

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

MYLLENA LUIZA FREITAS FERREIRA

**OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM PROCESSO FERMENTATIVO
PARA PRODUÇÃO DE CERVEJA UTILIZANDO SIMULAÇÃO DINÂMICA E
ANÁLISE EXERGÉTICA**

**BELO HORIZONTE - MG
2023**

MYLLENA LUIZA FREITAS FERREIRA

**OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM PROCESSO FERMENTATIVO PARA
PRODUÇÃO DE CERVEJA UTILIZANDO SIMULAÇÃO DINÂMICA E ANÁLISE
EXERGÉTICA.**

Defesa de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química.

Linha de Pesquisa: Engenharia de sistemas em processos

Orientadora: DSc Andréa Oliveira Souza da Costa.

BELO HORIZONTE – MG
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM PROCESSO FERMENTATIVO PARA PRODUÇÃO DE CERVEJA UTILIZANDO SIMULAÇÃO DINÂMICA E ANÁLISE EXERGÉTICA"

Myllena Luiza Freitas Ferreira

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos à obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA**.

306ª DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26 DE MAIO DE 2023 POR:



Documento assinado eletronicamente por **Andrea Oliveira Souza da Costa, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 26/05/2023, às 10:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Erika Cristina Cren, Coordenador(a) de curso**, em 26/05/2023, às 10:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Suzimara Reis da Silva, Usuária Externa**, em 26/05/2023, às 10:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Esly Ferreira da Costa Junior, Professor do Magistério Superior**, em 26/05/2023, às 10:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2324368** e o código CRC **A7F0CBBE**.

AGRADECIMENTOS

Ao finalizar essa etapa tão importante da minha jornada acadêmica, sinto-me profundamente grata.

Em primeiro lugar, quero agradecer a Deus, por sempre ter me guiado da melhor maneira e me permitido concluir mais uma etapa da minha vida.

Aos meus pais Vandréia e Fábio, que são meu porto seguro e que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus irmão Heitor e Miller, por todo amor e palavras de carinho.

Aos demais familiares, por todo apoio.

Aos meus orientadores Andréa e Esly, por todo o conhecimento transmitido, paciência, dedicação e boa vontade. Tudo isso foi fundamental para a concretização deste trabalho e para o meu amadurecimento como estudante e pesquisadora.

Aos colegas do Laboratório de Modelagem e Otimização de processos da UFMG pela disponibilidade, paciência e troca de conhecimento.

Ao Capes pela concessão da bolsa de Mestrado.

Aqueles que não mencionei mas que fizeram parte dessa jornada, meu sincero agradecimento. Cada gesto de apoio, cada palavra de incentivo e cada demonstração de carinho foram importantes nessa caminhada.

Que a vida nos reserve muitas outras conquistas e que possamos está em busca sempre dos nosso sonhos.

RESUMO

A fermentação desempenha um papel fundamental na fabricação da cerveja, e neste estudo, exploramos uma abordagem inovadora para otimizar esse processo vital. Nosso objetivo principal foi realizar uma simulação dinâmica das concentrações dos elementos-chave da cerveja, com foco na otimização do perfil de temperatura, bem como uma análise exergética para avaliar a eficiência geral do sistema. Para alcançar esses objetivos, utilizamos modelos cinéticos e técnicas de otimização, aproveitando dados disponíveis na literatura para propor e avaliar uma simulação matemática abrangente do processo de fermentação. Quando certos parâmetros essenciais não estavam prontamente disponíveis na literatura, empregamos uma rotina de otimização para estimá-los. Os resultados nos forneceram valores significativos para esses parâmetros, com K_x atingindo 59,1341 g/L e t_{lag} com um valor de 0,3264 horas. Após obter esses parâmetros cruciais, validamos a simulação matemática do processo de fermentação. Utilizando o algoritmo *Particle Swarm Optimization (PSO)*, alcançamos um perfil de temperatura otimizado para o fermentador. Nossa função objetivo foi dupla: minimizar o tempo de fermentação e garantir que as concentrações dos subprodutos (diacetil e acetato de etila) permanecessem dentro dos limites aceitáveis. Como resultado desse aprimoramento, conseguimos reduzir o tempo de fermentação em 17,5 horas em comparação com o desempenho da cervejaria WEST, além de aumentar a concentração de etanol. Além dos resultados notáveis em termos de tempo e concentração, também conduzimos uma análise exergética para avaliar a eficiência do sistema como um todo. Os resultados revelaram uma eficiência satisfatória de 85%, indicando um desempenho robusto e um sistema sustentável. A quantidade de exergia destruída que afetou o processo de fermentação foi baixa, representando apenas 14% do total, o que ressalta ainda mais a eficiência de nosso método. Para finalizar, vale destacar que nosso processo fermentativo alcançou um rendimento de 0,45 grama de etanol por grama de glicose consumida, destacando a eficácia e potencial de nossa abordagem. Esses resultados demonstram o impacto significativo de nossa simulação dinâmica e otimização no aprimoramento do processo de fermentação, contribuindo para a produção de cervejas de alta qualidade de maneira mais eficiente e sustentável.

Palavras-chave: Fermentação; otimização; modelo cinético; análise exergética.

ABSTRACT

Fermentation plays a fundamental role in beer production, and in this study, we explored an innovative approach to optimize this vital process. Our main goal was to perform a dynamic simulation of the concentrations of key beer components, with a focus on optimizing the temperature profile, as well as an exergy analysis to assess the overall system efficiency. To achieve these objectives, we used kinetic models and optimization techniques, leveraging available data in the literature to propose and evaluate a comprehensive mathematical simulation of the fermentation process. When certain essential parameters were not readily available in the literature, we employed an optimization routine to estimate them. The results provided significant values for these parameters, with K_x reaching 59.1341 g/L and t_{lag} having a value of 0.3264 hours. After obtaining these crucial parameters, we validated the mathematical simulation of the fermentation process. Using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, we achieved an optimized temperature profile for the fermenter. Our objective function was twofold: to minimize the fermentation time and ensure that the concentrations of by-products (diacetyl and ethyl acetate) remained within acceptable limits. As a result of this enhancement, we were able to reduce the fermentation time by 17.5 hours compared to the performance of WEST Brewery, while also increasing the ethanol concentration. In addition to remarkable results in terms of time and concentration, we also conducted an exergy analysis to evaluate the efficiency of the system as a whole. The results revealed a satisfactory efficiency of 85%, indicating robust performance and a sustainable system. The amount of destroyed exergy that affected the fermentation process was low, representing only 14% of the total, further highlighting the efficiency of our method. Finally, it is worth noting that our fermentation process achieved a yield of 0.45 grams of ethanol per gram of consumed glucose, highlighting the effectiveness and potential of our approach. These results demonstrate the significant impact of our dynamic simulation and optimization on enhancing the fermentation process, contributing to the production of high-quality beers in a more efficient and sustainable manner.

Keywords: Fermentation; optimization; kinetic model; exergetic analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 - Total de estabelecimento industrial registrado. Fonte: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, (2022).	19
Figura 3.2 - Etapas da produção da cerveja. Fonte: Bassoli, 2017.	22
Figura 3.3 - Produção do mosto. Fonte: Adaptada de Rogério e Moretti (2008).	23
Figura 3.4 - Produção da cerveja. Fonte: Adaptada de Rogério e Moretti (2008).	23
Figura 3.5 - Tanque de fermentação. Fonte: Beerequipment, 2020.	25
Figura 3.6 - Esquema do processo considerado no modelo cinético. Fonte: Adaptada de Rodman et al., (2016).	27
Figura 3.7 - Perfil de temperatura ideal de Rodman et al., (2016). Fonte: Adaptado de Rodman et al., (2016).	38
Figura 3.8 - Perfil de temperatura de Carrilo- Ureta et al., (2001). Fonte: Adaptada de Carrilo- Ureta et al., (2001).	38
Figura 3.9 - Perfil de temperatura de Xião et al., (2004). Fonte: Adaptada de Xião et al., (2004).	39
Figura 3.10 - Perfil genérico de temperatura industrial. Fonte: Adaptada de Rodman et al. (2016).	46
Figura 4.11 - Esquema da metodologia dividido em 3 partes.	52
Figura 4.12 - Perfil de temperatura isotérmica (13°C) e industrial de Rodman et al., (2016). Fonte: Adaptada de Rodman et al., (2016).	54
Figura 5.13 - Comparação entre o processo de simulação relatado por Rodman et al., (2016) e processo de simulação obtido neste estudo considerando um processo isotérmico (temperatura à 13°C). Fonte: Próprio autor.	61
Figura 5.14 - Concentrações de espécies do modelo do autor deste trabalho com a simulação do perfil de temperatura industrial de Rodman et al., (2016). Fonte: Próprio autor.	63
Figura 5.15 - Perfil de temperatura ideal deste estudo. Fonte: Próprio autor.	66
Figura 5.16 - Modelo de fermentação com perfil ótimo de temperatura: (a)-(c) Perfis deste estudo. Fonte: Próprio autor.	67
Figura 5.17 - Eficiência racional ao longo do tempo calculada neste estudo. Fonte: Próprio autor.	71
Figura 5.18 - Análise do rendimento do processo ao longo do tempo.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Classificação de alguns tipos de cerveja.	20
Tabela 3.2 - Constante de Arrhenius estimadas por Rodman et al., (2016).	30
Tabela 3.3 - Fases da fermentação dos açúcares do malte em relação à temperatura.	34
Tabela 3.4 - Defeitos de perfil gerados por controle da temperatura.	35
Tabela 3.5 - Análise entre os artigos que otimizaram o processo fermentativo da cerveja.	40
Tabela 3.6 - Condições iniciais da simulação dinâmica da fermentação da cerveja.	48
Tabela 3.7 - Variáveis do artigo em estudo (Rodman et al., 2016).	48
Tabela 3.8 - Taxas de diacetil determinadas experimentalmente.	48
Tabela 4.9 - Valores dos parâmetros utilizados por Rodman et al., 2016) e neste estudo.	56
Tabela 4.10 - Exergia química específica ($ex_{quí}^o$) dos compostos encontrados na literatura	57
Tabela 5.11 - Valores de Kx e tlag em temperaturas isotérmicas e não isotérmicas deste estudo.	59
Tabela 5.12 - Parâmetro estimado pelo autor deste trabalho.	64
Tabela 5.13 - Desempenho ideal do perfil de fermentação em Rodman et al. (2016).	65
Tabela 5.14 - Desempenho dos perfis de temperatura de Rodman et al. (2016), de WEST Brewery e deste estudo	68
Tabela 5.15 - Resultados da exergia química específica $ex_{quí,i}^o$ de compostos orgânicos puros sólidos e líquidos	69
Tabela 5.16 - Resultados das exergias químicas específicas para entrada e saída deste estudo ...	69
Tabela 5.17 - Valores dos parâmetros de desempenho exergéticos obtidos neste estudo.	70

LISTA DE SIGLAS

ABV	Álcool por volume
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
PIB	Produto Interno Bruto
EDO	Equações diferenciadas ordinárias
SA	Recozimento simulado
GA	Algoritmo genético
ACS	Algoritmo do sistema de colônia de formigas
I	Irreversibilidades
IST	Índice de sustentabilidade termodinâmica
C	Carbono
N	Nitrogênio
O	Oxigênio
S	Enxofre

LISTA DE SÍMBOLOS

1. Nomenclatura

A_i	Constante de Arrhenius (espécie i)	[k]
B_i	Constante de Arrhenius (espécie i)	[K^{-1}]
C_i	Concentração (espécie i)	[K^{-1}]
X_{act}	Concentração de biomassa ativa	[gL^{-1}]
X_{dead}	Concentração de biomassa morta	[gL^{-1}]
X_{lag}	Concentração de biomassa latente	[gL^{-1}]
X_{inc}	Concentração de biomassa inoculada	[gL^{-1}]
X_{sus}	Concentração de biomassa suspensa	[gL^{-1}]
Y_{EA}	Fator estequiométrico de produção de acetato de etila	[gL^{-1}]
K_e	Constante de afinidade de etanol	[gL^{-1}]
K_s	Constante de afinidade de açúcar	[gL^{-1}]

K_x	Constante de afinidade da biomassa	$[gL^{-1}]$
t_{lag}	Duração de fase latente da fermentação	$[h]$
μ_{AB}	Taxa de consumo de diacetil	$[g^{-1}h^{-1}L^{-1}]$
μ_{DY}	Taxa de produção de diacetil	$[g^{-1}h^{-1}L^{-1}]$
μ_L	Taxa de ativação de células específica	$[g^{-1}h^{-1}L^{-1}]$
μ_{SD}	Taxa de sedimentação de células mortas	$[g^{-1}h^{-1}L^{-1}]$
μ_x	Taxa de crescimento celular específico	$[g^{-1}h^{-1}L^{-1}]$
μ_S	Taxa de consumo de açúcar	$[g^{-1}h^{-1}L^{-1}]$
μ_e	Taxa de produção de etanol	$[g^{-1}h^{-1}L^{-1}]$
μ_{DT}	Taxa máxima de morte celular específica	$[g^{-1}h^{-1}L^{-1}]$
μ_S	Taxa de consumo de açúcar	$[g^{-1}h^{-1}L^{-1}]$
f	Fator de inibição da fermentação	$[gL^{-1}]$

2. Variáveis

ex	Exergia específica	$[kJ.kg]$
Ex	Exergia	$[kJ]$
t	Tempo	$[h]$
P	Pressão	$[atm]$
T	Temperatura	$[^{\circ}C, K]$
Q	Calor	$[Cal]$
h	Entalpia específica	$[kJ.kg^{-1}]$
S	Entropia	$[kJ.K^{-1}]$
s	Entropia específica	$[kJ.kg.K^{-1}]$
$Y_{p/s}$	Fator de rendimento	$[-]$
H	Entalpia	$[kJ.kg^{-1}]$

R	Constante dos gases	[J.mol.K]
x	Fração molar	[-]

3. Letras gregas

η	Eficiência exergetica
--------	-----------------------

4. Subscritos

dest	Destruída
e	Entrada
i	Espécie ou início
norm	Normalizada
Prod, úteis	Produtos de interesse econômico
rac	Racional
resíduo	Resíduo
ger	Geração
w	Trabalho
f	Final
r	Reação
fís.	Física
o	Estado morto parcial
mist	Mistura
quí	Química
MF	Meio fermentativo

cin.	Cinética
po	Potencial
total	Total
s	Saída
p	Rendimento
a	Concentração do produto
g	Concentração da matéria prima

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	15
2- OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA	18
3.1.1 Surgimento do setor industrial cervejeiro e seu crescimento	18
3.1.2 Processo de produção da cerveja	20
3.1.3 Fermentação	24
3.2 MODELOS CINÉTICOS NA FERMENTAÇÃO	25
3.3 DESCRIÇÃO DO MODELO DINÂMICO	28
3.3.1 Evolução da biomassa	28
3.3.2 Consumo de açúcar	31
3.3.3 Produção de álcool	32
3.3.4 Produção de subproduto	32
3.4 TEMPERATURA	33
3.5 OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO FERMENTATIVO	36
3.6 EXERGIA E RENDIMENTO	40
3.6.1 Exergia química padrão	42
3.6.2 Parâmetros exergéticos	43
3.6.3 Rendimento do processo	45
3.7 SISTEMA A SER ESTUDADO	46
3.8 ESPECIFICAÇÃO DO MODELO	49
4- METODOLOGIA	51
4.1 ETAPA 1: DESCRIÇÃO DO MODELO DINÂMICO	53
4.2 ETAPA 2: TESTES DE NOVOS ALGORITMOS	54
4.3 ETAPA 3: ANÁLISE DA EFICIÊNCIA EXERGÉTICA E DO RENDIMENTO	56
4.3.1 Modelagem termodinâmica	56
5- RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1 MODELO DO PROCESSO DE FERMENTAÇÃO	59
5.2 OBTENÇÃO DE UM PERFIL DE TEMPERATURA ÓTIMO PARA O PROCESSO DE FERMENTAÇÃO	64
5.3 ANÁLISE EXERGÉTICA DO SISTEMA E O RENDIMENTO	68
6- CONCLUSÕES	73

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
--	-----------

1- INTRODUÇÃO

O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, que regula o comércio nacional de bebidas, relata que, no Brasil, em 2021, o número de cervejarias registradas cresceu 12% em relação ao ano de 2020. Essa demanda está relacionada com o crescimento que está ocorrendo neste setor a cada ano, e por mais que tenha tido a pandemia, o mesmo continuou resiliente e passou bem pela crise. A cadeia produtiva neste setor é extensa, e o PIB foi de 2,02%, uma massa salarial de 27 bilhões por ano (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2022).

A cerveja é uma bebida obtida da fermentação alcoólica do mosto cervejeiro resultante do malte de cevada, água potável, leveduras e lúpulos (BRASIL, 2009). O teor alcoólico de uma cerveja depende do seu estilo e pode variar de 0,05% até 14,9% de álcool por volume (ABV), sendo que essa porcentagem menor geralmente é atribuída às cervejas sem álcool, e a maior porcentagem é empregada na cerveja suíça Samichlaus. Todavia, o teor alcoólico encontrado rotineiramente nas cervejas mais comuns está em torno de 4% a 5% (JUNIOR et al., 2009). O processo de fabricação da cerveja possui várias etapas, e elas são geralmente divididas em: malteação, moagem do malte, brassagem ou mosturação, filtração do mosto, fervura, resfriamento, fermentação, maturação, carbonatação e envase.

A fermentação pode ser classificada como a etapa central do processo de produção de cerveja, e é nesta etapa que as leveduras presentes no mosto promovem a conversão do açúcar em etanol e dióxido de carbono (RODMAN et al., 2016). A duração da fermentação varia de acordo com o produto procurado, podendo variar de 3 a 10 dias. Podem-se destacar 2 grandes famílias de cervejas, que são diferentes pelo seu tipo de fermentação, Lager e Ale. Cerveja tipo Ale são fermentadas em temperaturas altas (15 a 24° C) e seu processo dura em média de 3 a 5 dias. Cervejas tipo Lager são fermentadas em temperaturas baixas (8 a 15 °C) e duram em média de 7 a 10 dias (BOULTON e QUAIN, 2008).

Para as indústrias, uma diminuição nesse tempo de fermentação é sinônimo de lucratividade para as empresas. Atualmente, a necessidade de um processo fermentativo cada vez melhor e de qualidade se dá pelo alto crescimento e competitividade do mercado. As empresas cervejeiras têm buscado uma diminuição no tempo de fermentação sem afetar a qualidade do produto final, por meio de uma eficiência cada vez melhor da temperatura. Implementar inovações tecnológicas, como, por exemplo, um perfil dinâmico adequado para controlar o perfil de temperatura ao longo do tempo e eliminar possíveis variações no lote de

fermentação, garante que subprodutos indesejáveis não sejam produzidos e não ultrapassem os limites de restrições (CARILLO-URETA et al., 2003).

Os métodos de avaliação cinética para um processo fermentativo têm sido ferramentas bastante utilizadas, e vários modelos foram publicados com o intuito de aprimorar o processo. Engasser et al. (1981), Gee et al. (1988), Andrés- Toro et al. (1998), Carrilo-Ureta et al. (2001), Xião et al. (2004), Rodman et al. (2016), entre outros, desenvolveram estudos importantes para a obtenção do ponto ótimo de temperatura de uma fermentação. Além disso, vários algoritmos passaram a serem implementados na simulação dinâmica de um modelo detalhado que descreve um processo de fermentação de cerveja e são utilizados para simular alterações na temperatura do processo. Cada algoritmo desempenha um papel diferente, porém com a mesma finalidade de avaliação do sistema na busca das condições ótimas para a temperatura.

Além de todas as análises com simulações para obter eficiência na temperatura do processo fermentativo e diminuir o tempo de lote, empregar outras funções objetivo para melhorar ainda mais o desempenho do processo também traz lucratividade para as indústrias. Contudo, avaliar o sistema com ferramentas termodinâmicas, como a análise exérgica, pode aumentar ainda mais a eficiência do processo (RAMOS et al., 2019). A exergia é uma propriedade termodinâmica resultante da junção da 1ª e 2ª leis da termodinâmica. Essa análise exérgica é uma ferramenta ainda pouco explorada na literatura em processos de fermentação de cerveja e é o diferencial deste trabalho.

2- OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é propor uma rotina computacional que permita a análise detalhada do processo fermentativo da produção de cerveja. Visa-se propor uma metodologia que permita a busca da condição ótima da temperatura do processo fermentativo através de alterações nas variáveis do processo, considerando especialmente a eficiência termodinâmica do sistema.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, destacam-se:

- Criar um código computacional, baseado em um sistema de equações diferenciais ordinárias (EDOs) para a simulação do processo em diferentes condições de operação, como a temperatura, para um processo de produção de cerveja;
- Testar diferentes algoritmos de otimização para a determinação do perfil de temperatura ótimo;
- Analisar as eficiências associadas à composição química ótima do processo fermentativo, bem como as eficiências exergéticas, empregando diferentes funções objetivo;
- Analisar o rendimento do sistema.

3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

3.1.1 Surgimento do setor industrial cervejeiro e seu crescimento

Uma das produções mais antigas do homem é a cerveja, cuja origem se deu na região da Mesopotâmia, com seus primeiros indícios há cerca de 4.000 A.C., no período neolítico. A produção da cerveja difundiu-se lado a lado com as culturas de milho, cevada e centeio, sendo produzida pelos romanos, gregos, pelos povos da Suméria, do Egito, entre outros. Na época da evolução das civilizações, houve também uma forte relação entre a história da cerveja e o pão, por serem oriundos dos mesmos ingredientes e fazerem parte da alimentação e da cultura de vários povos (MEUSSDOERFFER, 2009).

No Brasil, a cerveja chegou por meio da Família Real portuguesa, e sua produção se iniciou em 1836. Nessa época, as cervejarias que foram surgindo produziam em pequena escala, devido ao fato de ser difícil encontrar matéria-prima e à precariedade do controle da fermentação. No final do século XIX, começaram as produções em escala industrial, e foram fundadas duas grandes empresas que dominam o mercado até os dias de hoje. São elas: a Companhia Cervejaria Brahma e a Antártica Paulista, que se tornaram AB InBev, a empresa que possui o maior número de marcas de cerveja no mundo (SANTOS, 2003). Essas cervejas são consideradas tradicionais, pois são conhecidas como industrializadas, ou seja, são produzidas em grande escala.

Existem também as cervejas artesanais, as quais começaram a ter uma ênfase maior no mercado cervejeiro somente em 1996, embora seu conceito já circule no Brasil há muitos anos. Elas são produzidas em menor escala e feitas com foco na qualidade. Esse tipo de cerveja geralmente não é filtrada, não é pasteurizada e não é adicionado a ela produto químico para acelerar o processo de fermentação (CAPECE et al., 2018).

Não há grande diferença entre a rota de produção artesanal de cerveja e a produção industrial. É possível afirmar que a cerveja artesanal se caracteriza por ser mais pura, ou seja, com uma concentração maior somente de malte, empregando pouco ou nenhum adjunto amiláceo em sua fórmula, o que não influencia muito nas etapas de produção ou nos equipamentos envolvidos no processo (CASTRO, 2014). A produção das cervejarias artesanais é mais focada no tipo Ale, e seus consumidores são atraídos por optarem por

sabores diferentes. Já as indústrias cervejeiras se concentram mais em produzir cervejas do tipo Lager, por obter um perfil mais homogêneo e neutro (MASTANJEVIC et al., 2019).

Atualmente, a cerveja é a bebida alcoólica mais consumida, inclusive, no Brasil, e esse setor vem crescendo cada vez mais (RODMAN et al., 2016). Porém, em 2021, houve uma desaceleração no número de registros de novas cervejarias, contudo, o crescimento não foi interrompido, como mostrado na Figura 3.1.

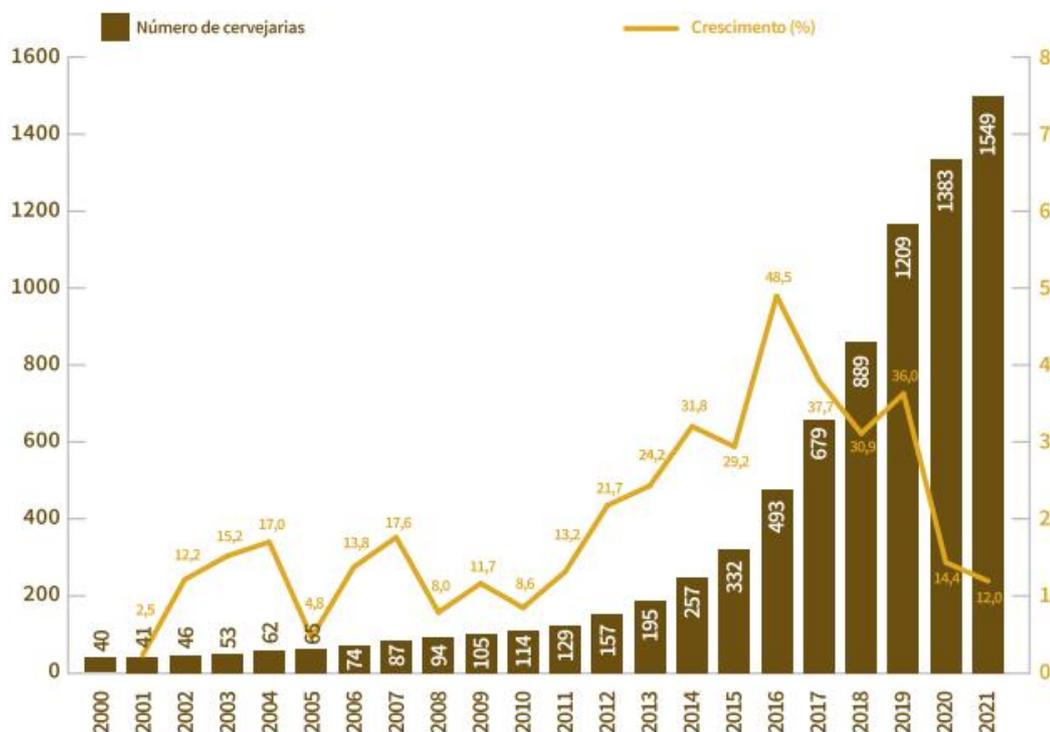


Figura 3. 1 - Total de estabelecimento industrial registrado. Fonte: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, (2022).

A desaceleração pode ser explicada pelo grande crescimento do setor registrado em anos anteriores, como no ano de 2016, que, em relação ao histórico dos últimos 20 anos, foi o ano em que houve o maior número de registros de cervejarias, que representou um crescimento de 48,5%. Esse crescimento contínuo na indústria cervejeira resultou em uma demanda cada vez maior por produtos de cerveja (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2022).

O mercado cervejeiro no Brasil se torna um dos mais potentes em produção, ficando atrás apenas da China e dos Estados Unidos, ou seja, é o 3º maior produtor de cerveja no mundo. Esse setor movimenta mais de 160 bilhões por ano e tem um papel fundamental na

geração de empregos, pois tem empregado mais de 2,7 milhões de pessoas no país (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA CERVEJEIRA, 2022).

3.1.2 Processo de produção da cerveja

Na produção de cerveja, o processo de fermentação pode ser feito de forma contínua ou em batelada. Essas duas formas tem suas vantagens e desvantagens, e a diferença operacional mais relevante entre elas é que o processo contínuo exige um maior nível de automação para que tudo funcione sem falhas. Além disso, o processo contínuo é uma operação mais simples, porém exige mais cuidados para que não haja contaminação por bactérias. Já o processo em batelada está menos sujeito a contaminação, e, caso ela ocorra, o tratamento do mosto é mais simples (CNPEM, 2017).

A produção de cerveja é um processo bioquímico com um único pré-requisito, que é o uso dos mesmos quatro ingredientes essenciais para qualquer tipo. São eles: a fonte de amido, levedura, lúpulo e água. As combinações variadas desses compostos são responsáveis pela identidade de cada cerveja (BENACCHIO et al. 2023).

Segundo Rodman et al. (2016), qualquer alteração nos ingredientes ou no processo produtivo gera uma enorme variedade de sabores, podendo escolher o estilo de cerveja que mais agrada ao paladar do consumidor: teor alcoólico (alto ou médio), aroma, cor (escura ou clara) e fator IBU (quanto maior o fator IBU, mais amarga é a cerveja). De acordo com os estilos, as cervejas podem ser denominadas como Pilsen, Export, Lager, Dortmunder, Munchen, Bock, Malzbier, Ale, Stout, Porter, Weissbier, entre outros, como mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Classificação de alguns tipos de cerveja.

Cerveja	Origem	Coloração	Teor alcoólico	Fermentação	IBU
Pilsen	Alemanha	Clara	Médio	Baixa	12 IBU
Dortmunder	Alemanha	Clara	Médio	Baixa	50 IBU
Stout	Inglaterra	Escura	Alto	Geralmente Baixa	45 IBU
Porter	Inglaterra	Escura	Alto	Alto ou Baixa	18 - 35 IBU
Weissbier	Alemanha	Clara	Médio	Alta	17 IBU
Munchen	Alemanha	Escura	Médio	Baixa	20 IBU
Bock	Alemanha	Escura	Alto	Baixa	22 IBU
Malzbier	Alemanha	Escura	Alto	Baixa	7,5 IBU
Ale	Inglaterra	Clara/Avermelhada	Médio/Alto	Alta	15 - 30 IBU
Ice	Canadá	Clara	Alto	Baixa	12 IBU

Fonte - Júnior et al. (2009).

O modelo de fermentação, alta ou baixa, influencia o estilo de cerveja obtida ao final do processo, como representado na Tabela 3.1. A cerveja de alta fermentação é obtida pela ação de leveduras que se eleva à superfície do líquido na fermentação. A cerveja de baixa fermentação acontece quando as leveduras são depositadas no fundo da cuba do fermentador durante ou após a fermentação. A temperatura é a variável mais importante no sistema, e é por meio dela que se define também o estilo da cerveja, pois é a partir de um perfil de temperatura estabelecido que se saberá qual será o tipo de fermentação (alta ou baixa) (ROSA et al., 2015, HOFFMANN et al., 2016). Por isso, frisa-se a importância de obter um perfil ótimo de temperatura.

Existem cervejas sem álcool e com álcool, e a porcentagem alcoólica vai depender do estilo de cerveja a ser produzida. A cerveja sem álcool é referente ao seu teor alcoólico ser menor que 0,5% em volume; contudo, não é obrigatório ser expresso o teor da embalagem. As cervejas com álcool já apresentam um teor alcoólico igual ou superior a 0,5% em volume, sendo necessário ser colocada a quantidade exata na embalagem. As cervejas industriais mais populares (Brama, Skol, Original, entre outras) têm o teor alcoólico que varia de 4 a 5% (JÚNIOR et al., 2009).

Todo o processo da cerveja é realizado por 10 etapas, que pode ser dividido em: malteação, moagem do malte, brassagem ou mosturação, filtração do mosto, fervura, resfriamento, fermentação, maturação, carbonatação e envase (Figura 3.2). A malteação consiste na germinação da cevada. Na moagem, o malte é triturado para expor o endosperma à ação das enzimas. A brassagem ou mosturação é o cozimento do malte para extrair os açúcares necessários para a fermentação da cerveja em temperaturas controladas. A filtração é necessária para a separação da parte líquida da parte sólida, deixando a cerveja mais límpida. Na fervura, acontece a esterilização do mosto, com a eliminação de contaminantes, sendo esta a fase em que o lúpulo é adicionado. A fermentação é uma operação essencial na produção da cerveja, quando a levedura é adicionada ao mosto lupulado, e os açúcares liberados do grão durante a germinação são fermentados em etanol e álcoois superiores. A carbonatação é realizada para gerar uma quantidade maior de CO₂ antes de envasar, e, por fim, tem-se o envase, também chamado de engarrafamento das cervejas (RODMAN et al., 2016).

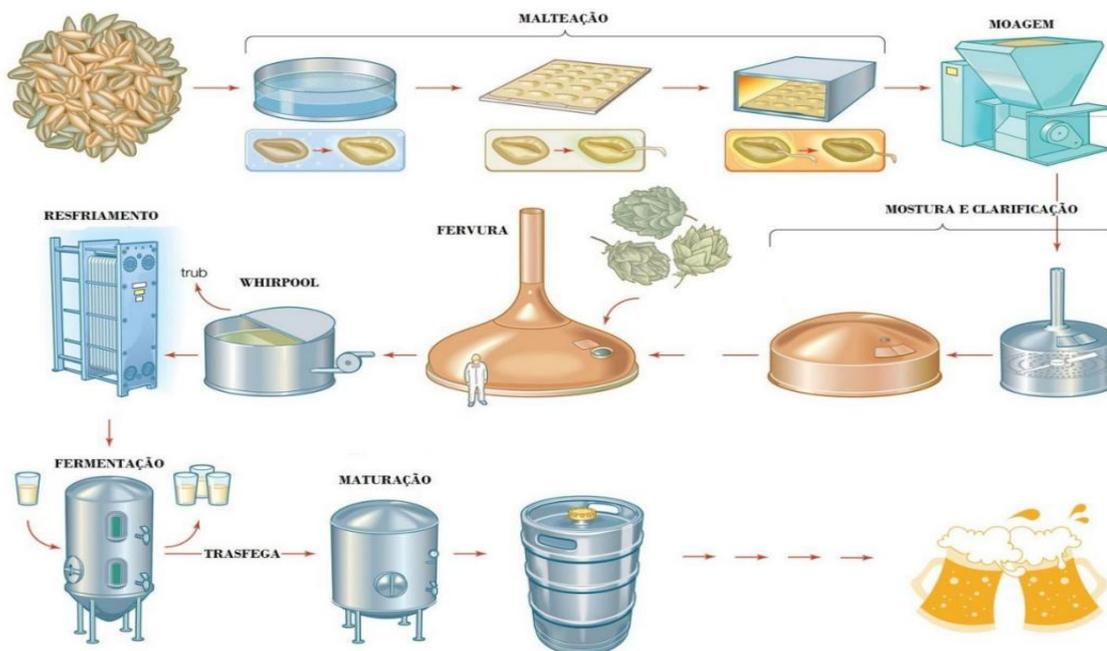


Figura 3.2 - Etapas da produção da cerveja. Fonte: Bassoli, 2017.

É apenas na etapa da fermentação que se obtém realmente o produto cerveja. No entanto, anteriormente à fermentação, o mosto é preparado, e, para essa preparação, são necessárias as etapas de mosturação (malte + água), fervura (adição do lúpulo) e filtragem. Para ilustração, observa-se, na Figura 3.3, o modo de preparo. O mel ilustrado na Figura 3.3 é apenas um adjunto para dar sabor diferente à cerveja, mas esse adjunto não é adicionado a todas, ou, quando são, podem ser adjuntos diferentes, sendo estes mais atribuídos às cervejas artesanais. O brix, também apresentado na Figura 3.3, refere-se ao número de gramas de sacarose presente por 100 gramas de líquido, ou seja, o valor é medido de 1 a 100 e é utilizado para calcular o potencial teor alcoólico aproximado. Já a temperatura de 96 °C é utilizada para que ocorra o processo de fervura. Na Figura 3.4 mostra a etapa da fermentação, que é a etapa principal da produção de cerveja e a estudada neste trabalho. Nesta etapa, é adicionada a levedura no mosto e são elas que trabalham para obter o produto final. Posteriormente, vem a etapa da carbonatação e é conduzida durante alguns dias até que seja obtido o produto final.

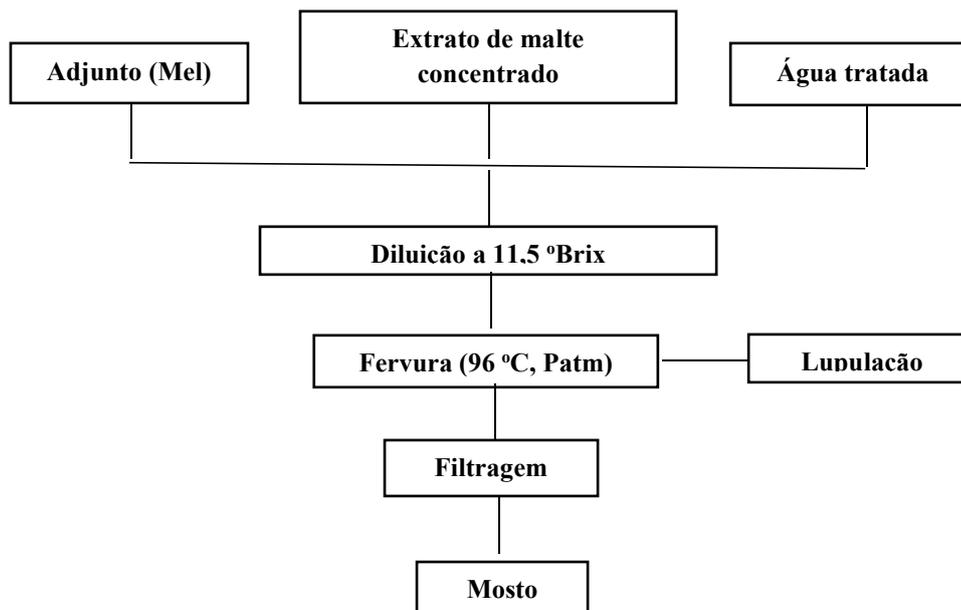


Figura 3.3 - Produção do mosto. Fonte: Adaptada de Rogério e Moretti (2008).

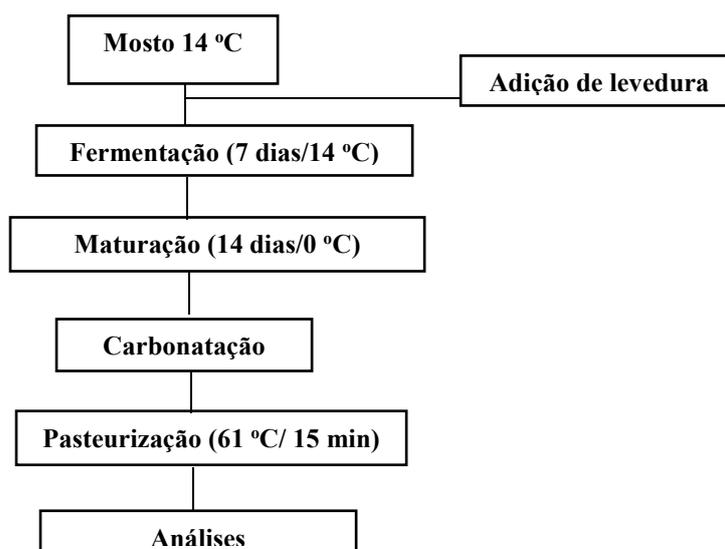


Figura 3.4- Produção da cerveja. Fonte: Adaptada de Rogério e Moretti (2008).

No processo de carbonatação, a maioria das cervejas possuem adição extra de gás, mas uma boa parte do gás é oriundo da fase da fermentação da cerveja, já que, a levedura, ao metabolizar os açúcares presentes no mosto para produção de energia e reprodução, libera etanol e dióxido de carbono (CO₂).

As temperaturas, dias/tempo de fermentação e maturação adequadas vão depender do tipo de cerveja a ser produzida. Logo, os valores adicionados nas Figuras 3.3 e 3.4 são apenas ilustrativos e servem como estimativas da ordem de grandeza destas variáveis operacionais.

3.1.3 Fermentação

Na fabricação de uma cerveja, a fermentação pode ser considerada a etapa central do processo. Nela são adicionadas as leveduras ao mosto cuja função é fazer a conversão do açúcar em etanol e dióxido de carbono. Durante a fermentação várias substâncias químicas são formadas em pequenas concentrações por uma diversidade de reações em presença de mais de 600 espécies, e algumas favorecem para o sabor da cerveja (RODMAN et al., 2016).

Além de ser uma etapa central, o processo fermentativo é muito delicado e qualquer parâmetro que não esteja adequado, como a temperatura do sistema, por exemplo, pode atrapalhar o crescimento da levedura e a taxa metabólica (RODMAN et al., 2016).

A fermentação pode ser realizada em altas ou em baixas temperaturas, e esse fator vai depender dos tipos de cervejas que serão fabricadas (Tabela 3.1). Entretanto, quando as temperaturas durante o processo fermentativo da cerveja são excessivamente altas, podem ocorrer reduções nas taxas de componentes voláteis e de etanol, resultando em um aumento na formação de compostos indesejáveis, além de promover o crescimento bacteriano. Já as temperaturas muito baixas podem fazer com que as leveduras não tenham energia o suficiente para trabalhar e podem resultar em uma fermentação muito longa, conseqüentemente, alguns sabores e aromas que seriam expelidos junto com o dióxido de carbono permanecerão por todo o processo fermentativo. Deste modo, ter um controle da temperatura entre 8 a 24 °C no processo fermentativo é fundamental, para que nenhum subproduto (diacetil e acetato de etila) ultrapasse os limites de restrições e o produto final não tenha sabores indesejáveis. No entanto, para obter uma cerveja de qualidade tem que se atentar para todos esses requisitos e para assegurar que a levedura não seja desnaturada, podendo assim cumprir seu papel adequadamente (TRELEA et al., 2001).

A fermentação geralmente ocorre em tanques de aço inoxidável, cilindro cônico encamisado (Figura 3.5), pois esta geometria promove a circulação das bolhas de CO₂ para agitar e misturar os conteúdos ajudando a manter a temperatura uniforme no vaso. Além disso, esta geometria dificulta que o produto fique retido na parede do reator (GONÇALVEZ et al., 2021).



Figura 3.5 - Tanque de fermentação. Fonte: Beerequipment, 2020.

Para garantir uma fermentação apropriada e de qualidade, há necessidade de implementação de um perfil dinâmico adequado ao longo do tempo para eliminar possíveis variações de temperatura do lote e obter uma cerveja desejável como citado anteriormente (CARILLO-URETA et al., 2003).

Tendo em vista que, a competitividade entre as indústrias cervejeiras tem aumentado cada vez mais, há uma grande necessidade que as cervejarias operem seus processos de produção de forma eficaz. Melhorar qualquer estágio da produção, ainda mais se for a fermentação, terá um efeito significativo na lucratividade e no sucesso da empresa.

3.2 MODELOS CINÉTICOS NA FERMENTAÇÃO

O uso de métodos de avaliação cinética tem sido amplamente divulgado na literatura como ferramentas valiosas para o monitoramento de processos fermentativos. Engasser et al. (1981) foram um dos primeiros autores a utilizar esse tipo de abordagem, empregando as vias bioquímicas fundamentais como base para o modelo cinético de fermentação de cerveja. Eles incorporaram a formação de compostos de sabor e aroma no modelo, e o perfil desses

compostos foi analisado a partir da taxa de crescimento da levedura. Com o passar dos anos, outros autores refinaram o trabalho de Engasser et al. (1981) utilizando outros fatores intrínsecos.

Gee et al. (1988) adaptaram o trabalho publicado por Engasser et al. (1981) e consideraram fatores adicionais para o controle otimizado de uma fermentação, incluindo o efeito da temperatura nas expressões de taxa cinética. Utilizando a Cinética de Monod, eles descreveram o consumo de glicose, maltose e maltotriose e obtiveram três equações diferenciais ordinárias (EDO). No entanto, eles não avaliaram os compostos de sabor e aroma, como exemplificado por Engasser et al. (1981).

Os modelos cinéticos desenvolvidos por Engasser et al. (1981) e Gee et al. (1988) constituem a base para o modelo de crescimento do processo fermentativo. No entanto, em 1994, Gee et al. expandiram o modelo original, adicionando novos compostos. Os autores incluíram a modelagem da liberação de dióxido de carbono (CO_2) e a limitação do crescimento celular devido à disponibilidade de ácidos graxos insaturados e lipídios. Na publicação inicial de Gee et al. (1988), o crescimento da levedura era dependente da absorção de açúcares, como maltose, glicose e maltotriose. Porém, posteriormente, os autores consideraram que o crescimento das leveduras era limitado pelos ácidos graxos insaturados, que se tornavam esgotados durante a fermentação anaeróbia. Para contornar esse efeito, foi incorporado um mecanismo de inibição simples na taxa de crescimento celular. Esse fator de inibição é uma forma de controlar a produção do produto final.

Na produção de cerveja, várias reações bioquímicas ocorrem, e as enzimas presentes no mosto do malte participam dessas reações. São as enzimas que degradam os polissacarídeos amilose e amilopectina, o amido do malte, em glicídios menores, maltose e glicose, que são a matéria-prima para a levedura na etapa da fermentação. O mecanismo de inibição é utilizado para inibir a enzima, ligando-se ao seu sítio ativo e impedindo a formação do complexo substrato-enzima, ou seja, evitando a transformação do amido em açúcar e, conseqüentemente, impedindo que as leveduras tenham sua matéria-prima para a produção de etanol. Dessa forma, a via bioquímica é desligada, e a quantidade de produto final é controlada.

Posteriormente, outros pesquisadores propuseram modelos cinéticos diferentes dos mencionados anteriormente para descrever o processo fermentativo na produção de cerveja. Andrés-Toro et al. (1998) foram um desses autores que utilizaram abordagens distintas e desenvolveram um modelo que se baseia na previsão do aumento das leveduras antes de computar o crescimento das espécies químicas. O modelo proposto por Andrés-Toro et al.

(1998) considera cinco variáveis: substrato (Cs), etanol (Ce), biomassa (X), acetato de etila (Cea) e diacetil (Cdy). Nesse método, os três açúcares não foram considerados separadamente, sendo representados por um único composto de açúcar. A biomassa é dividida em três fases de crescimento: fase de células latentes (Xlag), fase de células ativas (Xativa) e fase de células mortas (Xmorta), conforme ilustrado na Figura 3.6.

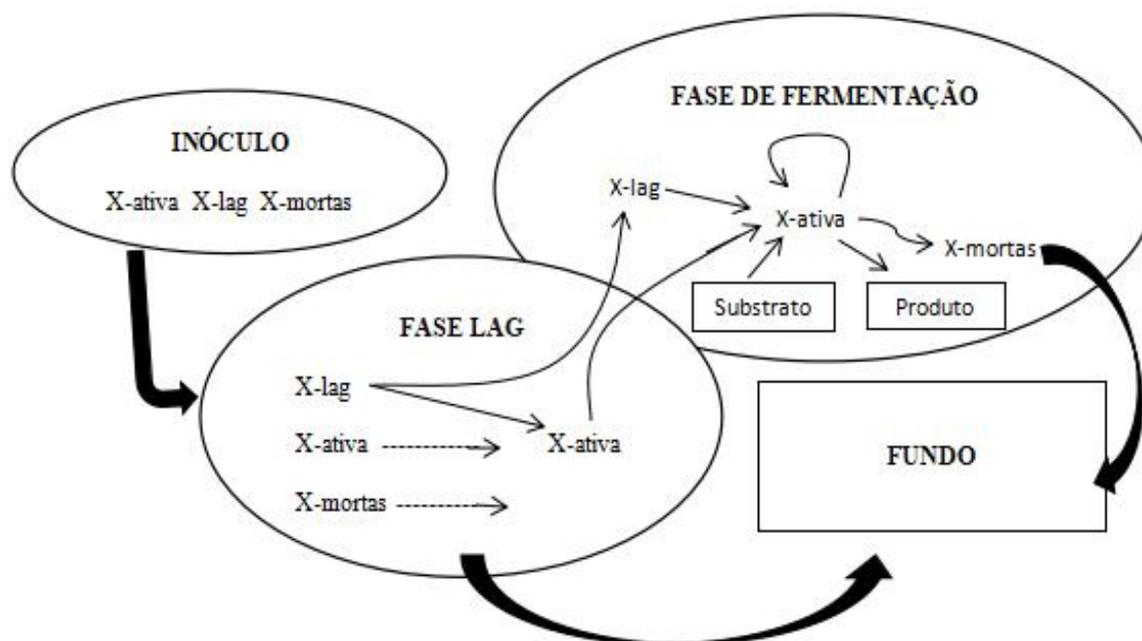


Figura 3.6 - Esquema do processo considerado no modelo cinético. Fonte: Adaptada de Rodman et al. (2016).

Na Figura 3.6, é possível verificar que o processo fermentativo envolve as fases de células latentes, ativas e mortas. O processo fermentativo possui duas etapas distintas: a primeira é a fase de latência, em que as células latentes (Xlag) são inoculadas, mas não promovem a fermentação. Somente na segunda etapa, a fase de fermentação, é que o processo fermentativo é iniciado, com cerca de 80% das células latentes se transformando em células ativas, responsáveis pelo consumo de açúcares fermentáveis. A partir deste ponto, os processos de estabilização e ativação, que foram ativados na primeira fase, ocorrem simultaneamente. As células ativas se multiplicam e crescem com o tempo, mas uma parte delas morre (Xmorta).

A evolução de cada tipo de célula dentro do sistema é calculada por meio de equações diferenciais ordinárias (EDOs), sendo as taxas de crescimento determinadas pela Equação de Arrhenius (Equação 3.1).

$$\mu_{io} = \exp\left(A_i + \frac{B_i}{T(t)}\right) \quad (3.1)$$

As constantes A_i e B_i são parâmetros obtidos a partir de dados experimentais em diferentes temperaturas, estimados por Rodman et al. (2016), que podem ser encontrados na Tabela 3.2. A Equação de Arrhenius (Equação 3.1) utiliza essas constantes para calcular as taxas de crescimento das células durante o processo fermentativo em diferentes temperaturas, em que T representa a temperatura em graus Celsius e t o tempo em horas.

3.3 DESCRIÇÃO DO MODELO DINÂMICO

Neste trabalho, será utilizado o modelo cinético proposto por Andrés-Toro et al. (1998) para a simulação do processo fermentativo. A escolha desse modelo deve-se ao fato de que ele foi empregado na metodologia dos autores Rodman et al. (2016), que são a referência base deste trabalho, conforme será explicado detalhadamente na seção de metodologia.

3.3.1 Evolução da biomassa

De acordo com Andrés-Toro et al. (1998), o inóculo ($X_{inoc.}$) de todas as fases de crescimento consiste em aproximadamente 50% de células mortas, 48% de células em estado lag e somente 2% de células ativas, conforme indicado pela Equação 3.2.

$$0,02.X_{ativa}(0) + 0,48.X_{lag}(0) = X_{morta}(0) = 0,5.X_{inoc.}(0) \quad t < t_{lag} \quad (3.2)$$

Conforme descrito pela Equação 3.3, as células em estado lag, ativas e mortas foram adicionadas em suspensão no fermentador.

$$X_{sus}(t) = X_{ativa}(t) + X_{lag}(t) + X_{morta}(t) \quad (3.3)$$

As células ativas presentes no mosto são provenientes das leveduras que se converteram através de reações enzimáticas no substrato de açúcar, conforme representado pela Equação 3.4:

$$\frac{dX_{lag}}{dt} = -\mu_L(T) \cdot X_{lag}(t) \quad (3.4)$$

em que μ_L representa a taxa específica de ativação, sendo muito sensível a temperatura. A concentração de células ativas sofre alterações em virtude da ativação celular, uma vez que esta não é considerada um processo de crescimento durante a fase de latência, como indicado pela Equação 3.5.

$$\frac{dX_{ativa}}{dt} = -\frac{dX_{lag}}{dt} \quad t < t_{lag} \quad (3.5)$$

Durante a fase de latência, não é levada em conta a morte celular. Entretanto, quando as células se encontram em suspensão, são influenciadas pela taxa de sedimentação e eventualmente se deslocam em direção ao fundo do tanque, saindo da suspensão, conforme a Equação 3.6.

$$\frac{dX_{morta(t)}}{dt} = -\mu_{SD}(T,t) \cdot X_{morta}(t), \quad t < t_{lag} \quad (3.6)$$

Nessa equação, μ_{SD} representa a taxa de sedimentação das células. A densidade do mosto em qualquer tipo de fermentação está relacionada com a concentração inicial de açúcar (C_{S0}). No entanto, a taxa de sedimentação é influenciada por essa densidade, como mostra a Equação 3.7.

$$\mu_{SD} = \frac{\mu_{SD0}(T) \cdot 0,5 \cdot C_{S0}}{0,5 \cdot C_{S0} + C_e(t)} \quad (3.7)$$

A concentração do etanol é representada pela letra C_e . No início do processo de fermentação, ocorre a estabilização da taxa máxima de sedimentação de células (μ_{SD0}). A Equação 3.1 de Arrhenius é utilizada para representar a dependência da temperatura em todos os parâmetros de taxa envolvidos no processo. A Tabela 3.2 apresenta os modelos dessas taxas, que foram determinados experimentalmente por Rodmam et al. (2016), e são os parâmetros empregados para a resolução do modelo matemático proposto por Andrés-Toro et al. (1998).

Tabela 3.2 - Constante de Arrhenius estimadas por Rodman et al. (2016).

Parâmetros		Ai	Bi
Símbolos	Descrição		
μ_{SD0}	Taxa máxima de sedimentação de células	33,82	10.033,28
μ_{x0}	Taxa máxima de crescimento de célula	108,31	31.934,09
μ_{S0}	Taxa máxima de consumo de açúcar	-41,92	11.654,64
μ_{e0}	Taxa máxima de produção de etanol	3,27	-1.267,24
μ_{DT}	Taxa de morte celular específica	130,16	-38.313,00
μ_L	Taxa de ativação de célula específica	30,72	-9.501,54
$K_e=K_s$	Constante de afinidade	-119,63	34.203,95
Y_{EA}	Fator estequiométrico de produção de acetato de etila	8,92	-26.589,00

Fonte - Rodmam et al. (2016).

Durante a fase de latência, há um equilíbrio nas células suspensas, que é representado pela Equação 3.2 e combinado com a Equação 3.8.

$$\frac{dX_{sus}(t)}{dt} = - \frac{dX_{morta}(t)}{dt} \quad (3.8)$$

A Equação 3.8 descreve o término da primeira fase do processo de fermentação, ou seja, o final da fase de latência. Após o término da fase de latência, a segunda fase da fermentação é iniciada, na qual as células ativas começam a crescer. Como resultado, a suspensão de células aumenta devido ao crescimento celular e à sedimentação de células mortas, conforme descrito na Equação 3.9:

$$\frac{dX_{sus}(t)}{dt} = \mu_x(T,t) \cdot X_{ativa}(t) - \mu_{SD}(T,t) \cdot X_{morta}(t), \quad t \geq t_{lag} \quad (3.9)$$

sendo μ_{SD} taxa de sedimentação específica de células mortas. A Equação 3.10 relaciona a taxa de crescimento celular específica (μ_x) com as concentrações de etanol e açúcar, sendo que a taxa de crescimento não é linear em relação à concentração de açúcar:

$$\mu_x = \frac{\mu_{x0}(T) \cdot C_s(t)}{k_x + C_e(t)} \quad (3.10)$$

em que:

μ_{x0} = Taxa máxima de crescimento de células;

C_s = Concentração do açúcar;

K_x = Constante e afinidade da biomassa;

C_e = Concentração de etanol.

Durante a fase de fermentação, as células ativas predominam. A taxa de concentração dessas células aumenta quando há uma combinação de crescimento da ativação celular latente, da célula ativa e da morte celular ativa, conforme representado pela Equação 3.11.

$$\frac{dX_{ativa}(t)}{dt} = \mu_x(T,t).X_{ativa}(t) - \mu_{DT}(T).X_{ativa}(t) + \mu_L(T).X_{lag}(t), \quad t \geq t_{lag} \quad (3.11)$$

Durante a segunda fase da fermentação, o crescimento das células latentes é determinado pela Equação 3.4. A morte das células ativas também deve ser considerada e pode ser calculada a partir da suspensão de células mortas, como mostrado na Equação 3.12.

$$\frac{dX_{morta}(t)}{dt} = -\mu_{SD}(T).X_{morta}(t) + \mu_{DT}(T).X_{ativa}(t), \quad t \geq t_{lag} \quad (3.12)$$

A temperatura é um dos principais fatores que influenciam no processo de fermentação. Nesse sentido, a Equação 3.1 de Arrhenius é fundamental, pois ela descreve a dependência da temperatura em relação a todos os parâmetros de taxa envolvidos no processo. Em particular, a taxa de morte celular (μ_{DT}) é altamente dependente da temperatura do mosto, e os valores desses parâmetros podem ser descritos pelas informações contidas na Tabela 3.2. Além disso, é importante ressaltar que μ_{SD} é a taxa de sedimentação específica de células mortas e também contribui para o cálculo da mortalidade celular.

3.3.2 Consumo de açúcar

A principal finalidade do processo de fermentação é a conversão do açúcar em etanol e dióxido de carbono. Essa conversão é representada pela taxa de consumo do substrato, que pode ser descrita pela Equação 3.13.

$$\frac{dC_s}{dt} = \mu_s(T,t) \cdot X_{ativa}(t) \quad (3.13)$$

A cinética de Michaelis-Menten é aplicada à taxa de consumo de substrato específico (μ_s), sendo a taxa máxima (μ_{s0}) observada no momento $t=0$, conforme apresentado na Equação 3.14:

$$\mu_s = \frac{\mu_{s0}(T) \cdot C_s(t)}{K_s(T) + C_s(t)} \quad (3.14)$$

em que K_s é a constante de afinidade do açúcar; e C_s é a concentração do açúcar.

3.3.3 Produção de álcool

Durante o processo fermentativo, a taxa de produção de etanol é influenciada pela biomassa ativa, mas essa taxa não é constante e pode ser observada pelos dados de concentração. Por essa razão, é essencial incorporar um fator de inibição (f) no processo, conforme a Equação 3.15-3.17.

$$\frac{dC_e(t)}{dt} = f(t) \cdot \mu_e(T,t) \cdot X_{ativa}(t) \quad (3.15)$$

em que

$$f = 1 - \frac{C_e(t)}{0,5 \cdot C_{s0}} \quad (3.16)$$

$$\mu_e = \frac{\mu_{e0}(T) \cdot C_s(t)}{K_e(T) + C_s(t)} \quad (3.17)$$

sendo μ_{e0} a taxa máxima de produção de etanol; C_e concentração de etanol; K_e constante de afinidade do etanol; C_{s0} concentração inicial de açúcar; e C_s concentração de açúcar.

3.3.4 Produção de subproduto

Durante o processo de produção de cerveja, a presença de acetato de etila (Cea) e diacetil (Cdy) em quantidades adequadas é essencial para garantir a qualidade e sabor da bebida. Por esse motivo, as taxas de produção desses subprodutos também devem ser levadas em consideração. A taxa de produção de acetato de etila pode ser descrita por um fator estequiométrico (YEA), conforme mencionado por Gee et al. (1994), que pode ser calculado pela Equação 3.18, com parâmetros definidos na Tabela 3.2:

$$\frac{dC_{EA}(t)}{dt} = Y_{EA}(T) \cdot \mu_x(T,t) \cdot X_{ativa}(t) \quad (3.18)$$

em que Y_{EA} é fator estequiométrico de produção de acetato de etila.

A produção de diacetil é um dos primeiros subprodutos a surgir durante o processo de fermentação. Em seguida, parte desse subproduto é convertida em acetoína e 2,3-butanodiol. O modelo conceitualiza duas vias químicas para a progressão do diacetil: a primeira via mostra que sua taxa de produção é proporcional à concentração de açúcar, enquanto a segunda via mostra que a redução ou desaparecimento dessa taxa é proporcional à concentração de etanol (Equação 3.19):

$$\frac{dC_{DY}(t)}{dt} = \mu_{DY} \cdot C_s(t) \cdot X_{ativa}(t) + \mu_{AB} \cdot C_{DY}(t) \cdot C_e(t) \quad (3.19)$$

em que:

- μ_{AB} = taxa de consumo de diacetil;
- μ_{DY} = taxa de produção de diacetil;
- C_{dy} = diacetil;
- C_s = concentração de açúcar.

3.4 TEMPERATURA

O perfil de temperatura é um conjunto de valores de temperaturas que é traçado para um determinado tipo de cerveja, ele é pré-definido e estabelecido empiricamente. A intercessão mais usada em um processo fermentativo é o controle desse perfil, pois ele influenciará no comportamento dos produtos e subprodutos, podendo acarretar mudanças positivas e negativas para a cerveja, e o resultado vai depender do manuseio correto dessa variável (ANDRÉS-TORO et al., 2004). Portanto, a estimativa do perfil de temperatura é

muito importante e deve ser mais rigorosa para se obter um produto de qualidade. (SOUZA, CORIOLANO, GOLÇALVES, SOUSA, 2019).

Em um processo de produção de cerveja, a temperatura afeta a taxa de fermentação. A fermentação é ocorrida em 4 fases principais: inicial, intermediária, tumultuosa e final. Um exemplo dessa influência é relatado na Tabela 3.3 (MALHERBE, FROMION, HILGERT, SABLAYROLLES, 2004; KUNZE, 1997).

Tabela 3.3 - Fases da fermentação dos açúcares do malte em relação à temperatura.

Fases	Temperatura	Descrição
Inicial (Pegar)	Até 10,5 °C	Momento de contato da levedura com o mosto. Tem de 12 a 18h de duração.
Intermediária (Espuma baixa)	De 10,5 °C a 12 °C	As leveduras começam a se alimentar da glicose e eliminar etanol e CO ₂ ocasionando a sua multiplicação. Tem 48h de duração.
Tulmutuosa (Espuma alta)	De 12 °C a 14,5 °C	Em decorrência da intensa liberação de CO ₂ , temos a impressão da mistura está fervendo. Tem de 72 a 96h de duração.
Final	Até 6 °C	Quando a quantidade de extrato a ser consumida já foi atingida, o tanque de fermentação é aberto para que o fermento seja inativado e recolhido.

Fonte: Adaptada de KUNZE (1997).

Quando a temperatura é controlada, as reações químicas que acontecem em cada fase da fermentação da cerveja (Tabela 3.3) não prejudicam as análises sensoriais do produto. A temperatura ideal para cada etapa é aquela que se adequa a condições da levedura, pois uma temperatura abaixo da faixa mínima de trabalho da levedura pode deixá-la com pouca energia para trabalhar. Porém, uma temperatura muito alta favorece a produção de compostos indesejáveis que se torna difíceis de serem retirados, sendo eles ésteres frutados em excesso, a produção de álcoois e *off-flavours* (quando se ultrapassa o limite estabelecido) (KUNZE, 1997).

Quando o perfil de temperatura do processo não é controlado, os compostos indesejáveis, citados anteriormente, prejudicam os aromas e sabores da cerveja. Algumas cervejas ficam com gosto e cheiro de ovo podre, cheiro de gás de cozinha, sabor de queimado, entre outros. As substâncias que designam cada sabor, aparência e aroma da cerveja podem ser observados pela Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Defeitos de perfil gerados por controle da temperatura.

Aroma/Sabor/Aparência	Substância	Origem	Possíveis causas
Ovo podre	H ₂ S	Excreção de substância do fermento	Choque de temperatura do mosto /fermento. Rápido resfriamento do tanque/aumento de temperatura.
Gás de cozinha	Mercaptana	Excreção de substância do fermento	Temperatura elevada no início/durante a fermentação/Autólise do fermento
Cor alta	Carboidratos	Exposição do mosto a altas temperaturas	Temperaturas elevadas durante a malteação. Temperaturas elevada durante a etapa de fervura. Tempo de fervura a 100 °C elevada. Atraso para o início do resfriamento do mosto no envio para a adega.
Sem corpo	Dextrinas e proteínas	Falhas na curva de mosturação	Mosturação com o tempo elevado na temperatura de 62 a 64 °C adjunto com o tempo elevado na temperatura de 72 °C
Queimado	Carboidratos	Exposição do mosto a altas temperaturas	Temperatura elevada durante a etapa de fervura. Tempo de fervura a 100°C elevada.
Turvação	Proteínas	Falha no controle de temperatura na maturação	Temperatura de centrifugação alta. Temperatura elevadas na maturação.
Doce	Carboidratos	Falha na durante a fermentação	Choque térmico no fermento causando sua autólise. Interrupção do processo de fermentação por variações de temperatura durante o processo.

Fonte: KUCK, (2008); TEIXEIRA, (2009).

A produção dessas substâncias indesejáveis ocorre com a mudança da temperatura no início e durante a fermentação, porque as leveduras sofrem estresse e seu metabolismo não ocorre naturalmente. A temperatura elevada inadequada pode fazer com o que o mosto não fique concentrado no açúcar, sendo assim, ele não obedece adequadamente ao processo e, com isso, ocorre a caramelização, aumentando, conseqüentemente, a cor da cerveja. Quando há instabilidade na cerveja, a presença de proteínas que não foram retiradas durante o processo pode não ser ideal para o produto, fazendo com que ele fique turvo no final da

produção. Todos esses fatores citados anteriormente (Tabela 3.4) são provocados pelo fato de não haver um controle adequado do perfil de temperatura (KUCK, 2008; TEIXEIRA, 2009).

Considerando os aspectos listados anteriormente, é possível afirmar que o controle da temperatura durante o processo de fermentação da cerveja é essencial para o sistema. Assim, a proposta de diferentes estratégias para obter o perfil de temperatura ideal durante a fermentação da cerveja pode melhorar a produção industrial com o intuito de gerar lucros, devido à temperatura ser uma variável fundamental para que se possa acelerar o processo de produção. Por conseguinte, diminuem-se os dias em que ocorre a produção da cerveja, fazendo com que ela seja envazada e vendida mais rapidamente.

3.5 OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO FERMENTATIVO

Como previamente mencionado, um dos processos centrais na produção da cerveja é a fermentação, que pode ser operada em batelada, semibatelada ou contínua, entre outros. A operação contínua é a mais econômica, visto que seu substrato é continuamente adicionado, enquanto seu produto é removido do mesmo modo.

Para encontrar um regime operacional ótimo ou pseudo-ótimo, pode ser utilizada uma estratégia de otimização baseada em rotinas computacionais. Três razões podem ser apontadas para que haja um controle do processo: garantir ou melhorar a estabilidade, extinguir a interferência de perturbações e otimizar o rendimento do processo (STENGEL, 1994). Um maior controle do processo através de uma rotina de otimização requer:

- o controle do modelo matemático do sistema: composto por equações constitutivas com condições de estado final, que caracterizam todo o processo;
- restrições sobre o projeto: restringem a série de soluções que podem ser concedidas e reparam muitas propriedades de sistema;
- demandas apresentadas ao sistema como uma meta de *design*: é originário de uma declaração de valor de projeto.

Um dos fatores cruciais que influencia o processo fermentativo é a temperatura (OMSTEAD, 1990). Temperaturas irregulares podem gerar o aumento de substâncias indesejáveis, perda de etanol e compostos voláteis. Outra característica central para o

processo fermentativo é a concentração de biomassa, que pode afetar as taxas de crescimento, consumo de substrato e também a formação do produto final.

Os métodos de otimização numéricos podem ser baseados em algoritmos heurísticos ou determinísticos e podem envolver a análise de variáveis contínuas ou discretas. Restrições, que descrevem limitações físicas ou operacionais dos processos, podem ser incorporadas às rotinas. Exemplos de técnicas de otimização contínua com restrição são: a programação linear, otimização restrita não linear, otimização limitada e programação de rede. Já as técnicas de otimização discreta são: a programação estocástica e programação inteira (CZYZYK et al. 1997).

Este texto menciona alguns modelos de otimização de perfil de temperatura presentes na literatura, desenvolvidos por autores como Rodman et al. (2016), Carrilo Ureta et al. (2001) e Xião et al. (2004). Esses modelos foram escolhidos para serem comparados com o estudo atual, já que utilizam o mesmo modelo cinético de Andrés-Toro et al. (1998) e algoritmos heurísticos.

O estudo de Rodman et al. (2016) utilizou o algoritmo de recozimento simulado (*simulated annealing* - SA) para otimizar o perfil de temperatura do processo fermentativo da cerveja de forma mais rápida e eficaz. O modelo cinético proposto por Andrés-Toro et al. (1998) foi escolhido para fazer parte da simulação e otimização. A fermentação foi realizada em tanques de escala de planta-piloto com formato cilindro-cônico. O texto de Rodman et al. (2016) descreve a função objetivo de um processo produtivo que tem como objetivo maximizar a produção de etanol e minimizar o tempo de lote, levando em consideração restrições explícitas nas concentrações de diacetil e acetato de etila. O perfil de temperatura ideal obtido é apresentado na Figura 3.7, e foram usadas, para tal, as equações do modelo de Andrés-Toro et al. (1998) juntamente a parâmetros e condições iniciais de Rodman et al. (2016).

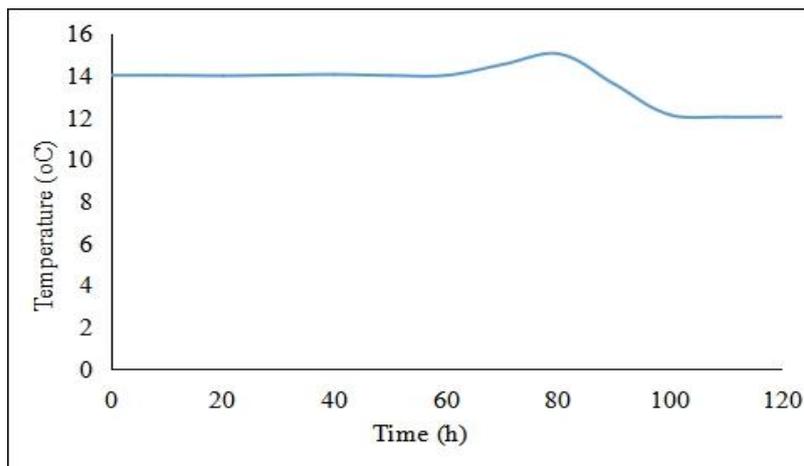


Figura 3.7 - Perfil de temperatura ideal de Rodman et al., (2016). Fonte: Adaptado de Rodman et al., (2016).

A Figura 3.7 mostra os valores ideais do perfil de temperatura em um sistema controlado por termostato e alterado com o tempo. Os resultados importantes do estudo de Rodman et al. (2016) estão listados na Tabela 3.6.

O estudo de Carrilo-Ureta et al. (2001) utilizou o algoritmo genético (*Genetic Algorithm - GA*) para otimizar o perfil de temperatura do processo fermentativo da cerveja. Os autores desenvolveram um programa no *software* MATLAB, que incorporou um modelo matemático de Andrés-Toro et al. (1998) e dados experimentais para alcançar uma função objetivo que acelerasse a fermentação industrial sem comprometer a qualidade ou aumentar o risco de contaminação. A faixa de temperatura foi definida entre 8 a 24°C. Os resultados indicaram um perfil de temperatura promissor para o processo, como representado na Figura 3.8.

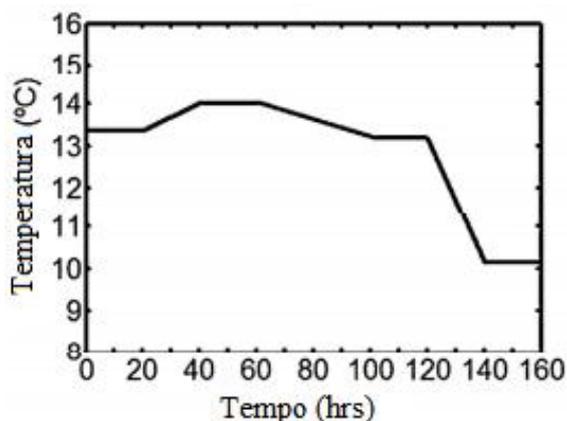


Figura 3.8 - Perfil de temperatura de Carrilo-Ureta et al. (2001). Fonte: Adaptada de Carrilo-Ureta et al. (2001).

A Figura 3.8 mostra os valores ótimos encontrados para o perfil de temperatura, obtidos através do algoritmo genético, que tem sido eficiente na otimização de processos de

fermentação. Esses perfis são necessários para minimizar o tempo do processo. Os resultados relevantes do estudo estão resumidos na Tabela 3.5.

O estudo realizado por Xião et al., (2004) implementou o algoritmo do sistema de colônia de formigas (*Ant colony system algorithm – ACS*) para otimizar o perfil de temperatura do processo de fermentação da cerveja, levando em consideração restrições de valores de diacetil e acetato de etila, além da perda de etanol. Foi utilizado um problema de otimização multiobjetivo para encontrar uma solução otimizada do perfil, que foi obtido por meio da resolução do modelo matemático de Andrés-Toro et al. (1998), com parâmetros e condições iniciais semelhantes às de Rodman et al. (2016). O estudo apresenta um problema de otimização dinâmica, em que a função objetivo deve ser maximizada por meio da aplicação de um determinado perfil de temperatura. O perfil de temperatura obtido por Xião et al. (2004) é apresentado na Figura 3.9.

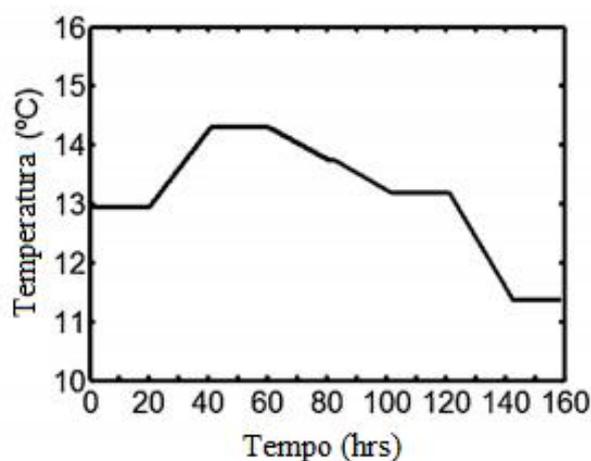


Figura 3.9- Perfil de temperatura de Xião et al., (2004). Fonte: Adaptada de Xião et al., (2004).

A Figura 3.9 mostra os valores ótimos obtidos para o perfil de temperatura do processo de fermentação da cerveja por meio do algoritmo ACS. Os resultados relevantes do estudo estão presentes na Tabela 3.5.

Os três artigos apresentam algumas semelhanças, como o modelo cinético, a função objetivo e os parâmetros utilizados. O resultado de cada autor mencionado é apresentado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Análise entre os artigos que otimizaram o processo fermentativo da cerveja.

Autores	Algoritmos	Objetivo da otimização	Principais Resultados
Rodman et al. (2016)	Algoritmo de recozimento simulado (<i>simulated annealing - SA</i>)	Determinar o perfil de alterações de temperatura ideal do processo fermentativo da cerveja	Conseguiu reduzir o tempo de fermentação em 16 horas, mas também aumentar a concentração de etanol e manter as concentrações de etanol e subprodutos no limite.
Carrilo-Ureta et al. (2003)	Algoritmo genético (<i>genetic algorithms - GA</i>)	Implementação de um perfil de temperatura ótimo ao longo do tempo do processo fermentativo da cerveja.	Foi alcançado um novo perfil de temperatura ótima após o alisamento do processo de otimização, que garantiu um processo fermentativo mais rápido, eficaz e melhor. Foi obtido também um aumento das concentrações de etanol e subprodutos no limite.
Xião et al. (2004)	Algoritmo de sistema de colônia de formiga (<i>Ant colony system algorithm - ACS</i>)	Resolver problemas relacionados ao perfil de temperatura do processo fermentativo da cerveja.	Os resultados foram promissores, pois foi possível diminuir consideravelmente o tempo de fermentação, garantindo um nível de obtenção de etanol necessário sem perder a qualidade da cerveja.

Fonte: Próprio autor

Os três autores analisados alcançaram seus objetivos de reduzir o tempo de fermentação, produzir etanol com boa concentração e manter a qualidade da cerveja sem ultrapassar limites de subprodutos. Rodman et al. (2016) obtiveram o menor tempo no processo fermentativo entre os três.

3.6 EXERGIA E RENDIMENTO

A exergia é uma grandeza termodinâmica que surge da combinação da primeira e segunda leis da termodinâmica. Esta propriedade é diferente da energia, pois, entre outros

fatores, a energia se conserva e a exergia, não (RAMOS et al., 2019). Na abordagem termodinâmica de processos industriais, é possível avaliar e comparar sistemas reais com sistemas ideais, com o intuito de identificar causas e irreversibilidades presentes no sistema, bem como os impactos ambientais associados ao ambiente natural. Em outras palavras, a análise termodinâmica possibilita avaliar a eficiência real de um processo, identificar as causas de ineficiência e reduzir custos de operação (DADAK et al., 2016; SOHEL et al., 2011).

O equacionamento exerético (3.20 - 3.31) foi retirado do trabalho de SILVA et al. 2021, tanto quanto as equações para encontrar os compostos orgânicos puros sólidos e líquidos que não estavam disponíveis na literatura, foi utilizado desse autor.

A modelagem termodinâmica é realizada por meio do balanço exerético (Equação 3.20):

$$\frac{d(ex_{MF,i})}{d_t} = \frac{d(ex_{MF,f})}{d_t} + \frac{d(ex_{dest})}{d_t} \quad (3.20)$$

em que $ex_{MF,i}$ é a exergia (KJ) dos constituintes do meio fermentativo, no início do processo; $ex_{MF,f}$ é a exergia (KJ) dos constituintes do meio fermentativo, no final do processo; ex_{dest} representa a exergia destruída devido às irreversibilidades do processo, sendo proporcional à entropia gerada (S_{ger}) por causa dessas irreversibilidades (I) relacionadas ao processo (Equação 3.21).

$$ex_{dest} = T_o S_{ger} = I \quad (3.21)$$

Em certos processos, o fluxo de massa pode ser composto por diversos componentes, tais como componentes químicos, físicos, cinéticos e potenciais. A partir desses componentes, é possível determinar a exergia total do sistema por meio da Equação 3.22 (BOATENG; LEE, 2013; AGHBASHLO et al., 2018; SOLTANIAN et al., 2020):

$$ex_{total} = ex_{fis.} + ex_{quí.} + ex_{cin.} + ex_{po} \quad (3.22)$$

em que ex_{total} é a exergia total; $ex_{fis.}$ é a exergia física; $ex_{quí.}$ é a exergia química; $ex_{cin.}$ é a exergia cinética; e ex_{po} é a exergia potencial. Contudo, na maioria dos sistemas, as exergias

cinética e potencial são insignificantes e apenas as exergias físicas e químicas estão associadas à massa do sistema, conforme representado na Equação 3.23.

De acordo com Moran et al. (2013), para determinar cada uma dessas exergias, é necessário definir o estado morto, que é um estado que não realiza mais trabalho em um processo.

$$ex_{total} = ex_{fis} + ex_{quí.} \quad (3.23)$$

em que

$ex_{fis.}$ = exergia física;

$ex_{quí.}$ = exergia química.

Neste trabalho em específico, a exergia física não foi considerada devido a sua pequena magnitude em comparação com a exergia química. Assim, a inclusão ou exclusão da exergia física não terá impacto significativo no sistema abordado. Portanto, apenas a exergia química será considerada neste estudo.

3.6.1 Exergia química padrão

A exergia química é definida em relação ao estado morto absoluto e pode ser tabelada quando seu valor é considerado padrão para um elemento. No entanto, para calcular a exergia química padrão de qualquer substância que não esteja presente no meio ambiente, é necessário usar a Equação 3.25.

$$ex_{quí}^o = -(\Delta H_r^o - T_o \Delta S_r^o) + \sum v_i \mathcal{E}_i^o \quad (3.25)$$

A unidade dos elementos está em (KJ.mol⁻¹); o \mathcal{E}_i^o é a exergia química padrão do estado de referência do composto; v_i é o número de átomos do elemento constituinte i ; H_r^o é a entalpia padrão; e S_r^o é a entropia de reação do processo.

Conforme Ptasinski (2016), a mistura de substâncias é um processo real e irreversível que resulta na produção de entropia e perda de exergia. No entanto, quando um sistema contém mais de uma substância, o efeito da mistura pode ser considerado em termos da exergia química padrão, que pode ser representada pela Equação 3.26:

$$ex_{quí,mist}^o = \sum_i x_i ex_{quí,i}^o + RT_0 \sum_i x_i \ln x_i \quad (3.26)$$

em que

x_i é a fração molar da substância pura i ;

R é a constante dos gases;

T_0 é temperatura do ambiente de referência.

A constante dos gases utilizada na Equação 3.26 é assumida como sendo 8,314 J.mol.K. Os compostos orgânicos puros, como carboidratos simples, vitaminas, aminoácidos, bases nitrogenadas, ácidos orgânicos e macromoléculas, como os lipídeos microbianos, proteínas e biomassa celular, são alguns dos compostos presentes no processo de uma reação biotecnológica. Os principais elementos químicos que compõem esses compostos biológicos são carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S).

Existem modelos disponíveis na literatura para a determinação da exergia química de compostos orgânicos (SHARIFIAN et al., 2019; SONG et al., 2012; SZARGUT, 2005; MORAN et al., 2013; SHIEN et al., 1982; SZARGUT, 1964; SILVA et al., 2021). No entanto, de acordo com MORRIS et al. (1986), os dados termodinâmicos de compostos puros geralmente não estão facilmente disponíveis para o cálculo da exergia química. Além disso, há poucos modelos específicos na literatura para o cálculo da exergia química de moléculas biotecnológicas, o que torna necessária a aplicação de modelos alternativos para esses cálculos (SILVA, 2021).

Silva et al. (2021) revisaram diversas metodologias para a predição da exergia química de vários compostos.

3.6.2 Parâmetros exergeticos

Na literatura científica, diversos parâmetros exergeticos são utilizados na análise do desempenho de processos biotecnológicos. Entre esses parâmetros, destaca-se a eficiência exergetica (η_{total}), que é o indicador termodinâmico mais frequentemente utilizado na avaliação da eficiência dos processos (Equação 3.27):

$$\eta_{total} = \frac{Ex_s}{Ex_e} \quad (3.27)$$

em que $\frac{Ex_s}{Ex_e}$ refere-se à razão entre a exergia de saída (Ex_s) e a exergia de entrada (Ex_e).

Sistemas que envolvem reações de conversão química podem ser avaliados quanto ao seu desempenho por meio da eficiência exergetica racional (η_{rac}), a qual pode ser determinada através da aplicação da Equação 3.28:

$$\eta_{rac} = \frac{Ex_{prod, \acute{u}teis}}{Ex_e} \quad (3.28)$$

em que $\frac{Ex_{prod, \acute{u}teis}}{Ex_e}$ é a razão entre exergia dos produtos de interesse e a exergia de entrada. Os produtos úteis em sistemas de produção referem-se aos produtos e subprodutos de relevância econômica, enquanto as correntes de saída desperdiçadas são consideradas perdas. Entretanto, uma parcela da exergia perdida poderia ter sido direcionada para a produção dos produtos desejados (ANACLETO et al., 2021; SILVA et al., 2021).

Além da consideração de aspectos relacionados à sustentabilidade e produtividade, a geração de um produto deve levar em conta a taxa de destruição de recursos ao longo do processo produtivo. Nesse sentido, este estudo emprega análises exergeticas para avaliar as perdas termodinâmicas do processo fermentativo com base no balanço exergetico, que é calculado utilizando-se a equação 3.29.

$$\sum_e Ex = \sum_s Ex_{prod.} + \sum_s Ex_{res\acute{u}duo} + I \quad (3.29)$$

A Equação 3.29 se dá pelas perdas termodinâmicas associadas às irreversibilidades e geração de resíduos, em que $Ex_{prod.}$ se refere a a soma de todas as quantidades de exergia que são geradas como resultado da produção de um processo ; I são as irreversibilidades; e $\sum_e Ex$ se refere a soma de todas as perdas de energia na forma de calor que ocorrem em um sistema durante o processo termodinâmico (KANG, TAN, 2016).

Ademais, a eficiência termodinâmica do processo pode ser avaliada por meio da exergia destruída normalizada, conforme descrito na Equação 3.30:

$$Ex_{dest,norm} = \frac{Ex_{dest}}{Ex_{prod, \acute{u}teis}} \quad (3.30)$$

em que Ex_{dest} é a quantidade de exergia destruída; e $Ex_{prod,úteis}$ é a exergia dos produtos de interesse econômico.

A avaliação da sustentabilidade do processo pode ser realizada por meio do Índice de Sustentabilidade Termodinâmica (IST), o qual é obtido pela razão entre a exergia fornecida ao sistema e a exergia destruída pelas irreversibilidades do processo, conforme apresentado na Equação 3.31.

$$IST = \frac{Ex_e}{Ex_{dest}} \quad (3.31)$$

Este trabalho apresenta um diferencial em relação à literatura existente ao realizar uma análise exérgica, que avalia as eficiências associadas ao processo fermentativo. A determinação da eficiência do processo é de grande relevância para as empresas, permitindo a identificação de oportunidades para otimizar a produção de cerveja.

3.6.3 Rendimento do processo

A avaliação do rendimento do processo fermentativo é uma etapa crucial para o sistema, uma vez que a análise do rendimento possibilita a investigação de possíveis limitações ao longo do processo de fermentação. Em linhas gerais, o rendimento de um processo fermentativo é definido pela relação entre a quantidade do produto obtido e a matéria-prima utilizada no tanque de fermentação (ELEONORA, 2006).

A eficiência exérgica está diretamente relacionada ao rendimento do processo, sendo importante buscar melhorias na eficiência por meio do aumento do rendimento para garantir um bom desempenho na fermentação e a obtenção de um produto final de qualidade (ELEONORA, 2006). Isso ocorre porque um sistema exergeticamente eficiente deve gerar lucro e apresentar elevado rendimento para as indústrias. O fator de rendimento (η_p) é definido pela Equação 3.32:

$$\eta_p = \frac{C_{a,f}}{C_{g,i}} \quad (3.32)$$

em que $C_{a,f}$ é a concentração do produto (etanol) final; e $C_{g,i}$ é a concentração da matéria-prima (glicose) inicial.

3.7 SISTEMA A SER ESTUDADO

Neste estudo, foram utilizados os dados relatados por Rodman et al. (2016) para descrever o modelo dinâmico do processo fermentativo da cerveja. Para obtenção dos parâmetros, esses autores empregaram dois experimentos diferentes com temperaturas isotérmicas e não isotérmicas. O modelo matemático utilizado nesta pesquisa foi derivado de Andrés-Toro et al. (1998).

A fermentação não isotérmica foi conduzida em um tanque de escala-piloto com capacidade de 100 litros, utilizando o perfil de temperatura industrial representado na Figura 3.10. Já a fermentação isotérmica foi realizada em um tanque de escala de laboratório de 3 litros em cinco temperaturas diferentes, a fim de obter medições *on-line* das concentrações de espécies e determinar a melhor temperatura entre as testadas. Com base nos resultados experimentais obtidos por Rodman et al. (2016) e na Equação 3.1, foram determinados os parâmetros para análise do modelo dinâmico.

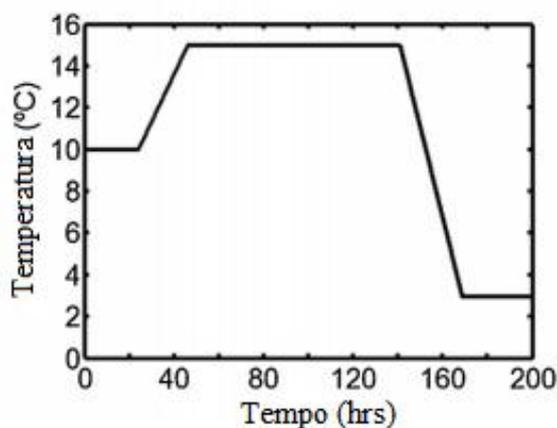


Figura 3.10 - Perfil genérico de temperatura industrial. Fonte: Adaptada de Rodman et al. (2016).

A proposta de Rodman et al. (2016) consistia em desenvolver um modelo para a fermentação da cerveja a fim de recomendar melhorias no processo operacional para um parceiro industrial, a cervejaria WEST. Essas melhorias visavam reduzir o tempo de fermentação, sem comprometer a qualidade do produto final.

Entre as diversas simulações realizadas por Rodman et al. (2016), utilizando o modelo dinâmico da cervejaria, observou-se que, no primeiro modelo de simulação isotérmica, a temperatura de 13°C apresentou a melhor concentração de produtos e subprodutos da fermentação da cerveja, em relação às demais temperaturas testadas. No segundo modelo, que utilizou o perfil de temperatura industrial da cervejaria WEST, foi obtida uma melhor concentração de produtos e subprodutos em comparação com outros modelos encontrados na literatura. Entretanto, o tempo de fermentação foi maior, totalizando 130 horas.

Rodman et al.(2016) compararam dois modelos de temperatura, 13 °C e o perfil de temperatura industrial, e constataram que o perfil de temperatura industrial atual era mais eficiente em termos de concentração de etanol. De acordo com a literatura, uma redução de 10 horas no tempo de fermentação em relação ao tempo atual já teria um impacto significativo na produção de cerveja. Portanto, o objetivo de Rodman et al. (2016) era encontrar um sistema que permitisse um tempo de fermentação menor do que o utilizado pela cervejaria em questão. Para atingir esse objetivo, eles utilizaram o algoritmo de recozimento simulado (*simulated annealing - SA*) para otimizar o perfil de temperatura.

No presente estudo, o objetivo da análise do modelo dinâmico da fermentação da cerveja é encontrar um perfil de temperatura ideal, que seja mais eficiente do que o modelo desenvolvido por Rodman et al. (2016).

Os parâmetros e condições iniciais (Tabela 3.6) selecionados para o presente estudo foram obtidos de Rodman et al. (2016), e o modelo matemático utilizado foi proposto por Andrés-Toro et al. (1998) para a otimização do processo fermentativo da cerveja. Tais parâmetros e condições podem ser vistos na Tabela 4.9 e na Equação (3.10), respectivamente, enquanto o modelo matemático é descrito pelas equações (3.2) a (3.19). As concentrações iniciais de espécies como etanol, acetato de etila e diacetil foram consideradas iguais a zero, conforme assumido em outros estudos. Alguns dados experimentais, como as taxas de diacetil, determinados por Rodman et al. (2016), são mostrados na Tabela 3.8.

No processo de produção de cerveja, o mosto a ser fermentado é esterilizado na fase de fervura, em que o lúpulo é adicionado para conferir sabor e aroma à cerveja (fator IBU), geralmente a uma temperatura em torno de 96 a 100°C. O mosto é, então, resfriado antes de entrar no fermentador, e a temperatura em que entra dependerá do tipo de cerveja a ser produzido (REBELLO, 2009). Para a fermentação, é utilizada a levedura *Sacharomyces cerevisiae*.

O delineamento experimental empregado por Rodman et al. (2016) e adotado neste estudo abrange uma faixa de temperatura entre 8 e 24 °C, com tempo de fermentação variando

de 0 a 160 horas. A metodologia adotada neste trabalho apresenta o modelo do sistema estudado.

Tabela 3.6 - Condições iniciais da simulação dinâmica da fermentação da cerveja.

Parâmetros	Valores iniciais	Unidades
C_s	130	gL^{-1}
X_{inc}	4	gL^{-1}

Fonte: Adaptada de Rodman et al. (2016).

A Tabela 3.7 representa as variáveis do artigo de Rodman et al. (2016).

Tabela 3.7 - Variáveis do artigo em estudo (Rodman et al., 2016).

Parâmetros do artigo	Descrição	Unidades
μ_e	Taxa de produção de etanol	h^{-1}
μ_{SD}	Taxa de sedimentação de célula	h^{-1}
μ_s	Taxa de consumo de açúcar	h^{-1}
μ_x	Taxa de crescimento de células	h^{-1}
μ_{DT}	Taxa de morte celular específica	h^{-1}
μ_L	Taxa de ativação de célula específica	h^{-1}
k_s	Constante de afinidade do açúcar	gL^{-1}
k_e	Constante de afinidade do etanol	gL^{-1}
C_s	Concentração inicial do açúcar	gL^{-1}
C_e	Concentração inicial do etanol	gL^{-1}
X_{lag}	Célula latente	gL^{-1}
X_{act}	Célula ativa	gL^{-1}
X_{dead}	Célula morta	gL^{-1}
X_{inc}	Concentração de inóculo de biomassa total	gL^{-1}
μ_{AB}	Taxa de produção de diacetil	$g^{-1}h^{-1}L^{-1}$
μ_{DY}	Taxa de consumo de diacetil	$g^{-1}h^{-1}L^{-1}$

Fonte: Próprio autor.

Tabela 3.8 - Taxas de diacetil determinadas experimentalmente.

Símbolos	Descrição	Valores	Unidades
μ_{DY}	Taxa de produção de diacetil	$1,2767 \times 10^{-7}$	$g^{-1}h^{-1}L$
μ_{AB}	Taxa de consumo de diacetil	$1,13864 \times 10^{-3}$	$g^{-1}h^{-1}L$

Fonte: Adaptada de Rodman et al. (2016).

Os limites de restrição para o diacetil e o acetato de etila são muito importantes para a qualidade da cerveja, pois essas substâncias podem afetar significativamente o sabor, o aroma e a experiência de consumo da bebida.

O diacetil é um composto químico que pode conferir um sabor e aroma indesejáveis de manteiga ou pipoca ao final do processo de fermentação. Em concentrações mais altas, ele pode causar uma sensação de "off-flavor" na cerveja, tornando-a desagradável para o consumidor. Portanto, estabelecer um limite máximo de 0,1 ppm para o diacetil ajuda a garantir que o sabor e o aroma da cerveja não sejam comprometidos por esse composto.

O acetato de etila, por sua vez, é um éster que pode contribuir com notas frutadas na cerveja. No entanto, em concentrações mais altas, ele pode se tornar excessivo e dominar o perfil sensorial da bebida, resultando em sabores e aromas desequilibrados. Estabelecer um limite máximo de 2 ppm para o acetato de etila permite que a cerveja tenha uma presença adequada desses ésteres, sem que isso se torne excessivo e desagradável.

Além de afetar diretamente o sabor e o aroma, o diacetil e o acetato de etila também podem ser indicadores de problemas durante o processo de fermentação da cerveja. Valores elevados dessas substâncias podem indicar a presença de leveduras indesejáveis ou um processo de fermentação inadequado, o que pode comprometer a qualidade geral da cerveja.

Portanto, para garantir a aceitação do produto pelo consumidor, é fundamental cumprir esses limites de restrição para o diacetil e o acetato de etila. Dessa forma, a cerveja apresentará um sabor e aroma equilibrados e agradáveis, além de indicar um processo de fermentação adequado e de alta qualidade.

3.8 ESPECIFICAÇÃO DO MODELO

Durante a realização deste estudo, foi observado que os estudos de Rodman et al. (2016) não forneceram todos os dados experimentais necessários para determinar os parâmetros de interesse, como a constante de afinidade da biomassa (K_x) e a duração da fase de latência da fermentação (t_{lag}). Isso comprometeu a validação do modelo matemático utilizado.

A implementação do modelo proposto por Andrés-Toro et al. (1998), adotado pelos autores em questão, enfrentou dificuldades devido à ausência dessas variáveis cruciais para a reprodução do processo.

Para contornar essa limitação, foram realizadas análises em artigos similares a fim de obter informações relevantes que possibilitassem tentativas e erros na aplicação do modelo matemático. No entanto, esse procedimento revelou-se ineficaz, pois não foi possível reproduzir com sucesso as curvas do modelo de Rodman et al. (2016).

A segunda opção para validar o sistema na primeira fase da metodologia consistiu em estimar essas variáveis utilizando o software MATLAB. Foi utilizada a função `fminsearch` para resolver numericamente o modelo de fermentação dinâmica não linear ao longo do período temporal. A temperatura isotérmica empregada nesse sistema correspondeu àquela mencionada por Rodman et al. (2016).

Todas as etapas foram executadas para estimar os valores de K_x e t_{lag} , que não foram inicialmente fornecidos, e validar o programa deste trabalho, permitindo o avanço para as etapas subsequentes da metodologia adotada.

4- METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo foi baseada nos resultados obtidos por Rodman et al. (2016), que descrevem o processo fermentativo da cerveja. Para otimizar o perfil de temperatura do processo, o modelo matemático proposto por Andrés-Toro et al. (1998) foi empregado por este autor. No entanto, em relação ao estudo de Rodman et al. (2016), este trabalho se diferencia na consideração da análise exergética.

Para o desenvolvimento deste estudo, a metodologia foi dividida em três partes, como ilustrado no esquema da Figura 4.11.

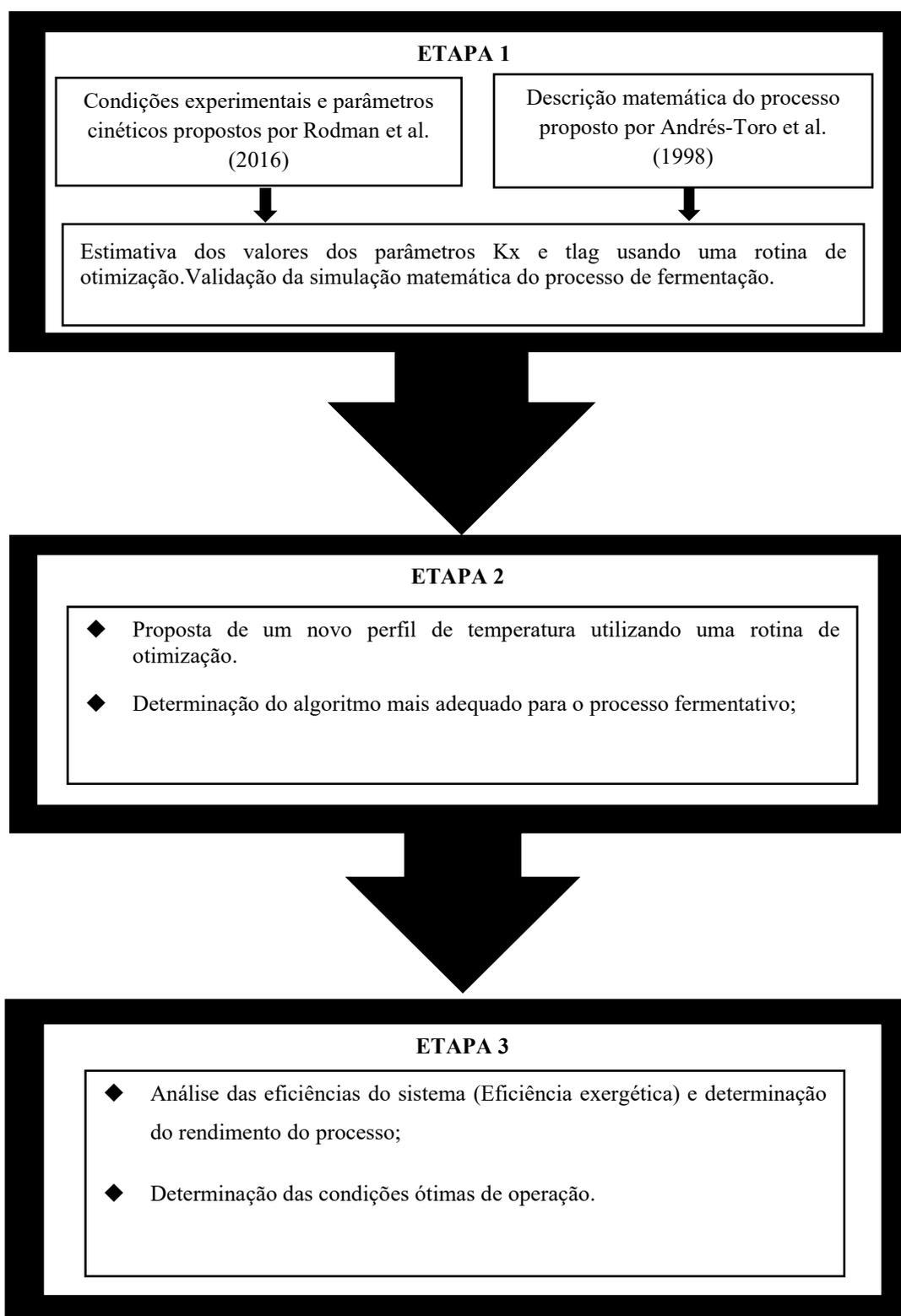


Figura 4.11 - Esquema da metodologia dividido em 3 partes.

4.1 ETAPA 1: DESCRIÇÃO DO MODELO DINÂMICO

A primeira etapa deste estudo consistiu na estimativa dos valores dos parâmetros Kx e t_{lag} utilizando uma rotina de otimização. Para este fim, o modelo matemático proposto por Andrés-Toro et al. (1998), descrito pelas equações (3.2) a (3.19), foi considerado.

O sistema de Rodman et al. (2016) foi utilizado, e as mesmas condições iniciais presentes na Tabela 3.6 foram adotadas para simular o sistema. Todas as outras concentrações iniciais de espécies, não descritas na Tabela 3.6, foram consideradas nulas.

O modelo matemático empregado neste estudo foi julgado apropriado, tendo em vista que:

- os parâmetros do modelo contam com um conjunto considerável de dados empíricos, obtidos através de uma ampla faixa de temperatura (8–24 °C);
- o modelo utilizado é capaz de prever a concentração de subprodutos diacetil e acetato de etila, os quais podem comprometer a qualidade do produto cervejeiro em termos de sabor e aroma.

Nesta pesquisa, foram considerados os parâmetros cinéticos utilizados por Rodman et al. (2016). Contudo, os valores dos parâmetros Kx (constante de afinidade da biomassa) e t_{lag} (duração da fase lag de fermentação (h)) não foram disponibilizados pelos autores.

A fim de estimar os valores de Kx e t_{lag} , foi proposto um procedimento de otimização utilizando a Equação 4.33. A função objetivo configurada no MATLAB tem como propósito minimizar a soma dos erros quadráticos entre os dados experimentais e simulados, a fim de encontrar os valores de Kx e t_{lag} por meio da manipulação dos parâmetros cinéticos. Em outras palavras, utilizou-se um modelo de regressão não linear de mínimos quadrados:

$$\text{Minimize } f(Kx, t_{lag}) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_{i,exp} - X_{i,s}}{X_{i,exp}} \right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_{i,exp} - C_{i,s}}{C_{i,exp}} \right)^2 \quad (4.33)$$

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} f(Kx, t_{lag}) \quad \text{Sujeito a : } \begin{cases} X_{i,s} \geq 0 \\ C_{i,s} \geq 0 \end{cases}$$

em que f é a função objetivo; i é o índice para cada estimativa; n é o número de pontos experimentais; Kx e t_{lag} são os parâmetros cinéticos a serem estimados; $C_{i,exp}$ é a concentração de observação experimental do índice i ; $X_{i,exp}$ são as células de observação experimental do índice i ; $C_{i,s}$ é a concentração do valor calculado pelo modelo de observação

(simulação) do índice i ; $X_{i,s}$ são as células do valor calculado pelo modelo de observação (simulação) do índice i . Foram utilizados 8 n pontos para montar a função objetivo.

Visando estimar as variáveis K_x e t_{lag} do modelo cinético, foi desenvolvido um algoritmo no MATLAB capaz de solucionar a minimização da Equação 4.33. Todas as Equações Diferenciais Ordinárias (EDOs) descritas pelas equações (3.2) a (3.19) foram implementadas nesse algoritmo, bem como os dados de todas as funções para cada parâmetro (Tabela 4.9) em função da temperatura, as condições iniciais (Tabela 3.6) e o perfil de manipulação de temperatura.

Inicialmente, foram considerados dois perfis de temperatura: um isotérmico e outro não isotérmico, ambos considerados por Rodman et al., (2016), conforme demonstrado na Figura 4.12. O perfil de temperatura não isotérmico é o adotado em escala industrial.

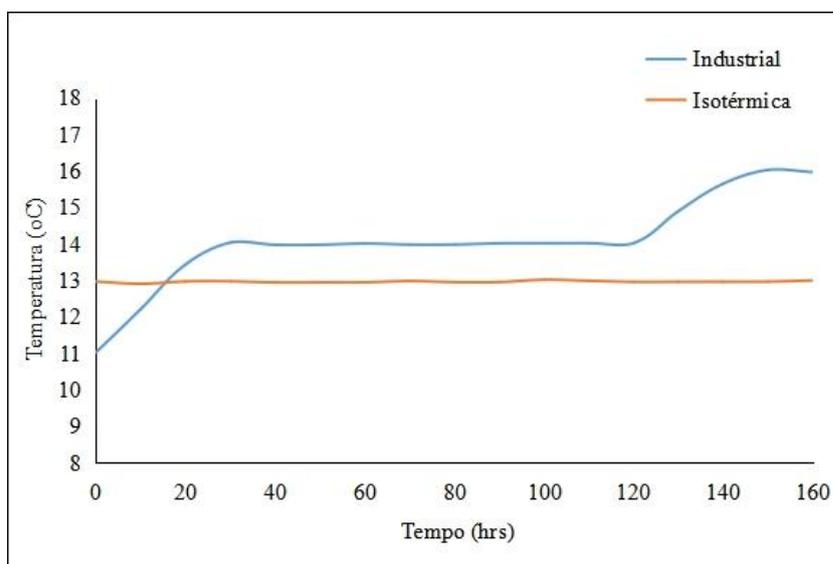


Figura 4.12 - Perfil de temperatura isotérmica (13°C) e industrial de Rodman et al., (2016). Fonte: Adaptada de Rodman et al., (2016).

4.2 ETAPA 2: TESTES DE NOVOS ALGORITMOS

A segunda etapa da metodologia consiste em obter o perfil de temperatura ótimo para o processo de fabricação de cerveja. Com base nos resultados obtidos por Rodman et al. (2016), foi proposta uma estratégia de otimização para encontrar o perfil de temperatura ótimo. O problema de otimização foi formulado em quatro estágios ou intervalos de tempo. No primeiro estágio, que vai de 0 a 40 horas, a temperatura varia linearmente de T_0 a T_1 . No segundo estágio, que vai de 40 a 80 horas, a temperatura é mantida constante em T_1 . No

terceiro estágio, que vai de 80 a 100 horas, a temperatura varia de T1 para T2. Por fim, no último estágio, que vai de 100 horas até o final do processo, a temperatura é mantida constante em T2. Portanto, o problema de otimização depende das variáveis T0, T1 e T2.

O problema de otimização resultante é não linear e sujeito a restrições. As restrições são impostas pelos limites mínimos e máximos de temperatura e pelas concentrações máximas permitidas de diacetil e acetato de etila ao final do processo. Esses limites de temperatura são explicados pelo impacto desse parâmetro operacional na qualidade da cerveja, como mencionado anteriormente. Os limites de concentração de diacetil e acetato de etila são os mesmos estabelecidos por Rodman et al. (2016) e também estão relacionados à qualidade da cerveja, conforme mencionado anteriormente. O problema de otimização resultante pode ser descrito pelas equações (4.34) a (4.37).

$$\text{Minimize } f(T0, T1, T2) = t \quad (4.34)$$

Sujeito a:

$$8 \leq T_i \leq 24 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.35)$$

$$C_{diacetyl} \leq 0,1 \text{ ppm} \quad (4.36)$$

$$C_{ethyl\ acetate} \leq 2 \text{ ppm} \quad (4.37)$$

Para resolver o problema de otimização, foi adotado um método heurístico conhecido como *Particle Swarm Optimization (PSO)*, o mesmo utilizado por Costa Jr et al. (2003). Esse método é baseado no comportamento de um grupo de pássaros e tem como objetivo encontrar a solução ótima em um espaço de busca específico, utilizando a troca de informações entre os indivíduos para determinar o melhor caminho a seguir.

A proposta deste estudo foi empregar novos métodos de otimização heurística, diferentemente dos métodos utilizados por Rodman et al. (2016), Carrilo-Ureta et al. (2002) e Xião et al. (2005).

As constantes de Arrhenius (presentes na Tabela 3.2) e a Equação 3.1 foram utilizadas para determinar os valores dos parâmetros presentes na Tabela 4.9. Esses parâmetros, juntamente às condições iniciais, foram empregados ao longo deste estudo.

Tabela 4.9 - Valores dos parâmetros utilizados por Rodman et al., 2016) e neste estudo.

$$\mu_{x0} = \exp(108.31 + 31934.09/T+273.15)$$

$$\mu_{SD0} = \exp(33.82+ 10033.28/T+273.15)$$

$$\mu_{S0} = \exp(-41.92 + 11654.64/T+273.15)$$

$$\mu_{e0} = \exp(3.27- 12667.24 /T+273.15)$$

$$\mu_L = \exp(30.72 - 9501.54/T+273.15)$$

$$\mu_{DT} = \exp(130.16 -38313.00/T+273.15)$$

$$K_c=K_s = \exp(-119.63+ 34203.95/T+273.15)$$

$$Y_{EA} = \exp(8.92- 26589.00/T+273.15)$$

$$\mu_{dy} = 1.27672 \times 10^{-7}$$

$$\mu_{ab} = 1.13864 \times 10^{-3}$$

Fonte: Adaptada de Rodman et al. (2016).

4.3 ETAPA 3: ANÁLISE DA EFICIÊNCIA EXERGÉTICA E DO RENDIMENTO

Nesta terceira etapa, o objetivo é realizar uma avaliação da eficiência exergética do sistema e determinar o rendimento do processo fermentativo. Essa análise foi feita para o perfil de temperatura que foi determinado na Etapa 2. Para tal, a metodologia proposta compreende as seguintes etapas: i) cálculo do balanço exergético; ii) determinação dos parâmetros de desempenho exergético; e iii) cálculo do rendimento do processo.

4.3.1 Modelagem termodinâmica

Serão adotadas as seguintes hipóteses para análise de exergia:

- O processo fermentativo ocorre considerando um controle de temperatura ao longo do tempo;
- As exergias cinética e potencial serão consideradas desprezíveis;
- Não há nenhuma agitação dentro do tanque de fermentação;
- Admite-se que o tanque de fermentação é adiabático;
- A exergia física não foi considerada devido ser muito pequena em relação a exergia química.

O fim da fermentação será estabelecido pela completa utilização do açúcar residual, tendo como critério a concentração de etanol de 56 a 60%. No volume de controle, os

principais parâmetros a serem levados em consideração incluem a variação da biomassa, o consumo de açúcar, a produção de etanol e a produção de subprodutos.

A modelagem termodinâmica será realizada por meio do balanço exergético (Equação 3.20). A exergia química do meio de fermentação será calculada conforme a Equação 3.26, considerando-se o efeito da mistura na exergia. Serão empregados valores de exergia química padrão, obtidos a partir da literatura, e os adquiridos utilizando-se o modelo de predição desenvolvido por Silva et al. (2021).

Para a estimativa da exergia química específica de diferentes macromoléculas, será utilizado o modelo ExSL1 proposto por Silva et al. (2021) (Equação 4.38). O modelo ExSL1 é aplicável a compostos orgânicos líquidos e sólidos.

$$ex_{qui,SL}^o = 361,3537[C] + 1100,6547[H] - 113,6193[O] + 18,3479[N] + 220,4570[S] \quad (4.38)$$

O modelo de exergia química específica estimou os valores de macromoléculas como acetato de etila ($C_4H_8O_2$), diacetil ($C_4H_6O_2$) e glicose ($C_6H_{12}O_6$). As demais substâncias, como etanol e leveduras, foram encontradas na literatura. Todas as moléculas consideradas no sistema estão apresentadas na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Exergia química padrão (ex_{qui}^o) dos compostos considerados no sistema.

Composto	Fórmula	ex_{qui}^o (KJ.kg ⁻¹)
Etanol	C_2H_6O	29472 ^a
Levedura	$CH_{1,8}O_{0,9}N_{0,14}$	4,89 ^b
Acetato de etila	$C_4H_8O_2$	30579,06 ^c
Diacetil	$C_4H_6O_2$	25725,51 ^c
Glicose	$C_6H_{12}O_6$	15716,50 ^c

Fonte: Silva et al. (2021)^a, Ortiz (2016)^b, calculado^c.

Todos os compostos considerados no balanço estão presentes na Tabela 4.10. A partir dos cálculos da exergia química da mistura, é possível determinar o valor total da exergia de entrada e saída de um processo, que serão utilizados nos cálculos subsequentes.

Em seguida, serão calculadas as eficiências exergéticas do fermentador, empregando-se duas abordagens. A primeira é o cálculo da eficiência exergética total (η_{total}), definida pela Equação 3.27, e a segunda é o cálculo da eficiência exergética racional (η_{rac}), definida pela

Equação 3.28. Também será calculada a exergia destruída normalizada, por meio da Equação 3.30.

A determinação do rendimento do processo fermentativo é definida pela Equação 3.32.

5- RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 MODELO DO PROCESSO DE FERMENTAÇÃO

De acordo com a metodologia apresentada, foram empregados os parâmetros listados na Tabela 4.9, bem como as equações (Equações (3.2) a (3.19)) que compõem o modelo matemático proposto por Andrés-Toro et al. (1998) e as condições iniciais (Tabela 3.6) fornecidas por Rodman et al. (2016) para estimar os valores de K_x e t_{lag} .

Através do uso do software MATLAB, foi resolvido um problema de otimização, que é descrito pela equação não linear (Equação 4.33), com a função `fminsearch` implementada no programa. Após a simulação de cada perfil de temperatura descrito na metodologia, os valores de K_x e t_{lag} foram obtidos e posteriormente analisados e comparados com os resultados apresentados no artigo de Rodman et al. (2016). Com base nessa comparação, foi selecionado o valor de K_x e t_{lag} que melhor se aproxima dos resultados de Rodman et al. (2016) e que será usado na busca do perfil de temperatura ideal. Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Valores de K_x e t_{lag} em temperaturas isotérmicas e não isotérmicas deste estudo.

Temperaturas	K_x (g/L)	t_{lag} (K)
Temperatura isotérmica	58,7335	0,2855
Temperatura não isotérmica	59,1341	0,3264

Fonte: Próprio autor

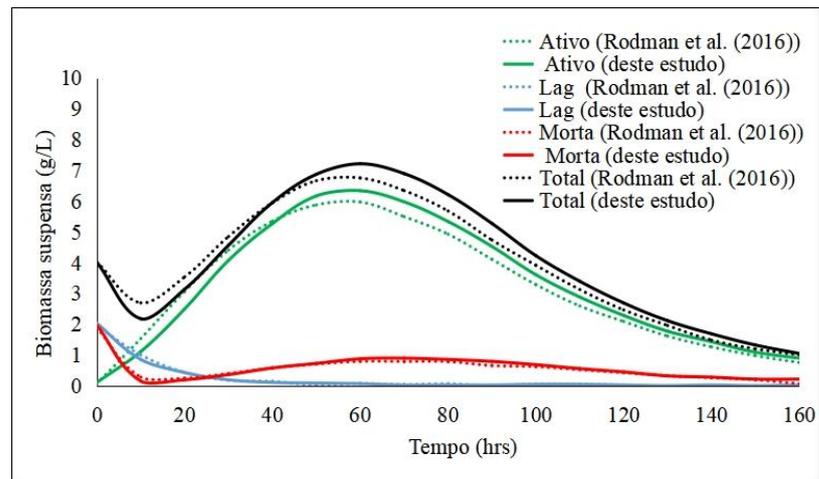
O método empregado para estimar os valores de K_x e t_{lag} foi altamente eficaz e convergiu rapidamente. A execução da simulação foi realizada em um computador Dell OptiPlex 3050, com o processador Intel (R) Core(TM) i7-7700T CPU @ 2.90GHz, tendo uma duração total de 2 segundos. Este método foi aplicado para duas condições de temperatura diferentes, isotérmica e não isotérmica, como mencionado anteriormente, e os dois valores encontrados (Tabela 5.11) foram comparados. Essa comparação pode ser observada nas Figuras 5.13 e 5.14.

Inicialmente, duas condições diferentes foram consideradas para temperaturas isotérmicas e não isotérmicas: temperatura constante (13 °C) e perfil industrial, respectivamente, relatado por Rodman et al. (2016) e apresentado na Figura 4.12. Essas duas temperaturas foram utilizadas para determinar o melhor valor de K_x e t_{lag} , pois foram as

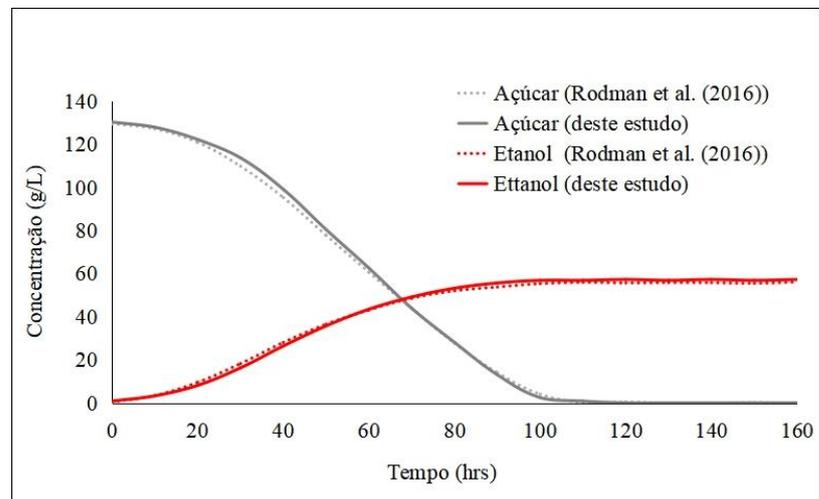
temperaturas que Rodman et al. (2016) avaliaram e obtiveram os melhores resultados para as concentrações.

Os resultados apresentados na Figura 5.13 mostram a comparação entre as simulações obtidas por Rodman et al. (2016) e o presente estudo quando a temperatura é mantida constante e igual a 13 °C.

a) Evolução da biomassa



b) Consumo de açúcar e produção de substrato



c) Produção de Subprodutos

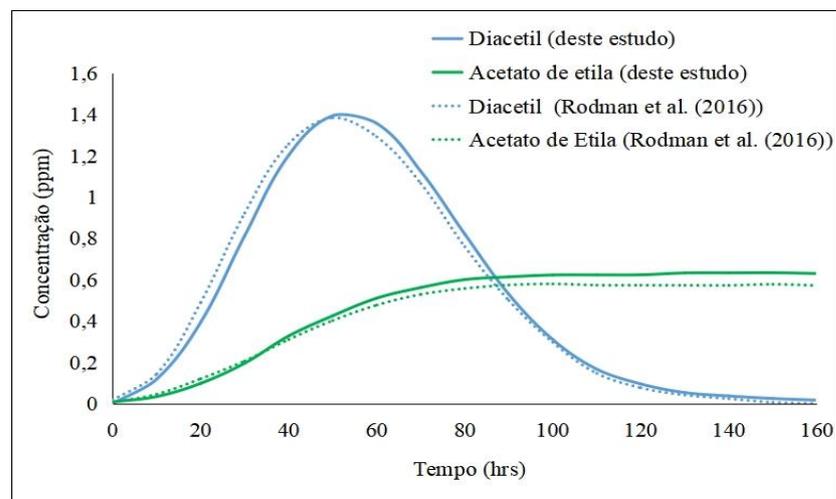
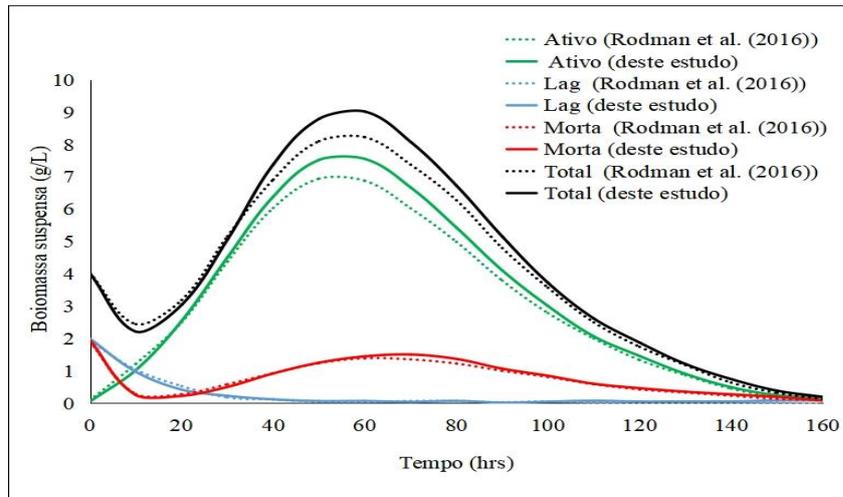


Figura 5.13 - Comparação entre o processo de simulação relatado por Rodman et al., (2016) e processo de simulação obtido neste estudo considerando um processo isotérmico (temperatura à 13°C). Fonte: Próprio autor.

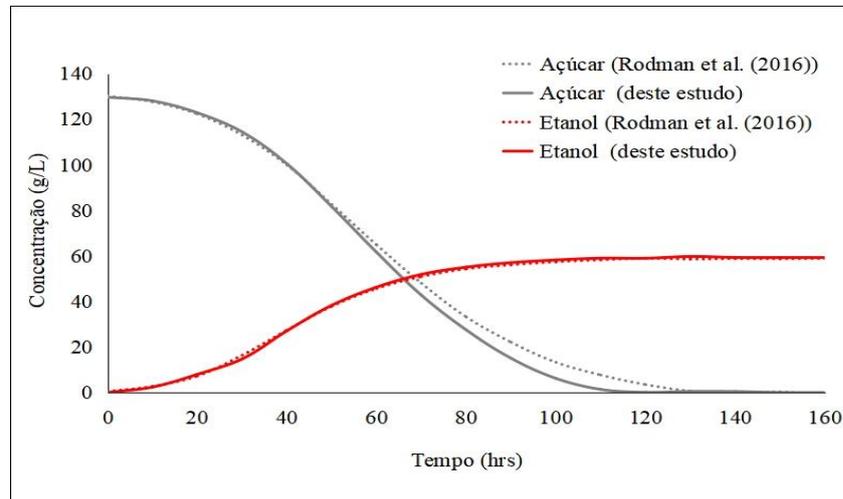
As linhas sólidas presentes em todos os gráficos representam as simulações realizadas neste estudo, enquanto as linhas tracejadas correspondem ao perfil de simulação isotérmica do modelo de Rodman et al. (2016). É possível observar que ambas as curvas apresentam comportamentos semelhantes. No entanto, a análise dos resultados numéricos das concentrações em comparação com os resultados relatados por Rodman et al. (2016) revelou que eles não são idênticos, o que indica que os valores de K_x e t_{lag} são diferentes dos obtidos por Rodman et al. (2016).

Os resultados apresentados na Figura 5.14 oferecem uma comparação entre a simulação realizada neste estudo e o perfil de temperatura industrial obtido por Rodman et al. (2016).

a) Evolução da biomassa



b) Consumo de açúcar e produção subprodutos



c) Produção do subproduto

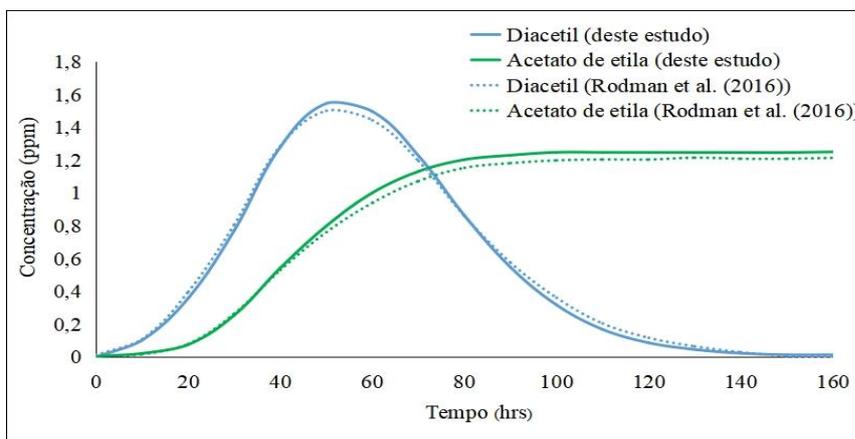


Figura 5.14 - Concentrações de espécies do modelo do autor deste trabalho com a simulação do perfil de temperatura industrial de Rodman et al., (2016). Fonte: Próprio autor.

Na Figura 5.14, as curvas contínuas representam as simulações realizadas pelo presente estudo, enquanto as curvas tracejadas indicam o perfil isotérmico de simulação utilizado no modelo de Rodman et al. (2016). Assim como na Figura 5.13, é observado que ambas as curvas apresentam comportamentos semelhantes. Entretanto, ao examinar os resultados numéricos das concentrações e compará-los novamente com os dados relatados por Rodman et al. (2016), foi constatado que eles também não são idênticos.

Por meio da análise dos dados obtidos pela simulação, verificou-se que os valores de K_x e t_{lag} estimados pela temperatura não isotérmica (perfil de temperatura industrial) apresentaram concentrações mais próximas às dos autores Rodman et al. (2016). Portanto, o perfil de temperatura industrial foi adotado para a busca do perfil de temperatura ótimo neste estudo. O valor utilizado para a otimização é apresentado na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Parâmetro estimado pelo autor deste trabalho.

Parâmetro estimado	Valores	Unidades
t_{lag}	0,3264	K
K_x	59,1341	$g.L^{-1}$

Fonte: Próprio autor.

5.2 OBTENÇÃO DE UM PERFIL DE TEMPERATURA ÓTIMO PARA O PROCESSO DE FERMENTAÇÃO

A segunda fase deste estudo tem como objetivo obter um novo perfil de temperatura para a fermentação da cerveja, com a finalidade de reduzir o tempo do processo sem comprometer a qualidade do produto final, evitando a formação de compostos indesejáveis. Para isso, foi proposta uma rotina de otimização, conforme descrito na segunda parte da metodologia apresentada.

Segundo descrito na literatura, uma redução significativa no tempo de fermentação traz vários benefícios e lucratividade para as indústrias cervejeiras. De acordo com Rodman et al. (2016), encontrar um tempo de fermentação inferior a 130 horas pode melhorar o processo produtivo da Cervejaria WEST. No entanto, a intenção de Rodman et al. (2016) era reduzir o tempo sem afetar a qualidade do produto final. Para atingir esse objetivo, foram utilizados procedimentos computacionais, como o algoritmo de recozimento simulado (SA), a fim de determinar o perfil de temperatura ideal.

Após a execução do procedimento operacional e de todas as análises para avaliar os resultados ótimos da otimização estocástica SA, foi encontrado por Rodman et al. (2016) um perfil de temperatura ideal (Figura 3.7). Ao encontrar o perfil de temperatura ideal, foi realizada uma simulação com os mesmos parâmetros, equações e concentrações iniciais já citados neste trabalho, resultando em uma diminuição no tempo de 16 horas em relação à Cervejaria WEST, além de resultados das concentrações satisfatórios. Uma comparação dos resultados encontrados por Rodman et al. (2016) com as concentrações e tempo da Cervejaria WEST pode ser vista na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Desempenho ideal do perfil de fermentação em Rodman et al. (2016).

Parâmetros	Unidades	Manipulação da cervejaria WEST	Novo perfil de Rodman et al. (2016)
Tempo de fermentação	Hrs	129.5	113.5
Concentração de etanol	g/L	59.0	59.1
Concentração EA	ppm	1.16	1.35
Concentração DY	ppm	0.06	0.09

Fonte: Adaptada de Rodman et al. (2016).

A Tabela 5.13 indica que, além da redução do tempo de fermentação sem comprometer a qualidade da cerveja, houve um leve aumento na concentração de etanol. A validação experimental do modelo foi crucial e alcançou o resultado desejado.

Este estudo tem como objetivo encontrar um perfil de temperatura ainda melhor do que o encontrado por Rodman et al. (2016), capaz de reduzir ainda mais o tempo de fermentação sem comprometer a qualidade da cerveja. Para isso, utilizou-se o método heurístico de otimização *Particle Swarm Optimization (PSO)*, diferentemente do método empregado no estudo anterior. O programa utilizou os parâmetros estimados K_x e t_{lag} (Tabela 5.12), todas as equações (3.2) a (3.19), as concentrações iniciais (Tabela 3.6) e todos os parâmetros (Tabela 4.9). Além disso, foram considerados limites de restrição para acetato de etila e diacetil, que não poderiam exceder 2ppm e 0,1ppm, respectivamente, para evitar influenciar o sabor do produto final. Outros fatores, como o consumo de açúcar até próximo de zero, a concentração de etanol entre 55 e 60 g/L e a evolução da biomassa próxima à do estudo anterior, foram considerados para obter um novo perfil de temperatura ideal.

O algoritmo utilizado foi eficiente e convergiu, com a simulação sendo concluída em apenas 2 segundos, utilizando um computador Dell OptiPlex 3050 com processador Intel (R)

Core(TM) i7-7700T CPU @ 2.90GHz. O resultado final da obtenção do perfil de temperatura ideal é mostrado na Figura 5.15.

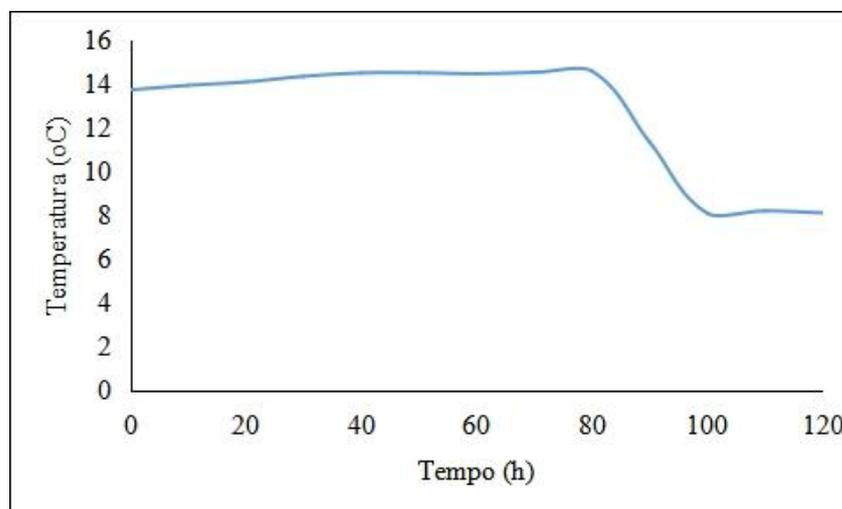
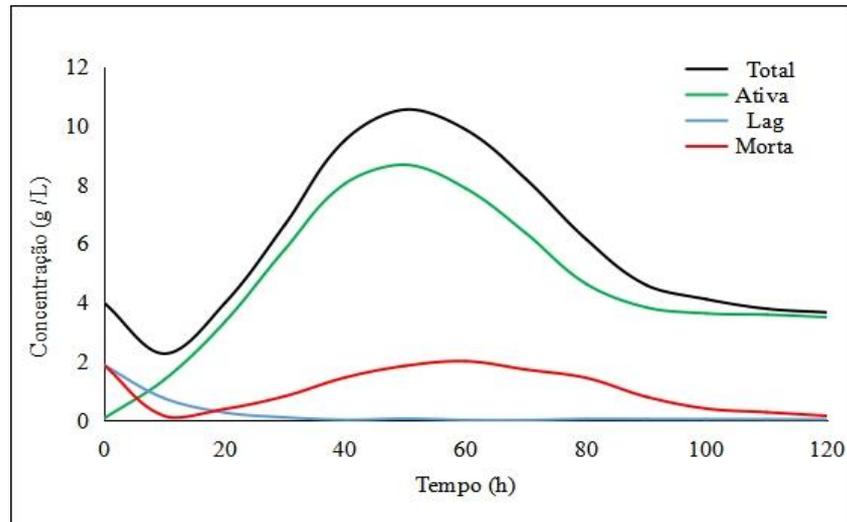


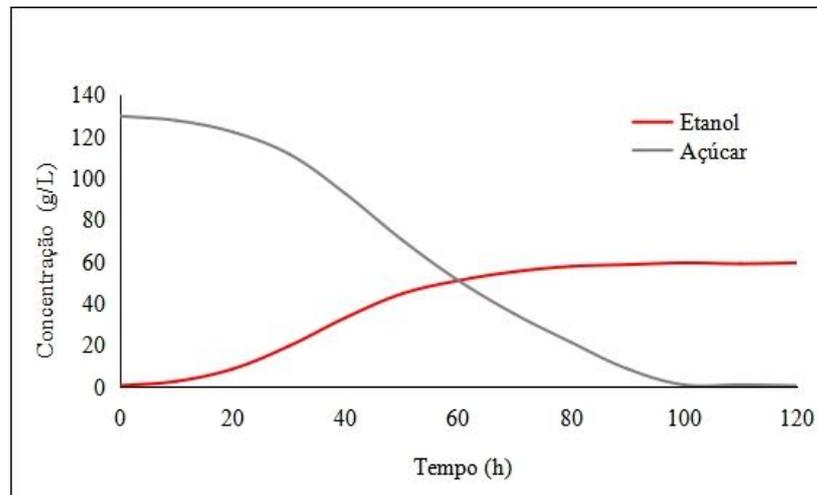
Figura 5.15 - Perfil de temperatura ideal deste estudo. Fonte: Próprio autor.

Após a obtenção do perfil de temperatura ideal por meio do algoritmo *Particle Swarm Optimization (PSO)*, conforme apresentado na Figura 5.15, o modelo matemático foi resolvido utilizando as mesmas equações e dados anteriormente mencionados. Os resultados obtidos foram representados na Figura 5.16.

a) Evolução da biomassa



b) Consumo do açúcar e produção do etanol



c) Produção de subprodutos

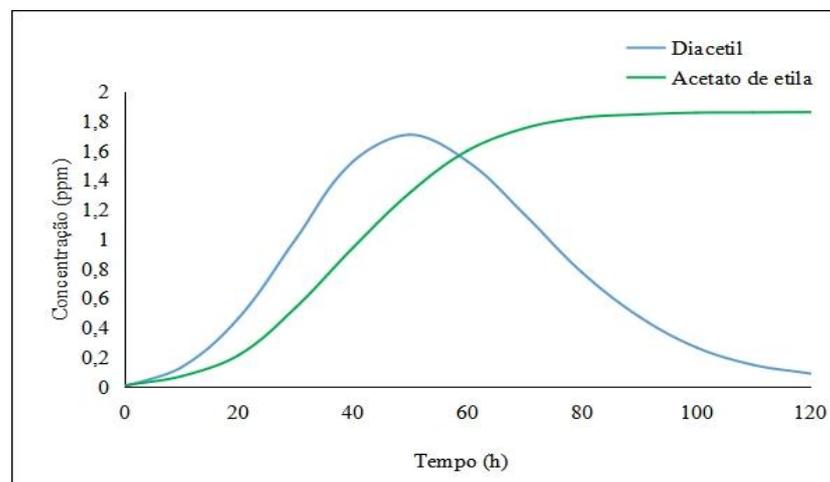


Figura 5.16 - Modelo de fermentação com perfil ótimo de temperatura: (a)-(c) Perfis deste estudo. Fonte: Próprio autor.

Ao analisar a Figura 5.16, pode-se constatar que os gráficos obtidos evidenciam melhorias significativas no desempenho industrial, o que ocorreu devido à redução do tempo de fermentação sem comprometer a qualidade da cerveja. O tempo de fermentação ótimo encontrado neste estudo, em que todas as espécies químicas se mantiveram dentro dos limites favoráveis, foi de 112 horas, com concentração de etanol de 59,2 g/L e concentração de acetato de etila e diacetil de 1,82 ppm e 0,10 ppm, respectivamente.

Os resultados obtidos com o novo perfil ótimo de temperatura deste estudo em comparação com os de Rodman et al. (2016) e da Cervejaria WEST podem ser comparados e apresentados de forma resumida na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 - Desempenho dos perfis de temperatura de Rodman et al. (2016), de WEST Brewery e deste estudo

Parâmetros	Unidades	Manipulação existente (Cervejaria WEST)	Novo perfil de Rodman et al. (2016)	Novo perfil deste estudo
Tempo de Fermentação	hrs	129.5	113.5	112
Concentração de etanol	g/L	59.0	59.1	59.2
Concentração EA	ppm	1.16	1.35	1.82
Concentração DY	ppm	0.06	0.09	0.10

Fonte: Próprio autor.

A análise da Tabela 5.14 evidencia que este estudo alcançou resultados satisfatórios, conseguindo reduzir 17,5 horas em relação ao tempo de fermentação da Cervejaria WEST e 1,5 horas em relação aos resultados de Rodman et al. (2016). O objetivo proposto de diminuir o tempo de fermentação sem afetar a qualidade do produto final foi atingido. Isso significa que, para as indústrias, haverá um aumento de rendimento da planta, com um menor tempo de processo de fermentação e uma produção eficiente e de qualidade, resultando em maior rentabilidade.

Além disso, este estudo apresenta uma vantagem significativa em relação aos resultados obtidos por Rodman et al. (2016), com uma concentração celular ativa mais elevada. Enquanto a concentração alcançada neste estudo foi de 3,5114 g/L, o estudo de Rodman et al. (2016) obteve apenas 2,0857 g/L. A obtenção de uma concentração final mais alta de células ativas de levedura é de extrema relevância para a indústria, uma vez que a recuperação dessas células para serem reutilizadas em fermentações subsequentes reduz os custos associados à aquisição de novas leveduras.

5.3 ANÁLISE EXERGÉTICA DO SISTEMA E O RENDIMENTO

Os resultados encontrados pelo modelo de predição da exergia química específica se encontram na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 - Resultados da exergia química $ex_{quí,i}^o$ de compostos orgânicos puros sólidos e líquidos

Composto	Fórmula	$ex_{quí,i}^o$ (KJ.kg ⁻¹)
Glicose	C ₆ H ₁₂ O ₆	15716,50
Diacetil	C ₄ H ₆ O ₂	25725,51
Acetato de etila	C ₄ H ₈ O ₂	30579,06

Fonte: Próprio autor.

Com base nas informações referentes à exergia química específica dos compostos orgânicos puros sólidos e líquidos (Tabela 5.15), bem como na literatura especializada (Tabela 4.10), na fração molar de cada composto em sua forma pura, na constante dos gases (287,0530 J.Kg⁻¹.K⁻¹) e na temperatura ambiente de referência (T = 298,15K), é possível determinar a exergia química da mistura contendo os compostos de entrada (matéria-prima) e saída (produto) do processo em questão. Os compostos iniciais consistem em glicose e levedura, enquanto os compostos finais são diacetil, acetato de etila e etanol. Os valores da exergia química de entrada e saída do sistema encontram-se apresentados na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 - Resultados das exergias químicas padrão para o início do processo no tempo de 1h e final no tempo de 112h, deste estudo.

Exergias	$ex_{quí,mist.}^o$ (J)
Exergia química inicial	2,04330x10 ⁶
Exergia química de final	1,7468x10 ⁶

Fonte: Próprio autor

O resultado da exergia química final, conforme apresentado na Tabela 5.16, está relacionado a um período de 112 horas, correspondendo ao tempo total do processo de fermentação. Por outro lado, a exergia química inicial é avaliada com base em apenas 1 hora de tempo do processo de fermentação.

Os parâmetros exergéticos de avaliação de desempenho são obtidos mediante a análise dos dados constantes na Tabela 5.16. A eficiência exergética global, a eficiência exergética racional, a exergia destruída normalizada e o índice de sustentabilidade são os principais

resultados obtidos e estão apresentados na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 - Valores dos parâmetros de desempenho exergéticos obtidos neste estudo.

Desempenhos exergéticos	Valores
Eficiência exergética total	85%
Eficiência exergética racional	85%
Exergia destruída	0,2962x10 ⁶ J
Índice de sustentabilidade	6,8973

Fonte: Próprio autor.

A eficiência exergética global do sistema atingiu 85%, o que representa um resultado satisfatório para o processo em questão, uma vez que se aproxima do desempenho de um sistema ideal (100%). A eficiência exergética racional apresentou valores similares à eficiência exergética total, o que evidencia que o processo gera poucos subprodutos e quase todos os compostos presentes na matéria-prima de entrada são transformados em produto final, indicando a efetividade do sistema.

A perda total de exergia do sistema foi reduzida, correspondendo a cerca de 14% da exergia fornecida ao processo. As principais fontes de destruição da exergia estão relacionadas às reações bioquímicas que ocorrem durante o processo fermentativo da cerveja, a reprodução e morte de micro-organismos, entre outros fatores. É importante destacar que, como a perda de exergia é relativamente pequena (14%), o sistema se apresenta como uma opção sustentável.

O índice de sustentabilidade termodinâmica (IST) obtido neste estudo foi de 6,8973, conforme apresentado na Tabela 5.17. Resultados de IST próximos ou iguais a 1 indicam condições experimentais pouco sustentáveis termodinamicamente (DA SILVA, 2021). O fato de o resultado do IST ter atingido aproximadamente 7 indica que os recursos exergéticos fornecidos ao fermentador foram utilizados de maneira sustentável.

A eficiência racional do processo ao longo do tempo, é demonstrada na Figura 5.17.

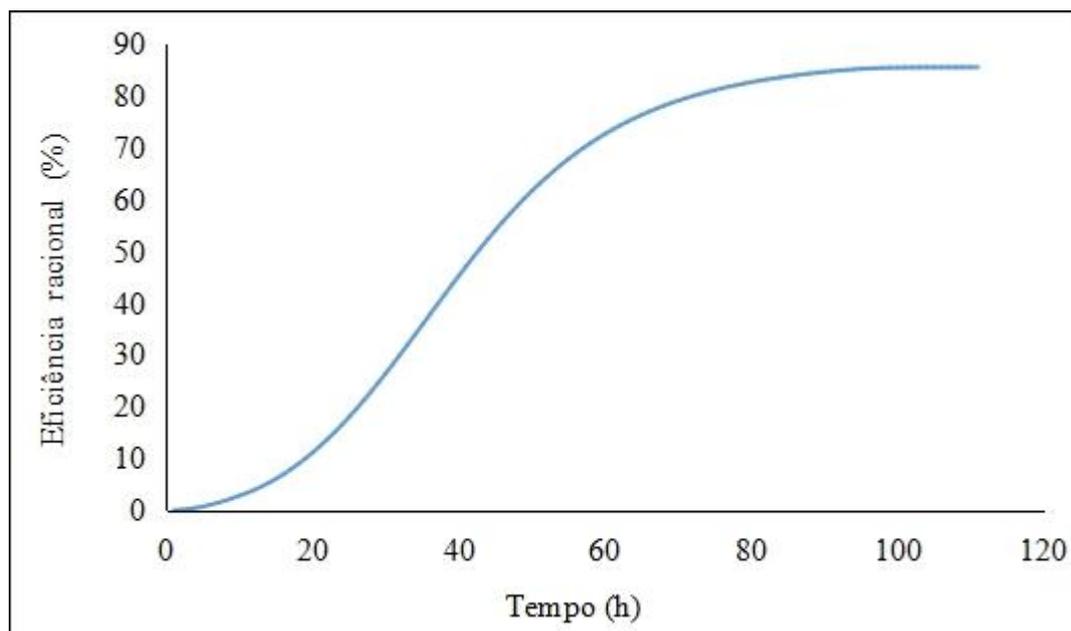


Figura 5.17 - Eficiência racional ao longo do tempo calculada neste estudo. Fonte: Próprio autor.

De acordo com o resultado encontrado da análise exergética total (Tabela 5.17), é possível observar que a eficiência do processo foi aumentando gradativamente conforme foi passando o tempo do processo, e a eficiência máxima (85%) foi obtida no final do processo fermentativo.

O rendimento do processo fermentativo foi de 0,45 grama de etanol por grama de glicose consumido. A eficiência exergética total está atrelada ao rendimento, e o elemento predominante nesses dois parâmetros é o etanol, por isso a semelhança entre as curvas, como representado na Figura 5.18.

De acordo com o resultado obtido na análise exergética total (Tabela 5.17), é possível observar que a eficiência do processo fermentativo aumentou gradualmente ao longo do tempo, alcançando a eficiência máxima de 85% no final do processo. O rendimento do processo fermentativo, foi de 0,45 grama de etanol por grama de glicose consumido, e o principal fator que influencia tanto na eficiência exergética total quanto no rendimento é o etanol. Portanto, há uma semelhança entre as curvas desses dois parâmetros, como pode ser visto na Figura 5.18.

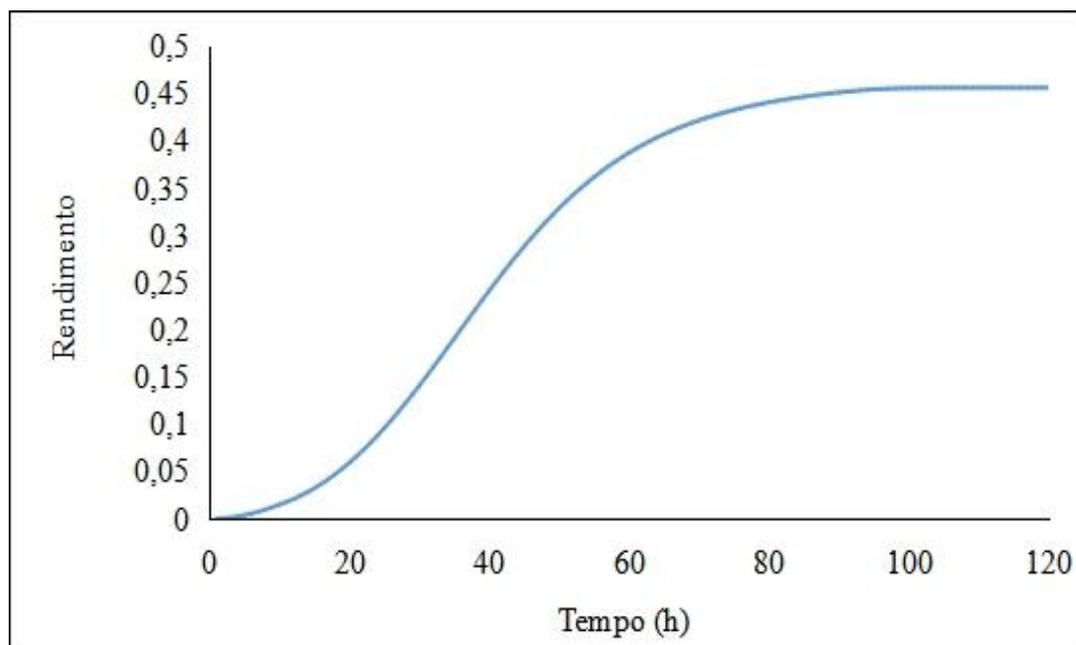


Figura 5.18 - Análise do rendimento do processo ao longo do tempo.

Em outras palavras, o desempenho do processo de produção de etanol está diretamente relacionado à eficiência de conversão da glicose em etanol, sendo influenciado por diversos fatores, como temperatura e a levedura utilizada. Por meio da otimização realizada, conseguimos melhorar o rendimento da glicose e, conseqüentemente, reduzir o tempo de processo em comparação com o estudo de Rodman et al. (2016). Além disso, conseguimos maximizar a eficiência exergética do sistema. Enquanto os resultados obtidos por Rodman et al. (2016) indicavam uma eficiência exergética e um rendimento máximos de 83,95% e 0,44 gramas de etanol por grama de glicose consumido, respectivamente, os resultados deste estudo demonstraram uma eficiência e um rendimento superiores.

6- CONCLUSÕES

A etapa de fermentação é considerada a operação crucial em unidades produtoras de cerveja, e é o objeto de estudo desta dissertação. Durante o processo de fermentação, mudanças operacionais podem ser realizadas para aumentar a produtividade e melhorar a qualidade da cerveja. Uma melhoria significativa do processo, como a redução do tempo de fermentação, pode trazer benefícios para a planta industrial, resultando em maior lucratividade.

Nesse sentido, este estudo propõe uma metodologia para encontrar o perfil de temperatura ideal por meio do modelo matemático proposto por Andrés-Toro et al. (1998). A metodologia consiste em três etapas, começando pela estimativa dos valores dos parâmetros K_x e t_{lag} , que não foram fornecidos por Rodman et al. (2016), utilizando uma rotina de otimização no MATLAB. Os valores encontrados foram 59,1341 g/L e 0,3264 K, respectivamente. Em seguida, a simulação matemática do processo de fermentação foi validada, mostrando resultados satisfatórios e uma aproximação do modelo deste estudo em relação ao modelo de Rodman et al. (2016).

Na segunda etapa da metodologia, um algoritmo *Particle Swarm Optimization (PSO)* foi desenvolvido para determinar um novo perfil de temperatura ideal que maximiza as funções objetivo, considerando o aumento da concentração de etanol e a redução do tempo de fermentação, dentro dos limites de restrição dos subprodutos diacetil e acetato de etila. O perfil encontrado apresentou um desempenho satisfatório e melhor do que o modelo de Rodman et al., (2016), com uma redução de 17,5 horas em relação ao desempenho da cervejaria WEST, mantendo as concentrações de subprodutos abaixo dos valores limites.

Na terceira etapa, a análise exérgica foi realizada para avaliar a eficiência do processo e mostrou um desempenho em torno de 85% do sistema. A exergia destruída, que afeta o processo de fermentação, foi relativamente pequena em relação à exergia de entrada, representando apenas 14%, indicando que o sistema é sustentável. O rendimento do processo fermentativo foi de 0,45 grama de etanol por grama de glicose consumido.

Para projetos futuros, busca-se estabelecer uma nova rotina de aprimoramento visando controlar, de forma mais precisa, a concentração dos subprodutos.

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGHBASHLO, M.; MANDEGARI, M.; TABATABAEI, M.; FARZAD, S.; SOUFIYAN, M. M.; GORGENS, J. F. Exergy analysis of a lignocellulosic-based biorefinery annexed to a sugarcane mill for simultaneous lactic acid and electricity production. **Energy**, v. 149, n. February, p. 623–638, 2018a.

AGHBASHLO, M.; TABATABAEI, M.; RASTEGARI, H.; GHAZIASKAR, H. S.; VALIJANIAN, E. Exergy-based optimization of a continuous reactor applied to produce value-added chemicals from glycerol through esterification with acetic acid. **Energy**, v. 150, n. February, p. 351–362, 2018b.

ANACLETO, T. F.; SILVA, A. E. G. O.; SILVA, S. R.; COSTA JUNIOR, E. F.; COSTA, A. O. S. Chemical exergy influence in the exergetic analysis of a real clinker rotary kiln. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 38, p. 197–214, 2021.

ANACLETO, T. F.; TURETTA, L. F.; COSTA JR., E. F.; COSTA, A. O. S. Efeito da reação de calcinação nas análises energética e exergetica de um forno rotativo empregado na produção de clínquer. v. 64, n. 372, p. 507–518, 2018.

ANDRÉS-TORO, B.; GIRÓN-SIERRA J. M.; LÓPEZ-OROZCO J. A.; FERNÁNDEZ-CONDE C.; PEINADO J. M.; GARCIA-OCHOA F. A kinetic model for beer production under industrial operational conditions. *Mathematics and Computers in Simulation*, v. 48, n. 1, p. 65-74, 1998.

ANDRÉS-TORO B.; GÍRON-SIERRA J. M.; FERNANDEZ-BLANCO P.; LÓPEZOROZCO J. A.; BESADA-PORTAS E. Multiobjective optimization and multivariable control of the beer fermentation process with the use of evolutionary algorithms. **Journal of the Zhejiang University – SCIENCE**. v. 5, n. 4), p. 378-389, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CERVEJA, 2022. Disponível em: <cervbrasil.org.br> Acessado em: 14 de abril de 2023.

BEEREQUIPMENT. 2020. Disponível em: <<http://portuguese.craft-beerequipment.com/sale-12250817-30001-40001-50001-beer-fermentation-tank-for-large-beer-brewery-equipment-brew-system.html.>> Acesso em: 20 de dezembro de 2021.

BENACCHIO, A. PADILHA, J. C., DA SILVA ARRIECHE, L. Produção de cerveja artesanal e oportunidades de automação. **Orbis Latina**, v. 13, n. 1, p. 93-107, 2023.

BOATENG, C. O.; LEE, K. T. Comparative thermodynamic sustainability assessment of lignocellulosic pretreatment methods for bioethanol production via exergy analysis. **Chemical Engineering Journal**, v. 228, n. April, p. 162–171, 2013.

BOULTON, C.; QUAIN, D. *Brewing Yeast and Fermentation*. Wiley. 2008.

BRASIL. Decreto nº. 6871, de 04 de junho de 2009. Regulamenta a Lei n. 8.918, de 14 de julho de 1994, que dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas.

BÜHLER, F.; NGUYEN, T.; KJÆR, J.; MÜLLER, F.; ELMGAARD, B. Energy , exergy and advanced exergy analysis of a milk processing factory. *Energy*, v. 162, p. 576–592, 2018.

CAPECE A.; ROMANIELLO R.; PIETRAFESA A.; SISESTO G.; PIETRAFESA R.; ZAMBUTO M.; ROMANO P. Use of *Saccharomyces cerevisiae* var. *bouardii* in co-fermentations with *S. cerevisiae* for the production of craft beers with potential healthy value-added. *International Journal of Food Microbiology*, v. 284, p. 22-30, 2018.

CARRILLO-URETA G. E.; ROBERTS P. D.; BECERRA V. M. **Optimal control of fermentation processes**. Tese de Doutorado. City University London. 2003.

CARRILLO-URETA G. E.; ROBERTS P. D.; BECERRA V. M. Genetic algorithms for optimal control of beer fermentation. *International Symposium on Intelligent Control*. p. 391-396. 2001.

CASTRO, O. M. **Obtenção de cerveja super concentrada com a utilização de xarope de milho como adjunto de malte**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CNPEN, 2017. Disponível em:<<https://cnpem.br/fermentacao-continua-ou-em-batelada/>> Acesso em: 25 de novembro de 2021.

CZYZYK, J.; OWEN J.H.; WRIGHT S.J. Optimization on the Internet: Ambitious NEOS project aims to connect users of optimization technology and provide them with problem-formulating information and software. *Or Ms Today*, v.24, p. 48-51, 1997.

DADAK A.; AGHBASHLO M.; TABATABAEI M.; YOUNESI H.; NAJAFPOUR, G. Using exergy to analyse the sustainability of fermentative ethanol and acetate production from syngas via anaerobic bacteria (*Clostridium ljungdahlii*). *Sustain. Energy Technol.* 15, 11–19. 2016.

DA SILVA, S. R. Análise exérgica e o uso eficiente de recursos em processos biotecnológicos: modelagem e otimização de variáveis de processo. 2021.

ENGASSER, J.M.; MARC, I.; MOLL, M.; DUTEURTE, B. Kinetic modelling of beer fermentation. In: *Proceedings of the 18th Congress of the European Brewery Convention*, Copenhagen, pp. 579–586. 1981.

FELLAOU S.; BOUNAHMIDI T. Evaluation of energy efficiency opportunities of a typical Moroccan cement plant: Part I. Energy analysis. *Applied Thermal Engineering*, v. 115, p. 1161–1172, 2017.

GEE, D. A.; RAMIREZ, W. F. Optimal temperature control for batch beer fermentation. *Biotechnology and bioengineering*, v. 31, n. 3, p. 224-234, 1988.

GEE, D. A.; RAMIREZ, W. F. A flavour model for beer fermentation. *Journal of the Institute of Brewing*, v. 100, n. 5, p. 321-329, 1994.

GONÇALVEZ, L. F. G. **Cervejaria Beeringá–Brewpub com processo de fermentação contínua realizada pela levedura Kveik**. Dissertação de mestrado. 2021.

HOFFMAN, L. A.; QUADRELLI, G.; PIZZOLATO, N. D.; ARAUJO, F. O. Proposta de sistema baseado em lógica Fuzzy como modelo de apoio a decisão para a qualidade do produto acabado em uma microcervejaria brasileira. *Espacios*, v. 38, p.31, 2016.

JUNIOR, A. AD.; VIEIRA, A. G.; FERREIRA, T. P. Processo de produção de cerveja. *Revista Processos Químicos*, v. 3, n. 6, p. 61-71, 2009.

KANG, Q.; TAN, T. Exergy and CO₂ analyses as key tools for the evaluation of bio ethanol production. *Sustainability (Switzerland)*, v. 8, n. 1, p. 1–11, 2016.

KUCK, L. S. Cerveja: Sabor e Aroma. Pelotas: UFPEL, 2008, 46p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Química em Alimentos) Departamento de Ciências dos Alimentos. Universidade Federal de Pelotas, 2008

KUNZE, W. **Technology Brewing and Malting**. Berlim: VLB. p. 433-435. 1997.

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**, v. 86, n. 3, p. 261-272, 2004.

MASTANJEVIK, K., KRSTANOVIC, V., LUKINAC, J., JUKIC, M., LUCAN, M. Craft brewin-is it really about the sensory revolution?. **Kvasny prumysl**, v. 65, n. 1, p.13-16, 2019.
MEGA, J. F.; NEVES, E.; ANDRADE, C. J. A produção de cerveja no Brasil. *Revista Citino*, v. 1, n. 1, p. 34-42, 2011.

MEUSSDOERFFER F. G. Handbook of brewing: Processes, technology, markets. Weinheim: Wiley-VHC Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009, 42 p.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Anuário da cerveja: 2021 /. Secretária de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA/SDA, 2022. 36 p., il.

MORAN, M. J. **Availability analysis: a guide to efficient engineering use**. New Jersey: Prentice Hall, 1982.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BAILEY, M. B. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7.ed. LTC, 2013.

MORRIS, D. R.; SZARGUT, J., STEWARD, F. R. Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes. Hemisphere, 1986.

PTASINSKI, K. **Efficiency of biomass energy: An energy approach to biofuels, power, and biorefineries**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.

RAMOS, V. F.; PINHEIRO, O. S.; FERREIRA DA COSTA, E.; SOUZA DA COSTA, A. O. A method for exergetic analysis of a real kraft biomass boiler. *Energy*, v. 183, p. 946–957, 2019.

REBELLO, F. F. P. Produção de cerveja. *Revista Agrogeoambiental*, v. 1, n. 3, 2009.

RODMAN, A. D.; GEROGIORGIS, D. I. Multi-objective optimisation of flavour and processing time in beer fermentation via dynamic simulation. In: *Computer Aided Chemical Engineering*. Elsevier, 2016. p. 1033-1038.

ROGERIO, B. M.; MORETTI, R.H. Produção de cerveja Pilsen com malte concentrado. CONGRESSO INTERNO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA. 16., São Paulo, **Tecnologia de Alimentos**, UNICAMP, São Paulo, 2008.

ROSA, N. A; AFONSO, J. C. A química da cerveja. *Química e Sociedade*, São Paulo, v. 37, p. 98-105, 2015.

SANTOS, S. P. **Os Primórdios da Cerveja no Brasil**. Ateliê Editorial. 1ª ed., Cotia, 2003.

SILVA, S. R.; BONANATO, G.; DA COSTA JR, E. F.; SARROUH, B.; DA COSTA, A. O. S. Specific chemical exergy prediction for biological molecules using hybrid models. *Chemical Engineering Science*, v. 235, p. 116462, 2021.

Sindicato Nacional da Indústria da Cerveja. Disponível em <<https://www.sindicerv.com.br/o-setor-em-numeros/>> Acesso em 10 de Setembro de 2021.

SHARIFIAN, S.; MADADKHANI, M.; RAHIMI, M.; MIR, M.; BAGHBAN, A. QSPR based ANFIS model for predicting standard molar chemical exergy of organic materials. *Petroleum Science and Technology*, v. 37, p. 2174–2181, 2019.

SHIEH, J. H.; FAN, L. T. Estimation of energy (enthalpy) and exergy (availability) contents in structurally complicated materials. *Energy Sources* 6, 1–46. 1982.

SOHEL, M. I.; JACK, M. W. Thermodynamic analysis of lignocellulosic biofuel production via a biochemical process: Guiding technology selection and research focus. *Bioresour. Technol.*, v. 102, p. 2617–2622, 2011.

SOLTANIAN, S.; AGHBASHLO, M.; ALMASI, F.; BANDBAFHA, H. H.; NIZAMI, A. S.; OK, Y. S.; LAM, S. S.; TABATABAEI, M. A critical review of the effects of pretreatment methods on the exergetic aspects of lignocellulosic biofuels. **Energy Conversion and Management**, v. 212, n. February, p. 112792, 2020.

SONG, G.; XIAO, J.; ZHAO, H.; SHEN, L. A unified correlation for estimating specific chemical exergy of solid and liquid fuels. *Energy* 40, 164–173. 2012.

SOUZA, T. S.; CORIOLANO D. L.; GOLÇALVES D. P.; SOUSA T. G. R. desenvolvimento de um reator em batelada para produção de ésteres, ácidos e álcoois superiores. **Anais Semana Nacional de Ciência e Tecnologia (SNCT)**, v. 1, n. 1, p. 173-177, 2019.

STENGEL, R. F. *Optimal Control and Estimation*. Dover Publications. 1994.

SZARGUT, J.; STYRYLSKA, T. Approximate evaluation of the exergy of fuels. *Brennst. Wärme Kraft*, v. 16, n. 12, p. 589-596, 1964.

SZARGUT, J. Chemical exergies of the elements. *Applied energy*, v. 32, n. 4, p. 269-286, 1989.

SZARGUT, J. **Exergy Method: Technical and Ecological Applications**. v. 18. WIT Press. México, 2005.

TEXEIRA, L. V. **Análise Sensorial na Indústria de alimentos**. Instituto de Laticínios Cândido Tostes. Minas Gerais. v. 64. n. 336, p. 12-21, jan./fev.2009.

TRELEA, I. C.; TITICA, M.; LANDAUD, S.; LATRILLE, E.; CORRIEU, G.; CHERUY, A. Predictive modelling of brewing fermentation: from knowledge-based to black-box models. *Math. Comput. Simul.* 56, 405–424. 2001.

USTAOGLU, A.; ALPTEKIN, M.; AKAY, M. E. Thermal and exergetic approach to wet type rotary kiln process and evaluation of waste heat powered ORC (Organic Rankine Cycle). *Applied Thermal Engineering*, v. 112, p. 281–295, 2017.

XIAO, J.; ZHOU, Z.; ZHANG, G. Ant colony system algorithm for the optimization of beer fermentation control. **Journal of Zhejiang University-Science A**, v. 5, p. 1597-1603, 2004.

YILDIRIM, N.; GENÇ, S. Energy and exergy analysis of a milk powder production system. *Energy Conversion and Management*, v. 149, p. 698–705, 2017.