

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE BIOTECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA

**AVALIAÇÃO DA CONVERSÃO DE AÇÚCARES REDUTORES DURANTE A
MOSTURAÇÃO CERVEJEIRA EM SISTEMAS ESTÁTICO E COM RECIRCULAÇÃO**

Aurea Camilli Ramos

Uberlândia - MG

Maior / 2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE BIOTECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA

**AVALIAÇÃO DA CONVERSÃO DE AÇÚCARES REDUTORES DURANTE A
MOSTURAÇÃO CERVEJEIRA EM SISTEMAS ESTÁTICO E COM RECIRCULAÇÃO**

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Biotecnologia, da Universidade Federal de Uberlândia, para obtenção do grau de Bacharel em Biotecnologia.

Orientador: Edgar Silveira Campos

Uberlândia - MG
Maior / 2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE BIOTECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA

**AVALIAÇÃO DA CONVERSÃO DE AÇÚCARES REDUTORES DURANTE A
MOSTURAÇÃO CERVEJEIRA EM SISTEMAS ESTÁTICO E COM RECIRCULAÇÃO**

Aurea Camilli Ramos

Prof. Dr. Edgar Silveira Campos
Instituto de Biotecnologia (IBTEC)

Instituto de Biotecnologia homologado pela Coordenação do
Curso de Biotecnologia em ____/____/____.

Profª. Dra. Rute Magalhães Brito

Uberlândia - MG
Maior / 2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE BIOTECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA

**AVALIAÇÃO DA CONVERSÃO DE AÇÚCARES REDUTORES DURANTE A
MOSTURAÇÃO CERVEJEIRA EM SISTEMAS ESTÁTICO E COM RECIRCULAÇÃO**

Aurea Camilli Ramos

Aprovado pela Banca Examinadora em: __/__/____. Nota:

Prof. Dr. Edgar Silveira Campos

Prof. Dr. Nilson Nicolau Junior

Kellen Cristina Silva Marques

Uberlândia, dia 20 de maio de 2026

“O importante é não parar de questionar. A
curiosidade tem sua própria razão de existir.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Chegar até aqui não foi um caminho que percorri sozinha. Por isso, antes de qualquer coisa, gostaria de agradecer às pessoas que estiveram comigo durante essa jornada e que fizeram parte da pessoa e da profissional que me tornei.

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Andrea de Fátima Domingos e José Miguel Ramos, a quem dedico este trabalho. Nada disso teria sido possível sem vocês. Obrigada por todo amor, por acreditarem em mim até quando eu mesma tive dúvidas, por me apoiarem em todas as escolhas e por me darem a oportunidade de me tornar biotecnologista. Tudo o que conquistei pertence a vocês.

Também gostaria de agradecer à minha gatinha, Vanessa, minha primeira filha e companheira. Obrigada por ter estado ao meu lado durante tantas noites enquanto eu escrevia este trabalho, sempre deitada perto de mim.

À minha irmã Isabella, obrigada por me ensinar, mesmo sem perceber, a enxergar a vida de formas diferentes. Ter você comigo foi essencial.

Aos meus amigos Mario e Isabela, obrigada por toda parceria ao longo desses anos. Vocês estiveram presentes tanto nos momentos acadêmicos quanto nos pessoais, comemorando conquistas, ouvindo reclamações e ajudando quando tudo parecia difícil. Sou muito grata por ter encontrado em vocês amigos e parceiros para a profissão e para a vida.

Ao Itallo e à Luana, obrigada pelo apoio principalmente nesta etapa final, pela amizade e por estarem presentes quando precisei sempre deixando tudo mais leve.

À Tayna, ao Leonardo e à Isadora, agradeço o carinho e por continuarem torcendo por mim ao longo dessa caminhada, mesmo à distância.

Ao meu orientador, Edgar, obrigada por aceitar participar desta etapa comigo, pelos ensinamentos compartilhados e pela contribuição para este trabalho.

Agradeço ao IBTEC e à UFU, por todas as oportunidades, aprendizados e experiências que fizeram parte da minha formação.

Também agradeço a Deus e à minha espiritualidade, que sempre estiveram comigo, iluminando meus caminhos e me dando força nos momentos em que pensei em desistir.

Por fim, agradeço a mim mesma. Por não ter desistido, mesmo quando as dificuldades fizeram o caminho parecer impossível. Por continuar tentando, errando, aprendendo e fazendo o melhor que eu podia com o que tinha naquele momento.

Concluo esta etapa com a certeza de que nenhuma conquista é individual. Levo comigo um pouco de cada pessoa que fez parte dessa caminhada.

RESUMO

A mosturação constitui uma das etapas mais importantes da produção cervejeira, sendo responsável pela hidrólise enzimática do amido e formação de açúcares fermentáveis que influenciam diretamente o rendimento do processo. Nesse contexto, estratégias capazes de compreender a dinâmica da conversão dos açúcares durante a mosturação apresentam potencial interesse industrial devido à possibilidade de redução do tempo operacional e melhoria da eficiência do processo. Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar o comportamento da conversão de açúcares redutores durante a mosturação cervejeira em sistemas estático e com recirculação, buscando compreender como diferentes condições operacionais influenciam a dinâmica da hidrólise do amido ao longo do processo experimental. Foram realizados ensaios de mosturação a 68 °C utilizando malte pilsen em sistema estático e sistema com recirculação contínua, com coletas nos tempos 0, 5, 10, 15 e 20 minutos. A concentração de açúcares redutores foi determinada pelo método do ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS), com leituras espectrofotométricas realizadas a 540 nm e posterior conversão dos valores por meio de curva de calibração de glicose. Também foram avaliadas taxas de conversão, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados experimentais. Os resultados demonstraram aumento inicial expressivo da concentração de açúcares redutores em ambos os sistemas, indicando intensa conversão nos primeiros minutos da mosturação. O sistema estático apresentou maior velocidade inicial de conversão, atingindo concentração máxima média aos 10 minutos (14,361 mg), enquanto o sistema com recirculação apresentou aumento mais gradual, com pico aos 15 minutos (14,171 mg). Em relação à variabilidade experimental, o sistema com recirculação apresentou tendência mais contínua de redução do coeficiente de variação nos tempos finais, sugerindo maior uniformidade entre as repetições experimentais. Os resultados indicam que diferentes condições operacionais influenciam o perfil temporal da conversão dos açúcares redutores durante a mosturação, contribuindo para compreensão da dinâmica do processo sob distintas condições experimentais e fornecendo subsídios para futuras investigações voltadas à otimização da produção cervejeira.

Palavras-Chave: mosturação cervejeira; açúcares redutores; método DNS; recirculação; hidrólise do amido.

ABSTRACT

Mashing is one of the most important stages in beer production, being responsible for the enzymatic hydrolysis of starch and the formation of fermentable sugars, which directly influence process efficiency. In this context, strategies capable of understanding the dynamics of sugar conversion during mashing are of industrial interest due to their potential to reduce operational time and improve process performance. Thus, the present study aimed to evaluate the conversion profile of reducing sugars during beer mashing under static and recirculation systems, seeking to understand how different operational conditions influence starch hydrolysis dynamics throughout the experimental process. Mashing experiments were carried out at 68 °C using Pilsner malt under static and continuous recirculation systems, with sampling performed at 0, 5, 10, 15, and 20 minutes. Reducing sugar concentration was determined using the 3,5-dinitrosalicylic acid (DNS) method, with spectrophotometric readings performed at 540 nm and subsequent conversion of values based on a glucose calibration curve. Conversion rates, standard deviation, and coefficient variation were also evaluated. The results demonstrated a pronounced initial increase in reducing sugar concentration in both systems, indicating intense conversion activity during the first minutes of mashing. The static system exhibited a higher initial conversion rate, reaching a maximum average concentration at 10 minutes (14.361 mg), whereas the recirculation system showed a more gradual increase, with a peak at 15 minutes (14.171 mg). The recirculation system presented a more continuous reduction in the coefficient of variation at the final stages, suggesting greater uniformity among experimental replicates over time. The findings indicate that different operational conditions influence the temporal profile of reducing sugar conversion during mashing, contributing to a better understanding of process dynamics under distinct experimental conditions and providing a basis for future studies aimed at optimizing beer production.

Keywords: beer mashing; reducing sugars; DNS method; recirculation; starch hydrolysis.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição das soluções utilizadas para construção da curva padrão de glicose. Fonte: Autoria própria (2026)	23
Tabela 2: Condições experimentais da mosturação em sistema estático	24
Tabela 3: Condições experimentais da mosturação em sistema com recirculação. Fonte: Autoria própria (2026).	25
Tabela 4: Valores de absorbância obtidos. Fonte: Autoria própria (2026).	29
Tabela 5: Concentração de açúcares redutores (mg) obtida durante a 1ª repetição da mosturação estática nos diferentes tempos experimentais. Fonte: Autoria própria (2026).	31
Tabela 6: Concentração de açúcares redutores (mg) obtida durante a 2ª repetição da mosturação estática nos diferentes tempos experimentais. Fonte: Autoria própria (2026).	31
Tabela 7: Concentração de açúcares redutores (mg) obtida durante a 3ª repetição da mosturação estática nos diferentes tempos experimentais. Fonte: Autoria própria (2026).	31
Tabela 8: Valores médios da concentração de açúcares redutores (mg) durante a mosturação estática. Fonte: Autoria própria (2026).	32
Tabela 9: Taxa média de conversão dos açúcares redutores durante a mosturação estática. Fonte: Autoria própria (2026).....	34
Tabela 10: Desvio padrão e coeficiente de variação obtidos durante a mosturação estática. Fonte: Autoria própria (2026).	37
Tabela 11: Concentração de açúcares redutores (mg) obtida durante a 1ª repetição do experimento de mosturação com recirculação nos diferentes tempos experimentais. Fonte: Autoria própria (2026).....	38
Tabela 12: Concentração de açúcares redutores (mg) obtida durante a 2ª repetição do experimento de mosturação com recirculação nos diferentes tempos experimentais. Fonte: Autoria própria (2026).....	39
Tabela 13: Concentração de açúcares redutores (mg) obtida durante a 3ª repetição do experimento de mosturação com recirculação nos diferentes tempos experimentais. Fonte: Autoria própria (2026).	39
Tabela 14: Valores médios da concentração de açúcares redutores (mg) durante a mosturação com recirculação. Fonte: Autoria própria (2026).....	40
Tabela 15: Taxa média de conversão dos açúcares redutores durante a mosturação com recirculação. Fonte: Autoria própria (2026).	42

Tabela 16: Desvio padrão e coeficiente de variação obtidos durante a mosturação com recirculação. Fonte: Autoria própria (2026).	43
Tabela 17: Comparação da concentração média de açúcares redutores entre os sistemas estático e com recirculação. Fonte: Autoria própria (2026).	44
Tabela 18: Comparação da taxa média de conversão dos açúcares redutores entre os sistemas avaliados. Fonte: Autoria própria (2026).	45
Tabela 19: Comparação do desvio padrão e coeficiente de variação entre os sistemas estático e com recirculação. Fonte: Autoria própria (2026).	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Crescimento do setor cervejeiro Fonte: Imagem adaptada Ministério da Agricultura e Pecuária, 2026.....	16
Figura 2: Método de produção da cerveja Fonte: Imagem adaptada de Bicalho et al., 2020.....	17
Figura 3: Principais rampas de temperatura da mosturação cervejeira Fonte: Imagem adaptada de Muxel et al., 2016.....	19
Figura 4: Curva de calibração da glicose obtida a partir da regressão linear. Fonte: Autoria própria (2026).	30
Figura 5: Curva de conversão da concentração média de açúcares redutores (mg) durante a mosturação estática nos diferentes tempos experimentais. Fonte: Autoria própria (2026).....	32
Figura 6: Taxa média de conversão dos açúcares redutores (mg/min) durante os intervalos avaliados no experimento de mosturação estática. Fonte: Autoria própria (2026).....	34
Figura 7: Curva de conversão da concentração média de açúcares redutores (mg) durante a mosturação com recirculação nos diferentes tempos experimentais. Fonte: Autoria própria (2026).....	39
Figura 8: Taxa média de conversão dos açúcares redutores (mg/min) durante os intervalos avaliados no experimento de mosturação com recirculação.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS

PIB	Produto Interno Bruto
DNS	Ácido 3,5-dinitrosalicílico
LAPBBIO	Laboratório de Processos e Bioprocessos Biotecnológicos
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
CV	Coeficiente de Variação
DP	Desvio Padrão
R ²	Coeficiente de Determinação
α -amilase	Alfa – amilase
β -amilase	Beta - amilase

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Contexto histórico e importância da cerveja	15
1.2 Contexto econômico da indústria cervejeira	15
1.3 Etapas da produção cervejeira	16
1.4 Mosturação cervejeira	17
1.4.1 Enzimas e Rampas de Temperatura	18
1.4.2 Métodos de mosturação	19
1.4.3 Mosturação em escala industrial e artesanal	19
1.5 Limitações da mosturação cervejeira	20
1.6 Agitação e recirculação aplicadas à mosturação	20
2. OBJETIVOS	21
2.1 Objetivo Geral:	21
2.2 Objetivos Específicos:	21
3. MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 Materiais utilizados	21
3.2 Preparo da solução padrão de glicose	22
3.3 Método do DNS e Espectrofotometria	22
3.4 Determinação da curva de calibração	23
3.5 Mosturação em sistema estático	23
3.6 Mosturação em sistema com recirculação	24
3.7 Tratamento dos dados	25
3.8 Análise estatística	26
3.8.1 Média aritmética	27
3.8.2 Desvio padrão	27
3.8.3 Coeficiente de variação	28
3.8.4 Taxa de conversão	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1 Curva de calibração da glicose	29
4.2 Conversão dos açúcares redutores durante a mosturação estática	30
4.2.1 Curva de conversão dos açúcares redutores	30
4.2.2 Taxa de conversão dos açúcares redutores durante a mosturação	33
4.2.3 Hipóteses para redução dos açúcares redutores	35
4.2.4. Variabilidade experimental: desvio padrão e coeficiente de variação	36
4.3 Conversão dos açúcares redutores durante a mosturação com recirculação	38

4.3.1 Curva de conversão dos açúcares	38
4.3.2 Taxa de conversão dos açúcares redutores.....	41
4.3.3 Hipóteses para comportamento observado na mosturação com recirculação.....	42
4.3.4 Variabilidade experimental: desvio padrão e coeficiente de variação.....	43
4.4 Comparação entre sistemas estático e com recirculação	44
4.5 Comparação com dados da literatura	47
5. CONCLUSÃO	48
6. REFERÊNCIAS.....	49

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contexto histórico e importância da cerveja

A cerveja é uma bebida obtida a partir da fermentação alcoólica de grãos malteados, principalmente cevada, água, lúpulo e levedura, podendo também ser utilizadas outras fontes amiláceas, como milho, arroz e trigo (CARVALHO, 2011)

Embora não exista confirmação definitiva sobre o momento exato de sua invenção, há fortes evidências de que a fermentação de cereais passou a ser utilizada para conservação e consumo de grãos após o surgimento da agricultura. Evidências arqueológicas encontradas em Jiahu, no norte da China, indicam a existência de bebidas fermentadas entre 9000 e 7000 anos atrás. Além disso, registros demonstram a produção sistemática de cerveja na antiga Mesopotâmia por volta de 6000 a.C., período em que a bebida passou a integrar sistemas econômicos organizados das cidades sumérias. No Egito Antigo, pão e cerveja constituíam alimentos fundamentais da dieta da população e já eram produzidos comercialmente aproximadamente em 5000 a.C. Posteriormente, a produção cervejeira difundiu-se pela Europa, estando presente na Grécia antiga e em outras civilizações ao longo da história, embora, em algumas regiões, o vinho fosse a bebida preferida das classes mais altas (CABRAS, 2016).

No Brasil, o consumo de cerveja ganhou maior relevância com a chegada da família real portuguesa, sendo inicialmente importada da Europa e contribuindo posteriormente para a consolidação da indústria cervejeira nacional (BICALHO., 2020).

Durante grande parte da história, o principal papel da cerveja não estava associado a suas propriedades intoxicantes, uma vez que apresentava baixo teor alcoólico. Devido à presença de álcool, dióxido de carbono e baixo pH, frequentemente representava uma alternativa mais segura ao consumo de água em períodos nos quais o acesso à água potável era limitado. Além disso, possuía relevância nutricional, sendo fonte de vitaminas, minerais e outros compostos importantes para a alimentação humana (RAIHOFER, 2022).

1.2 Contexto econômico da indústria cervejeira

O Brasil ocupa posição de destaque no cenário cervejeiro mundial, sendo o terceiro maior produtor e também o terceiro maior mercado consumidor de cerveja. O setor cervejeiro apresenta elevada relevância econômica para o país, correspondendo a cerca de 2% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional e gerando aproximadamente dois milhões de empregos diretos e indiretos. Além disso, a produção anual de cerveja no Brasil é estimada em cerca de 15 bilhões de litros,

movimentando diferentes setores da economia, especialmente a agricultura, por meio da produção de cevada nas regiões Sul e Sudeste, com apoio de pesquisas desenvolvidas pela Embrapa (LIMBERGER, 2024).

Nos últimos anos, o setor cervejeiro brasileiro apresentou crescimento significativo. Dados referentes ao ano de 2022 demonstram aumento de 11,6% no setor, com a abertura de 180 novos estabelecimentos, totalizando 1.729 cervejarias registradas no país. O crescimento ocorreu em todas as unidades da federação, destacando-se Minas Gerais, que alcançou a terceira posição no ranking nacional, com 222 cervejarias registradas, ultrapassando o estado de Santa Catarina. São Paulo permaneceu como o estado com maior número de cervejarias registradas, seguido pelo Rio Grande do Sul (MINISTERIO DA AGRICULTURA E PECUARIA, 2026).



Figura 1: Crescimento do setor cervejeiro Fonte: Imagem adaptada Ministério da Agricultura e Pecuária, 2026.

Diante do crescimento contínuo da indústria cervejeira e da elevada demanda produtiva, torna-se cada vez mais necessária a otimização das etapas de produção de cerveja, visando ao aumento da eficiência operacional, à redução do consumo energético e à melhoria da qualidade final do produto (ALBANESE, 2017).

1.3 Etapas da produção cervejeira

O processo de produção de cerveja pode ser dividido em diferentes etapas, incluindo sanitização dos materiais, moagem do malte, mosturação, filtração do mosto, fervura, tratamento do mosto, fermentação, maturação, carbonatação e envase (BICALHO, 2020).

Inicialmente, realiza-se a sanitização dos materiais utilizados, visando evitar contaminações microbiológicas durante o processo produtivo. Em seguida, ocorre a moagem do

malte, etapa responsável pela trituração dos grãos e exposição do endosperma, favorecendo posteriormente a atuação enzimática sobre os compostos presentes no malte (BICALHO, 2020).

Após a moagem, realiza-se a mosturação ou brassagem, considerada uma das etapas mais importantes da produção cervejeira. Nessa etapa, o malte moído é misturado à água sob condições controladas de temperatura, permitindo a atuação das enzimas amilolíticas na conversão do amido em açúcares fermentáveis. Posteriormente, o mosto passa pelas etapas de filtração, fervura e *whirlpool*, responsáveis pela separação do bagaço do malte, adição do lúpulo, esterilização do mosto e remoção de materiais suspensos (BICALHO, 2020).

Na sequência, ocorre a fermentação, processo no qual as leveduras convertem os açúcares fermentáveis em etanol e dióxido de carbono sob condições controladas de temperatura. Por fim, a cerveja passa pelas etapas de maturação, carbonatação e envase, responsáveis pelo desenvolvimento das características finais do produto (BICALHO., 2020).

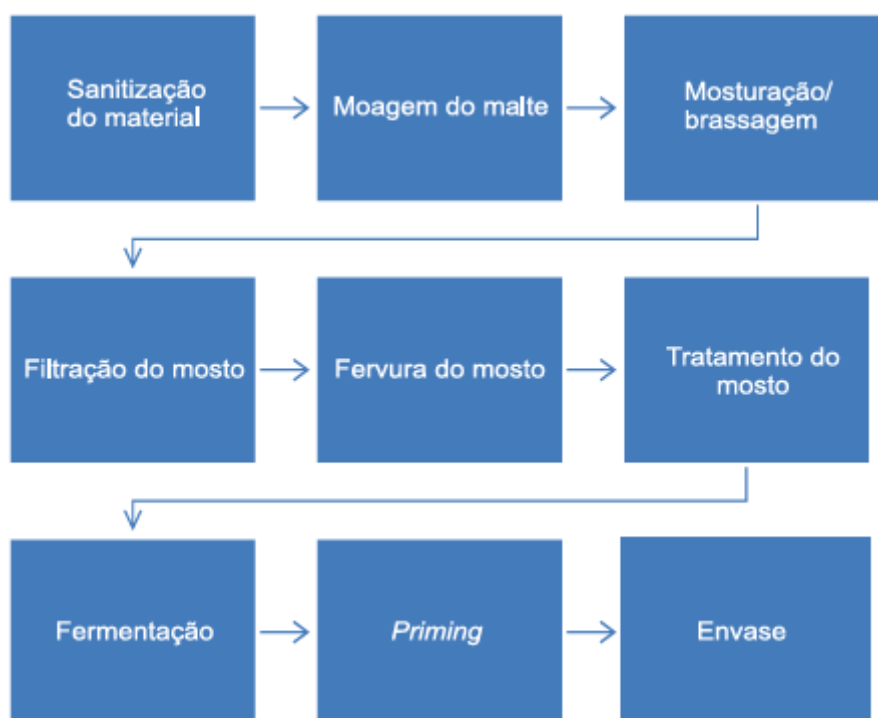


Figura 2: Método de produção da cerveja Fonte: Imagem adaptada de Bicalho et al., 2020.

1.4 Mosturação cervejeira

Dentre as etapas da produção cervejeira, destaca-se a mosturação, considerada uma das fases mais importantes desse processo, uma vez que nela ocorrem as principais reações responsáveis pela formação do mosto fermentável (HORNINK, 2022). A mosturação consiste na mistura de

água e malte moído sob condições controladas de temperatura e pH, permitindo a atuação das enzimas presentes nos grãos maltados sobre diferentes compostos, principalmente o amido. Durante essa etapa ocorre a hidrólise enzimática do amido, processo conhecido como sacarificação, responsável pela conversão dos polissacarídeos presentes no malte em açúcares fermentáveis (ALBANESE, 2017). Por meio desse processo, obtém-se cerca de 65% dos sólidos totais do malte, os quais constituirão o mosto destinado à fermentação cervejeira (SCHEFFER, 2013).

Para que a sacarificação ocorra de forma eficiente, o amido presente nos grãos precisa inicialmente sofrer gelatinização, processo no qual os grânulos de amido absorvem água e tornam-se mais acessíveis à ação enzimática. Após a gelatinização, ocorre a atuação das enzimas amilolíticas presentes e ativadas durante a malteação, principalmente α -amilase e β -amilase, promovendo a quebra das cadeias de amido e formando açúcares como glicose, maltose e maltotriose (DALBERTO, 2024).

1.4.1 Enzimas e Rampas de Temperatura

As enzimas desempenham papel fundamental na mosturação, pois aumentam significativamente a velocidade das reações químicas por meio da redução da energia de ativação necessária para que as reações ocorram (HORNINK, 2022). A atividade dessas enzimas é diretamente influenciada pelas condições de temperatura e pH da mostura, sendo que diferentes enzimas apresentam faixas ótimas específicas de atuação. Dessa forma, as condições de temperatura e pH influenciam diretamente a atividade das enzimas amilolíticas e a formação de açúcares fermentáveis (DALBERTO, 2024).

Durante o processo, diferentes rampas de temperatura podem ser empregadas, sendo que cada faixa térmica favorece a atuação de grupos enzimáticos específicos responsáveis pela conversão dos compostos presentes no malte (MUXEL, 2016). Entre as principais etapas das rampas de temperatura destaca-se o repouso proteico, realizado entre 45 °C e 55 °C, no qual as proteases promovem a quebra das proteínas dos grãos em aminoácidos e peptídeos importantes para a nutrição das leveduras e para características da cerveja, como retenção de espuma (MUXEL, 2016).

Em seguida, ocorre o repouso das amilases, relacionado à atuação das enzimas α -amilase e β -amilase sobre o amido presente no malte. A β -amilase apresenta maior atividade em temperaturas entre 60 °C e 65 °C e pH entre 5,4 e 5,6, favorecendo a formação de açúcares fermentáveis, enquanto a α -amilase apresenta maior atividade entre 70 °C e 75 °C e pH entre 5,6 e 5,8, promovendo maior formação de dextrinas (DALBERTO, 2024).

Ao final das rampas de temperatura, realiza-se o *mash-out*, conduzido entre 75 °C e 79 °C, etapa responsável pela inativação das enzimas e preparação do mosto para a filtração. Além disso,

o *mash-out* aumenta a solubilidade dos açúcares presentes no mosto, contribuindo para o rendimento da brassagem (MUXEL, 2016). Também é recomendada a elevação gradual da temperatura entre as rampas e constante agitação durante o aquecimento, favorecendo a homogeneização do sistema (MUXEL, 2016).

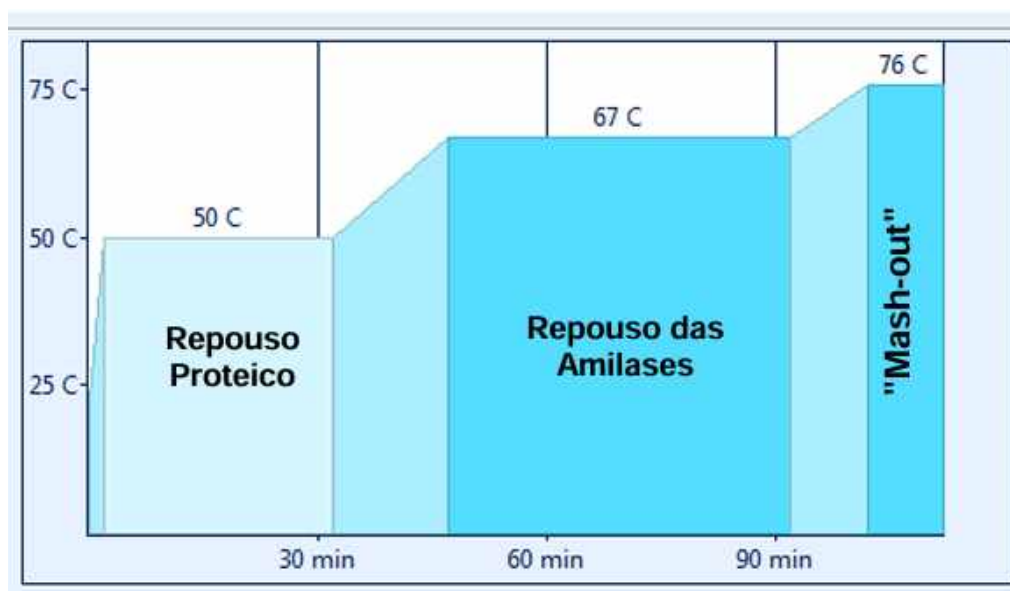


Figura 3: Principais rampas de temperatura da mosturação cervejeira Fonte: Imagem adaptada de Muxel et al., 2016

1.4.2 Métodos de mosturação

Os principais métodos utilizados na produção cervejeira são a mosturação por infusão e a mosturação por decocção. A mosturação por infusão está associada à elevação da temperatura da mostura, ocorrendo principalmente pela adição de água quente ou por aquecimento direto do sistema (MONTANARI, 2005).

Já a mosturação por decocção foi desenvolvida principalmente devido à utilização de maltes pouco modificados ou com baixa atividade enzimática. Nesse sistema, uma porção da mostura é removida, submetida à fervura em um recipiente separado e posteriormente retornada à mostura principal, promovendo o aumento da temperatura (MONTANARI, 2005).

1.4.3 Mosturação em escala industrial e artesanal

Em cervejarias artesanais e produções de pequeno porte, a mosturação normalmente é realizada em sistemas mais simples e com maior participação manual durante o processo. São utilizados equipamentos como tina de mostura, fogareiro e termômetro, sendo o aquecimento e o controle das rampas de temperatura conduzidos manualmente (MUXEL, 2016). Além disso, recomenda-se constante agitação do mosto durante o aquecimento e nas transições de temperatura, visando favorecer a homogeneização do sistema (MUXEL, 2016).

Na produção cervejeira em escala industrial, a mosturação é realizada em tanques denominados *mash tuns*, equipamentos de grande capacidade utilizados para mistura do malte moído com água aquecida sob condições controladas de processamento (DAVIES, 2014). Esses sistemas frequentemente são automatizados e equipados com mecanismos de aquecimento e agitação mecânica (“*stirrer gear*”), visando maior homogeneização da mostura (DAVIES, 2014).

Estudos em cervejarias industriais relatam utilização de *mash tuns* com capacidade aproximada de 400 hL e proporções de aproximadamente 4:1 entre água e malte durante o processo (DAVIES, 2014). Além disso, a produção industrial emprega rigoroso controle de tempo e temperatura, podendo apresentar ciclos operacionais variando entre aproximadamente 3 e 6 horas (DAVIES, 2014).

1.5 Limitações da mosturação cervejeira

Apesar da importância da mosturação para a produção cervejeira, essa etapa ainda apresenta limitações relacionadas à eficiência do processo, ao elevado consumo energético e aos longos tempos operacionais. A extração do amido durante a mosturação tradicional nem sempre ocorre de forma completa, sendo que a taxa de extração geralmente permanece inferior a 80%, limitando o rendimento de açúcares fermentáveis obtidos a partir do malte (ALBANESE, 2017).

Além disso, as múltiplas etapas térmicas empregadas na produção cervejeira podem demandar várias horas de operação, contribuindo para o aumento dos custos industriais e do consumo energético. Diferentes tempos de mosturação também podem influenciar diretamente as propriedades do mosto e do produto, reforçando a importância do controle adequado dessa etapa (CANO, 2023).

Outro fator importante está relacionado às limitações de transferência de massa e homogeneização da mostura. A hidrólise do amido e a atuação das enzimas dependem diretamente do contato adequado entre enzimas, amido e meio líquido. Dessa forma, sistemas com baixa homogeneização podem apresentar regiões heterogêneas, dificultando a difusão dos compostos e reduzindo a eficiência da sacarificação (ALBANESE, 2017).

1.6 Agitação e recirculação aplicadas à mosturação

Sistemas com recirculação podem ser empregados durante a mosturação por meio de bombas e circuitos hidráulicos responsáveis pela circulação contínua do mosto durante o processo (ALBANESE, 2017). A recirculação pode favorecer a extração de amido e enzimas presentes no malte e pode aumentar a transferência de massa durante a mosturação (ALBANESE, 2017).

Nesse contexto, sistemas com agitação e recirculação representam alternativas promissoras para otimização da mosturação cervejeira, principalmente em relação à transferência de massa e à eficiência do processo. A utilização desses sistemas pode favorecer a movimentação

do mosto durante a brassagem, contribuindo para melhor distribuição térmica e maior interação entre os componentes presentes na mostura. Além disso, abordagens voltadas à otimização dessa etapa apresentam relevância industrial devido ao potencial de redução do tempo de processamento e do consumo energético empregado na produção cervejeira.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral:

Avaliar o comportamento da conversão de açúcares redutores durante a mosturação cervejeira em sistemas estático e com recirculação, visando compreender como diferentes condições operacionais influenciam a dinâmica da hidrólise do amido ao longo do processo experimental.

2.2 Objetivos Específicos:

- Determinar a concentração de açúcares redutores durante a mosturação cervejeira utilizando o método do ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS);
- Construir curvas de conversão e avaliar as taxas de formação dos açúcares redutores ao longo do tempo experimental em sistemas estático e com recirculação;
- Avaliar a variabilidade experimental dos sistemas estudados por meio do desvio padrão e coeficiente de variação, investigando diferenças na repetibilidade experimental ao longo da mosturação;
- Investigar possíveis influências das condições operacionais sobre a dinâmica da mosturação, considerando aspectos relacionados à homogeneização do sistema, interação entre enzimas e substratos e limitações de transferência de massa;
- Discutir possíveis implicações das condições operacionais avaliadas para a compreensão da dinâmica da mosturação e otimização do processo cervejeiro.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais utilizados

Foram utilizados malte pilsen moído, água destilada, reagente de ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) preparado previamente em laboratório e solução padrão de glicose preparada conforme metodologia descrita pela Embrapa para construção da curva de calibração (EMBRAPA, 2013).

Durante os experimentos, foram utilizados béquer de 500 mL, reator com sistema de recirculação e fundo falso, banho-maria para aquecimento e estabilização térmica das mosturas, ebulidor para fervura das amostras submetidas ao método DNS, além de tubos de ensaio, cubetas plásticas e espectrofotômetro utilizado para realização das leituras espectrofotométricas em 540 nm. Também foram utilizados balança analítica, balão volumétrico de 100 mL e pipetas durante o preparo das soluções e análises experimentais.

Durante os ensaios, o malte moído foi acondicionado em tecido filtrante semelhante a sachê de chá, visando facilitar a coleta das amostras e reduzir a presença de partículas sólidas durante as análises espectrofotométricas. Todos os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Processos e Bioprocessos Biotecnológicos (LAPBBIO – UFU).

3.2 Preparo da solução padrão de glicose

A solução padrão de glicose foi preparada na concentração de 1,0 g/L, conforme metodologia descrita pela (EMBRAPA, 2013). Para isso, foram pesados 0,1000 g de glicose em balança analítica, posteriormente dissolvidos em aproximadamente 20 mL de água destilada sob agitação constante. Em seguida, a solução foi transferida analiticamente para balão volumétrico de 100 mL, completando-se o volume com água destilada. Após o preparo, a solução foi homogeneizada vigorosamente e utilizada no mesmo dia da análise.

3.3 Método do DNS e Espectrofotometria

O ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) é um reagente colorimétrico utilizado para a determinação de açúcares redutores. Em meio alcalino e sob aquecimento, o DNS reage com os grupos carbonila livres desses açúcares, formando um composto avermelhado cuja intensidade é proporcional à concentração de açúcar presente na amostra. A quantificação é realizada por espectrofotometria, geralmente em 540 nm, utilizando uma curva de calibração como referência (CODDENS, 2026).

Após a reação, o espectrofotômetro é utilizado para medir a absorbância da solução. O equipamento faz a passagem de luz pela amostra e detecta a quantidade de luz absorvida pelo composto colorido gerado na reação entre o DNS e os açúcares redutores. Com os valores obtidos, é possível correlacionar a absorbância à concentração de açúcar utilizando uma curva de calibração (SANTOS, 2017).

3.4 Determinação da curva de calibração

A curva de calibração foi construída utilizando solução padrão de glicose e o reagente de ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS), conforme metodologia adaptada da Embrapa.

Para construção da curva padrão, foram preparadas diferentes concentrações da solução de glicose em tubos de ensaio, utilizando volumes variando entre 0,1 e 1,0 mL da solução padrão.

Em cada tubo, adicionou-se 1,0 mL de reagente de DNS e volumes de água destilada suficientes para completar o volume final de 10 mL após a reação. O branco foi preparado utilizando 1,0 mL de DNS e 9,0 mL de água destilada.

As amostras foram submetidas à fervura em banho fervente por 5 minutos, posteriormente resfriadas e homogeneizadas. Após o preparo, as leituras foram realizadas em espectrofotômetro a 540 nm. A partir dos valores de absorbância obtidos, foi construída a curva de calibração utilizada para conversão das leituras espectrofotométricas das amostras em concentração de açúcares redutores.

Tabela 1: Composição das soluções utilizadas para construção da curva padrão de glicose. Fonte: Autoria própria (2026).

Tubo	Glicose (mL)	DNS (mL)	Água destilada (mL)
1	0,1	1,0	8,9
2	0,2	1,0	8,8
3	0,3	1,0	8,7
4	0,4	1,0	8,6
5	0,5	1,0	8,5
6	0,6	1,0	8,4
7	0,7	1,0	8,3
8	0,8	1,0	8,2
9	0,9	1,0	8,1
10	1,0	1,0	8,0
Branco	—	1,0	9,0

3.5 Mosturação em sistema estático

A mosturação em sistema estático foi realizada em béquer de 500 mL. Inicialmente, foram adicionados 200 mL de água destilada ao sistema, mantendo-se o béquer em banho-maria até atingir 68 °C. Após atingir a temperatura desejada, o sistema permaneceu em estabilização térmica por 30 minutos.

Em seguida, foram adicionados 50 g de malte *pilsen* moído, previamente acondicionado em tecido filtrante semelhante a sachê de chá. As amostras foram coletadas nos tempos 0, 5, 10, 15 e 20 minutos de mosturação.

Tabela 2: Condições experimentais da mosturação em sistema estático. Fonte: Autoria própria (2026).

Parâmetro	Condição experimental
Volume de água	200 mL
Massa de malte	50 g
Temperatura de mosturação	68 °C
Tempo de estabilização térmica	30 min
Tempos de coleta	0, 5, 10, 15 e 20 min
Número de replicatas	3
Comprimento de onda	540 nm
Diluição das amostras	1:6

Para cada tempo experimental, foram retiradas três alíquotas de 1 mL, correspondentes às triplicatas, e transferidas para tubos de ensaio contendo 1 mL de reagente de DNS. O branco foi preparado utilizando 1 mL de água destilada e 1 mL de DNS. Posteriormente, todas as amostras foram submetidas à fervura por 5 minutos em ebulidor. Após a fervura, adicionaram-se 8 mL de água destilada em cada tubo.

Antes da leitura espectrofotométrica, as amostras foram diluídas na proporção 1:6, utilizando-se 1 mL da amostra e 5 mL de água destilada, visando adequar as absorbâncias à faixa de leitura do equipamento. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro a 540 nm. O experimento foi repetido três vezes.

3.6 Mosturação em sistema com recirculação

A mosturação em sistema com recirculação foi realizada em reator com circulação contínua do mosto. Inicialmente, foram adicionados 4 L de água ao reator, sendo o sistema aquecido até atingir 68 °C. Após estabilização da temperatura por 30 minutos, foram adicionados 1 kg de malte *pilsen* moído, previamente acondicionado em tecido filtrante semelhante a sachê de chá.

As amostras foram coletadas pela torneira do sistema de recirculação nos tempos 0, 5, 10, 15 e 20 minutos.

Tabela 3 – Condições experimentais da mosturação em sistema com recirculação. Fonte: Autoria própria (2026).

Parâmetro	Condição experimental
Volume de água	4 L
Massa de malte	1 kg
Temperatura de mosturação	68 °C
Tempo de estabilização térmica	30 min
Tempos de coleta	0, 5, 10, 15 e 20 min
Número de replicatas	3
Comprimento de onda	540 nm
Diluição das amostras	1:6

Para cada tempo experimental, foram retiradas três alíquotas de 1 mL, correspondentes às triplicatas, e transferidas para tubos contendo 1 mL de reagente de DNS. O branco foi preparado utilizando 1 mL de água destilada e 1 mL de DNS.

As amostras foram submetidas à fervura por 5 minutos e, posteriormente, adicionaram-se 8 mL de água destilada em cada tubo. Antes da leitura espectrofotométrica, as amostras foram diluídas na proporção 1:6, utilizando-se 1 mL da amostra e 5 mL de água destilada. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro a 540 nm. O experimento foi repetido três vezes.

3.7 Tratamento dos dados

Os valores de absorbância obtidos nas leituras espectrofotométricas a 540 nm foram convertidos em concentração de açúcares redutores por meio da equação da curva de calibração da glicose. A curva padrão foi construída a partir das soluções de glicose preparadas em diferentes concentrações e analisadas pelo método do ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS).

Os dados da curva de calibração foram organizados em gráfico de dispersão no *software Microsoft Excel*, sendo aplicada regressão linear para obtenção da equação da reta e do coeficiente de determinação (R^2). A regressão linear utilizada seguiu o modelo descrito pela equação 1.

Equação 1: Modelo de regressão linear.

$$y = ax + b$$

Onde:

y = absorbância obtida;

a = coeficiente angular da reta;

x = concentração de glicose;

b = coeficiente linear da reta.

A equação obtida para a curva de calibração foi:

$$y = 0,2605x + 0,0005$$

A curva de calibração apresentou coeficiente de determinação $R^2 = 0,9899$.

A conversão dos valores de absorbância em concentração de açúcares redutores foi realizada a partir do isolamento da variável da equação da reta obtida na curva de calibração. Para correção das amostras submetidas à diluição antes da leitura espectrofotométrica, foi aplicado fator de correção correspondente à diluição 1:6, utilizando-se a equação 2.

$$((Absorbância - 0,0005)/1,3024) \times 6$$

Equação 2 – Conversão da absorbância em concentração de açúcares redutores considerando o fator de diluição.

Os resultados obtidos foram organizados em tabelas e gráficos para construção das curvas de conversão ao longo do tempo experimental nos sistemas estático e com recirculação. Essas curvas foram elaboradas a partir da relação entre concentração média de açúcares redutores (mg) e tempo de mosturação (min), permitindo avaliar o comportamento temporal da formação dos açúcares detectáveis pelo método DNS durante o processo.

3.8 Análise estatística

Os experimentos com mosturação em sistema estático e com recirculação foram realizados em triplicata, sendo calculadas as médias dos valores obtidos para cada tempo experimental. Também foram determinados taxa de conversão, os desvios padrão e os coeficientes de variação (CV%) com o objetivo de avaliar a dispersão e a reprodutibilidade dos dados experimentais.

3.8.1 Média aritmética

A média aritmética é uma medida estatística utilizada para representar um conjunto de dados por meio de um valor central único (CAZORLA, 2019). A média aritmética foi calculada a partir da soma dos valores experimentais obtidos nas triplicatas dividida pelo número total de amostras, conforme descrito na equação 3.

Equação 3 – Cálculo da média aritmética.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{N}$$

Onde:

$\bar{x}$ = média aritmética;

$\sum x$ = soma dos valores experimentais;

n = número de amostras.

3.8.2 Desvio padrão

O desvio padrão é uma medida estatística utilizada para indicar o grau de variação dos valores de um conjunto de dados em torno da média (ANDRADE, 2020). O desvio padrão foi calculado com o objetivo de avaliar a variabilidade dos valores obtidos nas triplicatas experimentais, conforme descrito na equação 4.

Equação 4 – Cálculo do desvio padrão.

$$DP = \sqrt{\frac{\sum |x - \mu|^2}{N}}$$

Onde:

DP = desvio padrão;

x = valor experimental;

$\bar{x}$ = média aritmética;

n = número de amostras.

3.8.3 Coeficiente de variação

Coeficiente de variação (CV), que é uma medida utilizada para expressar a variabilidade dos dados em relação à média, geralmente em porcentagem (ALAZZAWI, 2012). Essa medida facilita a comparação entre diferentes conjuntos de dados, mesmo quando possuem médias diferentes. Este coeficiente foi utilizado para avaliar a variabilidade relativa dos dados experimentais em relação à média obtida, conforme descrito na equação 5.

Equação 5 – Cálculo do coeficiente de variação.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\%$$

Onde:

CV% = coeficiente de variação;

DP = desvio padrão;

$\bar{x}$ = média aritmética.

3.8.4 Taxa de conversão

A taxa de conversão indica a eficiência da transformação de um substrato em um produto de interesse ao longo de um processo químico ou biológico (CROWELL, 2015). Esta foi calculada a partir da diferença entre as concentrações de açúcares redutores obtidas em tempos consecutivos de mosturação, permitindo avaliação da velocidade de formação de açúcares redutores ao longo do processo, conforme descrito na equação 6.

Equação 6 – Cálculo da taxa de conversão.

$$\text{Taxa de Conversão} = \frac{CF - CI}{TF - TI}$$

Onde:

CF = concentração final;

CI = concentração inicial;

TF = tempo final;

TI = tempo inicial.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Curva de calibração da glicose

Os valores médios de absorvância correspondentes às diferentes concentrações da solução padrão de glicose estão apresentados na tabela 3.

Tabela 4: Valores de absorvância obtidos. Fonte: Autoria própria (2026).

Tubo	Absorvância 1	Absorvância 2	Absorvância 3	Média
1	0,011	0,016	0,028	0,018
2	0,033	0,050	0,050	0,044
3	0,082	0,091	0,082	0,085
4	0,110	0,108	0,104	0,107
5	0,125	0,166	0,126	0,139
6	0,154	0,174	0,161	0,163
7	0,166	0,215	0,194	0,192
8	0,183	0,209	0,208	0,200
9	0,255	0,225	0,235	0,238
10	0,270	0,233	0,248	0,250

A partir das médias obtidas, foi construída a curva de calibração por regressão linear utilizando o Microsoft Excel, resultando na equação 7.

$$y = 0,2605x + 0,0005$$

$$R^2 = 0,9899$$

Equação 7: Equação da regressão linear da curva de calibração da glicose.

A Figura 4 apresenta a curva de calibração da glicose obtida a partir da relação entre concentração de glicose padrão e absorvância medida pelo método DNS, utilizada para conversão dos valores experimentais em concentração de açúcares redutores.

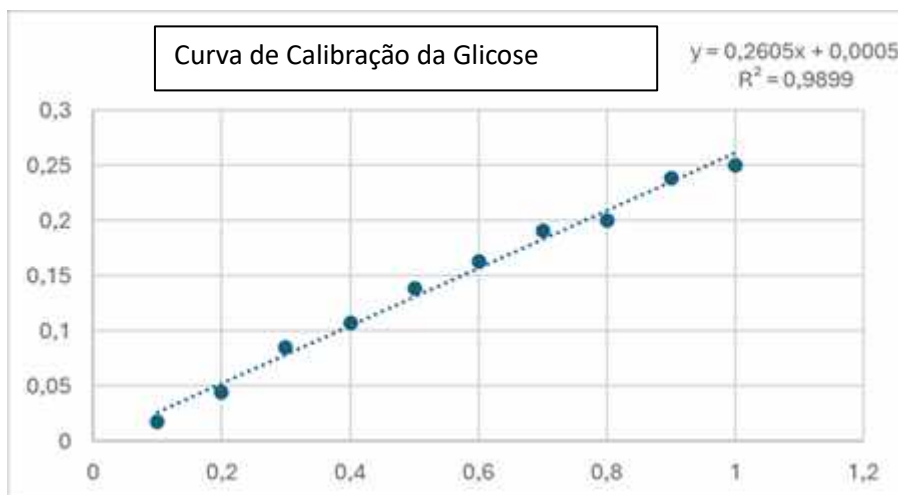


Figura 4: Curva de calibração da glicose obtida a partir da regressão linear. Fonte: Autoria própria (2026).

O coeficiente de determinação (R^2) corresponde à proporção da variabilidade dos dados explicada pelo modelo ajustado, sendo amplamente utilizado para avaliação da qualidade do ajuste em regressões lineares. Valores próximos de 1 indicam maior capacidade preditiva do modelo e melhor ajuste aos dados experimentais (QUININO, 2023.)

Além disso, observa-se na Figura 4 comportamentos aproximadamente linear entre concentração de glicose e absorbância, evidenciado pelo aumento progressivo dos valores médios de absorbância conforme o aumento da concentração da solução padrão.

Assim, o valor obtido no gráfico ($R^2 = 0,9899$) sugere elevada correlação linear entre concentração de glicose e absorbância, indicando alta confiabilidade da equação empregada para conversão dos valores espectrofotométricos em concentração de açúcares redutores.

4.2 Conversão dos açúcares redutores durante a mosturação estática

4.2.1 Curva de conversão dos açúcares redutores

A Tabela 5, 6 e 7 apresentam os valores obtidos para concentração de açúcares redutores nas repetições experimentais adquirido a partir dos valores de absorbância do experimento de mosturação estática, posteriormente convertidos em mg.

Tabela 5: Concentração de açúcares redutores (mg) obtida durante a 1ª repetição da mosturação estática nos diferentes tempos experimentais. Fonte: Autoria própria (2026).

1º Repetição Absorbância do DNS				
Tempo (minutos)	1	2	3	Média
0	0,172745	0,403071	0,172745	0,24952
5	11,66603	5,332054	3,190019	6,729367
10	15,51248	14,54511	14,17658	14,74472
15	12,88676	14,17658	14,38388	13,81574
20	13,73896	15,23608	14,52207	14,49904

Tabela 6: Concentração de açúcares redutores (mg) obtida durante a 2ª repetição da mosturação estática nos diferentes tempos experimentais. Fonte: Autoria própria (2026).

2º Repetição Absorbância do DNS				
Tempo (minutos)	1	2	3	Média
0	0,011516	0,034549	0,057582	0,034549
5	12,97889	12,10365	14,03839	13,04031
10	14,15355	13,46257	14,26871	13,96161
15	10,95202	11,41267	12,47217	11,61228
20	10,35317	10,53743	10,60653	10,49904

Tabela 7: Concentração de açúcares redutores (mg) obtida durante a 3ª repetição da mosturação estática nos diferentes tempos experimentais. Fonte: Autoria própria (2026).

3º Repetição Absorbância do DNS				
Tempo (minutos)	1	2	3	Média
0	0,213052	0,103647	0,080614	0,132438
5	14,45298	13,30134	10,83685	12,86372
10	13,32438	14,42994	15,37428	14,3762
15	10,238	10,69866	10,3071	10,41459
20	12,54127	10,60653	9,477927	10,87524

A partir das médias experimentais foi construída a curva de conversão dos açúcares redutores apresentada na Figura 5.

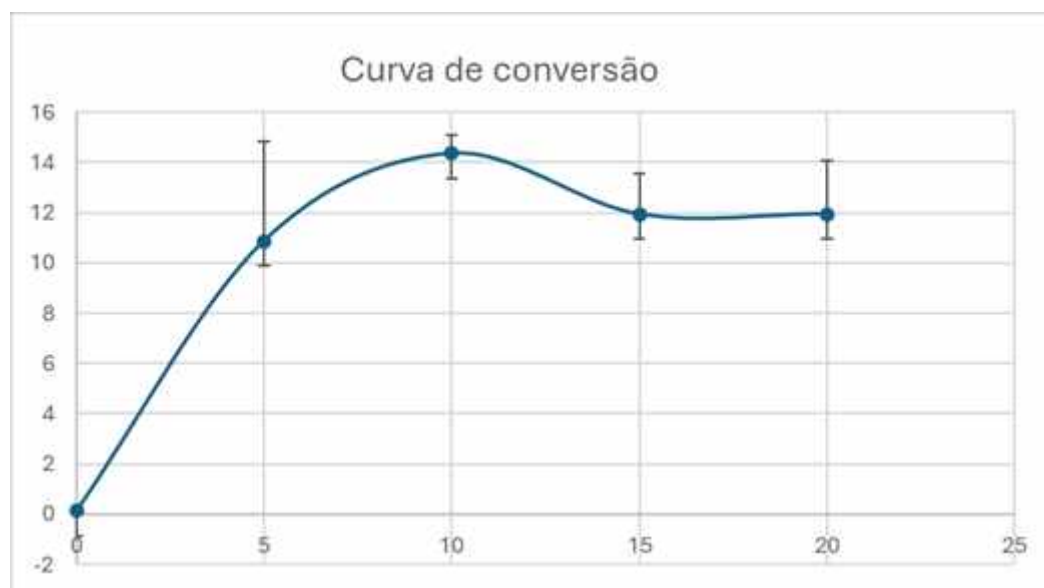


Figura 5: Curva de conversão da concentração média de açúcares redutores (mg) durante a mosturação estática nos diferentes tempos experimentais. Fonte: Autoria própria (2026).

Observou-se aumento expressivo na concentração média de açúcares redutores entre 0 e 10 minutos, seguido por redução aos 15 minutos e posterior estabilização aos 20 minutos. Os valores médios desses compostos obtidos para os tempos avaliados encontram-se apresentados na Tabela 8:

Tabela 8: Valores médios da concentração de açúcares redutores (mg) durante a mosturação estática. Fonte: Autoria própria (2026).

Tempo (min)	Média Total (mg)
0	0,138836
5	10,8778
10	14,36084
15	11,94754
20	11,95777

Inicialmente, entre 0 e 5 minutos, ocorreu aumento expressivo da concentração média de açúcares redutores, passando de 0,139 mg para 10,878 mg, representando aumento aproximado de 77 vezes. O crescimento observado nos primeiros minutos de mosturação pode estar relacionado à elevada disponibilidade inicial de amido gelatinizado e à intensa atuação das enzimas amilolíticas presentes no malte. Durante essa etapa, enzimas como α -amilase e β -amilase promovem a degradação das cadeias de amido, resultando na formação de açúcares fermentáveis

e oligossacarídeos contendo extremidades redutoras, detectáveis pelo método do ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS). A β -amilase atua preferencialmente nas extremidades das cadeias, liberando maltose, enquanto a α -amilase promove hidrólise interna das moléculas de amido, formando compostos menores que aumentam a disponibilidade de substratos para continuidade da sacarificação. Dessa forma, o aumento observado na concentração de açúcares redutores pode refletir maior disponibilidade de compostos contendo extremidades redutoras ao longo dos primeiros minutos da sacarificação (NASCIMENTO, 2019)

Entre 5 e 10 minutos observou-se continuidade do aumento na concentração de açúcares redutores, atingindo valor máximo médio de 14,361 mg aos 10 minutos. A manutenção do crescimento nesse intervalo sugere persistência da atividade enzimática nas condições avaliadas, indicando que a conversão do amido em compostos detectáveis ainda ocorria de forma significativa. Considerando a temperatura experimental de aproximadamente 68 °C, esse comportamento pode refletir condições favoráveis para manutenção da atividade sacarificante durante o período experimental inicial (HORNINK, 2022). Após atingir o maior valor médio aos 10 minutos, observou-se redução para 11,948 mg aos 15 minutos. Essa diminuição corresponde aproximadamente a 16,8% em relação ao valor observado anteriormente. O comportamento observado sugere alteração na dinâmica de formação dos compostos redutores ao longo do tempo experimental, indicando possível desaceleração do processo de sacarificação nas condições avaliadas.

Entre 15 e 20 minutos ocorreu pequena variação, passando de 11,948 mg para 11,958 mg, indicando tendência de estabilização da concentração média de açúcares redutores ao final do período experimental. A estabilização observada sugere aproximação de um estado de menor variação líquida da sacarificação sob as condições avaliadas. Esse comportamento pode indicar redução significativa da ocorrência de novas conversões detectáveis ou estabelecimento de equilíbrio entre processos simultâneos de formação e disponibilidade dos açúcares redutores (NELSON, 2017)

4.2.2 Taxa de conversão dos açúcares redutores durante a mosturação

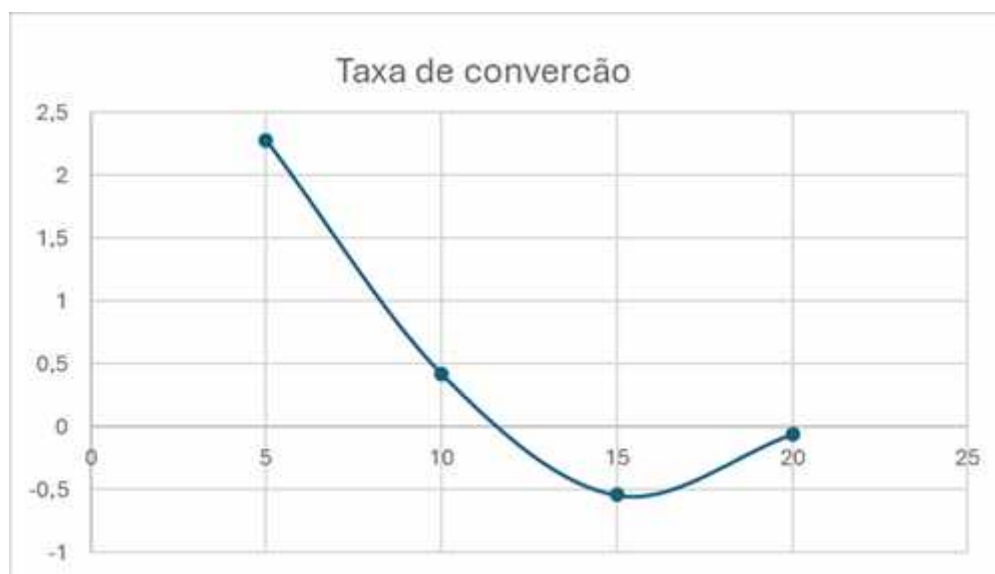


Figura 6: Taxa média de conversão dos açúcares redutores (mg/min) durante os intervalos avaliados no experimento de mosturação estática. Fonte: Autoria própria (2026).

A Figura 6 apresenta a taxa média de conversão dos açúcares redutores ao longo dos intervalos experimentais avaliados durante a mosturação estática, expressa em mg/min. A taxa de conversão representa a variação média na quantidade de açúcares redutores formados entre tempos consecutivos, permitindo avaliar a velocidade do processo de conversão ao longo da mosturação.

Tabela 9: Taxa média de conversão dos açúcares redutores durante a mosturação estática. Fonte: Autoria própria (2026).

Intervalo (min)	Taxa média (mg/min)
0–5	2,148
5–10	0,697
10–15	-0,483
15–20	0,002

A maior taxa foi observada entre 0 e 5 minutos (2,148), indicando elevada velocidade inicial de formação dos açúcares redutores detectáveis pelo método DNS. Esse comportamento é compatível com a grande disponibilidade inicial do substrato e alta atividade das enzimas responsáveis pela sacarificação (SAARNI, 2020).

Entre 5 e 10 minutos houve redução significativa da taxa correspondente a aproximadamente 67,5%. Apesar da concentração total continuar aumentando nesse intervalo (0,697), a velocidade de formação de açúcares diminuiu consideravelmente, indicando desaceleração progressiva da reação.

A taxa negativa observada entre 10 e 15 minutos ($-0,483$) indica que a variação líquida da concentração de açúcares redutores nesse intervalo ocorreu no sentido de redução. Esse resultado não representa produção negativa de açúcares, mas sugere que a quantidade detectável ao final do intervalo foi inferior à observada anteriormente.

Considerando o comportamento simultaneamente observado na curva de conversão, na qual ocorreu redução da concentração média de açúcares após 10 minutos, a taxa negativa pode refletir mudanças na dinâmica do processo ao longo da mosturação, indicando desaceleração da conversão e possível aproximação da estabilização do processo sob as condições experimentais avaliadas.

Entre 15 e 20 minutos a taxa aproximou-se de zero ($0,002$ mg/min), indicando ausência de alterações expressivas na velocidade líquida de formação dos açúcares redutores durante esse período.

Esse comportamento sugere possível estabilização do sistema ao final do experimento, uma vez que a concentração média de açúcares redutores apresentou variação mínima entre os tempos de 15 e 20 minutos ($11,948$ mg para $11,958$ mg), reforçando hipóteses sobre mudanças na dinâmica da sacarificação ao longo do processo.

De forma geral, o perfil da taxa de conversão demonstrou elevada velocidade inicial de formação de açúcares redutores, seguida por desaceleração progressiva ao longo do tempo experimental e posterior aproximação de valores próximos a zero, indicando redução gradual da ocorrência de conversões detectáveis durante a mosturação.

4.2.3 Hipóteses para redução dos açúcares redutores

A redução observada na concentração média de açúcares redutores após o pico máximo aos 10 minutos sugere alterações na dinâmica do processo de sacarificação ao longo do período experimental. Entre as possíveis explicações encontra-se a diminuição progressiva da disponibilidade de amido acessível à hidrólise enzimática, considerando que parte do substrato já teria sido convertida em compostos detectáveis pelo método DNS durante os intervalos iniciais da mosturação. Em sistemas enzimáticos, a redução gradual do substrato disponível pode resultar em diminuição da velocidade de reação, comportamento compatível com princípios clássicos de cinética enzimática (NELSON, 2017).

Além da redução progressiva do substrato disponível, limitações relacionadas ao método analítico empregado também devem ser consideradas na interpretação dos resultados. O método DNS quantifica compostos contendo grupos redutores acessíveis, não representando diretamente a concentração total de carboidratos presentes no sistema. Dessa forma, alterações no perfil dos

produtos formados durante a sacarificação, incluindo formação de moléculas maiores ou compostos com menor capacidade redutora detectável, podem influenciar os valores obtidos experimentalmente (SAQUIB, 2011).

Outro fator que pode ter influenciado o comportamento observado refere-se às condições operacionais do sistema estático empregado neste estudo. A ausência de agitação ou recirculação contínua pode favorecer heterogeneidade na distribuição térmica e menor homogeneização entre enzimas, substratos e produtos formados ao longo do processo. Em sistemas parcialmente heterogêneos, diferenças locais na concentração de substratos e na atividade enzimática podem influenciar a velocidade de sacarificação, resultando em variações temporais na formação de açúcares detectáveis (PALMQVIST, 2011).

Adicionalmente, limitações na transferência de massa podem reduzir a frequência de contato entre enzimas amilolíticas e moléculas de amido disponíveis para hidrólise, influenciando a eficiência global da conversão ao longo do tempo experimental. Estudos relacionados aos processos de mosturação indicam que condições com maior homogeneização tendem a favorecer distribuição mais uniforme do calor e dos componentes reacionais, podendo influenciar a eficiência da sacarificação (PALMQVIST, 2011).

Por fim, a estabilização observada nos tempos finais pode indicar aproximação de um estado de menor variação líquida da sacarificação nas condições avaliadas, sugerindo redução progressiva da ocorrência de novas conversões detectáveis pelo método empregado. Considerando que comportamento semelhante foi observado entre as repetições experimentais, reduz-se a probabilidade de ocorrência exclusivamente associada à variabilidade experimental, reforçando a hipótese de que as alterações observadas estejam relacionadas à dinâmica intrínseca do processo de mosturação utilizado neste estudo.

4.2.4. Variabilidade experimental: desvio padrão e coeficiente de variação

A variabilidade experimental dos resultados obtidos durante a mosturação estática foi avaliada por meio do desvio padrão (DP) e do coeficiente de variação (CV%). Enquanto o desvio padrão representa a dispersão absoluta dos valores em relação à média experimental, o coeficiente de variação expressa essa variabilidade de forma relativa, permitindo comparação entre conjuntos de dados com magnitudes distintas (FREIRE, 2024).

Os coeficientes de variação obtidos para os diferentes tempos experimentais encontram-se apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Desvio padrão e coeficiente de variação obtidos durante a mosturação estática. Fonte: Autoria própria (2026).

Tempo	Desvio Padrão	CV(%)
0	0,120387	86,7119
5	3,953515	36,34481
10	0,738123	5,13983
15	1,601256	13,40239
20	2,098499	17,54924

O elevado coeficiente de variação observado no tempo inicial (86,71%) deve ser interpretado com cuidado. Embora esse valor indique elevada dispersão relativa, sua magnitude está diretamente associada à baixa média obtida nesse intervalo (0,139 mg). Em situações nas quais os valores médios se aproximam de zero, pequenas variações absolutas podem resultar em coeficientes de variação elevados, sem necessariamente representar baixa qualidade experimental (NARDINO, 2020). Esse comportamento é reforçado pelo baixo desvio padrão absoluto observado no mesmo intervalo (0,120), sugerindo que a elevada variabilidade relativa decorre principalmente da pequena magnitude da média experimental e não de elevada instabilidade entre as repetições.

O maior desvio padrão absoluto foi observado aos 5 minutos (3,954), acompanhado de coeficiente de variação de 36,34%, indicando maior dispersão entre as repetições experimentais nesse intervalo. Esse comportamento pode estar relacionado às condições do sistema estático, no qual a ausência de agitação ou recirculação contínua pode favorecer diferenças locais na distribuição de temperatura, substrato e enzimas. Assim, durante o início da conversão, pequenas variações na homogeneização da mostura podem ter influenciado a concentração de açúcares redutores obtida entre as repetições (SAARNI, 2020).

Em contrapartida, o tempo de 10 minutos apresentou simultaneamente o menor desvio padrão (0,738) e o menor coeficiente de variação (5,14%), indicando elevada repetibilidade experimental e baixa dispersão relativa entre as repetições. Valores reduzidos de CV frequentemente estão associados a maior consistência dos dados experimentais e menor variabilidade relativa (REED, 2002). Esse comportamento sugere maior uniformidade entre as repetições experimentais próximas ao ponto de maior concentração média de açúcares redutores observado durante o experimento.

Após esse período, observou-se aumento moderado tanto do desvio padrão quanto do coeficiente de variação nos tempos de 15 e 20 minutos. Aos 15 minutos, o coeficiente de variação atingiu 13,40%, aumentando posteriormente para 17,55% aos 20 minutos. Apesar do aumento em relação aos valores observados aos 10 minutos, esses coeficientes ainda permanecem inferiores

ao observado no tempo inicial, sugerindo variabilidade moderada entre as repetições experimentais.

De forma geral, o comportamento conjunto entre desvio padrão e coeficiente de variação sugere maior heterogeneidade experimental durante os estágios iniciais da mosturação, seguida por período de elevada repetibilidade próximo ao pico de conversão e posterior aumento moderado da variabilidade durante a fase de estabilização do processo. A interpretação simultânea dessas medidas estatísticas permite avaliação da variabilidade experimental dos resultados obtidos.

4.3 Conversão dos açúcares redutores durante a mosturação com recirculação

4.3.1 Curva de conversão dos açúcares

A Tabela 11, 12 e 13 apresentam os valores obtidos para concentração de açúcares redutores nas repetições experimentais durante o experimento de mosturação com recirculação, posteriormente convertidos em mg por meio da equação da curva de calibração e corrigidos considerando os fatores de diluição aplicados.

Tabela 11: Concentração de açúcares redutores (mg) obtida durante a 1ª repetição do experimento de mosturação com recirculação nos diferentes tempos experimentais. Fonte: Autoria própria (2026).

1º Repetição Absorbância do DNS				
Tempo (minutos)	1	2	3	Média
0	0,034549	0,034549	0,011516	0,026871
5	7,128599	8,003839	8,763916	7,965451
10	13,57774	11,22841	14,66027	13,15547
15	16,15739	15,00576	14,98273	15,38196
20	12,61036	12,77159	11,85029	12,41075

Tabela 12: Concentração de açúcares redutores (mg) obtida durante a 2ª repetição do experimento de mosturação com recirculação nos diferentes tempos experimentais. Fonte: Autoria própria (2026).

2º Repetição Absorbância do DNS				
Tempo (minutos)	1	2	3	Média
0	0,034549	0,126679	0,011516	0,057582
5	5,608445	6	6,276392	5,961612
10	15,02879	14,59117	14,77543	14,79846
15	13,762	14,24568	11,94242	13,3167
20	13,46257	12,7025	12,4261	12,86372

Tabela 13: Concentração de açúcares redutores (mg) obtida durante a 3ª repetição do experimento de mosturação com recirculação nos diferentes tempos experimentais. Fonte: Autoria própria (2026).

3º Repetição Absorbância do DNS				
Tempo (minutos)	1	2	3	Média
0	0,057582	0,195777	0,034549	0,095969
5	7,243762	7,381958	8,948177	7,857965
10	9,662188	11,94242	13,80806	11,80422
15	15,42035	12,44914	13,57774	13,81574
20	13,66987	14,84453	13,32438	13,94626

A partir das médias experimentais foi construída a curva de conversão apresentada na Figura 7.



Figura 7: Curva de conversão da concentração média de açúcares redutores (mg) durante a mosturação estática nos diferentes tempos experimentais. Fonte: Autoria própria (2026).

A curva apresenta o perfil médio de conversão dos açúcares redutores durante a mosturação com recirculação. Observou-se aumento progressivo da concentração média de açúcares redutores entre 0 e 15 minutos, seguido por discreta redução aos 20 minutos. Os valores médios obtidos para os tempos avaliados encontram-se apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Valores médios da concentração de açúcares redutores (mg) durante a mosturação com recirculação. Fonte: Autoria própria (2026).

Tempo (min)	Média Total (mg)
0	0,060141
5	7,261676
10	13,25272
15	14,17147
20	13,07358

Inicialmente, entre 0 e 5 minutos, ocorreu aumento expressivo da concentração média de açúcares redutores, passando de 0,060 mg para 7,262 mg. O crescimento observado sugere rápida intensificação da conversão inicial do amido em compostos contendo grupos redutores detectáveis pelo método DNS, comportamento compatível com os estágios iniciais da sacarificação (SAARNI, 2020).

Entre 5 e 10 minutos observou-se continuidade do aumento da concentração média, atingindo 13,253 mg. Posteriormente, aos 15 minutos, ocorreu novo incremento, alcançando valor máximo médio de 14,171 mg. A persistência do crescimento até esse intervalo sugere manutenção da atividade enzimática por período prolongado, possivelmente favorecida pela recirculação contínua do sistema, contribuindo para maior homogeneização térmica e distribuição mais uniforme entre substratos e enzimas (PALMQVIST, 2011). Além disso, a circulação contínua tende a reduzir gradientes locais de concentração e favorecer maior eficiência na transferência de massa entre componentes reacionais, prolongando a ocorrência de conversões detectáveis ao longo do tempo experimental (PALMQVIST, 2011).

Após atingir o valor máximo aos 15 minutos, observou-se redução moderada para 13,074 mg aos 20 minutos, correspondendo aproximadamente à diminuição de 7,7%. Apesar da redução observada, a magnitude relativamente discreta da queda sugere manutenção parcial das condições favoráveis à sacarificação durante o período final do experimento. Esse comportamento pode indicar aproximação gradual do equilíbrio do processo. (BRANDAM, 2003).

De forma geral, o perfil obtido sugere crescimento progressivo da concentração de açúcares redutores até 15 minutos, seguido por tendência de estabilização ao final do período experimental. A manutenção prolongada do aumento observado até o tempo de 15 minutos pode indicar persistência da atividade sacarificante sob condições mais homogêneas de reação,

reforçando a possível influência da recirculação sobre a dinâmica temporal da conversão dos açúcares redutores durante a mosturação (SCHEPPER, 2021).

4.3.2 Taxa de conversão dos açúcares redutores

A partir das taxas médias obtidas foi construída a Figura 8, representando a variação da velocidade de conversão dos açúcares redutores ao longo do tempo experimental.



Figura 8: Taxa média de conversão dos açúcares redutores (mg/min) durante os intervalos avaliados no experimento de mosturação com recirculação. Fonte: Autoria própria (2026).

A Figura 8 apresenta o comportamento da taxa média de conversão dos açúcares redutores ao longo dos intervalos experimentais avaliados. Observa-se maior velocidade de conversão nos períodos iniciais da mosturação, seguida por redução progressiva da taxa ao longo do tempo e posterior tendência à estabilização ao final do experimento.

A Tabela 15 apresenta a taxa média de conversão dos açúcares redutores obtida para os diferentes intervalos experimentais durante a mosturação com recirculação.

Tabela 15: Taxa média de conversão dos açúcares redutores durante a mosturação com recirculação. Fonte: Autoria própria (2026).

Intervalo (min)	Taxa média (mg/min)
0–5	1,440
5–10	1,198
10–15	0,184
15–20	-0,220

A maior taxa de conversão foi observada entre 0 e 5 minutos (1,440 mg/min), indicando elevada velocidade inicial de formação de açúcares redutores durante os estágios iniciais da sacarificação (SAARNI, 2020). Entre 5 e 10 minutos ocorreu redução moderada para 1,198 mg/min, embora a taxa tenha permanecido elevada, sugerindo continuidade expressiva da conversão nesse intervalo.

Posteriormente, entre 10 e 15 minutos, observou-se redução mais acentuada da taxa para 0,184 mg/min, indicando desaceleração progressiva da velocidade de conversão ao longo do processo experimental. Apesar da redução observada, a taxa permaneceu positiva, sugerindo manutenção da formação líquida de açúcares redutores nesse período.

No intervalo entre 15 e 20 minutos foi observada taxa negativa (-0,220 mg/min), indicando redução líquida da concentração média de açúcares redutores. Entretanto, a baixa magnitude do valor obtido sugere comportamento próximo à estabilização do sistema, indicando redução progressiva da ocorrência de aumentos adicionais expressivos na concentração dos compostos analisados (SCHEPPER, 2021).

De forma geral, o perfil obtido sugere elevada velocidade inicial de conversão, seguida por desaceleração gradual ao longo do experimento e posterior aproximação de um estado de menor variação líquida ao final do período experimental.

4.3.3 Hipóteses para comportamento observado na mosturação com recirculação

O comportamento observado durante a mosturação com recirculação sugere possível influência das condições operacionais do sistema sobre a dinâmica da sacarificação. A recirculação contínua promove movimentação do mosto ao longo do processo, podendo favorecer distribuição mais uniforme do calor e reduzir diferenças locais de temperatura no meio reacional (SCHEPPER, 2021). Em sistemas de mosturação, maior homogeneização térmica pode contribuir para manutenção mais uniforme da atividade enzimática ao longo do tempo.

Além da distribuição térmica, a circulação contínua do meio pode favorecer maior contato entre enzimas amilolíticas e moléculas de amido disponíveis para hidrólise. Esse fenômeno está relacionado à transferência de massa, processo que influencia a frequência de interação entre substratos e enzimas presentes no sistema (PALMQVIST, 2011). Dessa forma, maior eficiência na transferência de massa pode favorecer continuidade da sacarificação por períodos mais prolongados.

Considerando que o aumento da concentração média de açúcares redutores foi mantido até 15 minutos no sistema com recirculação, uma possível hipótese é que a circulação contínua tenha contribuído para prolongar condições favoráveis à conversão ao longo do período experimental.

Adicionalmente, a redução moderada observada após o pico máximo pode indicar aproximação gradual de um estado de menor variação líquida do processo, sugerindo diminuição progressiva da ocorrência de novas conversões detectáveis nas condições avaliadas (SCHEPPER, 2021).

De forma geral, os resultados obtidos sugerem que a recirculação pode ter influenciado a dinâmica temporal da mosturação, contribuindo para manutenção prolongada da conversão observada ao longo do experimento.

4.3.4 Variabilidade experimental: desvio padrão e coeficiente de variação

Tabela 16: Desvio padrão e coeficiente de variação obtidos durante a mosturação com recirculação. Fonte: Autoria própria (2026).

Tempo	Desvio Padrão	CV(%)
0	0,06142	102,1277
5	1,171543	16,13322
10	1,88303	14,20863
15	1,383769	9,764476
20	0,870716	6,660121

O elevado coeficiente de variação observado no tempo inicial (102,13%) deve ser interpretado com atenção, uma vez que a média obtida nesse intervalo foi extremamente baixa (0,060 mg), favorecendo amplificação da variabilidade relativa (REED, 2002). Apesar do alto CV, o desvio padrão absoluto observado no mesmo tempo foi reduzido (0,061), sugerindo que a elevada dispersão relativa decorre principalmente da pequena magnitude da média experimental e não necessariamente de elevada instabilidade entre as repetições.

Após os primeiros minutos experimentais, observou-se tendência geral de redução do coeficiente de variação ao longo do experimento, acompanhada por diminuição do desvio padrão nos tempos finais. O maior desvio padrão absoluto foi observado aos 10 minutos (1,883), coincidindo com intervalo caracterizado por elevadas taxas de conversão dos açúcares redutores. Entretanto, como a média também foi elevada nesse intervalo, o coeficiente de variação permaneceu relativamente baixo (14,21%), sugerindo variabilidade moderada em relação à magnitude dos valores obtidos.

Nos tempos finais (15 e 20 minutos), observou-se redução simultânea do desvio padrão e do coeficiente de variação, atingindo valores mínimos aos 20 minutos ($DP = 0,871$; $CV = 6,66\%$). Esse comportamento sugere aumento progressivo da uniformidade entre as repetições experimentais ao longo da mosturação, indicando menor variabilidade relativa nos períodos finais do experimento.

O comportamento conjunto entre desvio padrão e coeficiente de variação sugere tendência de maior repetibilidade experimental ao final da mosturação com recirculação. A redução progressiva dessas medidas pode indicar maior homogeneidade do sistema ao longo do processo, possivelmente associada à movimentação contínua do meio reacional e à diminuição de gradientes locais durante a mosturação (CHEN, 2017).

4.4 Comparação entre sistemas estático e com recirculação

A comparação entre os sistemas de mosturação estática e com recirculação permitiu observar diferenças no perfil de formação dos açúcares redutores ao longo do tempo experimental. Embora ambos os sistemas tenham apresentado aumento expressivo nos primeiros minutos de mosturação, o comportamento posterior foi diferente, principalmente em relação ao tempo de pico, à queda após o valor máximo e à variabilidade experimental.

Tabela 17: Comparação da concentração média de açúcares redutores entre os sistemas estático e com recirculação. Fonte: Autoria própria (2026).

Tempo (min)	Sistema estático (mg)	Sistema com recirculação (mg)
0	0,139	0,060
5	10,878	7,262
10	14,361	13,253
15	11,948	14,171
20	11,958	13,074

No sistema estático, o maior valor médio de açúcares redutores foi observado aos 10 minutos, atingindo 14,361 mg. Após esse período, ocorreu redução para 11,948 mg aos 15 minutos, seguida de estabilização aos 20 minutos. Já no sistema com recirculação, a concentração média continuou aumentando até 15 minutos, quando atingiu 14,171 mg, com posterior redução moderada para 13,074 mg aos 20 minutos.

Esse comportamento indica que, no sistema estático, a conversão ocorreu de forma mais

intensa nos primeiros minutos, com pico antecipado aos 10 minutos. Por outro lado, no sistema com recirculação, o aumento foi mais gradual e prolongado, sugerindo manutenção da formação de açúcares redutores por maior tempo experimental.

As diferenças observadas podem estar relacionadas às condições operacionais específicas de cada sistema, incluindo movimentação do meio, geometria do recipiente e escala experimental utilizada. A recirculação pode contribuir para maior movimentação do mosto, favorecendo distribuição mais uniforme dos componentes reacionais e maior contato entre enzimas amilolíticas e amido disponível para hidrólise (ŠALAMON, 2010).

Tabela 18: Comparação da taxa média de conversão dos açúcares redutores entre os sistemas avaliados. Fonte: Autoria própria (2026).

Intervalo (min)	Estático (mg/min)	Recirculação (mg/min)
0–5	2,148	1,440
5–10	0,697	1,198
10–15	-0,483	0,184
15–20	0,002	-0,220

Em relação à taxa de conversão, o sistema estático apresentou maior velocidade inicial, com taxa de 2,148 mg/min entre 0 e 5 minutos, enquanto o sistema com recirculação apresentou 1,440 mg/min no mesmo intervalo. Entretanto, entre 5 e 10 minutos, a taxa no sistema estático caiu para 0,697 mg/min, enquanto no sistema com recirculação permaneceu mais elevada, em 1,198 mg/min.

Esses dados demonstram que a mosturação estática apresentou maior velocidade inicial de formação de açúcares redutores, porém com desaceleração mais acentuada após os primeiros minutos. No sistema com recirculação, apesar da menor taxa inicial, observou-se manutenção da conversão por período mais prolongado, com taxa positiva até o intervalo de 10 a 15 minutos.

A taxa negativa observada no sistema estático entre 10 e 15 minutos (-0,483 mg/min) indica redução líquida da concentração média de açúcares redutores logo após o pico máximo.

No sistema com recirculação, essa redução ocorreu apenas entre 15 e 20 minutos (-0,220 mg/min), e com menor magnitude. Esse comportamento sugere que a recirculação pode ter contribuído para prolongar a fase de conversão detectável, retardando a redução da concentração média de açúcares redutores.

Tabela 19: Comparação do desvio padrão e coeficiente de variação entre os sistemas estático e com recirculação. Fonte: Autoria própria (2026).

Tempo (min)	DP estático	DP recirculação	CV estático (%)	CV recirculação (%)
0	0,120	0,061	86,71	102,13
5	3,954	1,172	36,34	16,13
10	0,738	1,883	5,14	14,21
15	1,601	1,384	13,40	9,76
20	2,098	0,871	17,55	6,66

Embora ambos os sistemas tenham apresentado elevados coeficientes de variação no tempo inicial, esse comportamento ocorreu em condições de baixas concentrações médias de açúcares redutores, favorecendo aumento da variabilidade relativa. No tempo 0, o sistema estático apresentou $DP = 0,120$ e $CV = 86,71\%$, enquanto o sistema com recirculação apresentou $DP = 0,061$ e $CV = 102,13\%$. Apesar do maior coeficiente de variação observado na recirculação, ambos os sistemas apresentaram baixos desvios padrão absolutos nesse intervalo, indicando pequena dispersão absoluta entre as repetições.

Aos 5 minutos, observou-se diferença mais expressiva entre os sistemas avaliados. A mosturação estática apresentou o maior desvio padrão experimental observado ($DP = 3,954$), acompanhado de $CV = 36,34\%$, enquanto o sistema com recirculação apresentou valores inferiores ($DP = 1,172$; $CV = 16,13\%$). Esse comportamento indica maior dispersão entre as repetições experimentais no sistema estático durante os estágios iniciais da conversão.

No tempo correspondente ao pico máximo de concentração média de açúcares redutores em cada sistema, comportamentos distintos foram observados. Na mosturação estática, aos 10 minutos, registrou-se o menor coeficiente de variação experimental ($CV = 5,14\%$) e o menor desvio padrão ($DP = 0,738$), indicando baixa dispersão entre as repetições nesse intervalo. Em contrapartida, no sistema com recirculação, embora o coeficiente de variação aos 10 minutos tenha permanecido relativamente moderado ($CV = 14,21\%$), o maior desvio padrão absoluto do experimento foi observado nesse intervalo ($DP = 1,883$), sugerindo maior dispersão absoluta associada às concentrações mais elevadas obtidas.

Uma possível explicação para esse comportamento é que, na mosturação estática, as repetições tenham atingido maior uniformidade próximas ao pico de conversão, coincidindo com os menores valores de desvio padrão e coeficiente de variação. Em contrapartida, no sistema com recirculação, o maior desvio padrão foi observado em intervalo anterior ao pico máximo de concentração, sugerindo que diferenças entre as repetições ainda poderiam estar associadas à manutenção da dinâmica de conversão nesse período.

Nos tempos finais, observou-se comportamento distinto entre os sistemas. Na mosturação estática ocorreu aumento do desvio padrão de 0,738 aos 10 minutos para 2,098 aos 20 minutos,

acompanhado de aumento do coeficiente de variação de 5,14% para 17,55%. Já no sistema com recirculação verificou-se redução progressiva dessas medidas estatísticas, atingindo $DP = 0,871$ e $CV = 6,66\%$ aos 20 minutos.

De forma geral, os resultados evidenciam diferenças no comportamento temporal da variabilidade experimental entre os sistemas avaliados, indicando que a dispersão entre repetições não ocorreu de maneira uniforme ao longo do processo de mosturação. Essas diferenças devem ser consideradas na interpretação comparativa dos perfis de conversão observados entre os sistemas estudados.

4.5 Comparação com dados da literatura

Os resultados obtidos no presente estudo demonstraram que a formação de açúcares redutores ocorreu predominantemente nos primeiros minutos de mosturação, seguida por desaceleração progressiva da taxa de conversão nos períodos posteriores. Esse comportamento apresentou semelhança com o estudo conduzido por (VIADER, 2021), no qual foi observado que mais de 85% dos açúcares fermentáveis foram produzidos nos primeiros 20 minutos de mosturação, enquanto mais de 90% do amido disponível já havia sido hidrolisado nesse intervalo. Esses resultados levaram os autores a sugerirem que longos períodos adicionais de mosturação podem não resultar em aumentos proporcionais na conversão dos açúcares, uma vez que o tempo descrito pelos autores para uma mosturação convencional varia entre aproximadamente 60 e 74 minutos.

No presente trabalho, comportamento semelhante foi observado tanto no sistema estático quanto no sistema com recirculação. Na mosturação estática, a maior taxa média de conversão ocorreu entre 0 e 5 minutos, seguida por desaceleração progressiva e redução da concentração de açúcares redutores após 10 minutos. Já na mosturação com recirculação, embora o perfil tenha sido mais gradual, as maiores taxas de conversão também foram observadas nos intervalos iniciais, com redução progressiva após 10–15 minutos. Esses resultados sugerem que, independentemente das condições operacionais avaliadas, a etapa inicial da mosturação concentrou a maior intensidade da atividade sacarificante.

Além da dinâmica temporal da conversão, (VIADER, 2021) demonstraram que a redução do tempo total de mosturação em aproximadamente 20 minutos não comprometeu parâmetros importantes, como concentração de açúcares fermentáveis, teor alcoólico e fermentabilidade da cerveja final. Os autores observaram concentrações semelhantes de maltose, maltotriose e glicose entre perfis de mosturação reduzidos e convencionais, indicando manutenção da eficiência do processo mesmo com redução do tempo operacional.

Embora o presente estudo não tenha avaliado diretamente fermentabilidade ou composição

específica dos açúcares produzidos, o comportamento observado nas curvas de conversão sugere que grande parte da formação de compostos detectáveis pelo método DNS ocorreu nos períodos iniciais da mosturação. Dessa forma, os resultados obtidos reforçam a hipótese discutida na literatura de que a compreensão da dinâmica temporal da sacarificação pode representar ferramenta importante para otimização do processo cervejeiro.

Entretanto, comparações diretas devem ser realizadas com cautela. O estudo de (VIADER, 2021) utilizou monitoramento da atividade de α -amilase e β -amilase e quantificação específica dos açúcares fermentáveis por HPLC, enquanto o presente trabalho utilizou o método DNS para determinação de açúcares redutores totais. Assim, as aproximações realizadas referem-se principalmente ao comportamento temporal da sacarificação, e não aos valores absolutos obtidos.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que ambos os sistemas apresentaram aumento inicial expressivo na concentração de açúcares redutores, indicando ocorrência da conversão do amido durante os primeiros minutos experimentais. Entretanto, diferenças foram observadas no perfil temporal da conversão entre os sistemas avaliados. A mosturação estática apresentou maior velocidade inicial de conversão, atingindo pico máximo aos 10 minutos, enquanto o sistema com recirculação apresentou aumento mais gradual e manutenção prolongada da conversão, alcançando pico aos 15 minutos.

Esses resultados sugerem que diferentes condições operacionais podem influenciar a dinâmica temporal da sacarificação, alterando o comportamento da formação dos compostos detectáveis pelo método DNS. Entretanto, embora a recirculação possa favorecer maior homogeneização do sistema e manutenção do contato entre enzimas e substratos, esse efeito não necessariamente resulta em maiores concentrações máximas instantâneas de açúcares redutores.

No presente estudo, o sistema com recirculação apresentou pico mais tardio, sugerindo que a conversão pode ter ocorrido de forma mais gradual ao longo do tempo experimental.

Além do perfil de conversão, observaram-se diferenças na variabilidade experimental entre os sistemas estudados. Enquanto a mosturação estática apresentou redução inicial seguida por aumento moderado da variabilidade nos tempos finais, o sistema com recirculação demonstrou tendência mais contínua de redução do coeficiente de variação ao longo do experimento. Esses resultados indicam diferenças no comportamento experimental entre os sistemas avaliados, possivelmente relacionadas às condições de mistura, distribuição térmica e

interação entre substratos e enzimas durante a mosturação.

Contudo, a interpretação comparativa dos resultados deve considerar limitações relacionadas às diferenças de escala experimental e geometria dos sistemas utilizados. Embora a proporção entre água e malte tenha sido mantida nos dois ensaios, a mosturação estática foi conduzida utilizando 200 mL de água e 50 g de malte em béquer de 500 mL, enquanto a mosturação com recirculação foi realizada em reator com fundo falso contendo 4 L de água e 1 kg de malte. Dessa forma, diferenças no volume total, na geometria dos recipientes e na dispersão dos compostos no meio podem ter influenciado a velocidade de detecção dos açúcares redutores e, conseqüentemente, a interpretação direta das velocidades de conversão observadas.

Assim, o pico mais precoce observado na mosturação estática pode estar relacionado não apenas à dinâmica enzimática, mas também às características físicas do sistema experimental empregado. Da mesma forma, o comportamento mais gradual observado no sistema com recirculação pode refletir influência combinada entre movimentação contínua do meio e diferenças estruturais do sistema avaliado.

Considerando aplicações práticas, os resultados sugerem que sistemas com recirculação representam alternativa potencialmente interessante em contextos que demandam maior uniformidade experimental ao longo do processo. Por outro lado, sistemas estáticos podem apresentar interesse em situações nas quais a rápida conversão inicial seja priorizada. Entretanto, tais interpretações devem ser realizadas com cautela, considerando as limitações experimentais do presente trabalho.

Dessa forma, os resultados obtidos contribuem para ampliar a compreensão da dinâmica da mosturação sob diferentes condições operacionais, fornecendo subsídios para futuras investigações voltadas à otimização do processo de mosturação cervejeira.

6. REFERÊNCIAS

ALAZZAWI, S.; DE SPRENGER ROVER, W. B.; BROWN, J.; DAVIS, B. The conversion rate of bipolar hemiarthroplasty after a hip fracture to a total hip arthroplasty. *Clinics in Orthopedic Surgery*, v. 4, n. 2, p. 117–120, 2012. <https://doi.org/10.4055/cios.2012.4.2.117>

ALBANESE, L.; CIRIMINNA, R.; MENEGUZZO, F.; PAGLIARO, M. Beer-brewing powered by controlled hydrodynamic cavitation: theory and real-scale experiments. *Journal of Cleaner Production*, v. 142, p. 1457–1470, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.162>

ANDRADE, C. Understanding the difference between standard deviation and standard error of the mean, and knowing when to use which. *Indian Journal of Psychological Medicine*, v. 42, n.

4, p. 409–410, 2020. <https://doi.org/10.1177/0253717620933419>

ANDRADE, C. (repetido na lista original — removido duplicado conforme norma ABNT)

BICALHO PIMENTA, L. et al. A história e o processo da produção da cerveja: uma revisão. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 37, n. 3, 2020. <https://doi.org/10.35977/0104-1096.cct2020.v37.26715>

BRANDAM, C. et al. An original kinetic model for the enzymatic hydrolysis of starch during mashing. *Biochemical Engineering Journal*, v. 13, n. 1, p. 43–52, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1369-703X\(02\)00100-6](https://doi.org/10.1016/S1369-703X(02)00100-6)

CABRAS, I.; HIGGINS, D. M. Beer, brewing, and business history. *Business History*, v. 58, n. 5, p. 609–624, 2016. <https://doi.org/10.1080/00076791.2015.1122713>

CANO. Avaliação das características reológicas de cervejas tipo american barleywine. 2023. (Trabalho não publicado ou fonte acadêmica sem dados editoriais completos)

CARVALHO, D.; ZAMBIAZI, R. C. Avaliação do processo fermentativo de cerveja *Pilsen* pelo uso de diferentes concentrações de *Saccharomyces cerevisiae*. 2011. p. 351–357.

CAZORLA. O campo conceitual da média aritmética: uma primeira aproximação conceitual. 2019.

CHEN, H. Z.; LIU, Z. H. Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass from low to high solids loading. *Engineering in Life Sciences*, v. 17, n. 5, p. 489–499, 2017. <https://doi.org/10.1002/elsc.201600102>

CODDENS, L. et al. Comparative evaluation of DNS, PAHBAH, and BCA colourimetric assays for quantifying reducing sugars. *Carbohydrate Research*, v. 560, p. 109770, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2025.109770>

CROWELL, T. A.; HATANO, H. Clinical outcomes and antiretroviral therapy in “elite” controllers: a review of the literature. *Journal of Virus Eradication*, v. 1, 2015.

DALBERTO. Desenvolvimento de cervejas sem álcool e de baixo teor alcoólico. 2024.

DAVIES. Evolution of a mash tun. 2014.

DE SCHEPPER, C. F. et al. Starch hydrolysis during mashing: a study of the activity and thermal inactivation kinetics of barley malt α -amylase and β -amylase. *Carbohydrate Polymers*, v. 255, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117494>

DOS SANTOS, A. A. et al. Dosagem de açúcares redutores com o reativo DNS em microplaca. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 20, 2017. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.11315>

EMBRAPA. Determinação de açúcares redutores pelo ácido 3,5-dinitrosalicílico: histórico do desenvolvimento do método e estabelecimento de um protocolo. 2013.

FREIRE, S. M. Bioestatística básica. 2024.

HORNINK, G. Princípios da produção cervejeira e as enzimas na mosturação I. 2022. Disponível em: <https://www.rcsb.org/structure/1AMY>

LIMBERGER, S. C. O setor cervejeiro no Brasil: formação nacional, internacionalização e as

novas demandas do mercado. 2024.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. Setor cervejeiro segue crescendo a cada ano, aponta anuário. 2026.

MONTANARI, L. et al. Effect of mashing procedures on brewing. *European Food Research and Technology*, v. 221, n. 1–2, p. 175–179, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-1166-8>

MUXEL. Fundamentos de fabricação de cerveja. 2016.

NARDINO, M. et al. Coefficient of variation: a new approach for the study in maize experiments. *Revista Brasileira de Biometria*, v. 38, n. 2, p. 185–206, 2020. <https://doi.org/10.28951/rbb.v38i2.440>

NASCIMENTO. Produção e análise de cervejas artesanais “low carb”. 2019.

NELSON, D. L.; COX, M. M. *Lehninger principles of biochemistry*. New York: W. H. Freeman, 2017.

PALMQVIST, B. et al. Effect of mixing on enzymatic hydrolysis of steam-pretreated spruce. *Biotechnology for Biofuels*, v. 4, 2011. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-4-10>

RAIHOFER, L. et al. A short history of beer brewing. *EMBO Reports*, v. 23, n. 12, 2022. <https://doi.org/10.15252/embr.202256355>

REED, G. F. et al. Use of coefficient of variation in assessing variability of quantitative assays. *Clinical and Diagnostic Laboratory Immunology*, v. 9, n. 6, p. 1235–1239, 2002. <https://doi.org/10.1128/CDLI.9.6.1235-1239.2002>

SAARNI, A. et al. A multi-parameter, predictive model of starch hydrolysis in barley beer mashes. *Beverages*, v. 6, n. 4, 2020. <https://doi.org/10.3390/beverages6040060>

ŠALAMON, L.; MOROVIĆ-VERGLES, J. Initial presentation of hereditary angioedema as abdominal pain and ascites in puerperium: case report. *Acta Dermatovenereologica Croatica*, v. 18, n. 4, 2010.

SAQIB, A. A. N.; WHITNEY, P. J. Differential behaviour of the DNS reagent towards mono- and di-saccharide sugars. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, n. 11, p. 4748–4750, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.09.013>

SCHEFFER, R. C. et al. Processo produtivo da cerveja tipo Pilsen. 2013.

VIADER, Raimon Parés et al. Optimization of beer brewing by monitoring α -amylase and β -amylase activities during mashing. *MDPI Beverages*, Basel, v. 7, n. 1, p. 13, 2021. DOI: 10.3390/beverages7010013.

