

## PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE CONTROLE NO PROCESSO DE FERMENTAÇÃO EM USINAS SUCROALCOOLEIRAS: UMA REVISÃO DA LITERATURA.

Leonardo Souza Tenca do Nascimento.<sup>1</sup>  
Orientador: Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Renan Mitsuo Ueda.<sup>2</sup>  
Coorientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Laiane Andrade.<sup>3</sup>

### RESUMO

A fim de mitigar os desafios globais como a emissão de monóxido de carbono na atmosfera, a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015) foi estabelecida, composta por 18 objetivos principais. Dentre eles, o objetivo 7 enfatiza a necessidade de aumentar a participação de energias renováveis, como o bioetanol, na matriz energética global. Neste cenário, o presente estudo investiga o comportamento das principais variáveis de controle e suas faixas de especificação em um processo crucial para a produção de bioetanol: a fermentação alcoólica. Tal investigação foi conduzida por meio de uma revisão da literatura recente em artigos indexados nos últimos 11 anos em periódicos com fator de impacto *Journal Citation Reports* (JCR). Os resultados desta pesquisa destacam que variações na temperatura e gradientes inadequados de substrato, etanol e biomassa nos reatores afetam a cinética da levedura, resultando na redução da eficiência fermentativa. Observa-se uma tendência no uso de modelos preditivos baseados em redes neurais artificiais e programação não linear para controlar essas variáveis. Este estudo contribui com avanços na produção sustentável de bioetanol, com foco na eficiência energética, proporcionando *insights* valiosos para otimização do processo de fermentação.

**Palavras-chave:** variáveis de controle, fermentação alcoólica, cinética metabólica, revisão da literatura, usinas sucroenergéticas.

### ABSTRACT

In order to mitigate global challenges such as carbon monoxide emissions into the atmosphere, the United Nations' 2030 Agenda (UN, 2015) was established, comprising 18 main objectives. Among them, goal 7 emphasizes the need to increase the participation of renewable energies, such as bioethanol, in the global energy matrix. In this context, the present study investigates the behavior of key control variables and their specification ranges in a critical process for bioethanol production: alcoholic fermentation. This investigation was conducted through a review of recent literature in articles indexed over the past 11 years in journals with Journal Citation Reports (JCR) impact factors. The results of this research highlight that variations in temperature and inadequate gradients of substrate, ethanol, and biomass in reactors affect yeast kinetics, resulting in reduced fermentation efficiency. There is a trend towards the use of predictive models based on artificial neural networks and nonlinear programming to control these variables. This study contributes to advances in sustainable bioethanol production, focusing on energy efficiency and providing valuable insights for optimizing the fermentation process.

**Keywords:** *control variables, alcoholic fermentation, metabolic kinetics, literature review, sugar-energy plants.*

---

<sup>1</sup>Aluno do Curso de Engenharia de Produção da UFMS, campus Nova Andradina.

<sup>2</sup>Doutor em Engenharia de Produção, Curso de Engenharia de Produção da UFMS, campus Nova Andradina.

<sup>3</sup>Doutora em Engenharia Química, Curso de Engenharia de Produção da UFMS, campus Nova Andradina.

## 1 INTRODUÇÃO

Com a necessidade urgente de promover um desenvolvimento sustentável global, a ONU (2015) destacou a emergência de promover este objetivo, levando à criação da Agenda 2030, que visa mitigar questões como pobreza, desigualdade, mudanças climáticas e degradação ambiental. Este estudo se concentra no objetivo 7 desta agenda, aos quais buscam dobrar a taxa global de progresso na eficiência energética até 2030 e fortalecer a cooperação internacional para facilitar o acesso a tecnologias de energia limpa, respectivamente. Sob esta perspectiva, a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2024) destaca a importância das usinas de cana-de-açúcar para o alcance dos objetivos da Agenda 2030, sendo grandes responsáveis pela produção de biocombustíveis como o bioetanol.

Tal produção de bioetanol, no Brasil, efetiva-se através do método mais comum chamado de fermentação em batelada alimentada conforme apontado por Veloso *et al.* (2023) e melhor descrita adiante. Esta abordagem é parte dos processos convencionais de fermentação, os quais são caracterizados por variações temporais e alta complexidade, como destacado por Niaze *et al.* (2023). Além disso, a qualidade e a quantidade do etanol obtido dependem significativamente da taxa de crescimento dos microrganismos envolvidos no processo, como reforçam Mohan *et al.* (2022).

Seguindo essa linha de pensamento, a ANP (2024) elucida os créditos de descarbonização (CBIOs) como certificados ambientais emitidos por fabricantes de biocombustíveis com base na eficiência de sua produção e no volume de biocombustível vendido, cada CBIO representa uma tonelada de gases de efeito estufa não emitidos, e podem ser negociados na Bolsa de Valores brasileira (B3), assim como adquiridos pelas distribuidoras para cumprir suas metas de redução de emissões, podendo também ser adquiridos por terceiros interessados, mesmo ainda não sendo obrigados por lei.

No âmbito do metabolismo de *Saccharomyces cerevisiae*, Acorsi *et al.* (2022) destacam sua importância e as relações estequiométricas envolvidas. Sobretudo, Voet; Voet (2013) frisam que as reações de formação de adenosina trifosfato (ATP) estão acopladas à produção líquida de dois ATPs, que por sua vez requerem  $11,6 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  de glicose consumida. Já a fermentação alcoólica consegue ser 26% eficiente nesta condição padrão. No entanto, os autores pontuam que, em condições fisiológicas onde as concentrações dos reagentes e produtos diferem das condições padrão, a eficiência termodinâmica dessas reações pode superar 50%.

Ainda, Resende; Ribeiro (2018); Sawatzki *et al.* (2018); e Rivera *et al.* (2024) ressaltam a necessidade de um perfil adequado de temperatura para otimizar a conversão de substrato em produto. Este perfil ótimo é capaz de reduzir a inibição celular em processos de fermentação intensificados por elevados gradientes de etanol nos reatores e desequilíbrio do pH. Sendo estes, indicativos do progresso da fermentação, permitindo a detecção de componentes que influenciam o metabolismo celular e a produção de etanol.

Além disso, Ajbar; Ali (2017) elucidam que, além do substrato e do produto, as variáveis de controle incluem a distribuição das populações de células presentes no reator em três grupos: células viáveis, células não viáveis e células mortas. Ademais, Kachrimanidou *et al.* (2021) discutem a importância da taxa de crescimento celular, assim como Almeida *et al.* (2021); Li *et al.* (2023) tornam compreensível a evolução temporal do substrato, biomassa e concentração do produto no fermentador.

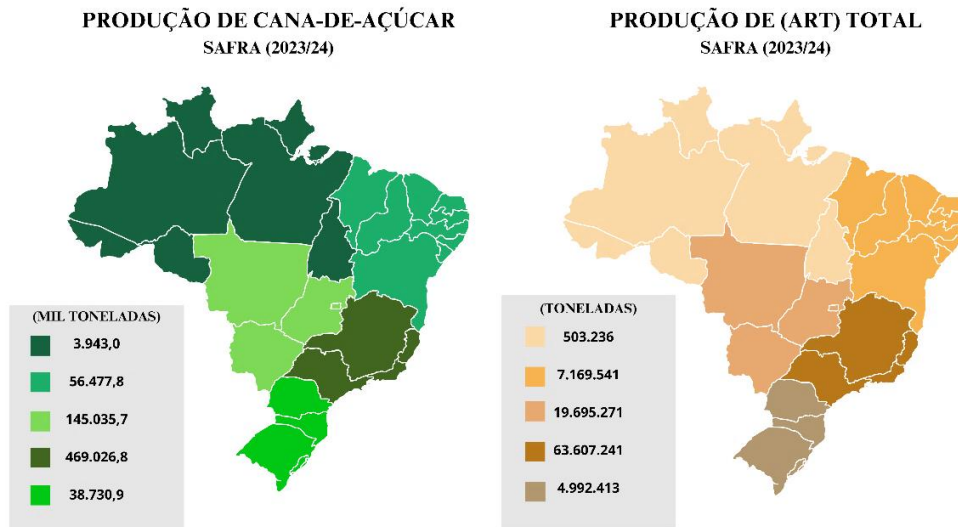
Portanto, sustentado pela revisão de literatura, por meio de levantamento e análise das variáveis de controle exploradas nos mais recentes estudos, este artigo investiga as principais variáveis de controle da fermentação alcoólica nos seus intervalos de faixas ótimas. Sobretudo, esta investigação inclui os aspectos técnicos da produção, como o perfil de processo batelada alimentada, a influência da temperatura, do gradiente de concentração do substrato e produto, a distribuição das células no reator e a taxa de crescimento dos microrganismos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Indústria sucroenergética no Brasil

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024) o panorama regional de produção de cana-de-açúcar em mil toneladas e de açúcares redutores totais (ART) em toneladas no Brasil para a safra de 2023/24 ilustrado na Figura 1 é fundamental para compreender a dinâmica e a contribuição de cada região para a produção nacional.

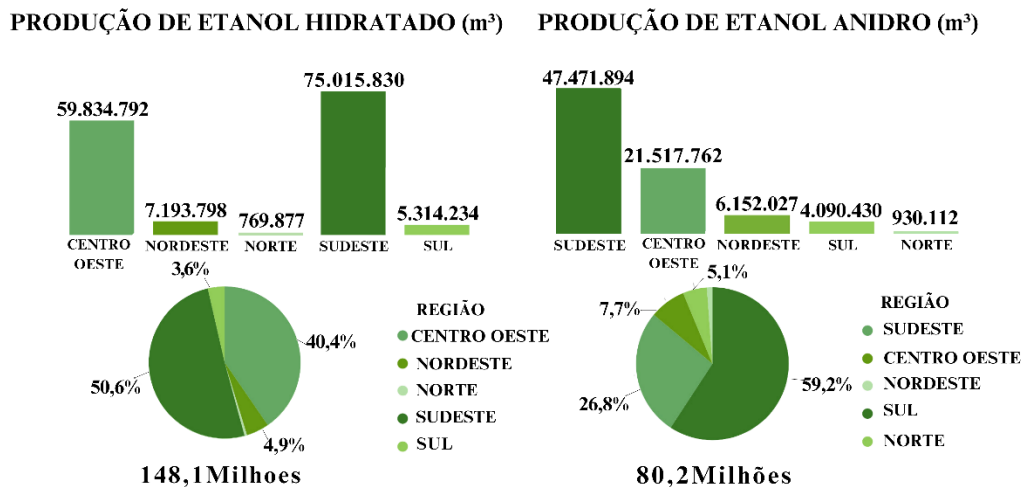
Figura 1 Panorama regional de produção de cana-de-açúcar e de (ART) no Brasil referente a safra de 2023/24.



Fonte: O autor, adaptado de CONAB (2024).

Ainda sobre o cenário brasileiro, conforme dados fornecidos pela ANP (2024), a figura 2 ilustra a produção regional de etanol hidratado e anidro no período de 2017 a abril de 2024, a esquerda, é possível observar a produção de etanol hidratado, enquanto à direita, a produção de etanol anidro subdivididas regionalmente.

Figura 2 Produção por região de etanol hidratado e anidro de 2017 até abr. 2024 e produção por região.

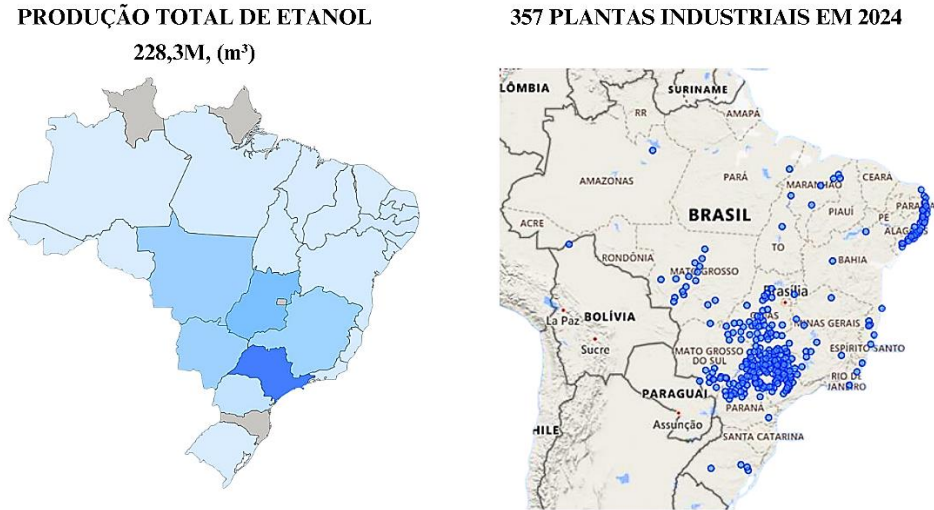


Fonte: ANP (2024).

Com isso, é possível compreender a dinâmica e a geografia da indústria sucroenergética no país de modo a orientar decisões estratégicas. Sobretudo, a Figura 3 apresenta a produção

de etanol no Brasil de 2017 até abril de 2024 e da distribuição das 357 plantas industriais de etanol em 2024 (ANP, 2024).

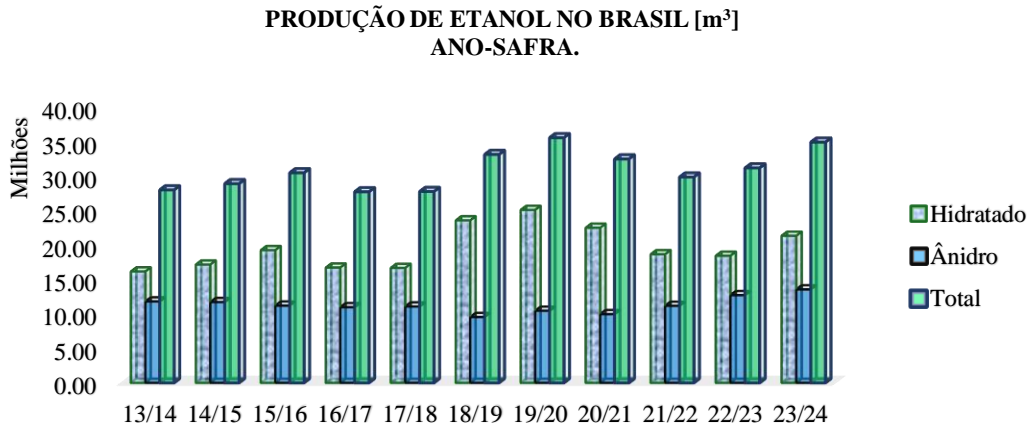
Figura 3 Mapas referente a produção de etanol total de 2017 até abr. 2024 e da distribuição de 357 plantas industriais de etanol no Brasil em 2024.



Fonte - ANP (2024).

O panorama mais recente da produção de etanol no Brasil revela um cenário de crescimento estável, marcado pela autorização de construção de novas unidades. Essas autorizações devem aumentar a capacidade nominal de moagem em 3 milhões de toneladas, o que equivale a 280 milhões de litros adicionais de etanol. Esse incremento ocorre sem considerar reativações ou fechamentos de unidades existentes. As ampliações de produção de etanol, nesse contexto, totalizam 2,3 bilhões de litros nos últimos 10 anos. A figura 4 ilustra a evolução dessa produção no período mencionado (ANP, 2024).

Figura 4 Evolução da produção de etanol no Brasil nos últimos 10 anos.



Fonte: O autor, adaptado de ANP (2024).

É possível observar no gráfico da Figura 4, assim como evidencia o Ministério de Minas e Energia (MME, 2023) no boletim mensal de energia, o incremento de 73,5% na produção do etanol anidro no período de 2014 a 2024, isso decorre da melhoria no ritmo de produção da safra de cana-de-açúcar. Outro aspecto relevante abordado pelo órgão foi a significativa contribuição das fontes renováveis para a Oferta Interna de Energia (OIE) e a Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE).

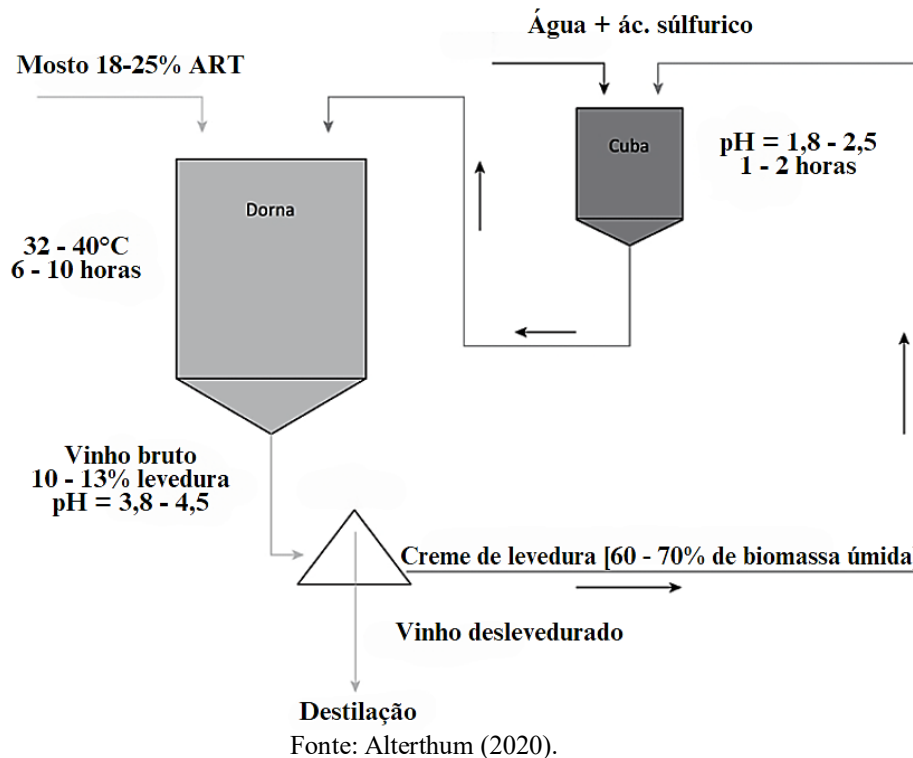
## 2.2 Processo de fermentação batelada alimentada

De acordo com Alterthum (2020) um dos principais processos utilizados nas usinas sucroalcooleiras no Brasil é o processo de batelada alimentada. Este método distingue-se por permitir a adição gradual do mosto ao reator ao longo do tempo, o que proporciona um controle mais preciso das condições de fermentação. O mosto é um termo comumente utilizado na produção de etanol e refere-se ao caldo extraído de cana-de-açúcar, por exemplo, que será fermentado pelas leveduras para produzir bioetanol.

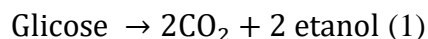
Segundo Basso *et al.* (2008), para que a fermentação do mosto ocorra de forma adequada, é crucial que ele possua um (ATR) específico. O (ATR) é uma medida da quantidade de açúcares presentes no mosto que podem ser convertidos em álcool pelos microrganismos fermentadores, como leveduras. Esse controle do (ATR) é fundamental, pois garante que a concentração de açúcares esteja no nível ideal para a atividade fermentativa, evitando problemas como fermentação incompleta ou produção excessiva de subprodutos indesejáveis.

Sendo assim, no processo de fermentação batelada alimentada, o mosto é adicionado ao pé-de-cuba (tanque de tratamento) já contido na dorna (reatores), iniciando-se a fermentação, que é finalizada, em média, após 6-10 horas. As células de levedura são coletadas por centrifugação, tratadas com ácido e reutilizadas em fermentação subsequente com o reciclo de leveduras como descreve a figura 5, (Alterthum, 2020).

Figura 5 Fluxo fermentativo tipo batelada alimentada com tratamento ácido e recirculação do fermento.



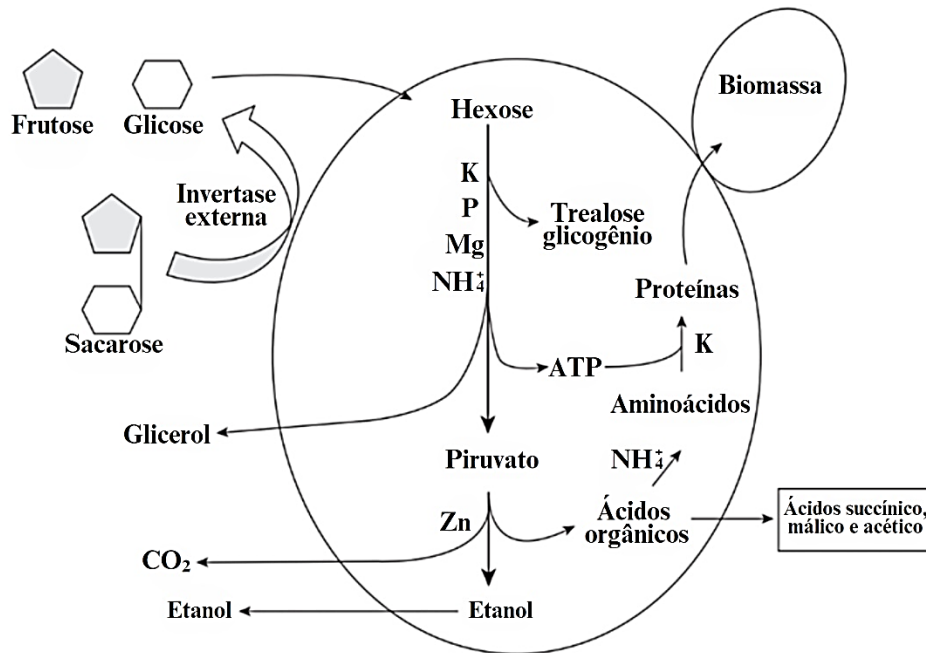
Uma das etapas do processo de conversão do substrato em etanol chamado de fermentação alcoólica, ocorre via metabolismo anaeróbico das leveduras, etapa conhecida como via glicolítica. A reação envolvida nesse processo pode ser descrita de forma resumida pela Equação 1 (Voet; Voet, 2013):



$$\Delta G^\circ = -235 \text{ KJ. mol}^{-1} \text{ de glicose.}$$

Alterthum (2020) complementa ao afirmar que a fermentação alcoólica visa principalmente a produção de energia em forma de (ATP) e precursores metabólicos essenciais para a formação de novas células. O etanol, objeto central deste estudo, não possui utilidade metabólica para a levedura e, portanto, é excretado como ilustra a Figura 6. A adaptação do etanol como produto de excreção conferiu à levedura uma vantagem competitiva devido ao seu efeito antimicrobiano e à capacidade de utilizá-lo em condições aeróbias.

Figura 6 Transformação dos açúcares encontrados na cana-de-açúcar em etanol por meio da via glicolítica.



Fonte: Alterthum (2020).

No Apêndice A adaptado de Voet; Voet (2013) as reações da via glicolítica e fermentação alcóolica são apresentadas de forma detalhada, bem como como as enzimas que compõem este sistema metabólico.

### 2.3 Variáveis de controle no processo de fermentação

Conforme ressaltado por Cruz (2018) e Velozo *et al.* (2020), a influência da temperatura é determinante na quantificação dos compostos de fermentação junto ao processamento dos dados referente a fermentação em batelada alimentada. Observaram-se que as oscilações afetam a cinética da levedura e a composição do caldo de fermentação. Não obstante, como sugerem Almeida *et al.* (2021), há também desafios na produção de etanol como a concentração máxima do produto e o controle da temperatura, devido ao estresse celular e ao risco de contaminação bacteriana.

Mais adiante, Veloso *et al.* (2023) exploraram os efeitos das temperaturas de fermentação, concentrações de substrato e o uso da técnica de *stripping*. Esta técnica reduziu o volume de água necessário para o controle da temperatura, economizando água de resfriamento e a produção de vinhaça também diminuiu, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a economia de vapor na fermentação extrativa em comparação com a convencional, destacando os benefícios econômicos e ambientais dessa abordagem.

Com isso, Paz *et al.* (2019) no intuito de trazerem soluções aos problemas recorrentes com o controle de temperatura, afirmam ser necessária a otimização dos trocadores de calor de placas atuantes em uma planta de produção de etanol para aumentar a capacidade de processamento de matéria-prima.

Já no estudo de Agu e Oduola (2021) foi enfatizado a análise da concentração de biomassa de leveduras, etanol e glicose. Por fim trouxeram modelos que traduzem o crescimento da biomassa e de produção de etanol. Por conseguinte, Acorsi *et al.* (2022) também inferem que a fermentação alcoólica abrange o transporte do substrato até a produção de etanol, com duas versões: considerando todas as ramificações metabólicas, e uma versão simplificada frisando a concentração celular e o consumo de substrato.

Costa, Cerri e Ceccato (2018) propuseram uma estratégia para combater a contaminação bacteriana na fermentação, visando estabelecer a concentração mínima de etanol necessária para eliminar a viabilidade da bactéria *L. fermentum*. Por sua vez, Leite *et al.* (2013) investigaram a contaminação bacteriana na fermentação, realizando diversos experimentos com diferentes concentrações de levedura, extrato de lúpulo, biocida e bactérias para avaliar seu impacto na produtividade, rendimento de etanol e concentração residual de sacarose.

Adicionalmente Bofo *et al.* (2016) debruçam-se no comportamento do melaço de cana-de-açúcar em diferentes concentrações e temperaturas de sólidos e a viscosidade do melaço foi analisada em altas temperaturas, como a de esterilização, sendo importante para diversas aplicações, como os sistemas de fermentação e digestão anaeróbica.

Além disso, com base na pesquisa realizada por Fernandez *et al.* (2020), realizou-se a adição de integradores, ou seja, novos termos incorporados à equação inicial do projeto do controlador da fermentação. Esse termo simboliza as incertezas do modelo, as quais foram mitigadas através do uso destes integradores de erros de rastreamento. No *design* de controladores observou-se uma estratégia eficaz para reduzir o erro de desempenho.

Contudo, Fernandez *et al.* (2021) em outro estudo, analisa um processo de produção de bioetanol em batelada alimentada e propõe outro *design* de controlador baseado em álgebra linear, para prever concentrações de células, etanol e glicerol com base apenas na medição de substratos. Acrescentam-se Mohan *et al.* (2022) que os fermentadores possuem comportamento dinâmico lento, devido à presença íons inorgânicos injetados com os microrganismos, controle impreciso da temperatura, do oxigênio dissolvido, da concentração de levedura, de etanol e substrato. Para mitigar tal comportamento, adotaram uma abordagem de controle em cascata com controladores fracionários *fuzzy* de derivada proporcional e integral proporcional fracionária, incorporando inteligência e flexibilidade ao esquema de controle.

Alguns estudos presentes na literatura destacam o uso de modelos matemáticos para previsão do comportamento de variáveis importantes no processo de fermentação. Nesse sentido, Li *et al.* (2022) discutiram os modelos de biorreatores retangular e circular, com ênfase na transferência de massa de oxigênio, retenção de gás, tamanho das bolhas, crescimento microbiano e uso de redes neurais artificiais (RNA). Em concordância, Niaze *et al.* (2023) enfatizam a eficácia dos modelos de (RNA) em combinação com algoritmos de otimização para prever com precisão a concentração de bioetanol.

A pesquisa de Li *et al.* (2023) abordou a modelagem da concentração de biomassa em condições complexas de fermentação de etanol, utilizando a equação logística em vez da curva de crescimento exponencial. Os parâmetros foram ajustados aos dados experimentais usando mínimos quadrados. Além disso, o estudo aponta que as concentrações de etanol e glicose podem apresentar desvios significativos entre diferentes lotes de fermentação.

Petre, Selisteanu e Roman (2021) focaram nas concentrações e temperaturas do substrato e do agente de resfriamento, além das concentrações de substrato, biomassa e etanol dentro e fora do biorreator. Seu modelo incorpora a taxa de crescimento celular máxima, a taxa de consumo de oxigênio e equações para a saturação e transferência de oxigênio. Notadamente, Kachrimanidou *et al.* (2021) também investigaram o aumento da produtividade de etanol usando o processo em batelada alimentada, analisando a evolução temporal das concentrações de substrato, biomassa e produto no fermentador.

Outros pontos a serem considerados foram apontados por Sawatzki *et al.* (2018) que empregaram *S. cerevisiae* AH22 para produzir endo-poligalacturonase recombinante. As culturas foram cultivadas em condições específicas e, após o cultivo, as amostras foram analisadas para densidade óptica, concentração de glicose e etanol, atividade enzimática, pH (potencial de hidrogênio) e tensão de oxigênio dissolvido.

Posto isso, Veloso *et al.* (2023) conduziram fermentações de etanol em reator a 30 °C, com levedura industrial liofilizada *S. cerevisiae* Y-904, obtendo concentrações de células e substrato semelhantes às industriais. Foram realizadas fermentações em batelada e batelada alimentada, incluindo uma com alta gravidade, e análises para determinar as concentrações de sacarose, glicose, frutose e etanol na fase abiótica. Modelos intrínsecos e não intrínsecos foram desenvolvidos a partir dos balanços de massa total, células totais, células viáveis, substrato e etanol. Nessa conjuntura Zentou *et al.* (2019) analisaram dois modelos para estudar concentrações de substrato e suas implicações no coeficiente de rendimento e taxa de crescimento de biomassa de *S. cerevisiae*, ambos os modelos podem ser práticos em condições específicas, mas não há um modelo universal para diferentes culturas de fermentação.

O estudo de Wang *et al.* (2020) mostrou que a operação de fermentação simultânea contínua aumenta a produtividade anual do etanol, com baixo risco de contaminação. Foram monitoradas as taxas de fluxo de gás carbônico, valores finais de pH, tempo do ciclo, produção de biomassa e taxa de consumo de glicose, sendo esta última um parâmetro para medir a eficiência da fermentação, o glicerol também estava presente nos ciclos. Por outro lado, Sarks *et al.* (2014) concentraram-se na investigação da concentração celular inicial, pH e temperatura, utilizando uma sonda de capacitância para medição precisa da população celular viável.

Através do estudo de Wang *et al.* (2017) ao qual foram analisados processos de fermentação semi-contínuos-cíclicos, observando-se a taxa de substrato ao longo do tempo em cada ciclo, a eficiência de fermentação e o pH. A produtividade foi comparada com a fermentação em lote. Em cada ciclo do processo, que dura até o início da fase estacionária, metade do volume do fermentador foi substituído por substrato fresco e estéril para manter as células em crescimento exponencial e evitar fases estacionárias.

Em adição, Monteiro *et al.* (2018) debruçaram-se sobre o comportamento das cepas de levedura CAT-1 e PE-2 em relação à produção de etanol e biomassa em diferentes condições de concentração de açúcar, ( $^{\circ}$ Brix) e suplementações. Observaram-se, pois, que a suplementação de ureia e diamônio fosfato impactou na taxa de crescimento celular, apresentando as melhores faixas das variáveis de controle para maior produção de etanol, baixa quantidade de açúcar não fermentado, alto rendimento, alta produtividade e viabilidade da levedura após vários ciclos.

Em paralelo Rivera *et al.* (2024) exploraram a fermentação com reciclagem celular, ressaltando a importância de fatores como temperatura, micro-aeração e suplementação de nutrientes para melhorar a concentração final de etanol e a produtividade volumétrica. Utilizaram cromatografia para monitorar sacarose, glicose, frutose e etanol durante a fermentação, além de sensores de capacitância, potencial de oxidação-redução e pH para monitorar as fermentações e desenvolver um sensor suave baseado em rede neural *feedforward*.

Igualmente importante Chwialkowska, Smaga e Oleskowicz (2021) trouxeram a influência de diferentes parâmetros, como pH e concentração inicial de substratos glicose,



xilose, galactose na produção de ácidos carboxílicos durante processos de fermentação. Os resultados indicaram que o pH desempenha um papel crucial na composição dos produtos formados, afetando a produção de ácidos carboxílicos de cadeia média e curta, além de outros produtos como álcoois.

Mais adiante o estudo de Sun, Dong e Yan (2023) salienta a modelagem do processo de fermentação do etanol e a eficácia do modelo na previsão da concentração de etanol combustível fora do tanque, bem como a influência do controle de temperatura na produção de etanol e glicerol durante a fermentação. Sobretudo, Ajbar e Ali (2017) voltaram-se ao modelo de fermentação contínua para produção de etanol e identificou-se que a produtividade máxima ocorre em um ponto periódico, sendo assim, foi utilizado um controle preditivo avançado baseado em modelo não linear capaz de maximizar a produtividade mesmo sem conhecer antecipadamente o valor exato da produtividade máxima

Por fim Veloso *et al.* (2022) desenvolveram uma modelagem cinética para fermentações de etanol em batelada alimentada. Eles observaram que o aumento do tamanho do inóculo levou a um aumento na taxa de consumo de substrato e, conseqüentemente, a uma maior produtividade de etanol. O modelo proposto conseguiu prever a dinâmica comportamental das fermentações, considerando três tipos de inibição: substrato, etanol e células.

Conforme evidenciado nos diversos estudos abordados, o processo de fermentação alcoólica envolve uma gama ampla de variáveis de controle que devem ser monitoradas e otimizadas para garantir a eficiência e a qualidade da produção de etanol. Cada uma dessas variáveis desempenha um papel crucial na cinética do processo fermentativo, impactando diretamente na produtividade, rendimento e estabilidade do processo. Portanto, o controle preciso dessas variáveis é essencial para a maximização da produção de etanol e a mitigação de problemas operacionais, demonstrando a complexidade e a importância da gestão integrada no ambiente industrial sucroalcooleiro.

### **3 METODOLOGIA DE PESQUISA**

#### **3.1 Classificação da pesquisa**

Prodanov e Freitas (2013) apud Demo (2000, p. 29) estabelecem que os esforços em torno da pesquisa qualitativa, abordagem deste trabalho, visam enfrentar os problemas causados pela excessiva formalização, destacando que a qualidade não depende tanto da quantidade, mas sim da profundidade. Ignorar esse aspecto, segundo eles, seria distorcer a realidade. Concomitantemente afirmam que o fato de a ciência ter dificuldade em lidar com isso é um problema da ciência, não da realidade.

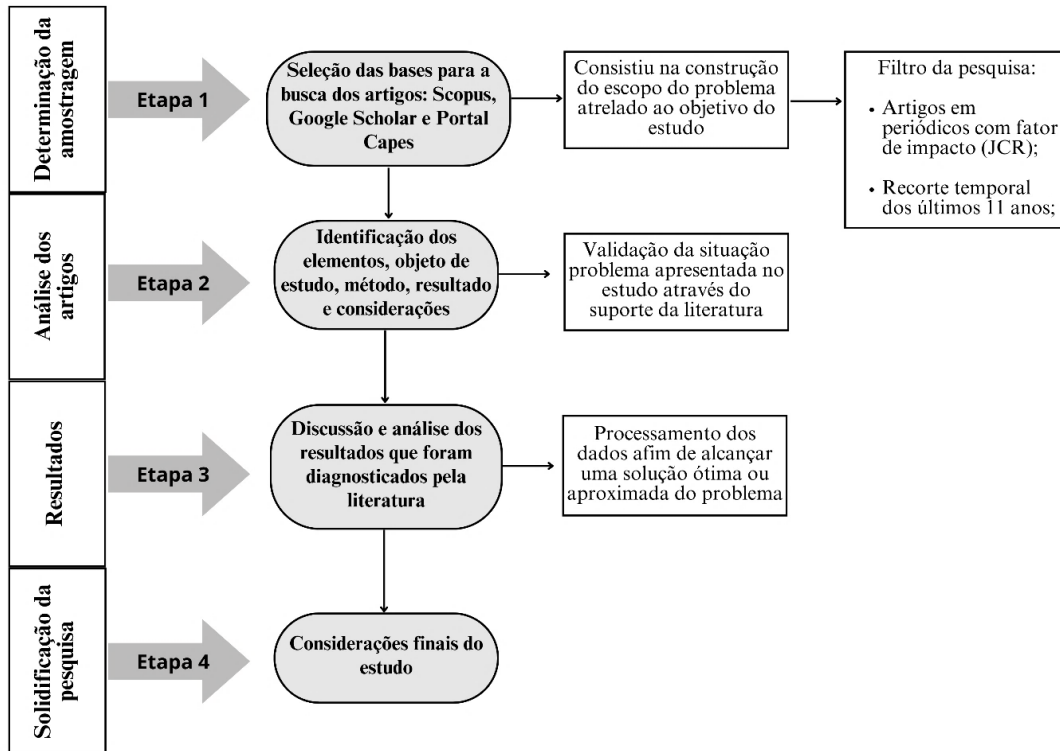
Seguindo os preceitos de Lakatos e Marconi (2021), a pesquisa bibliográfica adotada neste estudo abrange todo o material publicado sobre o tema investigado, incluindo variados formatos como livros, artigos científicos, mídias impressas e digitais. Este estudo, seguindo uma abordagem descritiva exploratória, busca expor fenômenos específicos, como a análise de casos, através de avaliações empíricas e teóricas, utilizando tanto métodos quantitativos quanto qualitativos e enfatizando a importância de métodos de amostragem adaptáveis para assegurar representatividade.

Em sinergia com Ueda, Agostino e Souza (2022), que atribuíram um código de identificação único (id#) para cada artigo selecionado na literatura, este trabalho adotou a mesma técnica por meio da Tabela 1. Neste contexto, Peres e Fogliatto (2018) comentam esta característica de exposição dos artigos contemplados na revisão em uma ordenação cronológica, dividida em períodos distintos, neste caso dois quinquênios, evidenciando um incremento notável no volume de publicações no período mais recente. Adicionalmente, os artigos estudados por eles também foram identificados conforme o título do periódico.

### 3.2 Procedimentos de pesquisa

Portanto esta pesquisa foi realizada em 4 etapas, e para explicá-las, desenvolveu-se o fluxograma detalhado pela Figura 7 a seguir:

Figura 7 Fluxograma.



Fonte: O autor (2024).

Etapa – 1: Foi realizada a seleção das bases para a busca dos artigos estritamente limitada aos trabalhos indexados nos periódicos (JCR), considerados como de alto impacto, e que foram publicados nos últimos 11 anos. Priorizando a abrangência e a qualidade das fontes, incluindo Scopus, Google Scholar e o Portal Capes.

Etapa – 2: Procedeu-se à identificação dos elementos essenciais presentes nos artigos selecionados, tais como o objeto de estudo, as variáveis de controle na fermentação de bioetanol, os métodos empregados nos artigos elencados, com foco em realçar os métodos que apresentassem correlações entre as variáveis de controle, bem como proposições de modelos de otimização e, por fim, os resultados obtidos pelos trabalhos elencados.

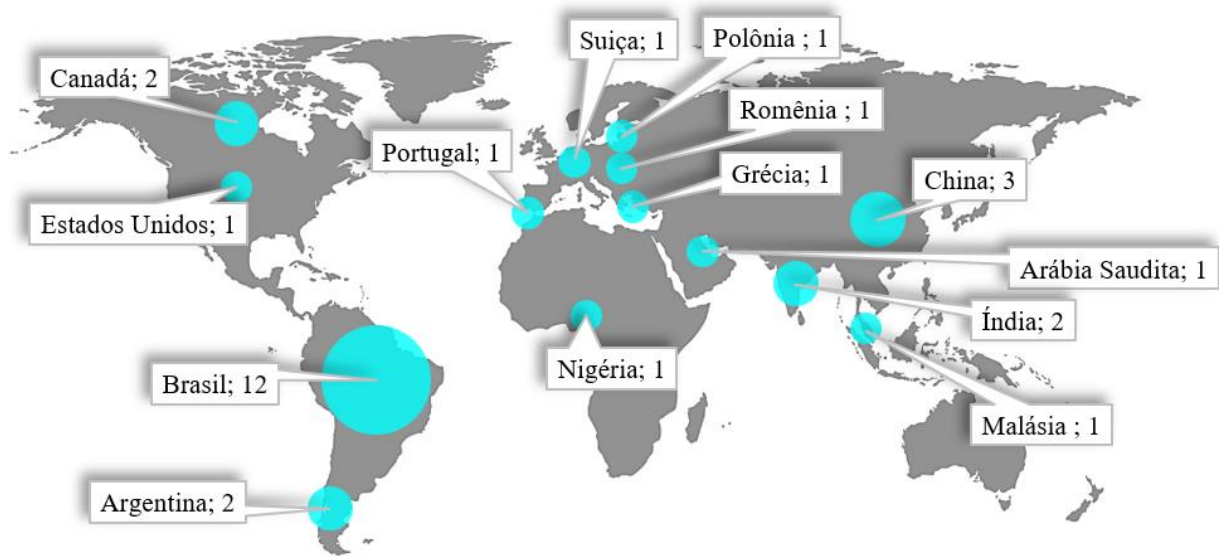
Etapa – 3: Promoveu-se uma reflexão crítica sobre os achados, integrando a análise e discussão dos resultados diagnosticados pela literatura. Além de evidenciar o quantitativo de estudos sobre cada variável, selecionou-se também as variáveis mais elucidadas para identificar padrões e divergências por meio do cálculo da média aritmética entre as faixas especificadas pelos autores permitindo a identificação de desvios e a justificativa para as pesquisas especializadas que se concentraram em variáveis menos estudadas.

Etapa – 4: Consolidou-se os principais *insights* e contribuições obtidos ao longo da pesquisa. Esse esforço culminou na síntese dos achados mais relevantes, destacando tanto os avanços alcançados quanto as lacunas ainda presentes no campo de estudo. Ademais, esta etapa apontou as possíveis direções para pesquisas futuras, sugerindo abordagens inovadoras e áreas de investigação que podem aprofundar o entendimento sobre as variáveis de controle no processo de fermentação, promovendo assim um contínuo desenvolvimento científico e tecnológico na área.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 9 do artigo ilustra a distribuição geográfica dos estudos elencados na revisão bibliográfica. Notavelmente, o Brasil se destaca com a maior porcentagem, representando 40% do total de pesquisas evidenciadas. Este predomínio reflete a significativa produção científica brasileira na área em questão, diminuindo uma robusta participação nacional na comunidade acadêmica internacional. Uma elevada quantidade de estudos provenientes do Brasil pode ser atribuída a políticas públicas de incentivo à pesquisa, bem como à atuação de universidades e institutos de pesquisa renomados. Além disso, a relevância do tema investigado no contexto brasileiro impulsionou a realização de numerosos estudos e publicações.

Figura 9 Panorama internacional dos artigos científicos selecionados.



Fonte: O autor (2024).

Em segundo lugar, a China aparece com 10% dos estudos, seguida pela Índia, Argentina e Canadá, cada um contribuindo com aproximadamente 7%. Esta distribuição evidencia uma diversidade geográfica nas contribuições acadêmicas, mostrando a relevância global do tema investigado. A presença de diferentes países destaca a natureza colaborativa e interdisciplinar da pesquisa científica atual. Além disso, o engajamento de nações como a Índia, Argentina e Canadá ressalta a importância de redes internacionais de pesquisa e cooperação acadêmica, promovendo avanços avançados através de múltiplas perspectivas e contextos regionais.

Na análise acerca da integração das variáveis de controle na fermentação alcoólica, os artigos selecionados para a presente revisão foram organizados na Tabela 1. Esta tabela identifica cada estudo conforme os respectivos autores, periódicos e anos de publicação, os quais foram subdivididos em dois quinquênios. Essa metodologia permite um panorama abrangente e detalhado da evolução das pesquisas no campo da fermentação alcoólica ao longo da última década, destacando as principais contribuições e tendências observadas em períodos distintos.

A estruturação dos artigos em quinquênios facilita a identificação de padrões e avanços tecnológicos, bem como a evolução das abordagens metodológicas utilizadas pelos pesquisadores. Dessa forma, é possível avaliar o impacto das inovações e dos desenvolvimentos científicos no aprimoramento dos processos fermentativos, oferecendo uma visão integrada e atualizada do estado da arte na fermentação alcoólica.

Tabela 1 Codificação dos artigos, autores, periódicos e ano de publicação.

	id#	Autores	Periódicos	Ano
2013-2018 = 9 artigos	A1	Leite <i>et al.</i>	<i>Fuel processing technology</i>	2013
	A2	Sarks <i>et al.</i>	<i>Biotechnology for biofuels</i>	2014
	A3	Bofo <i>et al.</i>	<i>Environmental progress &amp; sustainable energy</i>	2016
	A4	Ajbar; Ali.	<i>Journal of King Saud University-Engineering Sciences</i>	2017
	A5	Wang <i>et al.</i>	<i>Biotechnology for biofuels</i>	2017
	A6	Costa; Cerri; Ceccato.	<i>Letters in applied microbiology</i>	2018
	A7	Cruz; Resende; Ribeiro.	<i>Chemical Engineering Communications</i>	2018
	A8	Monteiro <i>et al.</i>	<i>Biotechnology for biofuels</i>	2018
	A9	Sawatzki <i>et al.</i>	<i>Bioengineering</i>	2018
2019-2024 = 21 artigos	A10	Paz; Garnica; Curbelo.	<i>Holos</i>	2019
	A11	Zentou <i>et al.</i>	<i>Biomolecules</i>	2019
	A12	Fernández <i>et al.</i>	<i>Mathematical Problems in Engineering</i>	2020
	A13	Veloso <i>et al.</i>	<i>Industrial &amp; Engineering Chemistry Research</i>	2020
	A14	Wang <i>et al.</i>	<i>Biotechnology for biofuels</i>	2020
	A15	Agu; Oduola.	<i>Global Journal of Engineering and Technology Advances</i>	2021
	A16	Almeida <i>et al.</i>	<i>Journal of Cleaner Production</i>	2021
	A17	Chwialkowska; Smaga; Oleskowicz.	<i>Biosystems Engineering</i>	2021
	A18	Fernández <i>et al.</i>	<i>Bioprocess and Biosystems Engineering</i>	2021
	A19	Kachrimanidou <i>et al.</i>	<i>Biomass Conversion and Biorefinery</i>	2021
	A20	Petre; Selișteanu; Roman.	<i>Bioresource Technology</i>	2021
	A21	Acorsi <i>et al.</i>	<i>Fermentation</i>	2022
	A22	Li <i>et al.</i>	<i>Engineering</i>	2022
	A23	Mohan <i>et al.</i>	<i>Bioresource Technology</i>	2022
	A24	Veloso <i>et al.</i>	<i>Applied Biochemistry and Biotechnology</i>	2022
	A25	Li <i>et al.</i>	<i>Renewable Energy</i>	2023
	A26	Niaze <i>et al.</i>	<i>Renewable Energy</i>	2023
	A27	Sun; Dong; Yan.	<i>Biochemical Engineering Journal</i>	2023
	A28	Veloso <i>et al.</i>	<i>Biochemical Engineering Journal</i>	2023
	A29	Veloso <i>et al.</i>	<i>BioEnergy Research</i>	2023
	A30	Rivera <i>et al.</i>	<i>Journal of Chemical Technology &amp; Biotechnology</i>	2024

Fonte: O autor (2024).

Com base nas informações coletadas na revisão bibliográfica para cada artigo, foi atribuído um código de identificação único (id#) entre o intervalo de [A1-A30] como é possível observar na Tabela 1. No primeiro período analisado (2013–2018), foram publicados 9 artigos, enquanto que no segundo período (2019–2024), esse número aumentou para 21. Nota-se que houve aumento significativo de 40% no número de pesquisas nos últimos anos abordando o tema em questão, o que pode indicar emergência e aumento de interesse pelo tema.

Em razão dessas evidências, o presente estudo identificou e descreveu as variáveis de controle cruciais na fermentação alcoólica como resposta da observação bibliográfica. Essas respostas foram compiladas de maneira detalhada na Tabela 2 fornecendo uma visão holística dos elementos essenciais para o controle eficaz desse processo.

Tabela 2 Variáveis de controle, descrição e suas dimensões.

Variável	Descrição	Variável	Descrição
$\mu$	Taxa de crescimento específica (g. L <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	$O_2$	Concentração de oxigênio (mg. L <sup>-1</sup> )
$X$	Concentração biomassa celular (g.L <sup>-1</sup> )	$\rho_M$	Massa específica do mosto (g.L <sup>-1</sup> )
$X_0$	Concentração celular inicial (g.L <sup>-1</sup> )	$Y_{P/S}$	Conversão do substrato em produto (g.L <sup>-1</sup> )
$P$	Concentração de etanol (g.L <sup>-1</sup> )	$Y_{X/S}$	Conversão do substrato em células (g.L <sup>-1</sup> )
$C_{XV}$	Concentração celular viável (g.L <sup>-1</sup> ou %)	$P_G$	Concentração de glicerol (g.L <sup>-1</sup> )
$S$	Concentração de substrato (g. L <sup>-1</sup> )	$UFC$	Unidade formadora de colônias (mL <sup>-1</sup> )
$S_0$	Concentração substrato inicial (g.L <sup>-1</sup> )	$\beta_{-B10-45}$	Concentração de extrato de lúpulo (mg. L <sup>-1</sup> )
$S_W$	Concentração da água na fase líquida (g.L <sup>-1</sup> )	$pH$	Potencial hidrogeniônico (adimensional)
$^{\circ}Brix$	Partículas sólidas suspensas (graus)	$CG/FM$	Gravidade específica (adimensional)
$U$	Taxa de alimentação (g. L <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	$T$	Temperatura (°C)
Biocida	Concentração de Biocida (g.L <sup>-1</sup> )		

Fonte: O autor (2024).

A Tabela 2 apresenta uma análise integral das variáveis de controle do processo de fermentação alcoólica. Com 21 variáveis listadas, ela oferece uma visão detalhada dos parâmetros críticos considerados pelos pesquisadores no último decênio. Por acréscimo sintetizou-se a Tabela 3, que tem por objetivo agrupar as variáveis de controle da fermentação alcoólica investigadas pelos 30 artigos mencionados na Tabela 2, e que serão estudadas neste artigo mais adiante de forma mais detalhada. Tal ordenamento foi realizado setorizando as quantidades de autores que teorizaram determinada variável de controle e o percentual correspondente a esta parcela. Essa abordagem permitiu uma análise panorâmica e fundamentada, agregando valor à compreensão dos mecanismos de controle nesse processo crucial da produção de bioetanol.

De acordo com a Tabela 3 é notório que as variáveis correspondentes a taxa de crescimento específico ( $\mu$ ), concentração de biomassa celular ( $X$ ) de leveduras, a concentração de produto etanol ( $P$ ), temperatura ( $T$ ) e a concentração de substrato ( $S$ ) estão entre as mais difundidas, refletindo então, a importância de otimizá-las com objetivo de maximizar a eficiência na fermentação. Verifica-se que a variável referente ao fator de conversão de substrato em produto ( $Y_{P/S}$ ) pertence ao grupo mais pronunciado pelos autores, entretanto por se tratar de uma variável dependente, a mesma será discutida em decorrência do aumento ou diminuição das demais variáveis. Já a inclusão de parâmetros menos comuns, como concentração de extrato de lúpulo ( $\beta$ -BIO-45), concentração de biocida e concentração de água na fase líquida ( $S_W$ ) demonstram a ampla gama de fatores que podem influenciar o processo fermentativo e que são objeto de investigação na literatura especializada, não sendo discutidas nesse estudo.

Tabela 3 Principais variáveis de controle quantificadas e autores.

Variável	Número de artigos	Autores
$S$	24 [80%]	[A1, A3, A4, A6, A9, A11, A12, A13, A15, A16, A17, A18, A19, A20, A21, A22, A23, A24, A25, A26, A27, A28, A29, A30]
$X$	21 [70%]	[A1, A6, A8, A9, A11, A12, A13, A14, A15, A16, A18, A19, A20, A21, A22, A23, A24, A25, A26, A28, A30]
$T$	21 [70%]	[A2, A3, A7, A9, A10, A11, A12, A13, A14, A15, A16, A18, A20, A21, A22, A23, A24, A25, A27, A28, A30]
$P$	19 [63,3%]	[A2, A4, A5, A6, A9, A13, A15, A16, A18, A19, A20, A21, A23, A25, A26, A27, A28, A29, A30]
$Y_{P/S}$	18 [60%]	[A1, A4, A8, A9, A11, A12, A13, A14, A16, A19, A20, A22, A23, A24, A25, A28, A29, A30]
$\mu$	16 [53,3%]	[A3, A4, A9, A11, A12, A13, A14, A15, A16, A18, A20, A21, A22, A23, A25, A28]
$pH$	15 [50%]	[A1, A2, A5, A6, A7, A9, A12, A14, A15, A17, A23, A24, A26, A29, A30]
$X_0$	9 [30%]	[A1, A9, A11, A14, A15, A19, A25, A26, A28]
$Y_{X/S}$	9 [30%]	[A9, A11, A15, A16, A20, A22, A23, A25, A28]
$S_0$	8 [26,6%]	[A2, A4, A7, A9, A15, A19, A20, A28]
$U$	7 [23,3%]	[A4, A9, A12, A18, A20, A23, A28]
$O_2$	5 [16,6%]	[A9, A15, A20, A22, A23]
$P_G$	4 [13,3%]	[A12, A13, A18, A27]
$C_{XV}$	3 [10%]	[A11, A16, A28]
$\rho_M$	2 [6,6%]	[A16, A28]
$^{\circ}Brix$	2 [6,6%]	[A3, A8]
$UFC$	2 [6,6%]	[A1, A6]
$CG/FM$	1 [3,3%]	[A26]
$S_W$	1 [3,3%]	[A16]
$\beta_{-BIO-45}$	1 [3,3%]	[A1]
Biocida	1 [3,3%]	[A1]

Fonte: O autor (2024).

Quanto à análise da variável pH, 20% dos estudos indicam que o valor ideal para condições ótimas de operação fermentativa é de 4,5. No entanto, 40% dos trabalhos desviam sutilmente desse valor, evidenciando um processo ótimo com o pH inicial ajustado para 5,0, aumentando em média para 6,5 após vários ciclos fermentativos. Além disso, aproximadamente 30% dos 15 artigos analisados demonstraram maximização fermentativa com pH inicial de 6,0. Sarks *et al.* (2014) comprovam que a elevação do pH pode resultar na remoção ou precipitação de subprodutos de degradação, prática comum na sobrecalagem, gerando diferenças significativas na capacidade fermentativa.

Subsequentemente, procede-se à avaliação das concentrações iniciais mais oportunas de biomassa celular de levedura ( $X_0$ ) nos reatores, com o objetivo de alcançar condições sustentáveis de produtividade etanoica. Dessa forma, convencionou-se o cálculo da média aritmética entre os valores indicados pelos 9 artigos que tratam dessa variável, obtendo-se um valor aproximado e considerado inteiramente adequado para a concentração celular inicial de  $30,0 \text{ g. L}^{-1}$ . O valor de  $1,0 \text{ g. L}^{-1}$ , #A11 contrasta dos demais estudos, por conseguinte, foi excluído do cálculo da média em decorrência de seu experimento pertencer à ordem de um micro biorreator.

Em acréscimo, 23,3% dos trabalhos sobressaltam os resultados desejáveis para a variável denotada taxa de alimentação ( $U$ ) de substrato nos reatores presentes no processo de fermentação, aos quais também foram aplicados a média aritmética, resultando assim, em uma taxa ótima de operação aproximadamente  $10,0 \text{ g.L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ . Em concordância, todos os autores acrescentam que a taxas otimizadas encontradas nos experimentos surtem efeito positivo na produtividade quando são mantidas constantes. Conclui-se ainda, que tais condições evitam o acúmulo de açúcares não fermentados ao final de cada ciclo fermentativo.

Posteriormente, procede-se à avaliação pormenorizada das concentrações iniciais de substrato ( $S_0$ ) mais favoráveis, com o anseio de atingir condições de produtividade etanoica de elevada sustentabilidade. Assume-se, por conseguinte, apropriado estabelecer um critério de rigor extremo para inferir a respeito destes resultados. Nesse sentido, convencionou-se o cálculo da média aritmética dos valores apresentados pelos autores obtendo-se um valor aproximado considerado plenamente adequado para a concentração celular inicial de  $121,0 \text{ g. L}^{-1}$ .

Concomitantemente nos estudos que abordaram a concentração de oxigênio ( $O_2$ ), destacam a importância de maximizar a biomassa e o tempo de cultivo para melhorar o rendimento de produtos recombinantes. Além disso, atestam a necessidade de considerar a taxa de crescimento ideal e a redução da produção de etanol em condições específicas, pois este fato aumenta a demanda por oxigênio. Por outro lado, enfatizam que a fermentação é influenciada por vários fatores, incluindo a disponibilidade de oxigênio, e que a taxa de fermentação pode ser controlada por meio da manipulação desses fatores, com destaque para a composição do mosto.

Em relação aos aspectos técnicos da concentração de oxigênio, 60% dos estudos em cogitação, apontam que o coeficiente volumétrico de transferência de massa de oxigênio é de  $8,886 \text{ mg. L}^{-1}$  e a taxa máxima de consumo específico de oxigênio é de  $0,5 \text{ h}^{-1}$  para operações sustentáveis. Estes valores são cruciais para avaliar o desempenho do biorreator. Além disso, destacam que um alto nível de oxigênio dissolvido pode levar ao acúmulo de subprodutos em fermentações com alto consumo de oxigênio. Essa variação afeta a concentração de biomassa e favorece o acúmulo de lipídios, sendo essencial para a produção de produtos altamente aeróbicos e para o crescimento das leveduras.

Notoriamente o glicerol ( $P_G$ ) é destacado como um dos principais compostos, monitorados por 13,3% dos artigos listados, e a sua quantificação em destilarias é predominantemente realizada por meio da cromatografia líquida de alta eficiência. Estudos têm sido conduzidos para avaliar os efeitos da temperatura, utilizando a regressão do glicerol como método de análise. Por essa razão, todos os artigos que investigaram o comportamento da produção de glicerol nas fermentações concluíram que a média de concentração inicial adequada é de aproximadamente  $0,001 \text{ g. L}^{-1}$  e, 75% deles acrescentaram que durante uma fermentação bem controlada, essa concentração deve atingir um limite de  $7,0 \text{ g. L}^{-1}$ .

As concentrações de células viáveis ( $C_{XV}$ ), tanto nos reatores quanto no caldo, são usualmente determinadas e empregadas para a aferição da taxa de crescimento específica. O valor referente à remoção de calor por meio de resfriamento apresentou incremento concomitante ao aumento da taxa de crescimento das células de levedura viáveis, alcançando um ápice durante a fase exponencial do crescimento celular, o que corroborou a hipótese de que

a geração de calor é proporcional ao crescimento das células de levedura. Em relação à porcentagem ideal de células viáveis nos fermentadores, constatou-se que esta deve ser de aproximadamente 80%.

6,6% dos estudos enfatizam que o melaço bruto, cuja concentração inicial de sólidos ( $^{\circ}BRIX$ ) situa-se entre 60 e 80°, passa por diluição até alcançar uma concentração entre 40 e 50°. Após esta diluição, o melaço é centrifugado para separar a fase leve da fase pesada. A fase pesada submete-se a decantação, sendo que o sobrenadante é reciclado, misturando-se com água para ser reutilizado na diluição do melaço bruto. A fase leve, por sua vez, é submetida a um processo de aquecimento e resfriamento em trocadores de calor, culminando em um melaço clarificado. Estes modelos propostos pelos artigos evidenciaram excelente precisão estatística para concentrações de sólidos no mosto de 20° Brix. Ao se elevar a concentração para 30° Brix, foram constatados valores negativos de tensão de escoamento.

Os estudos que examinaram a interferência da densidade do mosto ( $\rho_M$ ), sublinha-se a utilização de modelos matemáticos intrínsecos e não intrínsecos com o escopo de estimar o balanço de massa total nos reatores. Ademais, um dos estudos destacou que a variação de entalpia do sistema, advinda da alimentação do mosto (especificamente nos ensaios de batelada alimentada), pode ser descrita pela modelagem matemática referida, evidenciando que o valor da densidade do mosto, fixado em 1040,0 g. L<sup>-1</sup>, propiciou o aprimoramento do desempenho do sistema.

Com relação à variável gravidade específica do mosto ( $CG/FM$ ), diretamente vinculada aos seus efeitos na variável de saída do reator, a saber, a concentração de bioetanol, verifica-se que 3,3% dos estudos examinados nesta revisão abordaram essa variável. Tanto a gravidade específica do mosto quanto a gravidade específica da lavagem fermentada foram selecionadas para processamento mediante o modelo de rede neural artificial.

Apenas 6,6% dos artigos abordaram a variável unidade formadora de colônias bacterianas ( $UFC$ ). Sendo que, no contexto bacteriano, o extrato de lúpulo demonstrou eficácia contra a proliferação destas, mesmo em concentrações bacterianas elevadas. Os resultados mais promissores foram alcançados em concentrações de levedura e extrato de lúpulo de 35,0 g. L<sup>-1</sup> e 46,0 mg. L<sup>-1</sup>, respectivamente. A concentração bacteriana não exerceu um impacto significativo nos resultados, e o extrato de lúpulo apresentou um desempenho comparável ao biocida. Conclui-se, portanto, que a média de unidades formadoras de colônias bacterianas determinada pelos autores foi de aproximadamente  $3,5 \times 10^5$  células por mL.

Nota-se que a compreensão detalhada dessas variáveis possibilita a identificação de oportunidades para a otimização do processo fermentativo, reduzindo desperdícios e aumentando a produtividade. A correlação entre as variáveis de controle e os resultados operacionais oferece *insights* valiosos para ajustes precisos nas condições de fermentação, promovendo um ambiente mais controlado e eficiente. Essa análise não apenas esclarece os mecanismos subjacentes da fermentação alcoólica, mas também evidencia as melhores práticas para manter a consistência e a alta qualidade do etanol produzido.

A Tabela 4 a seguir apresenta as cinco variáveis de controle independentes mais endossadas pela literatura, destacando suas relações com as faixas acima e abaixo das especificações. Esta análise aprofundada ressalta a importância dessas variáveis no contexto da fermentação alcoólica, evidenciando seu impacto na qualidade e eficiência do processo. Essa abordagem fundamentada em evidências científicas oferece uma base sólida para a tomada de decisões estratégicas, contribuindo para o aprimoramento contínuo da produção de etanol.



Tabela 4 Principais problemas no processo de fermentação devido as variáveis fora das especificações.

Variáveis	Acima da especificada	Referências	Abaixo da especificada	Referências
	Redução de $[Y_{P/S}]$	[A4, A5, A7, A8, A9, A12, A19, A22, A24, A27, A28, A30]	Redução de $[Y_{P/S}]$	[A4, A5, A7, A9, A12, A13, A19, A20, A24, A28]
Concentração de substrato (S):	Acúmulo [ART] não fermentados.	[A4, A7, A8, A9, A13, A17, A19, A20, A21, A22]	Redução de $[\mu]$ celular, devido a concorrência por alimento.	[A9, A19, A22, A30]
	Redução de $[\mu]$ celular devido desregulagem osmótica.	[A11, A20, A25]		
Concentração biomassa celular (X):	Redução de $[Y_{P/S}]$	[A4, A7, A19, A20, A22, A24, A30]	Redução de $[Y_{P/S}]$	[A7, A4, A19, A20, A21, A22, A24, A30]
	Redução da $[C_{XV}]$	[A4, A17, A30]	Redução da $[C_{XV}]$	[A4, A7, A30]
Temperatura (T):	Redução de $[Y_{P/S}]$	[A4, A5, A7, A13, A24, A28, A30]	Redução de $[Y_{P/S}]$	[A4, A5, A7, A13, A17, A24, A28, A30]
	Aumento de $(P_G)$	[A13, A17, A27]		
Concentração de etanol (P):	Redução da $[C_{XV}]$ devido ao estresse.	[A9, A18, A28,]	Aumento do volume de vinhaça.	[A5, A13, A18, A28, A30]
	Aumento de $[P_G]$	[A12, A13, A14, A18, A27, A28]		
Taxa de crescimento específica de biomassa ( $\mu$ ):	Redução de $[C_{XV}]$ , devido a concorrência por substrato.	[A4, A18, A19, A30]	Redução de $[Y_{P/S}]$	[A4, A18, A19, A22, A30]
	Redução de $[Y_{P/S}]$	[A4, A18, A19, A22, A30]		
	Aumento de $[Y_{X/S}]$	[A4, A18, A19, A22, A30]		

Fonte: O autor (2024).

Tendo em vista que a Tabela 4 acima apresenta a inter-relação entre as variáveis de controle analisadas numericamente através das faixas acima e abaixo da especificação, efetiva-se a necessidade de destacar quais são os intervalos especificados pelos autores em questão. É evidente que houve divergência nos valores sublinhados, fato este já previsto, haja vista que cada pesquisa contou com particularidades, como dimensão dos biorreatores, fatores climáticos, tipo de levedura, variedade e manipulação nos modelos matemáticos (uso de constantes), assim como metodologias distintas acerca do processo de fermentação e o tipo de substrato.

Por estas razões, promoveu-se a realização do cálculo de média aritmética entre os resultados salientados nas pesquisas pertinentes com o intuito de harmonizar as discussões incluídas na Tabela 4. Em face desses resultados, apurou-se os seguintes valores de especificações ideais de processo: concentração de substrato de 84,83 g. L<sup>-1</sup>, concentração de biomassa celular de leveduras nos reatores de 40,79 g. L<sup>-1</sup>, taxa de crescimento celular de levedura de 1,294 h<sup>-1</sup>, temperatura de aproximadamente 31°C e concentração de produto etanol nos reatores de 30,38 g. L<sup>-1</sup>.

No que concerne a concentração de substrato, 50% do total de trabalhos que se apoiaram sobre ela, expressaram que as faixas acima das especificações apontam interferência negativa no rendimento de conversão de substrato em produto etanol. A explicação para este fenômeno foi abordada por aproximadamente 41% dos 21 artigos, que atribuíram um aumento do gradiente de concentração de substrato em relação ao campo interno-externo da levedura, levando ao acúmulo de açúcares redutores totais não fermentados ao final do ciclo fermentativo. Assim como 12,5% deles estipulam uma redução na taxa de crescimento da biomassa devido a desregulagem osmótica e aumento no estresse da levedura quando a concentração de substrato se encontra demasiada.

Por conseguinte, quando a concentração de substrato ocupa concentrações abaixo das especificações, 41% dos resultados apresentados pelos estudos notam declínio na obtenção de concentração de produto etanol desejado devido a insuficiência mássica de substrato necessária para a produção prevista. Ainda, quando o sistema atua em níveis deficitários de substrato, a taxa de crescimento celular nos reatores também será afetada devido a concorrência por alimento entre os micro-organismos atuantes no processo.

Além do mais, aproximadamente 33% dos autores que apuraram a concentração de biomassa, ressaltam que a presença desta variável em concentrações superiores às especificações recomendadas acarreta num retardo da conversão de substrato em produto. Analogamente, se a biomassa estiver abaixo do intervalo estabelecido pelos autores, aproximadamente 38% dos estudos pertencentes a esta variável percebem que a eficiência da conversão também será comprometida. Portanto, a manutenção da biomassa dentro dos limites estipulados é imprescindível para se atingir a eficiência do processo fermentativo.

Sem distanciar-se da variável concentração de biomassa, os trabalhos acima confirmam que a operação da fermentação com a concentração de biomassa acima da faixa especificada acarreta competição das leveduras pelo substrato presente nos fermentadores e conseqüentemente uma ocupação indesejável do volume destes fermentadores industriais. Quanto a insuficiência de biomassa os estudos incidem que haverá sobra de açúcares não fermentados ao final dos ciclos fermentativos devido a insuficiência metabólica haja vista a falta de leveduras, fato este que impacta negativamente nos valores esperados de conversão do substrato em produto.

Já em relação a taxa de crescimento específica, 25% dos autores validam que em taxas demasiadamente altas haverá impacto direto no comportamento do sistema ocasionando uma redução da concentração das células viáveis no reator devido a competição por alimento. Além disso, a redução da eficiência de conversão de substrato em produto é notória haja vista o desvio da energia bioquímica que seria investida para geração de etanol, para o brotamento, favorecendo assim, o aumento da conversão de substrato em biomassa. Neste contexto, os autores tornam evidente que quando a taxa de crescimento específica de biomassa de fermento está abaixo da previsão, ocorre uma redução na conversão de substrato em etanol. Isso se deve à menor atividade metabólica das leveduras, o que diminui a eficiência da fermentação. Sobretudo, a competição reduzida por recursos no meio de fermentação, devido à população de fermento menos ativa, resulta em uma utilização menos eficiente do substrato.

Com isso, pode-se concluir que o crescimento mais lento também pode indicar estresse nas células de fermento, causado por condições inadequadas do meio de fermentação, fato este que também ocasiona a redução na eficiência da conversão de substrato em produto. Adicionalmente, a menor taxa de crescimento resulta em uma densidade celular total menor no fermentador, o que diminui a produção total de etanol, mesmo mantendo a eficiência de conversão por célula.

Adentrando-se na observação da variável temperatura, aproximadamente 14% das pesquisas levantadas concordam que caso o sistema ultrapasse os valores desejáveis, a concentração de células viáveis irá reduzir, resultando em uma porcentagem não conveniente de células vivas no processo, 33% atribuem a este fato, uma redução na eficiência da conversão de substrato em etanol, devido a diminuição da atividade das enzimas responsáveis pelas reações da via glicolítica.

Outro fato importante que justifica a redução na eficiência da conversão de substrato em produto foi demarcado por 14% dos trabalhos devido produção de subprodutos indesejados como o glicerol, que por sua vez pode competir com a produção de etanol. Mais ainda, a desnaturação de proteínas e a alteração na membrana celular também ocorrem em temperaturas elevadas, afetando qualidades de atividade enzimática e função celular.

Na ocasião que a temperatura se encontra inferior à especificada em processos fermentativos, aproximadamente 14% dos estudos pontuam que haverá redução na concentração de células vivas nos reatores, bem como 38% notam diminuição na eficiência da conversão de substrato em etanol. Essa situação decorre, primeiramente, do menor crescimento celular em temperaturas mais baixas, resultando em uma menor quantidade de células vivas presentes no meio de fermentação. Além disso, a atividade enzimática envolvida na transformação do substrato em etanol prejudica-se em temperaturas mais frias, impactando diretamente na eficiência do processo. Outro aspecto relevante apontado foi o aumento da viscosidade do meio em temperaturas mais baixas, o que dificulta a transferência de massa e, conseqüentemente, a conversão eficaz de substrato em produto.

Por fim faz-se necessário apontar qual é o impacto da concentração de etanol durante o processo de fermentação. Quando essa variável assume concentração acima da especificação nos reatores de fermentação, aproximadamente 16% dos artigos apontam como consequência, a redução no número de células vivas de levedura no reator e 31,5% marcam o aumento na produção de glicerol. Esse fenômeno foi explicado devido ao estresse causado pelo excesso de etanol, que pode ser tóxico para as células de levedura, levando à sua morte ou inibição de seu crescimento.

Em contrapartida, aproximadamente 26% relatam que quando a concentração de etanol está abaixo do especificado, observar-se um aumento no volume de vinhaça. Isso ocorre porque a produção de etanol está diretamente relacionada à atividade metabólica das leveduras, e quando essa atividade é reduzida tendo em vista a baixa concentração de etanol observado no fim do ciclo, conclui-se que houve uma menor absorção de nutrientes, resultando em um aumento do volume deste subproduto.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O presente estudo empreendeu uma análise das principais variáveis críticas que influenciam o processo de fermentação alcoólica, enfatizando a relevância dos fatores operacionais e de controle na maximização da produtividade e eficiência. As variáveis de conversão de substrato em produto e células, ainda que dependentes de outros parâmetros, revelaram-se fundamentais para a compreensão da eficiência fermentativa. Ademais, a inclusão de parâmetros menos usuais, tais como a concentração de extrato de lúpulo, biocida e água na

fase líquida, sublinhou a complexidade inerente ao processo fermentativo, demandando investigações contínuas na literatura especializada.

Constatou-se a inter-relação entre as variáveis de controle analisadas numericamente, destacando as especificações dos autores. Divergências foram previstas devido às particularidades de cada pesquisa, tais como a dimensão dos biorreatores, fatores climáticos, tipo de levedura e metodologias distintas. Realizou-se o cálculo da média aritmética entre os resultados para harmonizar as discussões.

Os valores ideais de processo foram estabelecidos como: concentração de substrato de 84,83 g. L<sup>-1</sup>, concentração de biomassa celular de leveduras nos reatores de 40,79 g. L<sup>-1</sup>, taxa de crescimento celular de levedura de 1,294 h<sup>-1</sup>, temperatura de aproximadamente 31°C e concentração de etanol nos reatores de 30,38 g. L<sup>-1</sup>.

Quando a concentração de substrato está acima das especificações, 50% dos trabalhos indicaram interferência negativa no rendimento de conversão em etanol, devido ao aumento do gradiente de concentração de substrato, levando ao acúmulo de açúcares não fermentados. Concentrações abaixo das especificações resultaram em declínio na obtenção de etanol, conforme observado por 41% dos autores.

A concentração de biomassa, quando superior às especificações, retardou a conversão de substrato em produto, enquanto concentrações abaixo do intervalo estabelecido comprometeram a eficiência da conversão. Manter a biomassa dentro dos limites estipulados é, portanto, imprescindível.

Taxas de crescimento específicas demasiadamente altas impactaram negativamente o sistema, reduzindo a concentração de células viáveis devido à competição por alimento, enquanto taxas abaixo da previsão reduziram a eficiência da fermentação.

A temperatura revelou-se um fator crítico, com temperaturas elevadas reduzindo a viabilidade celular e a eficiência de conversão devido à diminuição da atividade enzimática. Em temperaturas abaixo das especificações, observou-se redução na eficiência de conversão devido ao menor crescimento celular.

Por fim, a concentração de etanol, quando acima da especificação, reduziu o número de células viáveis e aumentou a produção de glicerol, enquanto concentrações abaixo do especificado resultaram em aumento no volume de vinhaça devido à menor atividade metabólica das leveduras.

As limitações do presente estudo incluem a observação de um expressivo número de pesquisas conduzidas em reatores laboratoriais, incluindo micro biorreatores, enquanto há uma quantidade menos significativa de estudos que analisam a realidade industrial. Esta discrepância evidencia uma lacuna entre a pesquisa acadêmica e a aplicação prática no ambiente industrial. Para mitigar essa limitação, sugere-se um estreitamento dos vínculos entre as universidades e as unidades industriais. Essa colaboração mais próxima pode fomentar pesquisas mais aplicadas, permitindo que os avanços científicos sejam diretamente traduzidos em melhorias práticas nos processos industriais, beneficiando a produção e a competitividade do setor.

Em suma, esta pesquisa oferece uma visão detalhada e fundamentada na literatura sobre as principais variáveis de controle da fermentação alcoólica, destacando a importância de um gerenciamento metódico e da contínua investigação científica para o aprimoramento da produção de etanol. As conclusões fornecem uma base sólida para futuras pesquisas e aplicações industriais, promovendo avanços na sustentabilidade e eficiência do processo fermentativo.

## Referências

- ACORSI, Renam Luis *et al.* Modeling and Simulation of Batch Sugarcane Alcoholic Fermentation Using the Metabolic Model. **Fermentation**, v. 8, n. 2, p. 82, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/fermentation8020082>. Acesso em: 02. fev. 2024.
- AGU, Kingsley Chidozie; ODUOLA, Mujeeb Koyejo. Kinetic modeling of ethanol production by batch fermentation of sugarcane juice using immobilized yeast. **Global Journal of Engineering and Technology Advances**, v. 7, n. 1, p. 124-136, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.30574/gjeta.2021.7.1.0060> Acesso em: 8. maio. 2024.
- AJBAR, AbdelHamid; ALI, Emad. Study of advanced control of ethanol production through continuous fermentation. **Journal of King Saud University-Engineering Sciences**, v. 29, n. 1, p. 1-11, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2015.10.005> Acesso em: 13. jan. 2024.
- ALBERTS, Bruce *et al.* **Fundamentos da biologia celular**. 4.ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2017.
- ALMEIDA, Letícia P. *et al.* Heat transfer evaluation for conventional and extractive ethanol fermentations: Saving cooling water. **Journal of Cleaner Production**, v. 304, p. 127063, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127063> Acesso em: 13. mar. 2024.
- ALTERTHUM, Flávio. **Biotecnologia industrial: fundamentos**. 2. ed. São Paulo: Blucher Editora, 2020.
- ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Painéis Dinâmicos sobre Combustíveis, Infraestrutura, Qualidade e RenovaBio**, atualizado em 24/nov/2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp> Acesso em: 05. maio. 2024
- ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Metas individuais compulsórias definitivas de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para 2024**, atualizado em: 08/abr/2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/metas-individuais-compulsorias-definitivas-de-reducao-de-emissoes-de-gases-causadores-do-efeito-estufa-para-2024> Acesso em: 12. mai.2024.
- BASSO, L. C. *et al.* Yeast selection for fuel ethanol in Brazil. **FEMS Yeast Research**, v. 8, n. 7, p. 1155-1163, 2008.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Boletim Mensal de Energia de Abril de 2023. Brasília: MME, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/producao-de-etanol-anidro-cresce-73-5-no-brasil-aponta-bme> Acesso em: 10. maio. 2024.
- CHWIALKOWSKA, Joanna; SMAGA, Łukasz; OLESKOWICZ-POPIEL, Piotr. Operating parameters in open culture fermentation of sugars. **Biosystems Engineering**, v. 210, p. 78-90, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.08.002> Acesso em: 28. jan. 2024.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTCIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, DF, v. 11, n. 4 abril 2024. Disponível em: <http://www.conab.gov.br> Acesso em: 28. abr. 2024.

COSTA, M. A. S.; CERRI, B. C.; CECCATO-ANTONINI, S. R. Ethanol addition enhances acid treatment to eliminate *Lactobacillus fermentum* from the fermentation process for fuel ethanol production. **Letters in applied microbiology**, v. 66, n. 1, p. 77-85, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/lam.12819> Acesso em: 28. dez. 2023.

Cristina dos Santos Bofo, Daniele *et al.* Rheological Behavior of Molasses for Application in Industry. **Environmental progress & sustainable energy**. v. 35, n. 5, p. 1545-1552, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ep.12378> Acesso em: 16. abr. 2024.

CRUZ, Mariana Lopes; RESENDE, Miriam Maria de; RIBEIRO, Eloízio Júlio. Evaluation of process conditions in the performance of yeast on alcoholic fermentation. **Chemical Engineering Communications**, v. 205, nº. 6, p. 846-855, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00986445.2017.1423061> Acesso em: 09. abr. 2024.

FERNÁNDEZ, M. Cecilia *et al.* Multivariable tracking control of a bioethanol process under uncertainties. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2020, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2020/8263690> Acesso em: 12. mar. 2024.

FERNÁNDEZ, M. Cecilia *et al.* State estimation and nonlinear tracking control simulation approach. Application to a bioethanol production system. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 44, n. 8, p. 1755-1768, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00449-021-02558-y> Acesso em: 13. fev. 2024.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. Editora Atlas SA, 2002.

KACHRIMANIDOU, Vasiliki *et al.* Increasing the volumetric productivity of fermentative ethanol production using a fed-batch vacuferm process. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 11, p. 673-680, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00673-6> Acesso em: 22. mar. 2024.

LAKATOS, Eva M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2021. *E-book*. ISBN 9788597026580. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597026580/> . Acesso em: 14. maio. 2024.

LEITE, Inácio R. *et al.* Evaluation of hop extract as a natural antibacterial agent in contaminated fuel ethanol fermentations. **Fuel processing technology**, v. 106, p. 611-618, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.09.050> Acesso em: 28. jan. 2024.

LI, Ganlu *et al.* Mass transfer, gas holdup, and kinetic models of batch and continuous fermentation in a novel rectangular dynamic membrane airlift bioreactor. **Engineering**, v. 13, p. 153-163, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.07.025> Acesso em: 05. maio. 2024.

LI, Xinzhe *et al.* Dynamic hybrid modeling of fuel ethanol fermentation process by integrating biomass concentration XGBoost model and kinetic parameter artificial neural network model into mechanism model. **Renewable Energy**, v. 205, p. 574-582, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.113> Acesso em: 13. jan. 2024.

- MOHAN, Vijay *et al.* A novel cascaded fractional fuzzy approach for control of fermentation process. **Bioresource Technology**, v. 357, p. 127377, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127377> Acesso em: 10. maio. 2024.
- MONTEIRO, Bruno *et al.* Conditions promoting effective very high gravity sugarcane juice fermentation. **Biotechnology for biofuels**, v. 11, p. 1-15, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1239-0> Acesso em: 07. maio. 2024.
- NIAZE, Ambereen A. *et al.* Model construction and optimization for raising the concentration of industrial bioethanol production by using a data-driven ANN model. **Renewable Energy**, v. 216, p. 119031, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119031> Acesso em: 02. abr. 2024.
- ONU Organização das Nações Unidas. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**, 2015. Acesso mai.2024. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda> Acesso em: 18. mar. 2024.
- PAZ, José Eduardo de Matos; GARNICA, Alfredo Ismael Curbelo; CURBELO, Fabíola Dias da Silva. Redimensionamento do sistema de resfriamento da fermentação para elevação da capacidade de produção de etanol. **Holos**, v. 4, p. 1-19, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2019.8374> Acesso em: 29. jan. 2024.
- PERES, Fernanda Araujo Pimentel; FOGLIATTO, Flavio Sanson. Variable selection methods in multivariate statistical process control: A systematic literature review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 115, p. 603-619, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.006> Acesso em: 14. maio. 2024.
- PETRE, Emil; SELIȘTEANU, Dan; ROMAN, Monica. Advanced nonlinear control strategies for a fermentation bioreactor used for ethanol production. **Bioresource Technology**, v. 328, p. 124836, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124836> Acesso em: 09. mar. 2024.
- PRODANOV, Cleber Cristiano; DE FREITAS, Ernani Cesar. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico-2ª Edição**. Editora Feevale, 2013.
- RIVERA, Elmer C. *et al.* Prediction of intensified ethanol fermentation of sugarcane using a deep learning soft sensor and process analytical technology. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 99, n. 1, p. 207-216, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jctb.7525> Acesso em: 07. jan. 2024.
- SARKS, Cory *et al.* Studying the rapid bioconversion of lignocellulosic sugars into ethanol using high cell density fermentations with cell recycle. **Biotechnology for biofuels**, v. 7, p. 1-12, 2014. Disponível em: <http://www.biotechnologyforbiofuels.com/content/7/1/73> Acesso em: 20. fev. 2024.
- SAWATZKI, Annina *et al.* Accelerated bioprocess development of endopolygalacturonase-production with *Saccharomyces cerevisiae* using multivariate prediction in a 48 mini-bioreactor automated platform. **Bioengineering**, v. 5, n. 4, p. 101, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/bioengineering5040101> Acesso em: 02. jan. 2024.

SUN, Yifei; DONG, Yufeng; YAN, Xuefeng. Attention-based LSTM Block Model Framework based on static and dynamic variables for modeling fuel ethanol fermentation process. **Biochemical Engineering Journal**, v. 199, p. 109049, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2023.109049> Acesso em: 25. fev. 2024.

UEDA, Renan Mitsuo; AGOSTINO, Ícaro Romolo Sousa; SOUZA, Adriano Mendonça. Analysis and perspectives on multivariate statistical process control charts used in the industrial sector: a systematic literature review. **Management and Production Engineering Review**, p. 48-60-48-60, 2022. Disponível em: <https://journals.pan.pl/dlibra/publication/142054/edition/123664/content> Acesso em: 10. maio. 2024.

VELOSO, Ivan IK *et al.* A more accurate modeling for fed-batch ethanol fermentation with high cell density. **Biochemical Engineering Journal**, v. 193, p. 108855, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2023.108855> Acesso em: 12. jan. 2024.

VELOSO, Ivan IK *et al.* Mathematical modeling of fed-batch ethanol fermentation under very high gravity and high cell density at different temperatures. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 194, n. 6, p. 2632-2649, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12010-022-03868-x> Acesso em: 20. dez. 2023.

VELOSO, Ivan IK *et al.* Temperature influence in real-time monitoring of fed-batch ethanol fermentation by mid-infrared spectroscopy. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 59, n. 41, p. 18425-18433, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c03717> Acesso em: 03/04/2024.

VELOSO, Ivan IK *et al.* Thermal Analysis of Conventional and Extractive Fed-Batch Ethanol Fermentation at Different Temperatures. **BioEnergy Research**, v. 16, n. 4, p. 2093-2104, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10586-7> Acesso em: 17. jan. 2024.

VOET, Donald; VOET, Judith G. Bioquímica, 4ª Edição. **Porto Alegre, Brasil. Artmed editora Ltda**, 2013.

WANG, Jie *et al.* Improved bioethanol productivity through gas flow rate-driven self-cycling fermentation. **Biotechnology for biofuels**, v. 13, p. 1-14, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13068-020-1658-6> Acesso em: 13. dez. 2023.

WANG, Jie *et al.* Improving ethanol productivity through self-cycling fermentation of yeast: a proof of concept. **Biotechnology for biofuels**, v. 10, p. 1-11, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0879-9> Acesso em: 10. dez. 2023.

ZENTOU, Hamid *et al.* Modelling of molasses fermentation for bioethanol production: A comparative investigation of Monod and Andrews models accuracy assessment. **Biomolecules**, v. 9, n. 8, p. 308, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/biom9080308> Acesso em: 07. dez. 2023.



## APÊNDICE A – REAÇÕES DA VIA GLICOLÍTICA E FERMENTAÇÃO ALCÓOLICA.

