experimental consiste em uma câmara de refrigeração, um fermentador instrumentado e um banho térmico, a bancada é apresentada na Figura 4.1.

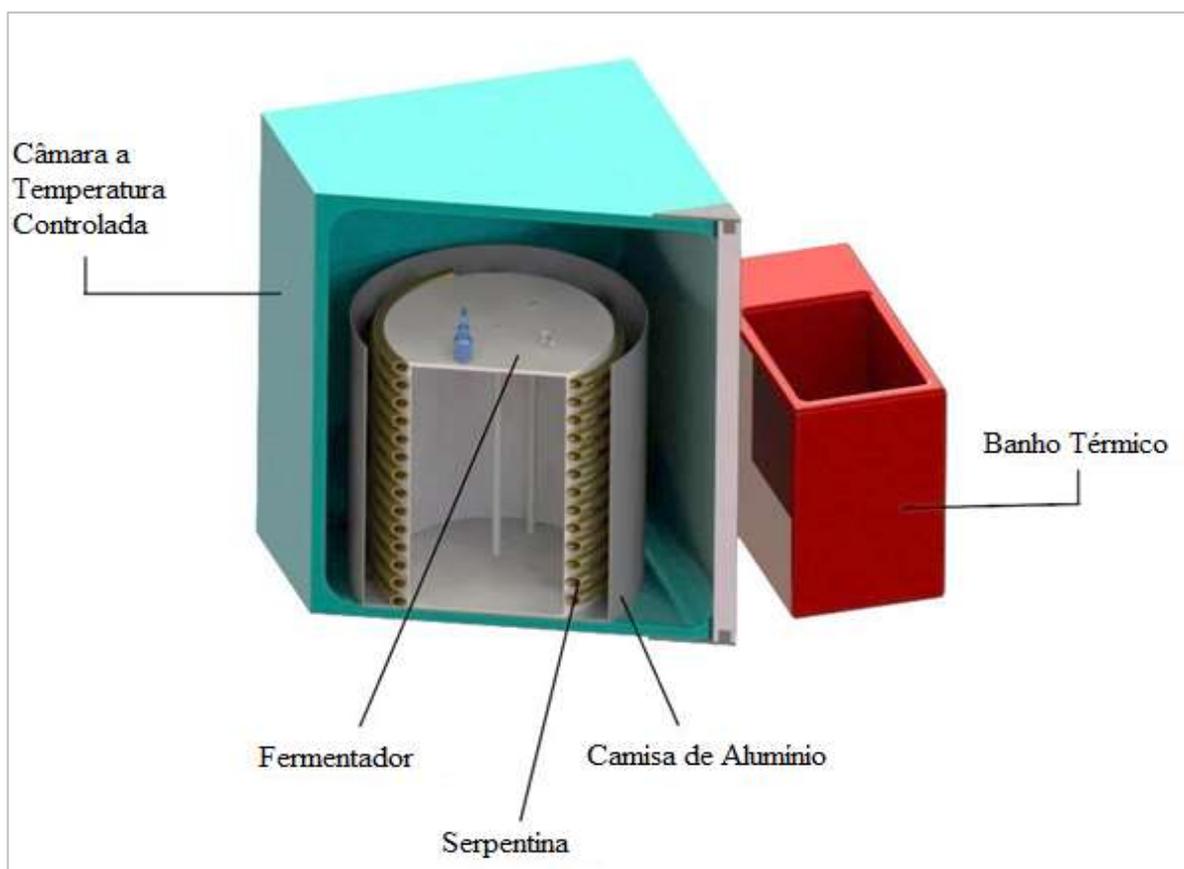


Figura 4.1 - Bancada experimental.

A Tabela 4.1 detalha os equipamentos utilizados na bancada, informando o fabricante e a potência nominal de cada equipamento.

Tabela 4.1 - Lista de equipamentos utilizados na bancada experimental.

Equipamento	Fabricante e Modelo	Potência
Banho Térmico	CIENLAB	1000 W
Câmara de Refrigeração	General Eletronic	500 W

A câmara de refrigeração, apresentada em verde, foi utilizada para manter o ambiente a temperatura controlada. No interior da câmara de refrigeração foi colocado o fermentador instrumentado, em branco, envolto por uma camisa de alumínio, em cinza, e uma serpentina, em amarelo. A serpentina é alimentada por um banho térmico, em vermelho, 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 e impede a entrada de oxigênio no interior do fermentador.

4.4 Método experimental para medição da concentração de glicose

As medições foram realizadas utilizando o método fenol sulfúrico, que 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 espectrofotômetro e comparada com o referencial, a fim de apresentar o valor de absorvância da solução, que é linearmente proporcional à concentração de açúcares totais (Dornemann, 2016).

As amostras foram analisadas no Laboratório de Bioengenharia do Instituto de Ciências e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (ICTA - UFRGS), através de um espectrômetro digital utilizando a metodologia descrita por Dubois et al., 1956. As medições foram realizadas a partir de amostras retiradas a cada três horas, durante o período de 120 horas, e repetidas em três ensaios completos. Essa definição foi acertada após a realização de ensaios preliminares, que resultou na escolha da melhor frequência e a duração da coleta de dados.

Alternativamente, foi utilizada a técnica de refratometria para determinar a concentração de açúcares, por meio de um refratômetro digital. Este equipamento mede a dispersão dos raios luminosos de acordo com a massa específica do líquido, cuja escala varia de 0 °BRIX, correspondente à água pura, até 100 °BRIX que corresponde a uma solução de sacarose de 100 g para 100 ml de água. Os valores são dados em peso de sólido em suspensão

por 100 ml de volume (Cecchi, 2003). Esta técnica também foi adotada por ser mais simples, e apesar de apresentar maior desvio em relação à espectrofotometria é amplamente utilizada no setor cervejeiro.

4.5 Instrumentação dos Ensaio

A aquisição dos dados foi realizada por meio de 12 termopares, dispostos de forma a varrer o domínio do fermentador. Além destes, 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.

A Figura 4.2 mostra 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.

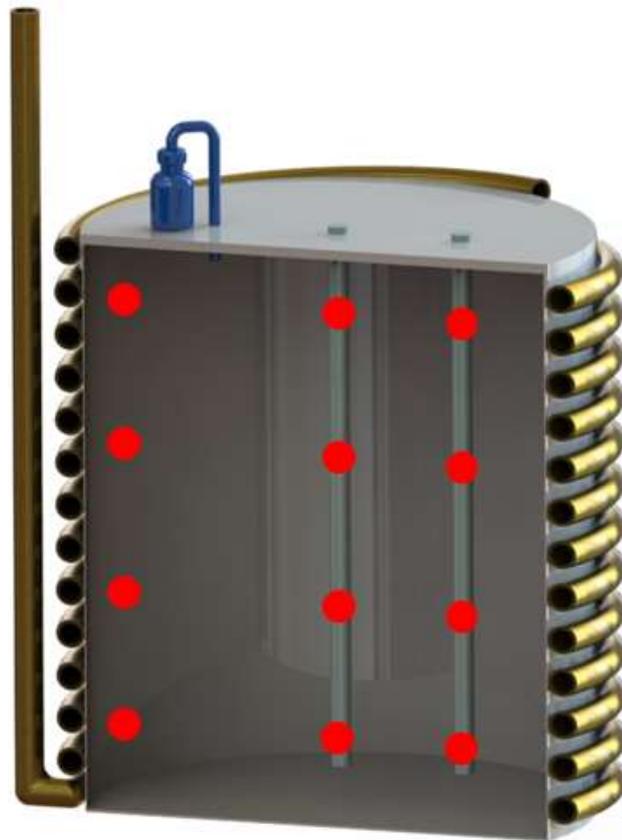


Figura 4.2 - Disposição esquemática dos termopares no interior do fermentador.

Os equipamentos utilizados na instrumentação da bancada experimental estão descritos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Lista de equipamentos para instrumentação da bancada.

Equipamento	Fabricante e Modelo	Resolução	Incerteza
Termopares PT100	Tipo J Classe A	68 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	$\pm 0,2^\circ\text{C}$ (*) $\pm 0,15^\circ\text{C}$
Data Logger	Agilent - 34970A	22 bits	$\pm 0,004\%$
Micropipeta Automática	LabMate Soft 20:200 L, 100:1000 L		
Espectrofotômetro Digital	Kasuaki IL-226	320-1020 nm	± 3 nm
Refratômetro Digital	Gehaka, PAL-1 - Atago	0.1 $^\circ\text{BRIX}$	0.2 $^\circ\text{BRIX}$

(*) – Incerteza após calibração.

4.5.1 Incerteza de medição

Neste trabalho a incerteza de medição tem origem em dois processos distintos, o primeiro processo é a medição da concentração de açúcares e o segundo é a medição das temperaturas do fermentando.

No primeiro processo, o cálculo da incerteza de medição da concentração dos açúcares se aplica na determinação das incertezas das etapas analíticas dadas pela medições das concentrações de açúcar e pelo desvio padrão da curva de ajuste que é propagada até o resultado final seguindo o roteiro proposto na seção 3.6.

As principais fontes de incertezas na análise química de amostras são, segundo Chui & Zucchini, 2000, a amostragem, a preparação da amostra em laboratório, a extração, a pré-concentração de soluções, e as interferências de vários tipos durante a quantificação (dos efeitos de matriz, das características dos instrumentos utilizados e da sua calibração, entre outras).

A concentração de açúcar foi medida com o auxílio do espectrofotômetro Kasuaki IL-226 (Tabela 4.2), que tem incerteza declarada de ± 3 nm. A incerteza de medição pode ser calculada pelo procedimento proposto por Ávila et al., 2004, que aponta as diluições da

amostra de calibração, a curva de calibração e a repetibilidade dos ensaios como principais fontes de incerteza de medição.

A Figura 4.4 apresenta o diagrama de causa e efeito das fontes de incerteza associadas ao processo de medição da concentração de glicose. O vetor central representa o valor medido e as suas ramificações são as contribuições dos diferentes fatores que afetam o resultado da análise.

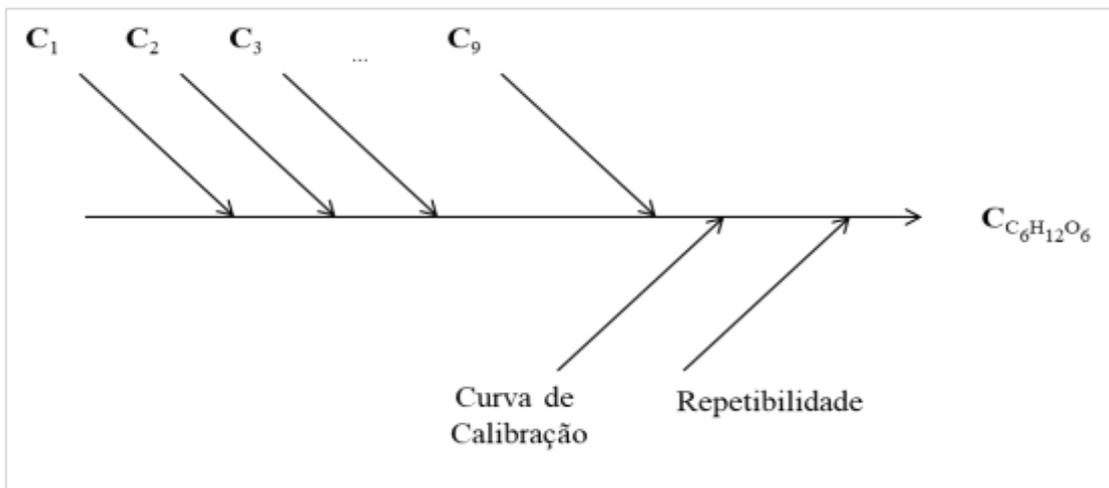


Figura 4.3 - Disposição esquemática dos termopares no interior do fermentador (adaptado de Ávila et al., 2004).

Os fatores C1, C2, C3, ..., C9 correspondem às diferentes diluições da amostra utilizada para traçar a curva de calibração, a curva de calibração contribui para o erro de acordo com a variância e o desvio padrão da curva ajustada e a repetibilidade é referente aos ensaios.

Para o cálculo da incerteza de medição de cada uma das diluições ($u_{c(n)}$), utiliza-se a equação a seguir

$$u_{c(n)} = \sqrt{(u_{pip})^2 V_{pip} + (u_{temp})^2 T} \quad (4.1)$$

onde u_{pip} representa a incerteza de enchimento da pipeta, V_{pip} o volume pipetado em ml, u_{temp} a incerteza devido a temperatura e T a temperatura medida, em °C. A incerteza u_{pip} foi considerado igual a 0,5%, pois não há nenhuma informação sobre o nível de precisão das

pipetas. A incerteza, u_{temp} , foi estimada baseada na faixa de temperatura e no coeficiente de expansão volumétrico, e é calculada através da Equação 4.2

$$u_{temp} = V_{pip} T \alpha \quad (4.2)$$

onde α é o coeficiente de dilatação térmica da amostra, aproximado para o valor da água, $\alpha = 2,1 \times 10^{-4} \text{ ml } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Ao realizar as diluições da amostra padrão em nove concentrações (C_1, C_2, \dots, C_9), foram feitas as medições no espectrofotômetro, estes dados foram plotados em um gráfico e foi traçada uma curva de ajuste aproximada a um polinômio de primeiro grau.

A partir do conhecimento da curva ajustada e seu desvio padrão, têm-se a curva de calibração do equipamento. O cálculo da incerteza associada a curva de calibração, u_{Co} , é realizado através da Equação 4.3.

$$u_{Co} = \frac{S}{B_1} \sqrt{\frac{1}{p} + \frac{1}{n} + \frac{(Co - \bar{C})^2}{S_x}} \quad (4.3)$$

onde B_1 é o coeficiente angular, p é o número de medições para determinar Co , n o número de medições para a calibração, Co é a concentração de glicose medida da amostra medida, \bar{C} é o valor médio das diferentes diluições. O desvio-padrão residual S é dado por

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n [A_j - (B_0 + B_1 C_j)]^2}{n-2}} \quad e \quad S_x = \sum_{j=1}^n (C_j - \bar{C})^2 \quad (4.4)$$

e a curva de calibração é $A_j = C_i \cdot B_1 + B_0$ onde A_j é a j th medição da absorvância da amostra diluída, C_i é a concentração da amostra diluída correspondente.

A incerteza associada a repetitividade da amostra foi calculada através da Equação 4.5

$$u_{repet} = \frac{\sigma_{amostra}}{\sqrt{3}} \frac{1}{B_1} \quad (4.5)$$

onde $\sigma_{amostra}$ corresponde ao desvio-padrão das absorvâncias medidas da amostra.

A estimativa da incerteza combinada, $u_{co(comb)}$ na determinação da concentração de glicose foi obtida através da Equação 4.6

$$u_{Co(comb)} = \sqrt{(u_{Ccomb})^2 + (u_{Co})^2 + (u_{repet})^2} \quad (4.6)$$

onde u_{Ccomb} é a combinação das incertezas de cada uma das diluições calculadas pelas Equação 4.1. A incerteza expandida $u_{Co(exp)}$ foi obtida pelo produto da incerteza combinada e o fator de abrangência $K = 2$ com 95% de confiança.

A partir das medições individuais foi realizada uma curva de ajuste e as incertezas expandidas de cada medição da concentração de açúcar, $u_{Co(exp)}$, foram então propagadas utilizando a mesma metodologia apresentada anteriormente para a curva de calibração, para realizar este cálculo foi utilizado o *software* LAB Fit.

A incerteza final das grandezas medidas é o resultado da propagação sequencial das incertezas individuais de cada procedimento experimental realizado nesse trabalho. O procedimento clássico de propagação de incertezas combinadas proposto por Kline e McClintock (Holmann, 1996) não se aplica nesse caso.

No segundo processo, a incerteza de medição das temperaturas do fermentando foi tomada a partir dos termopares que tiveram suas medições previamente corrigidas em relação a um PT100 de referência calibrado.

A correção realizada foi baseada na média do desvio sistemático ao longo do tempo de cada um dos termopares, assim cada termopar teve seu valor corrigido a partir de um ensaio de 4 horas um banho térmico a 17 °C com temperatura controlada onde todos os termopares foram colocados em conjunto com o PT100 de referência. A Tabela 4.3 mostra as correções individuais realizadas em cada termopar.

Tabela 4.3 - Lista correções aplicadas para cada um dos termopares frente a um PT100 de referência utilizando um *datalogger*.

Referência (PT100)		17,001 °C
Termopar	Valor medido médio [°C]	Valor compensado [°C]
102 <C2>	16,993	0,007
103 <C3>	17,078	-0,078
104 <C4>	17,130	-0,130
108 <L2>	17,080	-0,080
109 <L3>	17,094	-0,094
111 <L4>	17,018	-0,018
114 <P2>	17,008	-0,008
116 <P3>	16,982	0,018
117 <P4>	16,934	0,066

Com a correção aplicada nos valores medidos foi realizado o cálculo da incerteza do termopares. A incerteza combinada foi determinada pelas equação abaixo.

$$u_c(t) = \sqrt{u^2(\Delta t) + u^2(hpad)} \quad (4.7)$$

Nesta equação $u(\Delta t)$ representa a incerteza devido a repetibilidade das medidas dos termopares, com valor de 0,07034, e $u(hpad)$ representa a incerteza herdada do *PT100* de referência, esta incerteza é apresentada na Equação 4.9 e foi definida utilizando a distribuição normal.

$$u(hpad) = \frac{U}{k} = \frac{0,15}{2} = 0,075 \quad (4.8)$$

Na equação acima U é a incerteza do *PT100* e k é o fator de abrangência para 95% de confiança. Assim, a incerteza de medição dos termopares, $u_c(t)$, é igual a 0,1025 e a incerteza expandida com 95% de confiança é de 0,205.

5 RESULTADOS

5.1 Introdução

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através da análise experimental e das simulações computacionais com base na metodologia apresentada, utilizando um conjunto de equações, hipóteses e parâmetros já definidos. Estes resultados são discutidos e apresentados principalmente em função do tempo de fermentação, este parâmetro é dado em horas e abrange todo o processo de fermentação primária realizado nos tanques de fermentação.

Os resultados obtidos neste trabalho correspondem ao estudo de caso realizado com uma cerveja do estilo *Pale Ale*, que através da conversão em álcool dos açúcares fermentáveis presentes em um mosto previamente preparado há a liberação de calor.

A análise dos resultados experimentais foi baseada em dados obtidos em três ensaios de fermentação através de coleta de amostras e aquisição de temperaturas. A análise dos resultados simulados foi baseada em hipóteses simplificativas e condição de contorno na parede do fermentador com temperatura prescrita.

Os resultados do modelo M1 foram encontrados de forma analítica, para os modelos M2 e M3 foi utilizada a ferramenta PDETool do *software* MatLab e foram organizados de acordo com a metodologia aplicada no desenvolvimento do trabalho, sendo mostrados da seguinte forma:

- Análise dos resultados experimentais, dividida em três etapas. Na primeira é mostrada a variação da concentração de glicose no fermentando ao longo do tempo, na segunda é mostrada a variação da taxa de consumo de glicose e a taxa de produção de CO₂ no tempo, e por fim são mostrados os dados térmicos medidos durante os ensaios de fermentação;
- Análise dos resultados da modelagem computacional. Esta análise está dividida em duas etapas, na primeira é apresentada a dissipação térmica obtida através de dois modelos de cálculo do termo fonte, e na segunda são mostrados os resultados das simulações computacionais;
- Comparação entre os dados experimentais de temperatura e os resultados simulados com o objetivo de validar a metodologia, as hipóteses simplificativas e o equacionamento do problema simulado;

- Ajuste do modelo computacional utilizado, que teve o objetivo de aproximar os valores de temperaturas calculados aos valores medidos experimentalmente.

5.2 Medição da concentração de glicose ao longo do tempo

A Figura 5.1 mostra a evolução temporal das concentrações de açúcar, e suas incertezas, obtidas através da análise das amostras retiradas ao longo do processo em três ensaios diferentes.

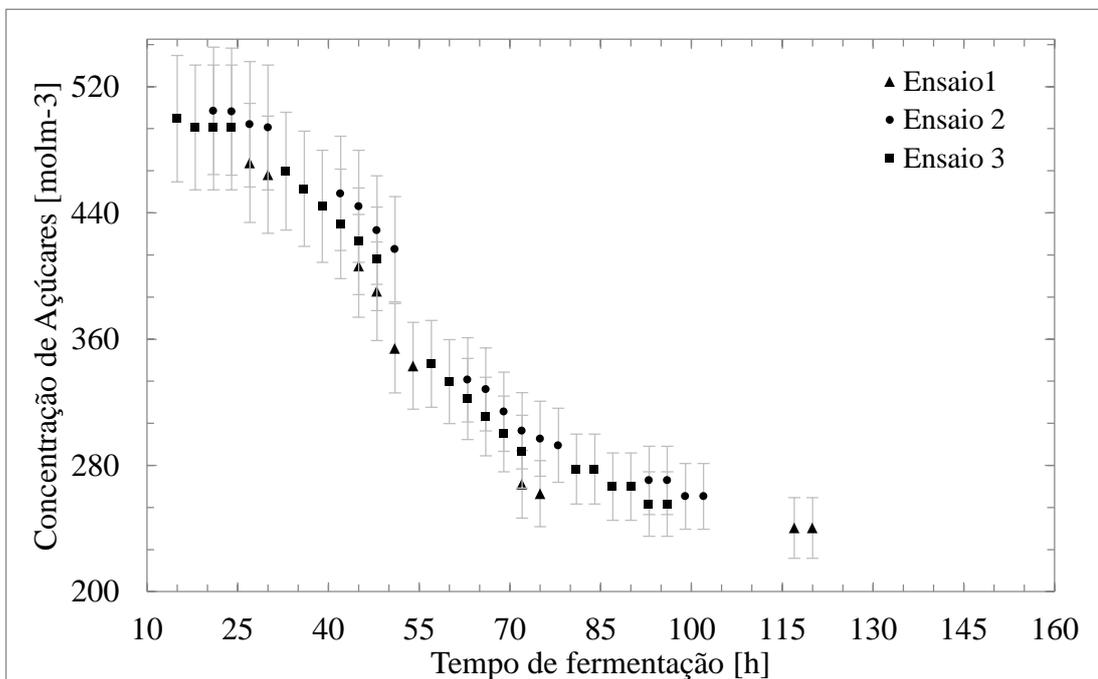


Figura 5.1 - Valores de concentração de açúcar das amostras retiradas durante os ensaios com suas respectivas incertezas de medição.

Os três ensaios apresentaram valores iniciais de concentração muito próximas, as amostras de dois ensaios foram analisadas utilizando um espectrofotômetro com incerteza de medição calculada de 8,49%. As amostras do terceiro ensaio foram medidas com um refratômetro digital com incerteza declarada de 0,2 °BRIX.

A partir dos valores de concentração medidos foi traçada uma curva de ajuste não linear utilizando uma regressão logística de quatro parâmetros, apresentada na Figura 5.2.

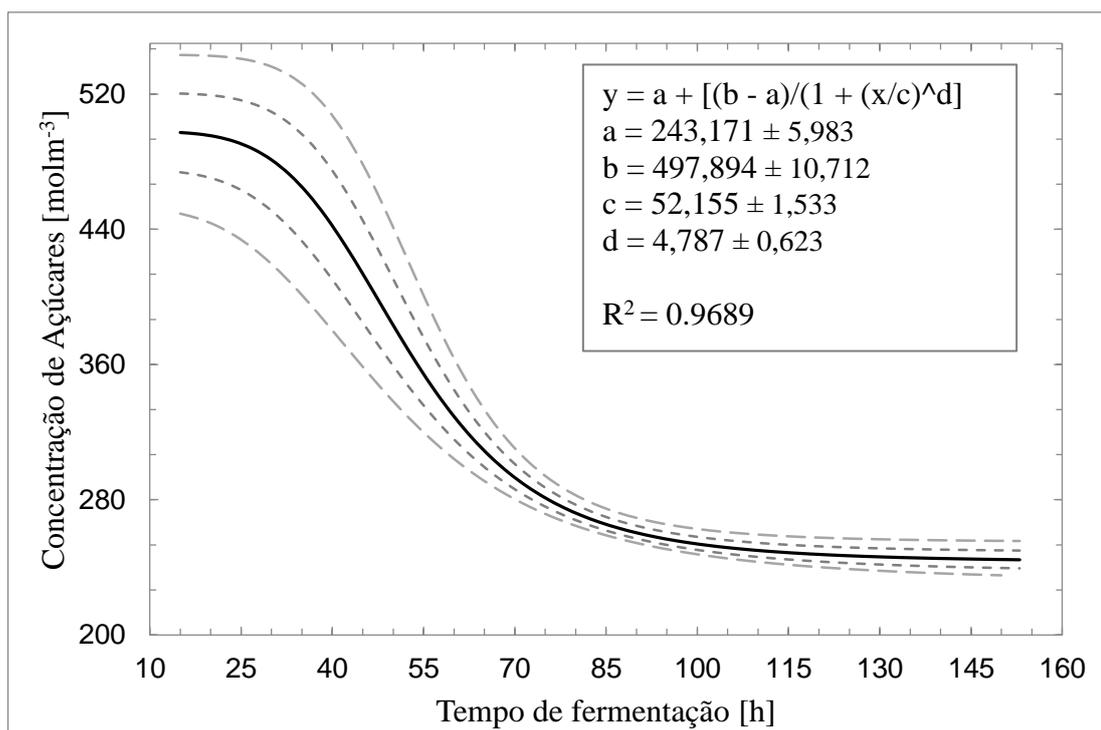


Figura 5.2 - Curva ajustada da concentração de açúcar ao longo do tempo com confiança de 68% e 95%, equação de ajuste com a incerteza expandida dos parâmetros e fator de correlação da curva ajustada.

Nota-se que o decaimento da concentração de açúcar inicia de forma muito lenta nas primeiras 25 horas de fermentação, entre 25 e 100 horas ocorre a maior parte do consumo dos açúcares e a partir das 100 horas apresenta uma variação muito baixa. Além disso, percebe-se que a concentração final de açúcar não é nula, isto se dá devido a presença de açúcares não-fermentáveis ou ainda pela inativação das leveduras por acúmulo de substância tóxica.

O comportamento das curvas do intervalo de confiança dependem das incertezas dos parâmetros da curva de ajuste. O intervalo de confiança se ajusta de acordo com a equação e a quantidade de dados experimentais, como a incerteza é dada através de uma porcentagem do valor medido, é natural que a incerteza seja menor para valores menores. Estes resultados foram encontrados utilizando o *software* LAB Fit..

5.3 Cálculo da taxa de conversão de glicose e da taxa de produção de CO_2

Obtém-se a taxa de conversão de açúcar pela derivação da equação da curva ajustada da concentração de açúcar, mostrada na Figura 5.3.

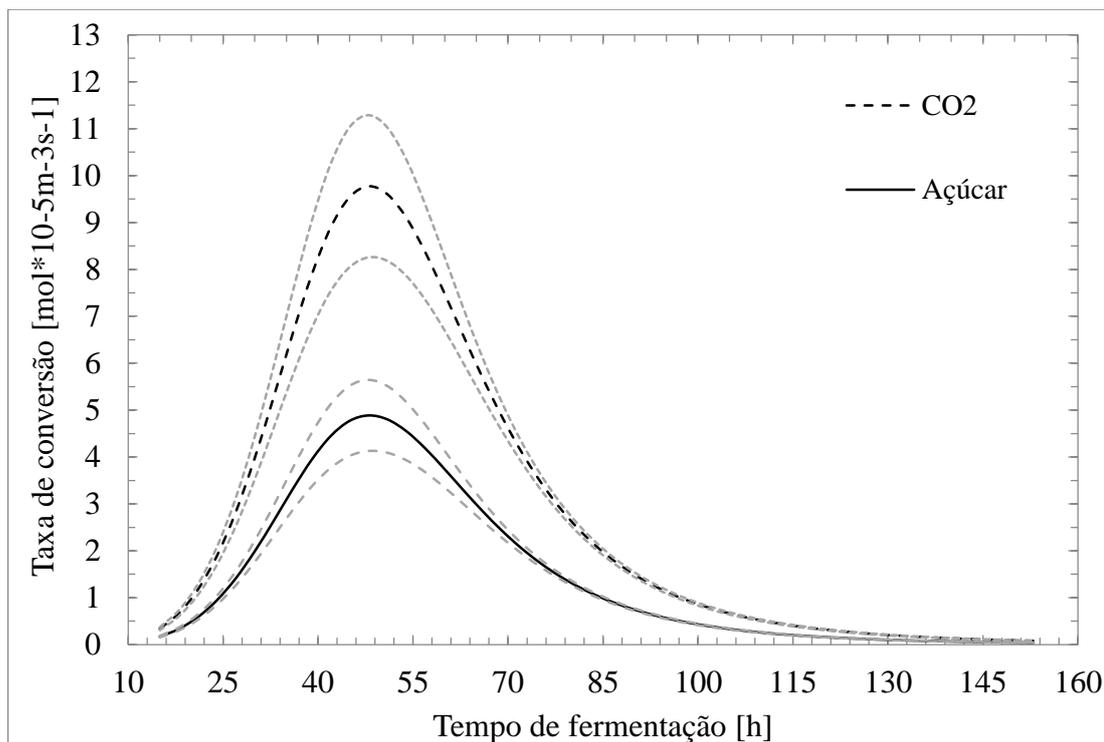


Figura 5.3 - Taxa de conversão de açúcar e produção de CO₂ ao longo do tempo com intervalo de confiança de 95%.

O gráfico apresenta as taxas de consumo de açúcar e produção de CO₂. A diferença observada entre as duas curvas diz respeito à relação existente entre reagente e produto, dada pela reação estequiométrica apresentada na Equação 2.2.

As referidas taxas de consumo foram obtidas através da Equação 3.4. O período de pico de produção de CO₂ 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 Figura 2.2.

A taxa de produção de CO₂ é utilizada como dado de entrada nas equações que determinam a quantidade de calor dissipada no processo fermentação pois representam a quantidade de açúcar efetivamente convertida no processo.

5.4 Análise das temperaturas medidas nos ensaios

A tabela abaixo mostra valores de temperatura adquiridos no eixo central do fermentador.

Tabela 5.1 - Temperaturas do fermentando medidas no eixo central do fermentador, segundo esquema apresentado na Figura 4.2.

Tempo de Fermentação [h]	Temperaturas no eixo central [°C]		
	$z = 0$ cm	$z = 15$ cm	$z = 30$ cm
30	17,20	17,18	17,13
60	17,40	17,42	17,38
90	17,02	17,05	17,00

Estes valores indicam baixas diferenças relativas, mantendo-se dentro do erro associado à medição do termopar. Assim, validando a hipótese simplificativa de que os gradientes de temperatura nesta direção podem ser desconsiderados.

A Figura 5.4 mostra a temperatura média das 3 diferentes alturas dos termopares no centro e na parede do fermentador plotadas ao longo do tempo de fermentação.

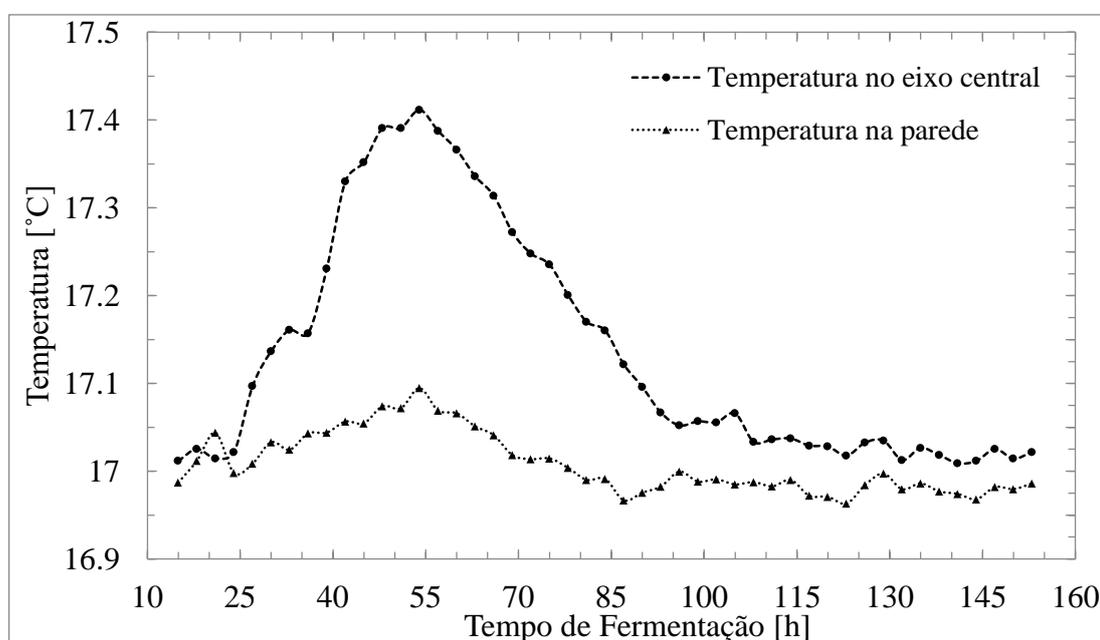


Figura 5.4 – Médias das temperaturas ao longo dos ensaios medidas no eixo central do fermentando e na superfície interna da parede do fermentado.

É possível identificar que a diferença de temperaturas médias no centro e na superfície interna da parede do fermentador atinge valores máximos de $0,3^{\circ}\text{C}$.

5.5 Cálculo do campo de temperaturas do fermentando

Na Figura 5.5 são apresentadas as curvas de dissipação térmica do termo fonte obtidas a partir dos modelos descritos pelas Equações 3.9 e 3.10, também mostra a perda de calor através da saída de CO_2 , estes valores foram obtidos através das taxas de conversão de $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ e de produção de CO_2 .

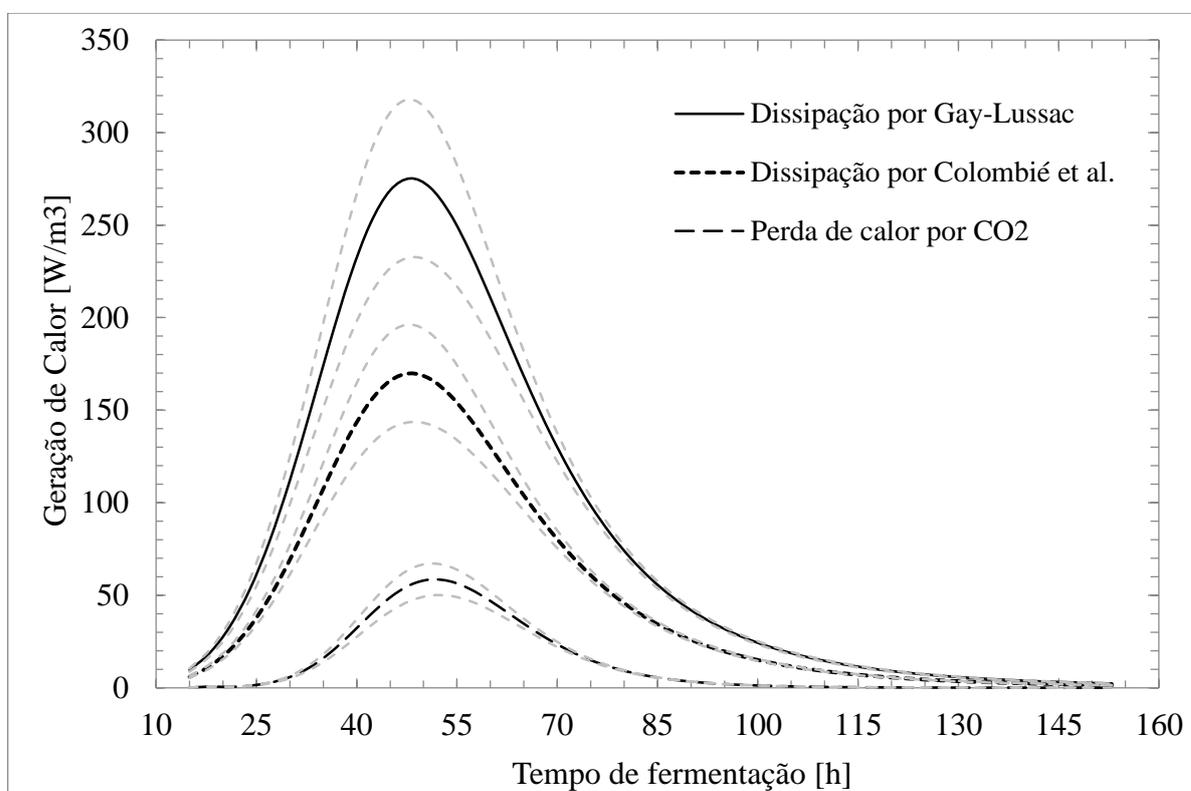


Figura 5.5 - Valores de liberação e de perda de calor ao longo do tempo com intervalo de confiança de 95%.

É possível perceber que o cálculo da geração térmica calculado através da equação de Gay-Lussac, apresentada na Equação 3.3, atinge valor máximo de $266,71 \text{ Wm}^{-3}$ em aproximadamente 45 horas. A geração térmica pelo modelo proposto por Colombié et al., 2007, Equação 3.4, apresentou comportamento semelhante com valor máximo de dissipação térmica igual a $165,43 \text{ Wm}^{-3}$.

Neste gráfico também são mostrados os valores da perda de calor através do fluxo de saída de CO_2 do líquido em fermentação. A perda de calor atinge o pico no mesmo instante em que há a maior geração de calor, atingindo valor máximo de $58,46 \text{ Wm}^{-3}$.

Combinando os valores de dissipação de calor obtidos através dos modelos propostos por Colombié et al. e por Gay-Lussac com a perda de calor pela liberação de CO_2 , chega-se ao calor efetivamente entregue ao fermentando pelo termo fonte (\dot{q}_t). Estes dados são mostrados na Figura 5.6 com suas respectivas incertezas.

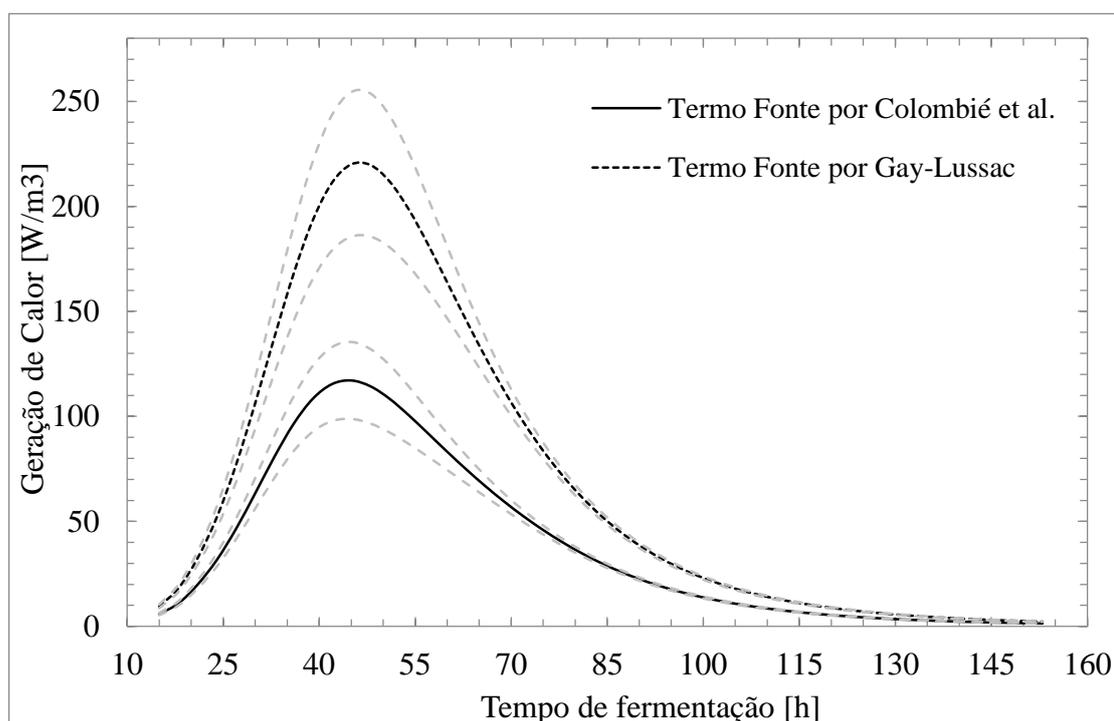


Figura 5.6 - Termo fonte calculado pelo modelo de Colombié et al. e por Gay-Lussac ao longo do tempo.

A máxima dissipação de calor foi encontrada em aproximadamente 45 horas de fermentação com valor igual a $109,41 \pm 9,51 \text{ Wm}^{-3}$ para Colombié et al. e $219,96 \pm 18,83 \text{ Wm}^{-3}$ para Gay-Lussac. 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 Equação 3.2 apresentou dissipação total de 1059,39 kJ, enquanto o modelo proposto por Colombié et. al., 2007, para a fermentação de vinho, apresentou 579,06 kJ.

É importante salientar que a diferença existente entre os dois modelos se explica pelo fato da Equação 3.2 considerar a conversão completa do açúcar fermentável. Já o modelo

proposto pela Equação 3.3 além de considerar apenas as quantidades de CO₂ efetivamente produzidas, também apresenta ajustes realizados de forma semi-empírica.

As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam o comportamento dos perfis de temperatura ao longo do tempo calculados através dos modelos térmicos M2 e M3.

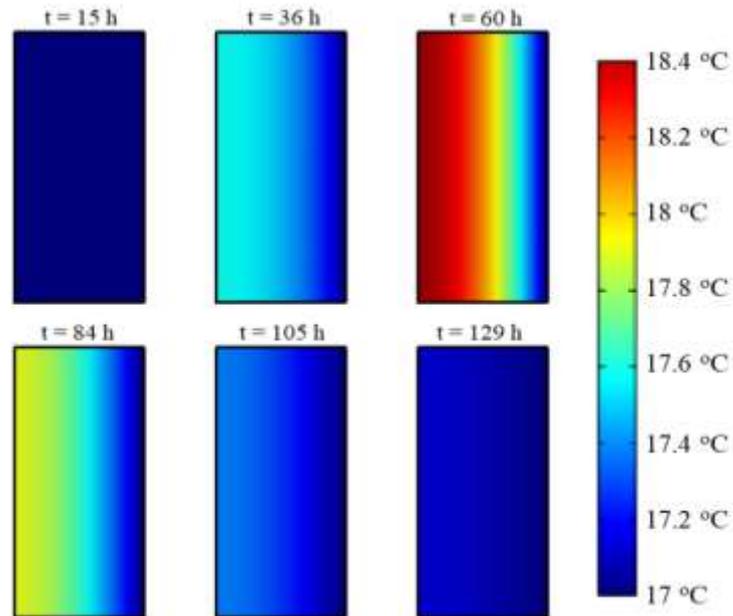


Figura 5.7 – Perfil de temperatura para seção $0 \leq r \leq 0,2$ m ao longo do tempo calculado pelo modelo térmico M2.

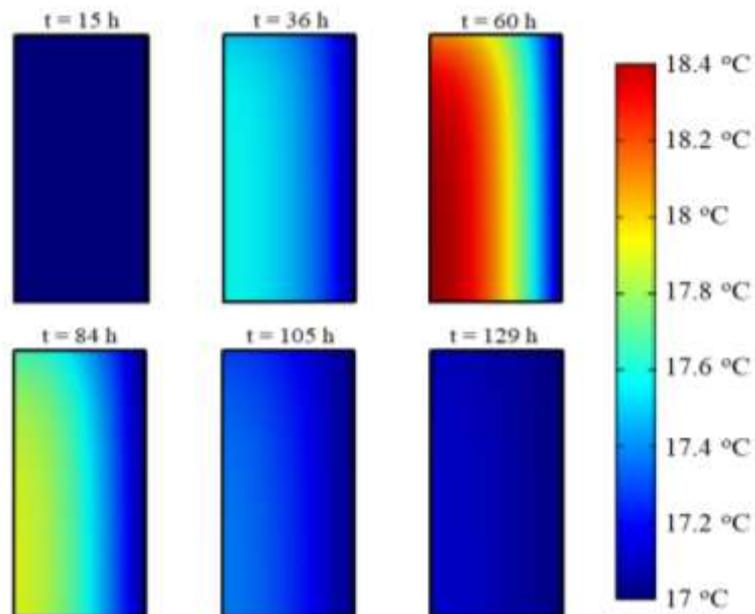


Figura 5.8 – Perfil de temperatura para seção $0 \leq r \leq 0,2$ m ao longo do tempo calculado pelo modelo térmico M3.

A Figura 5.9 apresenta os resultados das simulações, onde são mostradas as temperaturas médias do eixo central do fermentador ao longo do tempo.

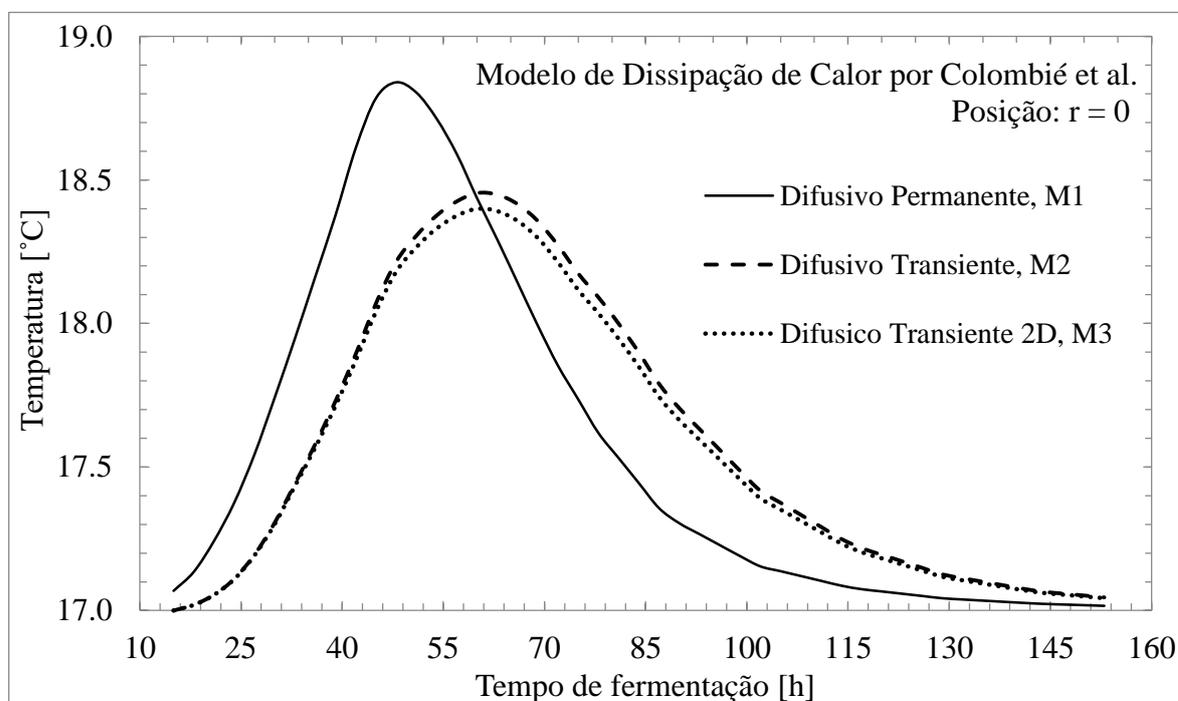


Figura 5.9 - Comparativo entre a temperatura média no eixo central do fermentador ao longo do tempo a partir dos modelos térmicos propostos.

Nas primeiras 15 horas a atividade das leveduras é pouco significativa, pois corresponde ao período de adaptação das leveduras, após este período inicia-se de fato a fermentação.

A Figura 5.9, apresenta a média das temperaturas calculadas no eixo central do fermentador utilizando os modelos térmicos propostos. O modelo difusivo permanente, M1, que atingiu a maior temperatura em 45 horas de fermentação com valor de 18,71 °C. O modelo difusivo transiente, M2, apresentou maior temperatura em 60 horas de fermentação com valor de 18,44 °C. No modelo difusivo transiente 2D, M3, a maior temperatura calculada foi de 18,35 °C em 58 horas de fermentação.

Percebe-se uma redução na temperatura máxima atingida pelos modelos transientes em relação ao modelo permanente. Isto mostra a influência do termo inercial na análise térmica do fenômeno, reduzindo as diferenças de temperatura e deslocando o ponto de máxima temperatura.

Comparando os modelos M2 e M3 é possível perceber que a imposição de uma condição de contorno de convecção natural alterou muito pouco os valores de temperatura no eixo central do fermentador.

5.6 Comparação dos resultados

A Figura 5.10 apresenta as temperaturas da parede interna do fermentador obtidas experimental na bancada de ensaio comparadas a temperatura prescrita utilizada como condição de contorno nas simulações.

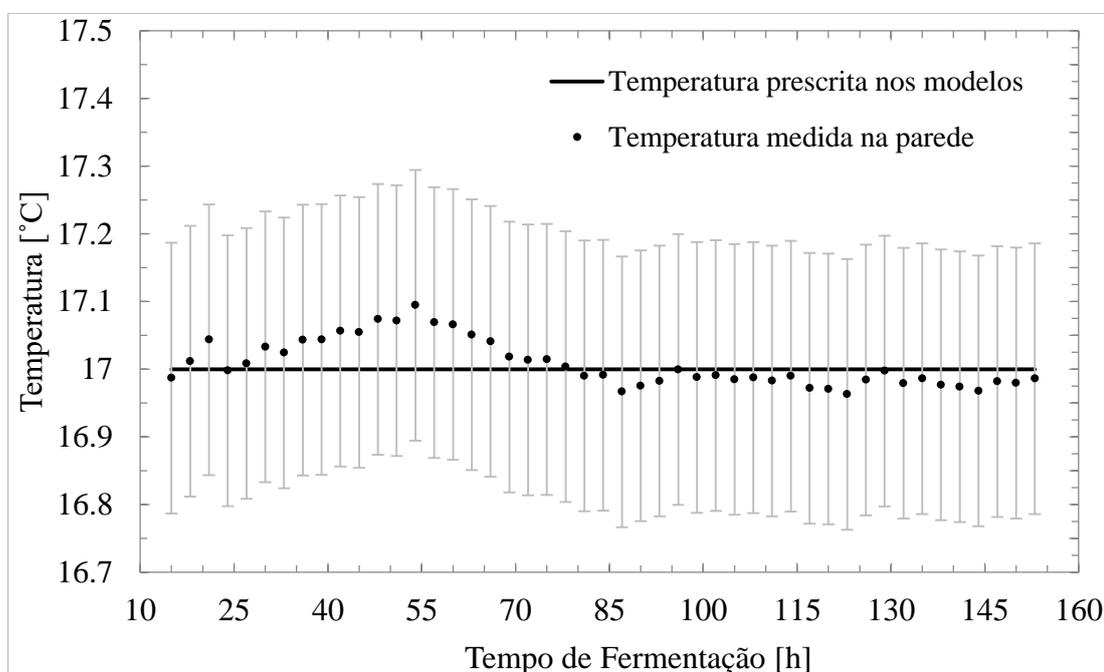


Figura 5.10 - Comparação das temperaturas na parede do fermentador com a temperatura utilizada na condição de contorno dos modelos térmicos.

Percebe-se que a temperatura prescrita utilizada na condição de contorno das simulações superestima a capacidade de manter a condição de contorno na bancada de ensaios. Durante os ensaios esta diferença foi atribuída a incerteza de medição dos termopares e por esta razão a condição de contorno de temperatura prescrita manteve-se válida.

Na Figura 5.11 são apresentadas os valores de temperaturas no centro do fermentador comparando os resultados das simulações e os dados obtidos através dos termopares.

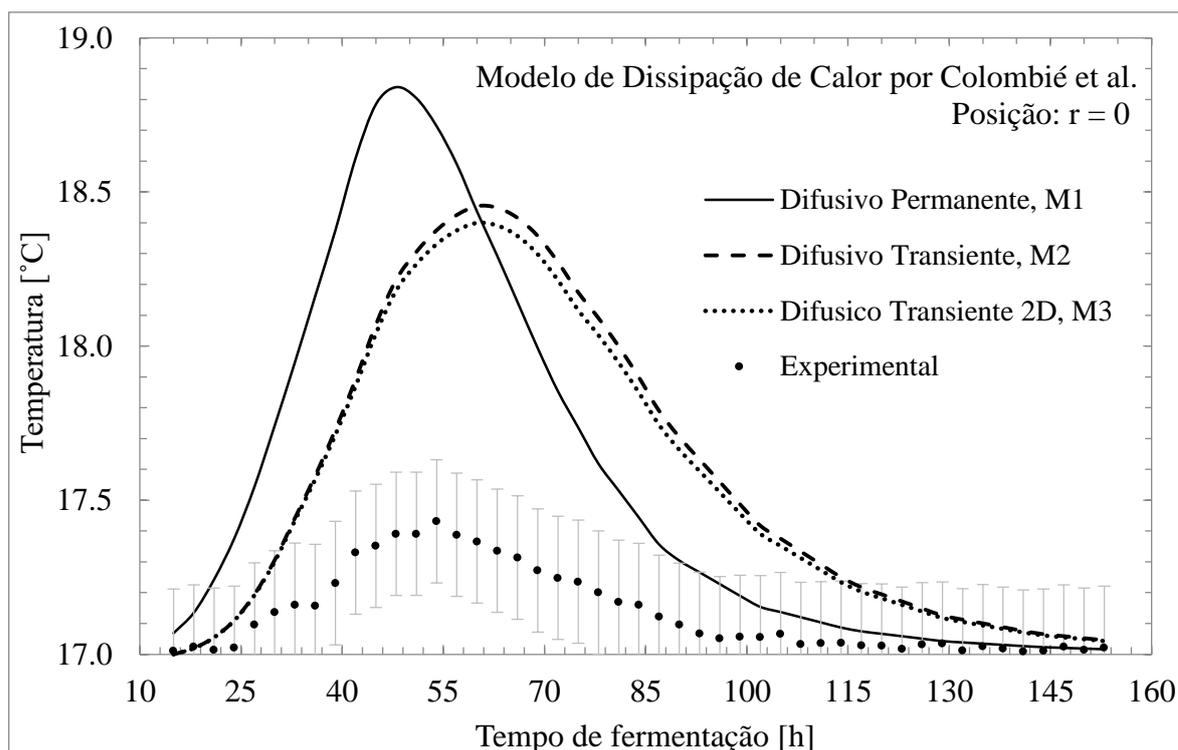


Figura 5.11 - Comparação das temperaturas médias do centro do fermentador calculadas pelos modelos propostos e as temperaturas medidas experimentalmente com sua incerteza.

Os resultados dos modelos térmicos apresentaram valores superiores aos dados experimentais, que pode estar associado aos valores de geração de calor na fermentação explorados neste trabalho (Gay-Lussac e Colombie et al.).

Outro fator a ser apontado, é a formação de bolhas pela produção do CO_2 que aumentam a movimentação do fermentando impondo uma condição de convecção forçada.

Além disso, foi desconsiderada a movimentação do líquido devido à convecção natural imposta pelas diferenças de massa específica causada pelo aquecimento do líquido e pela criação de novas espécies.

A movimentação do líquido aumenta a troca de calor contribuindo para a homogeneização das temperaturas e das concentrações do fermentando.

5.7 Ajuste do modelo de liberação de calor

Neste trabalho é explorada a proposição de um ajuste no modelo de geração térmica inicialmente proposto por Gay-Lussac, 1815, e posteriormente ajustado por Bouffard, 1985, Malherbe, 2004, e Colombié et al., 2007.

A fim de aproximar as temperaturas obtidas a partir dos modelos térmicos propostos com aquelas medidas no experimento, foi proposta uma equação para determinação da liberação de calor no processo.

Com base na literatura, o valor de liberação de calor durante a fermentação dada pela equação de Gay-Lussac ainda é discutido. O valor encontrado no modelo utilizado por Colombié et al., 2007, foi ajustado empiricamente para a liberação de calor em vinho utilizando parâmetros de interesse para a produção desejada.

Para o caso estudado neste trabalho o valor da geração térmica foi particularizado conforme os valores de temperaturas medidos experimentalmente. Através de um algoritmo de otimização implementado a partir do roteiro de cálculo utilizado neste trabalho chegou-se aos resultados expressos nas Equações 5.1 e 5.2.

$$\dot{q}_{f(t)} = 38 \frac{dC_6H_{12}O_6}{dt} \quad (5.1)$$

$$\dot{q}_{f(t)} = 19 \frac{dCO_2}{dt} \quad (5.2)$$

O termo derivativo da Equação 5.1 representa a taxa de consumo de glicose em $\text{molm}^{-3}\text{s}^{-1}$, o termo derivativo da Equação 5.2 representa a taxa de produção de CO_2 também em $\text{molm}^{-3}\text{s}^{-1}$. As constantes que multiplicam os termos de taxa de conversão e produção tem unidade de kJmol^{-1} .

Na Figura 5.12 é apresentada a curva de dissipação térmica calculada em comparação com a perda por liberação de CO_2 .

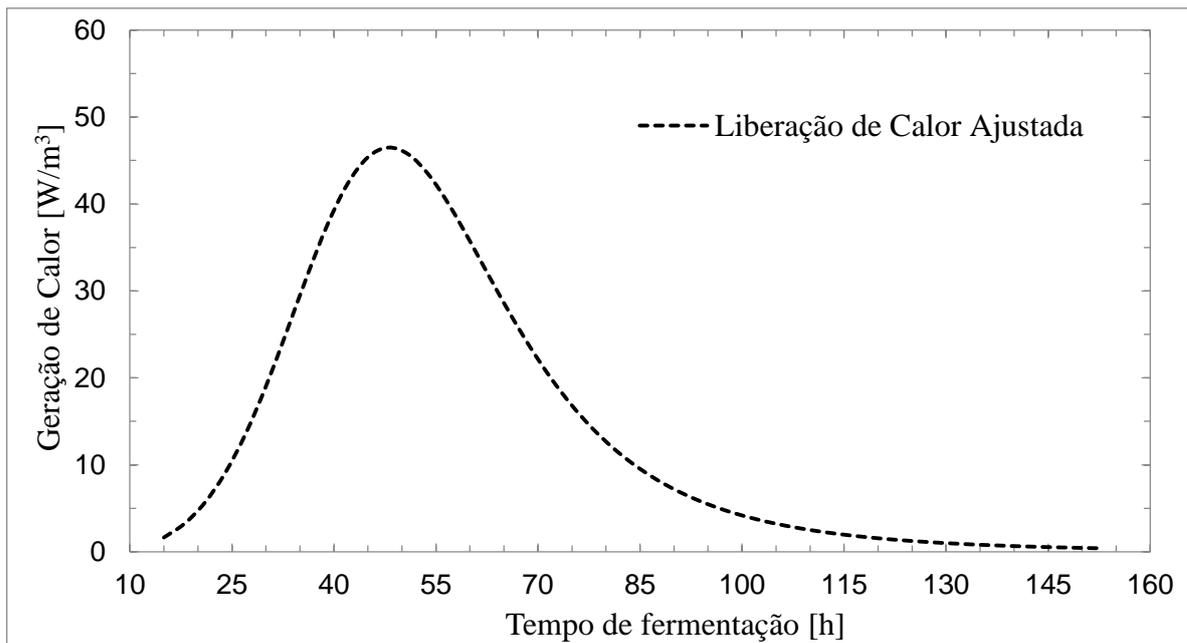


Figura 5.12 - Valores de dissipação térmica calculada pelo modelo ajustado e perda de calor pela liberação de CO_2 .

O valor máximo de dissipação térmica foi de $49,87 \text{ Wm}^{-3}$. Isto indica que a energia total liberada durante o processo foi de 213 kJ.

A figura a seguir mostra a comparação das temperaturas calculada a partir do modelo térmico M3, utilizando como dado de entrada a dissipação térmica ajustada.

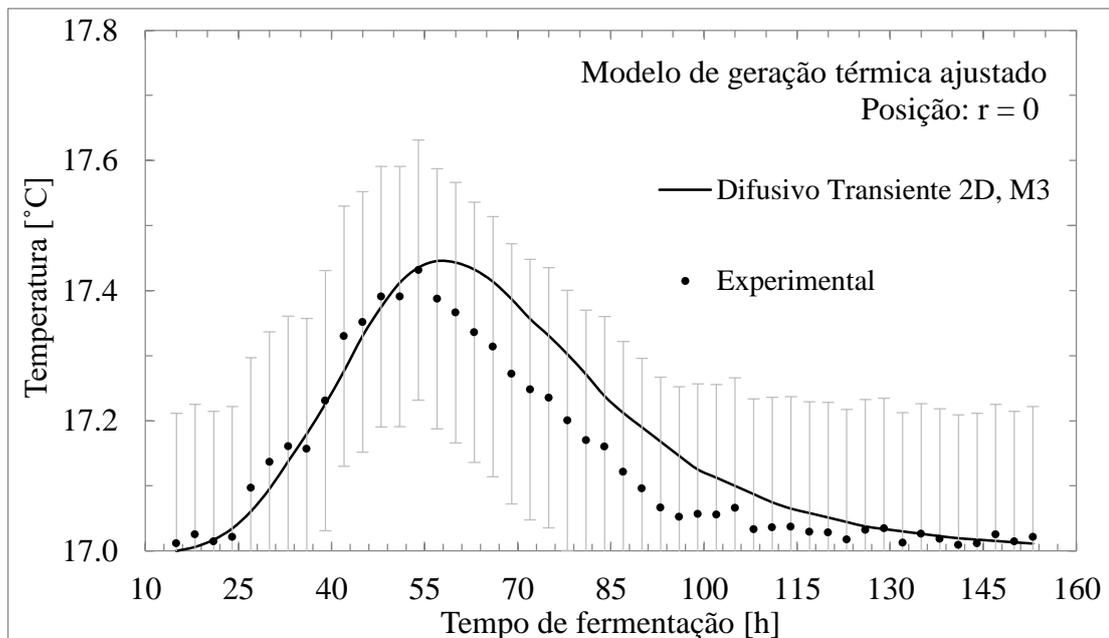


Figura 5.13 - Comparação das temperaturas no eixo central com as temperaturas calculadas pelo modelo M3 com termo fonte ajustado.

Estes resultados mostraram-se satisfatórios, apresentando valores próximos às temperaturas medidas.

A figura abaixo mostra a média das temperaturas em z ao longo do raio do fermentador no instante de maior temperatura.

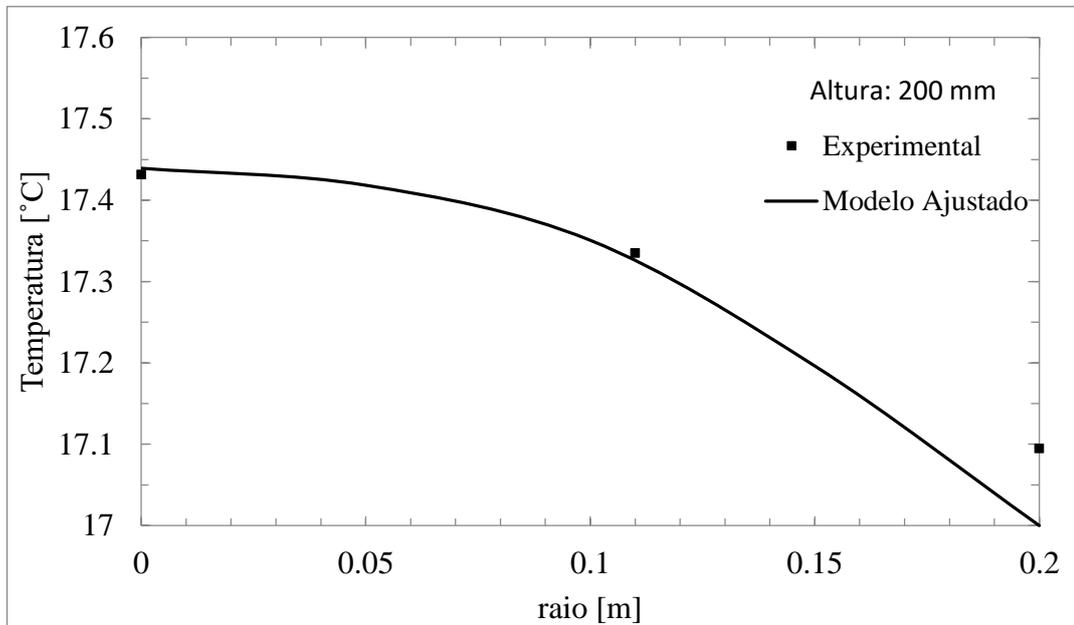


Figura 5.14 - Comparação do perfil de temperaturas calculado pelo modelo difusivo transiente bidimensional com termo fonte ajustado e temperaturas medidas experimentalmente.

5.8 Considerações sobre o modelo ajustado

O modelo ajustado está diretamente ligado as incertezas de medição dos termopares utilizados, além disso as hipóteses simplificativas aplicadas também exercem grande influência nestes resultados.

Nos experimentos realizados a diferença de temperatura máxima foi de 0,3 °C, este resultado foi replicado com a proposição do modelo ajustado. A expectativa é que este modelo possa ser generalizado para outros casos.

Ao extrapolar este modelo para um tanque de fermentação utilizado em microcervejarias a partir da metodologia e dos dados de concentração utilizados neste trabalho, foi calculada a temperatura média do eixo central.

Um tanque de fermentação regular com capacidade de fermentar 2000 litros de cerveja possui diâmetro de 1,6 metros e altura de 2,2 metros, a temperatura média do eixo central estimada é de 19,3 °C.

Assim, a diferença de temperatura média entre o centro do fermentador e a parede é igual a 2,3 °C, esta diferença de temperatura é significativa para a alteração das reações metabólicas das leveduras.

5.9 Conclusões parciais

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos com as medições experimentais e os resultados computacionais obtidos através da aplicação de modelos térmicos.

Inicialmente, os cálculos da dissipação térmica utilizando equações presentes na literatura apresentaram valores máximos de $109,41 \pm 9,51 \text{ Wm}^{-3}$ para Colombié et al. e $219,54 \pm 18,83 \text{ Wm}^{-3}$ para Gay-Lussac. A dissipação energética total foi calculada como a integral no tempo das curvas de dissipação térmica dos modelos, apresentando valores de $579,06 \pm 50,35 \text{ kJ}$ e $1059,39 \pm 92,12 \text{ kJ}$, respectivamente.

Estes valores serviram de entrada para três modelos térmicos difusivos. As temperaturas máximas calculadas foram de $18,71 \pm 0,26 \text{ °C}$ por M1 e $18,44 \pm 0,18 \text{ °C}$ por M2, e $18,3544 \pm 0,17 \text{ °C}$ por M3. Os modelos que consideraram o termo transiente apresentaram comportamento semelhante ao encontrado experimentalmente.

As temperaturas calculadas apresentaram desvios em relação aquelas medidas experimentalmente, devido aos valores de liberação de calor encontrados na literatura e por desconsiderar a movimentação do fermentando.

Assim, a partir de um ajuste proposto no termo fonte, a dissipação térmica máxima calculada foi de $49,87 \text{ Wm}^{-3}$, e a energia total dissipada foi de 213 kJ ao longo de 160 horas de fermentação.

Com os novos valores de geração térmica, as temperaturas foram calculadas utilizando o modelo difusivo em regime transiente bidimensional. O ajuste mostrou-se satisfatório, pois as temperaturas ao longo do tempo no eixo central do fermentador e o perfil de temperaturas no ponto de maior dissipação térmica apresentaram valores muito próximos aos valores experimentais.

6 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho consistiu em quantificar a energia liberada durante o processo de fermentação e estimar o campo de temperaturas do fermentando. Para isso, foi adotada uma metodologia teórico-experimental com a construção de uma bancada experimental que permitiu a retirada de amostras ao longo da fermentação.

A partir da análise química de amostras retiradas durante a fermentação foram estimadas as quantidades de calor liberado durante o processo, utilizando modelos de geração térmica presentes na literatura. Estes valores foram utilizados como entrada em dois modelos térmicos para avaliação do campo de temperaturas no interior do fermentador.

Os cálculos da geração térmica utilizando equações presentes na literatura apresentaram valores máximos de $109,41 \pm 9,51 \text{ Wm}^{-3}$ para Colombié et al. e $219,54 \pm 18,83 \text{ Wm}^{-3}$ para Gay-Lussac. A dissipação energética total foi calculada como a integral no tempo das curvas de dissipação térmica dos modelos, apresentando valores de $579,06 \pm 50,35 \text{ kJ}$ e $1059,39 \pm 92,12 \text{ kJ}$, respectivamente

Os valores de dissipação térmica serviram como dados de entrada para três modelos térmicos difusivos, um em regime permanente (M1), um segundo em regime transiente (M2) e um terceiro, também em regime transiente, considerando uma distribuição de temperaturas em duas dimensões. No modelo M1, a maior temperatura calculada foi de $18,71 \pm 0,26 \text{ }^\circ\text{C}$ no ponto de pico de dissipação em 45 horas de fermentação. Já no modelo M2, a maior temperatura foi de $18,44 \pm 0,18 \text{ }^\circ\text{C}$ em 58 horas de fermentação. E por fim, no modelo M3 a maior temperatura foi de $18,35 \pm 0,17 \text{ }^\circ\text{C}$ também em 58 horas de fermentação. As diferenças entre os resultados torna clara a influência do termo acumulativo na análise, reduzindo o valor máximo de temperatura e deslocando-o para um tempo posterior.

Quando estes valores foram comparados à curva experimental, que apresentou maior temperatura de $17,42 \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ em 57 horas de fermentação, percebe-se uma diferença significativa. Isto ocorreu principalmente devido a dois fatores, o primeiro é de que os modelos teóricos consideram apenas a transferência de calor por difusão, e o segundo é o fato de que o valor de liberação de calor na fermentação ainda é discutido.

Por fim, foi proposto um ajuste no termo fonte, Eqs. 5.1 e 5.2, com o intuito de aproximar os resultados dos cálculos aos dados obtidos experimentalmente na bancada de ensaios. Nele foi proposto um ajuste na quantidade de calor liberada pela conversão de cada

mol de glicose (ou CO_2), assim a dissipação térmica máxima calculada foi de $11,41 \text{ Wm}^{-3}$, e a energia total dissipada foi de 385 kJ ao longo de 160 horas de fermentação.

O ajuste mostrou-se satisfatório ao utilizar o modelo térmico difusivo transiente, pois as temperaturas ao longo do tempo no eixo central do fermentador e o perfil de temperaturas no ponto de maior dissipação térmica apresentaram valores próximos aos valores experimentais. Deve-se atentar ao fato que este ajuste foi proposto em condições controladas, e está diretamente ligado à incertezas de medição imposta pelos termopares utilizados.

Para trabalhos futuros, a determinação do coeficiente de troca de calor imposto pela movimentação no interior do fermentador é fundamental para conhecer o processo e avançar para uma modelagem mais precisa e robusta do campo de temperaturas.

Além disso, é pertinente realizar a análise do fenômeno em volumes maiores possibilitando a observação mais clara da distribuição de temperaturas e dos efeitos inerciais do processo, assim como uma análise da dissipação térmica para avaliar a escalabilidade dos modelos utilizados neste trabalho.

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 e o calor dissipado durante o processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ávila, Akie K. et al.; **“Comparação da estimativa de incerteza de medição na determinação de cobre por espectrometria de absorção atômica com chama por diluição gravimétrica e volumétrica”**, Revista Analytica, v. 48, 2004.

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.

Bouffard, A.; **“Détermination de la chaleur dégagée dans la fermentation alcoolique.”** Comptes rendus hebdomadaires des séances, Academie des Sciences, Paris 121:357. Progres agricole et viticole 24:345, 1985.

Buchdahl, H. A.; **“The Concepts of Classical Thermodynamics”**, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2009.

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.

Chui, Q. S.; Zucchini, R. R.; Lichtig, J.; **“Qualidade de medições em química analítica. Estudo de caso: determinação de cádmio por espectrofotometria de absorção atômica com chama”**, Química Nova, v. 24, n. 3, p. 374-380, 2001.

Colombié, S., Malherbe, S., Sablayrolles, J.; **“Modelling of heat transfer in tanks during wine-making fermentation”**, Food Control, v. 18, n.8, p. 953-960, 2007.

Declerck, Jean. **“A Textbook of Brewing”**, vol. 1. English edition, London: Chapman and Hall, p. 228, 1957.

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”**, Trabalho de Diplomação, 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, Rio de Janeiro-RJ, 643p.

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.

Lemgruber, A. P. M. et al.; **“Influência do erro de micropipetas na dosagem espectrofotométrica do ensaio de endotoxina bacteriana (LAL cromogênico) aplicável a produtos sujeitos à Vigilância Sanitária”**, Revista do Instituto Adolfo Lutz (Impresso), v. 70, n. 3, p. 368-372, 2011.

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.

McAdams, W.H.; **“Heat Transmission”**, 3rd ed. McGraw-Hill, New York, 1954, Chap 7.

McNaught, A. D., Wilkinson, A.; **“Compendium of Chemical Terminology”**, 2nd ed. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 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, 2010.

Ortiz, P. R., Schneider, P. S., **“Energy Analysis of Beer Brewing under Batch Process”**. 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT), 2016, Vitória, ES.

Ozisik, M. N., **“Heat conduction”**, John Wiley & Sons, 1993.

Santos, M. S.; Ribeiro, F. de M.; **“Cervejas e refrigerantes”**, São Paulo: CETESB, v. 58, 2005.

Sebrae, **“Potencial de Consumo de Cervejas no Brasil”**, <http://www.sebraemercados.com.br/>, 2014.

Sgarbi, W. M.; **“Análise térmica do processo de fermentação alcoólica não isotérmica em fermentadores cilíndricos de fundo”**, Trabalho de Diplomação, Universidade Feredal do Rio Grande do Sul, 2016.

Silveira, R. G.; **“Análise térmica de sistema de refrigeração direta em fermentadores cilíndricos”**, Dissertação de Mestrado (Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências), 2009.

Skeel, R. D. and M. Berzins, **“A Method for the Spatial Discretization of Parabolic Equations in One Space Variable”**, SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, Vol. 11, 1990, pp. 1-32

Venturini Filho, W. G. **Tecnologia de cerveja**. Jaboticabal: Funep, p. 83, 2000.

White, C., Zainasheff, J., **“Yeast: the practical guide to beer fermentation”**.
Brewers Publications, 2010.