

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
INSTITUTO DE QUÍMICA
ENGENHARIA QUÍMICA

Isabela de Souza Lima

**ESTUDO DO DIRECIONAMENTO DA SOLUÇÃO
HIDROALCOÓLICA PROVENIENTE DE UMA COLUNA DE
ABSORÇÃO EM UMA USINA LOCALIZADA NO MS**

Campo Grande - MS

2024

Isabela de Souza Lima

**ESTUDO DO DIRECIONAMENTO DA SOLUÇÃO
HIDROALCOÓLICA PROVENIENTE DE UMA COLUNA DE
ABSORÇÃO EM UMA USINA LOCALIZADA NO MS**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação apresentado como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química da Universidade
Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS).

Orientadora: Prof.(a) Dr.(a) Patrícia
Cristina de Araújo Puglia de Carvalho

Campo Grande - MS

2024

Isabela de Souza Lima

**ESTUDO DO DIRECIONAMENTO DA SOLUÇÃO
HIDROALCOÓLICA PROVENIENTE DE UMA COLUNA DE
ABSORÇÃO EM UMA USINA LOCALIZADA NO MS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Química da
Universidade Federal do Mato Grosso do Sul
(UFMS).

Orientadora: Prof.(a) Dr.(a) Patrícia Cristina de
Araújo Puglia de Carvalho

Campo Grande, MS, 30 de julho de 2024.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof.^a. Dr.^a. Patrícia Cristina de Araújo Puglia de Carvalho
Universidade Federal do Mato Grosso do Sul

Prof.^a. Dr.^a. Janaína Ferreira dos Santos
Universidade Federal do Mato Grosso do Sul

Prof. Dr. Sérgio Carvalho de Araújo
Universidade Federal do Mato Grosso do Sul

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, que em sua infinita sabedoria, guia meus caminhos me proporcionando saúde, serenidade e disposição para enfrentar todas as etapas da minha vida.

Aos meus pais, Wilson Maximiliano de Lima e Dilma Maria de Souza, e a minha irmã, Giovanna de Souza Lima, pelo esforço feito para que eu chegasse até aqui, por todo o suporte nos momentos difíceis e todo o amor incondicional. Sem o incentivo de vocês eu não estaria cursando esta graduação e sem o apoio dado não conseguiria concluí-la.

Gostaria de destacar minha gratidão aos meus tios Gilmar José de Souza e Dorvalina Moraes, que me cuidaram e alfabetizaram quando criança, sendo dessa forma os responsáveis por cada palavra escrita nesse trabalho. Agradecer também a minha avó, Neuza Barbosa Camelo, que me apoiou incondicionalmente nas minhas escolhas e acreditou que eu seria capaz mesmo quando duvidei de mim.

Aos meus amigos e colegas de turma, em especial Gustavo Dinardi Matos, que me acompanhou durante esses anos de curso e foi essencial para minha graduação e amadurecimento durante a faculdade, tornando a caminhada mais leve.

À minha orientadora Professora Patrícia Puglia, a qual admiro a trajetória acadêmica e profissional, por todo o apoio fornecido durante o desenvolvimento desse trabalho.

A todos os meus professores, Patrícia, Celso, Janaína, Rebeca, Carlos, Sérgio, João Renato e Marco, por todo suporte prestado e, principalmente, pela dedicação em fazer o curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul ser o que é hoje.

A Universidade Federal do Mato Grosso do Sul e ao Instituto de Química por me fornecerem estrutura e oportunidades para realizar minha graduação.

Por fim, a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, na minha trajetória acadêmica e pessoal.

RESUMO

A fermentação alcoólica para a produção de etanol é realizada por meio da ação de leveduras, em um processo anaeróbio que converte os açúcares do mosto em etanol e gás carbônico. No entanto, parte do etanol produzido durante a fermentação é arrastado pelo gás carbônico, necessitando ser recuperado em outra etapa. A recuperação do etanol arrastado é feita a partir do tratamento do gás em coluna de absorção, que tem como corrente de saída uma solução hidroalcoólica diluída com cerca de 1% de etanol (m/m). No processo atual da usina a solução hidroalcoólica da coluna é direcionada a dorna volante, tanque cujo conteúdo é o vinho a ser enviado para as torres de destilação promovendo o aumento do consumo de vapor na destilação. Diante dessa problemática do processo, o presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo do direcionamento da solução hidroalcoólica para as cubas de tratamento de fermento ou para o diluidor de mosto, com a finalidade de reduzir o consumo de vapor do sistema de destilação, que antes seguiam para a dorna volante. Simultaneamente, foi estudado a contaminação microbiológica resultante da inserção da solução hidroalcoólica nas cubas de tratamento e no diluidor de mosto, tendo em vista sua interferência no rendimento da fermentação alcoólica. O estudo foi baseado em análises experimentais utilizando o método de diluição seriada e plaqueamento, além de modelos matemáticos de previsibilidade do sistema. Os resultados indicaram que o desvio da solução hidroalcoólica da dorna volante implicaria no aumento do grau alcoólico do vinho e, como consequência uma economia de vapor nas colunas de destilação, além de um aumento de 3,48% na produção diária total de etanol. Com relação aos possíveis locais de desvio da solução hidroalcoólica, o direcionamento para as cubas de tratamento de fermento foi o cenário mais propício, pois apesar do aumento na contaminação há a possibilidade de controle mais efetivo.

Palavras-chave: Etanol hidratado; Solução Hidroalcoólica; Minitab®; Cubas de tratamento.

ABSTRACT

Alcoholic fermentation to produce ethanol is carried out through the action of yeast, in an anaerobic process that converts the sugars in the must into ethanol and carbon dioxide. However, part of the ethanol produced during fermentation is carried away by carbon dioxide and needs to be recovered in another stage. The recovery of entrained ethanol is carried out by treating the gas in an absorption column, which has as its output a hydroalcoholic solution diluted with around 1% ethanol (m/m). In the plant's current process, the hydroalcoholic solution from the column is directed to the flying tank, a tank whose contents are the wine to be sent to the distillation towers, promoting an increase in steam consumption during distillation. Faced with this process problem, the present work aims to carry out a study on the direction of the hydroalcoholic solution to the yeast treatment vats or to the must dilutor, with the aim of reducing the steam consumption of the distillation system, which previously they headed towards the flying dock. Simultaneously, the microbiological contamination resulting from the insertion of the hydroalcoholic solution in the treatment vats and in the must dilutor was studied, taking into account its interference in the alcoholic fermentation performance. The study was based on experimental analyzes using the serial dilution and plating method, in addition to mathematical models of system predictability. The results indicated that the diversion of the hydroalcoholic solution from the flying tank would result in an increase in the alcoholic strength of the wine and, therefore, a saving of steam in the distillation columns, in addition to an increase of 3.48% in the total daily production of ethanol. Regarding possible diversion sites for the hydroalcoholic solution, directing it to the yeast treatment vats was the most suitable scenario, as despite the increase in contamination there is the possibility of more effective control.

Keywords: Hydrated ethanol; Hydroalcoholic solution; Minitab®; Treatment tanks;

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1.	OBJETIVOS	13
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1.	Etanol.....	14
2.2.	Produção de etanol hidratado combustível.....	15
2.2.1.	Variedade de cana-de-açúcar.....	16
2.2.2.	Obtenção do caldo	18
2.2.3.	Tratamento do caldo	20
2.2.4.	Preparo do mosto	21
2.2.5.	Fermentação.....	22
2.2.6.	Destilação	27
2.3.	Absorção.....	31
2.4.	Contaminação microbiológica.....	35
2.5.	Método da diluição seriada e plaqueamento.....	37
2.6.	Ferramentas de análise estatística.....	39
3.	METODOLOGIA.....	41
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1.	Cenário 1 - °GL na dorna volante com a solução hidroalcoólica.....	46
4.2.	Cenário 2 - °GL na dorna volante sem a solução hidroalcoólica	48
4.3.	Cenário 3 - Contaminação nas cubas sem a solução hidroalcoólica	49
4.4.	Cenário 4 - Contaminação nas cubas com a solução hidroalcoólica.....	52
4.5.	Cenário 5 - Contaminação no diluidor de mosto sem a solução hidroalcoólica .	55
4.6.	Cenário 6 - Contaminação no diluidor de mosto com a solução hidroalcoólica .	58
4.7.	Comparação dos cenários	60

4.8.	Aplicação dos estudos	66
5.	CONCLUSÃO	67
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Planta de produção de etanol hidratado da usina localizada no MS.	15
Figura 2. Açúcares por cento em função da maturação da cana-de-açúcar.	17
Figura 3. Sistema de embebição composta.	18
Figura 4. Mistura e direcionamento dos caldos aos seus devidos processos produtivos.	19
Figura 5. Tratamento do caldo misto.	20
Figura 6. Preparo e resfriamento do mosto.	22
Figura 7. Fermentação em batelada.	25
Figura 8. Fermentação contínua.	25
Figura 9. Fermentação em batelada com reciclo de leveduras.	26
Figura 10. Coluna de destilação fracionada.	28
Figura 11. Sistema de destilação convencional para produção de etanol hidratado.	29
Figura 12. Sistema Flegstil para produção de etanol hidratado.	30
Figura 13. Coluna de absorção com recheio aleatório.	32
Figura 14. Tipos de recheios randômicos.	34
Figura 15. Método da diluição seriada e plaqueamento.	39
Figura 16. Fluxograma das etapas do trabalho.	41
Figura 17. Análise de contaminação com meio de cultura RCA.	45
Figura 18. Correntes estudadas no cenário 1.	46
Figura 19. Correntes estudadas no cenário 2.	48
Figura 20. Correntes estudadas no cenário 3.	49
Figura 21. Correntes estudadas no cenário 4.	52
Figura 22. Correntes estudadas no cenário 5.	55
Figura 23. Correntes estudadas no cenário 6.	58
Figura 24. Boxplot das correntes do cenário 4.	61
Figura 25. Teste de Normalidade das correntes do cenário 4.	62
Figura 26. Correlação de Pearson das correntes do cenário 4.	63
Figura 27. Boxplot das correntes do cenário 6.	64
Figura 28. Teste de Normalidade das correntes do cenário 6.	64
Figura 29. Correlação de Pearson das correntes do cenário 6.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parque industrial sucroalcooleiro por produto e por regiões geográficas.....	16
Tabela 2. Composição centesimal média de uma cana-de-açúcar sadia e madura.....	17
Tabela 3. Componentes do vinho fermentado.	23
Tabela 4. Diferenças entre tipos de fermentação.....	27
Tabela 5. Perdas percentuais de etanol por evaporação.	31
Tabela 6. Consumo de vapor por °GL do vinho.....	34
Tabela 7. Relação entre contaminação e redução no rendimento fermentativo	35
Tabela 8. Limites de contaminação por corrente processual.....	36
Tabela 9. Extrato de levedura tripton-a-dextrose-ágar (PCA – Plate Count Agar).	38
Tabela 10. Classificação do coeficiente de correlação de Pearson.....	40
Tabela 11. Cenários de estudo.	42
Tabela 12. Informações acerca da coleta de amostras.....	44
Tabela 13. Dados das correntes processuais do cenário 1.....	46
Tabela 14. Volumes das correntes de entrada e saída da dorna volante.....	47
Tabela 15. Comparação entre valores de °GL vinho para o cenário 1.	47
Tabela 16. Comparação entre valores de °GL vinho nos cenários 1 e 2.	48
Tabela 17. Dados das correntes processuais do cenário 3.....	50
Tabela 18. Volumes das correntes de entrada e saída das cubas no cenário 3.	51
Tabela 19. Contaminação da levedura tratada por análise experimental e cálculo.	51
Tabela 20. Volumes das correntes de entrada e saída das cubas no cenário 4.	53
Tabela 21. Contaminação da corrente de solução hidroalcoólica.	53
Tabela 22. Comparação entre contaminação microbiológica nos cenários 3 e 4.	54
Tabela 23. Dados das correntes processuais do cenário 5.....	56
Tabela 24. Volumes das correntes do diluidor de mosto no cenário 5.....	56
Tabela 25. Contaminação no diluidor de mosto por análise experimental e cálculo.	57
Tabela 26. Volumes das correntes do diluidor de mosto no cenário 6.....	58
Tabela 27. Comparação entre contaminação microbiológica nos cenários 5 e 6.	59
Tabela 28. Dados de contaminação nas cubas.....	66

1. INTRODUÇÃO

Com o conhecimento acerca dos efeitos nocivos do dióxido de carbono a partir dos combustíveis fósseis, como o petróleo os produtos e processos que agridem menos o meio ambiente passaram a substituir parcial ou totalmente esses combustíveis fósseis. É importante relatar, que a queima dos combustíveis fósseis é uma das atividades causadores do efeito estufa. Nesse viés, a produção de biocombustíveis tem sido uma alternativa por se tratar de uma fonte energética renovável e menos poluente. O etanol, por exemplo, é um biocombustível que pode ser produzido a partir da cana-de-açúcar, milho, trigo e beterraba (SILVEIRA, 2021).

No Brasil, uma das matérias-primas da produção de etanol é a cana-de-açúcar, desenvolvida nas áreas centro-sul do país e parte da região nordeste que também destina parte da sua produção a indústria açucareira. O cenário do etanol no país foi influenciado devido aos incentivos e investimentos realizados na década de 70 pelo Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL), uma iniciativa do governo brasileiro para intensificar a produção de álcool combustível em detrimento à substituição da gasolina (BASTOS, 2007). A produção de etanol se concentra em dois fluxos principais: etanol hidratado, que é utilizado diretamente como combustível, e etanol anidro, adicionado à gasolina na proporção de 27% em volume. Na usina relativa à este trabalho, há apenas produção do álcool hidratado, pois há deficiência de vapor no sistema para a produção do etanol anidro.

A produção de etanol hidratado compreende as etapas de obtenção e tratamento do caldo, preparo do mosto, fermentação e destilação. A obtenção do caldo é produto da moagem da cana-de-açúcar por rolos compressores (FERNANDES, 2011) e o tratamento é a etapa responsável pela remoção de matérias insolúveis e substâncias dissolvidas de não interesse para o processo (ALBUQUERQUE, 2011). Previamente à fermentação, ocorre o processo de diluição de mosto, em que o caldo de cana é misturado com mel final, um subproduto da diluição de açúcar, e diluído com água (VASCONCELOS, 2010). A fermentação então transforma o mosto em etanol e gás carbônico (CO₂) pela ação de leveduras, dando origem assim ao vinho. Essa solução hidroalcoólica contendo de 7 a 12% de volume em álcool é concentrada pela operação de destilação, que separa as substâncias de acordo com as temperaturas de ebulição (SCHIMIDELL; FACCIOTTI, 2001).

Durante a fermentação, parte do vinho fermentado com etanol é evaporado arrastado pelo dióxido de carbono gerado no processo. Para a recuperação do álcool arrastado são utilizadas torres de absorção com água em temperatura ambiente em sentido contracorrente com o gás (BREMM, 2016). A quantidade de vinho evaporado varia em função das variáveis como a concentração de álcool no mosto, temperatura de fermentação e projeto das dornas (SOLETTI, 2022).

Na usina avaliada nesse trabalho, a solução hidroalcoólica resultante da saída da coluna é direcionada a dorna volante, tanque cujo conteúdo é o vinho a ser enviado para as colunas de destilação. A problemática contida nesta tomada de decisão é o aumento do consumo de vapor na destilação, visto que se aumenta a quantidade de água inserida no sistema. Dessa forma, este trabalho visa estudar o direcionamento da solução para as cubas de tratamento de fermento ou para o diluidor de mosto, com enfoque na diminuição do consumo de vapor em razão do desvio da solução da dorna volante. Simultaneamente, a contaminação microbiológica resultante da inserção da solução nas cubas de tratamento e no diluidor de mosto não deve aumentar significativamente, pois caso isso ocorra, as bactérias contaminantes e as leveduras competem pelo açúcar do meio e o rendimento fermentativo diminui, prejudicando o processo e consequentemente o custo de produção.

1.1. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como finalidade, estudar a redução no consumo de vapor da coluna de destilação e a avaliar a contaminação microbiológica, a partir do desvio da solução hidroalcoólica da coluna de absorção para as cubas de tratamento de fermento ou para o diluidor de mosto.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Através do trabalho realizado, almeja-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- Descrever os parâmetros produtivos acerca da produção de etanol hidratado para estabelecer relação com a escolha do local de direcionamento da solução hidroalcoólica;
- Estudar o funcionamento da coluna de absorção para recuperação de etanol e sua importância para o processo produtivo;
- Realizar um estudo por meio de ensaios de plaqueamento para avaliar a contaminação nas correntes processuais relevantes ao trabalho;
- Avaliar a economia de vapor e ganho de capacidade no caso do redirecionamento da solução hidroalcoólica;
- Estimar a influência da solução hidroalcoólica no nível de contaminação nas cubas de tratamento de fermento e no diluidor de mosto por meio de cálculos e análise estatística.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Etanol

Os álcoois são moléculas que apresentam em sua estrutura um grupo hidroxila (-OH) ligado à um ou mais átomos de carbono saturado, sendo um deles o álcool etílico, também denominado etanol pela nomenclatura IUPAC. Este composto químico de fórmula molecular C_2H_5OH é usualmente produzido através da fermentação de açúcares e é um líquido incolor, de fácil inflamação e odor ardente (PORTO, 2005). Além disso, é um composto higroscópico, solúvel em substâncias orgânicas e minerais, como ésteres e cetonas, quando desidratado, e solubiliza sulfato, carbonatos, cloretos e acetatos de potássio (SOLETTI, 2022).

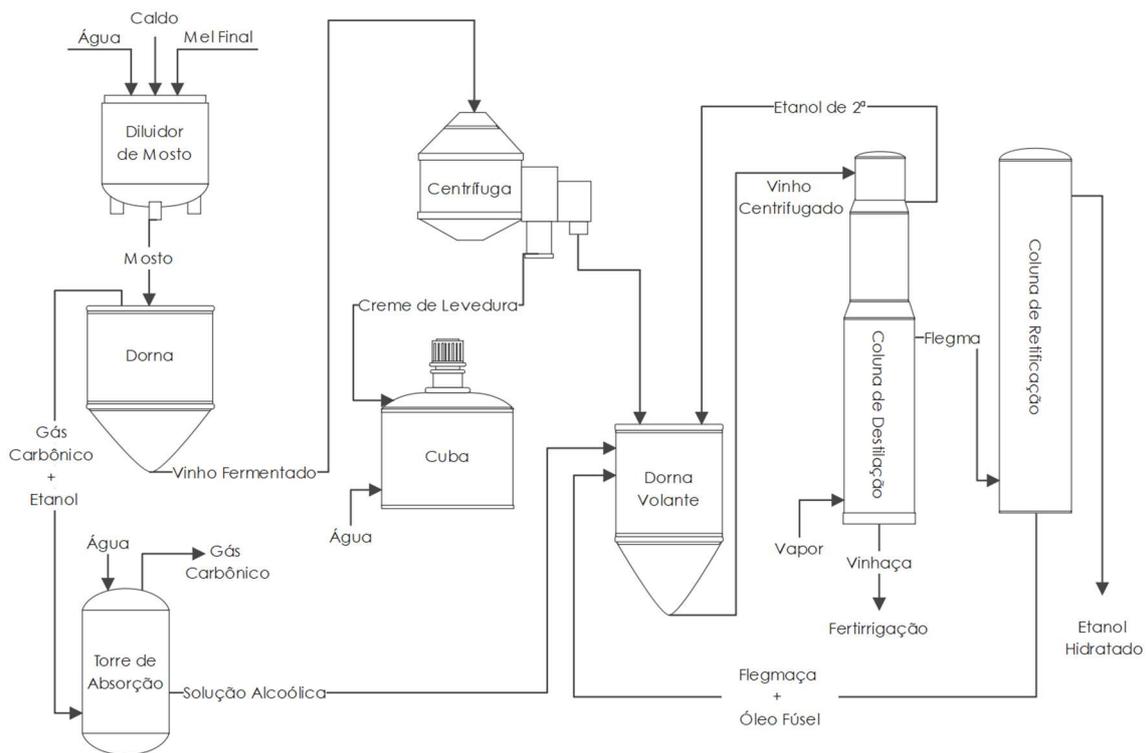
Os valores de referência para o controle de qualidade são estabelecidos pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), órgão responsável pelos combustíveis derivados do petróleo, gás natural, biodiesel e do etanol combustível. Nas análises exigidas para o padrão de qualidade tem-se o controle de acidez, pH, condutividade elétrica e presença de contaminantes, os quais podem sofrer reações que alteram a qualidade do produto. A Resolução ANP nº 907, de 18 de novembro de 2022, regulamenta a produção e comercialização tanto do etanol anidro combustível (EAH) quanto do etanol hidratado combustível (EHC) (BRASIL, 2022).

A concentração alcoólica é um dos parâmetros de controle de qualidade, que pode ser expressa em várias unidades, como °GL (grau alcoólico Gay-Lussac), °INPM (Instituto Nacional de Pesos e Medidas), %volume e %massa. O grau alcoólico Gay-Lussac (°GL) representa o teor alcoólico, em volume, exprime, portanto, a quantidade de etanol absoluto, em mililitros, contida em 100 mililitros da mistura hidroalcoólica. Já o grau alcoólico °INPM (Instituto Nacional de Pesos e Medidas), no qual consiste na massa de etanol absoluto, em gramas, presente em 100 gramas da mistura. A concentração medida em %volume e %massa significa a porcentagem em volume e massa, respectivamente, de um determinado composto, que no caso da concentração alcoólica é o álcool etílico (SILVEIRA, 2021).

2.2. Produção de etanol hidratado combustível

O processo produtivo do álcool se inicia na colheita da cana-de-açúcar, seguido da obtenção e tratamento do caldo, preparo do mosto, fermentação e destilação. É de suma importância o conhecimento do processo para a decisão do direcionamento da solução hidroalcoólica, visto que esta pode gerar interferências em algumas etapas. A produção de etanol hidratado da indústria está representada na Figura 1.

Figura 1. Planta de produção de etanol hidratado da usina localizada no MS.



Fonte: (AUTORA, 2024)

A cultura da cana-de-açúcar compõe o desenvolvimento histórico do Brasil desde a era colonial, percorrendo evoluções expressivas na agricultura e indústria e exercendo papel fundamental na economia do país. Com uma cadeia produtiva ampla, desde o cultivo da cana-de-açúcar até a distribuição de produtos e subprodutos do processo produtivo, o parque sucroalcooleiro brasileiro inclui fazendas, usinas de açúcar e álcool e destilarias de etanol, concentrando-se majoritariamente na região Centro-Sul, que oferece condições climáticas e infraestrutura favoráveis (VIEIRA FILHO et al., 2019). A Tabela 1 apresenta como ocorre a distribuição das usinas por produto e região.

Tabela 1. Parque industrial sucroalcooleiro por produto e por regiões geográficas.

Região	Etanol		Açúcar		Mista		Total Brasil	%
	Quantidade de usinas	%	Quantidade de usinas	%	Quantidade de usinas	%		
Norte	1	0,25	-	0,00	3	0,76	4	1,01
Nordeste	25	6,36	7	1,78	41	10,44	73	18,58
Centro-oeste	40	10,18	-	0,00	33	8,40	73	18,58
Sudeste	44	11,20	9	2,29	158	40,20	211	53,69
Sul	9	2,29	-	0,00	23	5,85	32	8,14
Brasil	119	30,28	16	4,07	258	65,65	393	100,00

Fonte: (Adaptado de MAPA, 2022)

A Tabela 1 mostra o demonstrativo do parque industrial sucroalcooleiro nacional, evidenciando a predominância da região Sudeste, responsável por 53,69% das usinas, se destacando como um núcleo estratégico para produção sucroalcooleira. O perfil de capacidade mista indica uma capacidade de adequação as necessidades do mercado e às diretrizes energéticas nacionais (GARCIA *et al.*, 2015). O centro-oeste e Nordeste, ambos com 18,58% das usinas, apresentam características produtivas distintas, sendo que a primeira região se destaca na produção de etanol, refletindo a expansão do plantio da cana-de-açúcar no cerrado, enquanto a região Nordeste preserva a tradição açucareira. Esse panorama representa a complexidade e diversidade regional do setor, revelando como os fatores territoriais, climáticos e econômicos influenciam na produção de etanol e açúcar.

2.2.1. Variedade de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta tropical que se desenvolve bem em regiões de clima quente, com temperaturas entre 18°C e 35°C, com composição química que varia dependendo do solo, clima e variedade. É uma espécie de colmo com fibra e caldo com açúcares dissolvidos, sendo que 75% a 82% é água e 18% a 25% são sólidos solúveis (açúcares e não açúcares orgânicos e inorgânicos), os quais podem ser metabolizados por leveduras e convertidos em etanol e gás carbônico. A glicose, frutose e sacarose são os açúcares presentes na cana-de-açúcar em maior proporção (SOUZA, 2022). A composição média dos constituintes orgânicos presentes na cana-de-açúcar é exibida na Tabela 2

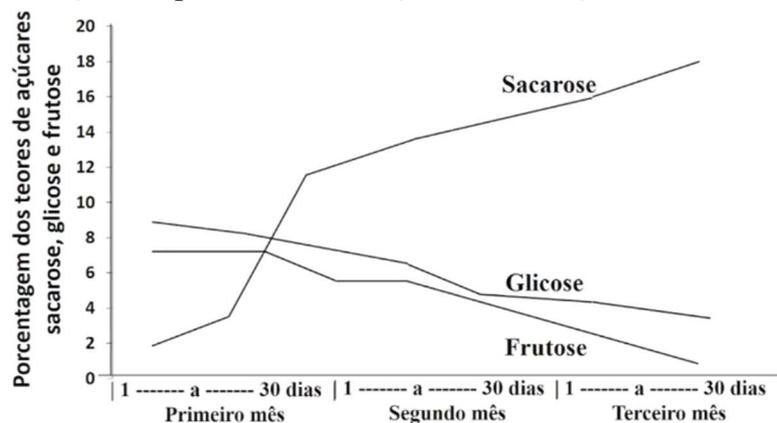
Tabela 2. Composição centesimal média de uma cana-de-açúcar sadia e madura.

Fibra	Celulose	5,50
	Pentosana	2,00
	Arabana	0,50
	Lignina	2,00
Açúcares	Sacarose	12,50
	Glicose	0,90
	Frutose	0,60
	Albiminoídes	0,12
	Amidas	0,07
	Aminoácidos	0,20
Corpos nitrogenados	Ácido nítrico	0,01
	Graxas e ceras	0,20
	Pectinas	0,20
	Ácido málico	0,08
	Ácido succínico	0,12

Fonte: (Adaptado de CALDAS, 2012)

Os componentes da cana-de-açúcar vão se alterando metabolicamente conforme o processo de maturação, em que o teor de sacarose aumenta enquanto a glicose e frutose reduzem, fato que influencia diretamente no °Brix do caldo (ARAÚJO, 2017). A variação dos teores de açúcares em função da maturação da cana-de-açúcar é apresentada na Figura 2. Acrescenta-se, ainda, que para a indústria sucroalcooleira todas as substâncias da matéria-prima que não sejam a sacarose, glicose e frutose são consideradas não açúcares (ARAÚJO, 2017).

Figura 2. Açúcares por cento em função da maturação da cana-de-açúcar.



Fonte: (ARAÚJO, 2017).

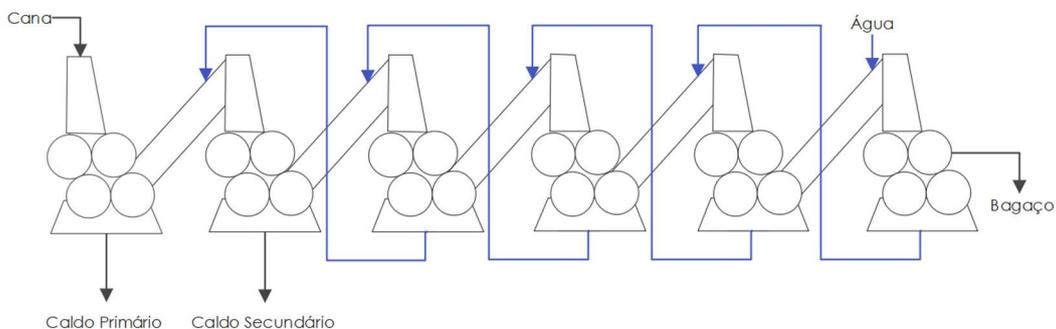
O caldo da cana-de-açúcar é caracterizado como um líquido opaco, viscoso, de

cor parda, cuja composição varia em razão da variedade, idade, meio ambiente (condições climáticas e solo), planejamento agrícola e pragas. Além disso, apresenta pH levemente ácido, variando entre 5 e 6. Para a produção de etanol, é necessário considerar a variedade de cana-de-açúcar, condições climáticas da região em que se vai produzir, baixo teor de fibras, boa produção por hectare, resistência a pragas e ao tombamento (PRATI & CAMARGO, 2008).

2.2.2. Obtenção do caldo

Após a recepção, a cana-de-açúcar passa por um desfibrador, equipamento que tem a função de abrir as fibras da cana para os processos de extração de sacarose. Posteriormente, ocorre a etapa de moagem, que consiste no processo de extrair o caldo de cana por meio de rolos compressores, os quais aplicam determinada pressão sobre a cana (FERNANDES, 2011). A eficiência da configuração dos ternos da moenda é determinada por fatores como: número de rolos, pressão efetiva, drenagem, grau de ruptura e propriedades físicas da fibra (PAYNE, 1989). O aumento da eficiência no sistema de extração do caldo por moagem é ampliado pelo uso do sistema de embebição, em que o bagaço que sai de um terno de moenda recebe água antes de passar por um novo esmagamento por outro rolo compressor (LIMA; MARCONDES, 2002). A Figura 3 detalha a embebição composta, em que a água é adicionada apenas no último terno da moenda e vem retornando até o segundo, onde se extrai o caldo secundário e o caldo primário, sendo que este advém da do primeiro terno, geralmente responsável por 70% de toda a extração.

Figura 3. Sistema de embebição composta.

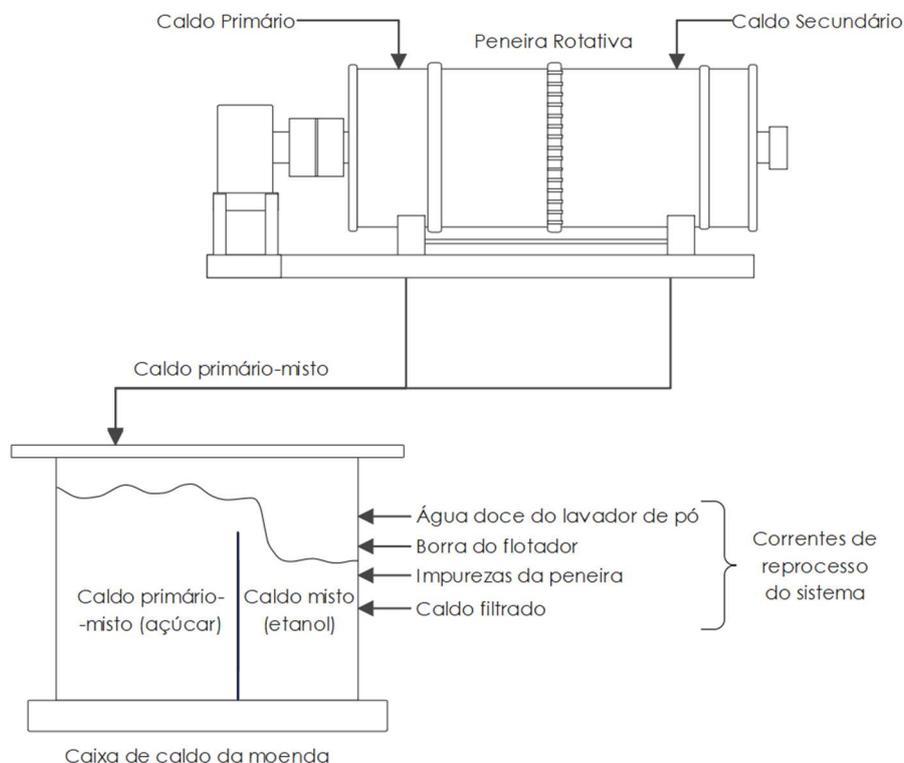


Fonte: (AUTORA, 2024)

Subsequente, o caldo passa por uma peneira para retirada de impurezas sólidas,

como por exemplo bagacilhos (fragmentos de cana ou bagaço que sai das moendas junto com o caldo) e areia ou terra, cuja eliminação é necessária para o fermento não sofrer contaminação com microrganismos. Na usina relativa ao estudo, após o peneiramento de ambos os caldos, eles se misturam e dão origem ao caldo primário-misto. Esse caldo é direcionado à fabricação de açúcar e o excedente não processado é somado às correntes de reprocesso do sistema para a produção de etanol hidratado. A mistura e o direcionamento dos caldos aos seus processos produtivos adequados estão representados na Figura 4.

Figura 4. Mistura e direcionamento dos caldos aos seus devidos processos produtivos.



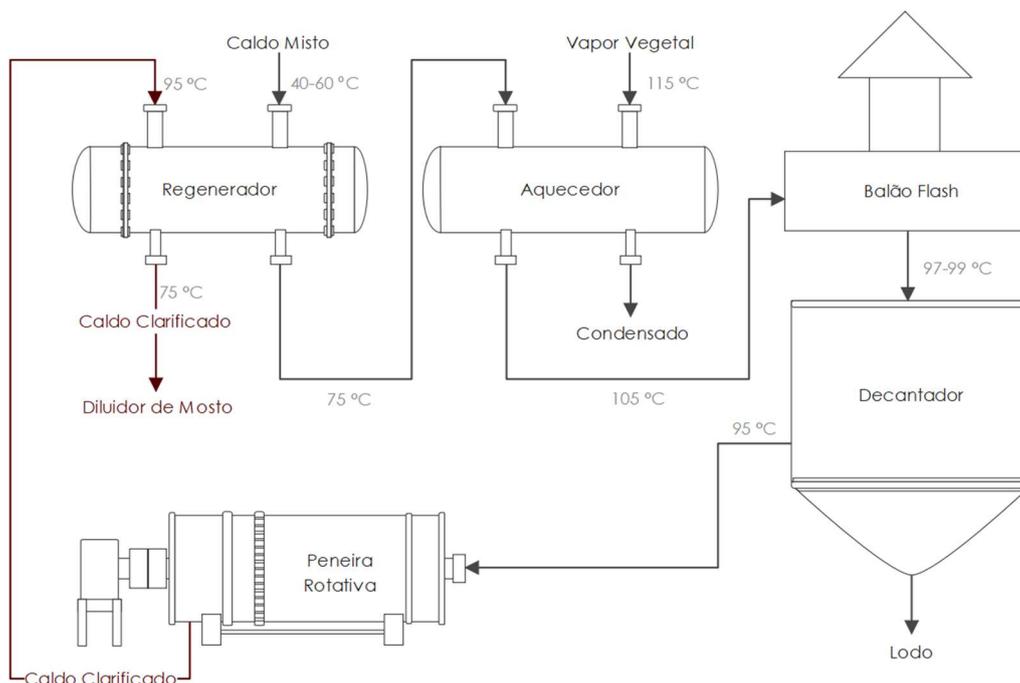
Fonte: (AUTORA, 2024)

O caldo primário-misto apresenta °Brix, entre 14 –16, enquanto que o caldo misto por ser misturado a correntes de reprocesso, tem o valor entre 8 - 12. Brix ou índice refractométrico é uma escala numérica que mede a quantidade de sólidos solúveis em uma solução de sacarose. Após essa etapa o caldo misto segue para a unidade de tratamento.

2.2.3. Tratamento do caldo

O caldo proveniente da extração deve passar por tratamento químico, que no caso da produção de etanol, consiste nas etapas de aquecimento, flasheamento, decantação e peneiramento, sendo por vezes adicionado ao processo a etapa de tratamento de lodo (ALBUQUERQUE, 2011). O tratamento do caldo misto direcionado à produção de etanol hidratado é ilustrado na Figura 5.

Figura 5. Tratamento do caldo misto.



Fonte: (AUTORA, 2024)

O aquecimento do caldo se inicia em um regenerador, ilustrado na Figura 5, em que o caldo clarificado que sai da peneira rotativa relativa ao final do tratamento, aquece o caldo misto que entra no regenerador, e depois segue para um aquecedor que utiliza vapor vegetal oriundo dos evaporadores de caldo do processo açucareiro (VASCONCELOS, 2010).

Depois de aquecido, o caldo misto é direcionado para o balão flash, a fim de eliminar gases que causem turbulência e interfiram na efetividade da decantação. O aquecimento do caldo a temperaturas acima da temperatura de ebulição gera um aumento de pressão. Quando o líquido é exposto à pressão atmosférica entra em ebulição espontânea, pois a queda brusca de pressão gera uma expansão do caldo e

consequentemente o seu flasheamento, removendo todos os gases dissolvidos e permitindo a sedimentação do caldo. Esse processo é conhecido como flash térmico, que diferentemente do mecânico, não necessita de válvula redutora de pressão. Outro fator importante do balão de flash é que ele atua como um regulador de velocidade do caldo, pois o fluido ao passar pelo balão e perde velocidade evitando assim possíveis turbulências no decantador (ALBUQUERQUE, 2011).

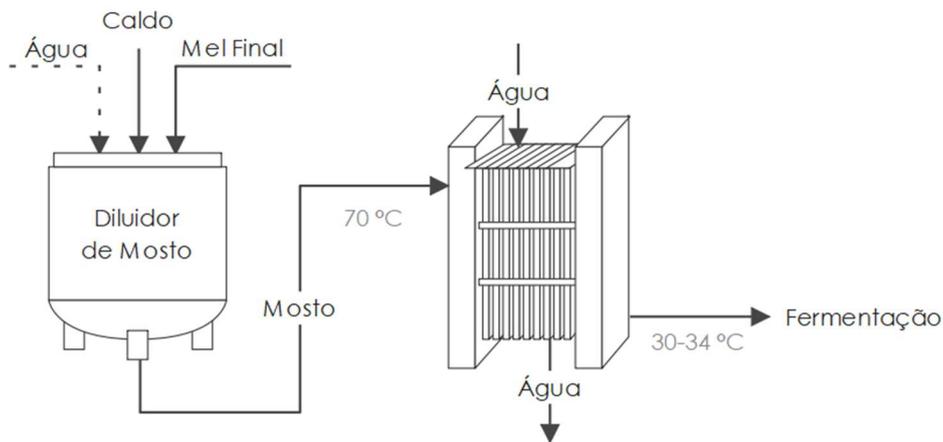
Do balão flash, o caldo segue para o decantador, o qual realiza a separação das partículas sólidas por sedimentação, processo em que as impurezas, por ação da gravidade, depositam-se no fundo do equipamento. Esse aglomerado de sólidos é nomeado de lodo (FRANCISCO, 2020). O caldo que sai do decantador é direcionado à uma peneira, com a finalidade de remover o restante das partículas sólidas. Após essa etapa, o caldo é denominado de clarificado e retorna ao regenerador, aquecendo o caldo misto que entra no sistema de tratamento de caldo. Após essas etapas, o caldo pode ser enviado para a etapa de fermentação. Há também a etapa de tratamento do lodo resultante dos decantadores. O lodo gerado é separado da fase líquida em filtro tipo prensa, sendo a torta produzida usada como adubo pelo setor agrícola, e caldo filtrado, que é uma das correntes de reprocesso que retornam ao tanque de caldo misto direcionado para a produção de álcool, como mostrado na Figura 4.

2.2.4. Preparo do mosto

O mosto é todo líquido com açúcar hábil a sofrer fermentação. Para a produção de etanol, o °Brix o ideal para o processo é em torno de 18-22. Como o caldo misto não atinge esse valor, é incorporado nele mel final, um subproduto da fabricação de açúcar que apresenta valor médio em torno de 80° Bx (VASCONCELOS, 2010). Caso nenhum caldo seja direcionado para a fábrica de etanol, o °Brix do mel final é corrigido utilizando água, que apresenta um teor de sólidos desprezível.

Além disso, o mosto deve ser resfriado de 70°C até cerca de 30 -34°C, que é a temperatura ideal para o desenvolvimento das leveduras e máxima atividade fermentativa. A redução da temperatura é feita geralmente utilizando-se trocadores de calor do tipo placas. O processo de resfriamento do mosto é esquematizado na Figura 6.

Figura 6. Preparo e resfriamento do mosto.



Fonte: (AUTORA, 2024)

2.2.5. Fermentação

A fermentação alcoólica para a produção de etanol é realizada por meio da ação de leveduras, em um processo anaeróbico que convertem os açúcares do mosto em etanol (C_2H_5OH) e gás carbônico (CO_2). Geralmente, a principal levedura utilizada é a *Saccharomyces cerevisiae*, que apresenta alta capacidade fermentativa e resistência ao estresse, ambas características positivas (AMORIM, 1996). Além destas, são atributos desejáveis uma fermentação inicial rápida, alta taxa de fermentação, elevada absorção e consumo de açúcar, fermentação completa do substrato, capacidade de floculação, baixa produção de ácido acético e rendimento na produção de etanol (SOUZA, 2022).

O mosto é fermentado quando se atinge o °Brix de zero, ou seja, quando todo o açúcar é convertido pelas leveduras em álcoois e em alguns compostos orgânicos, em menor quantidade, nas dornas. O tempo para a completa fermentação do mosto depende de alguns parâmetros, entre eles temperatura e levedura, sendo que de acordo com MARQUINI *ET AL*, (2007), o período de 8 horas é suficiente para transformar o mosto em vinho, sendo a concentração deste vinho depende da natureza e composição do mosto originário.

Os componentes principais do vinho fermentado são água e etanol, possuindo em menores quantidades também outros álcoois (metanol, isopropanol, propanol, álcool

isoamílico e isobutanol); ésteres (acetato de etila); aldeídos (crotonaldeído e acetaldeído); cetonas (acetona); ácidos orgânicos (ácido acético) e outros componentes minoritários (BATISTA, 2008). Tais componentes são designados como congêneres e suas frações mássicas podem ser observadas na Tabela 3.

Tabela 3. Componentes do vinho fermentado.

Componente	Fração Mássica
Água	0,92-0,95
Etanol	0,05-0,08
Metanol	$(0,0-3,18).10^{-8}$
Isopropanol	$1,02.10^{-6}$
Propanol	$(2,1-6,8).10^{-5}$
Álcool Isoamílico	$(2,7-18,8).10^{-5}$
Isobutanol	$(1,3-4,9).10^{-5}$
Acetato de Etila	$(5,5-11,9).10^{-6}$
Crotonaldeído	$1,2.10^{-5}$
Acetaldeído	$(1,0-8,3).10^{-5}$
Acetona	$1,5.10^{-5}$
Ácido Acético	$(3,3-99,3).10^{-4}$

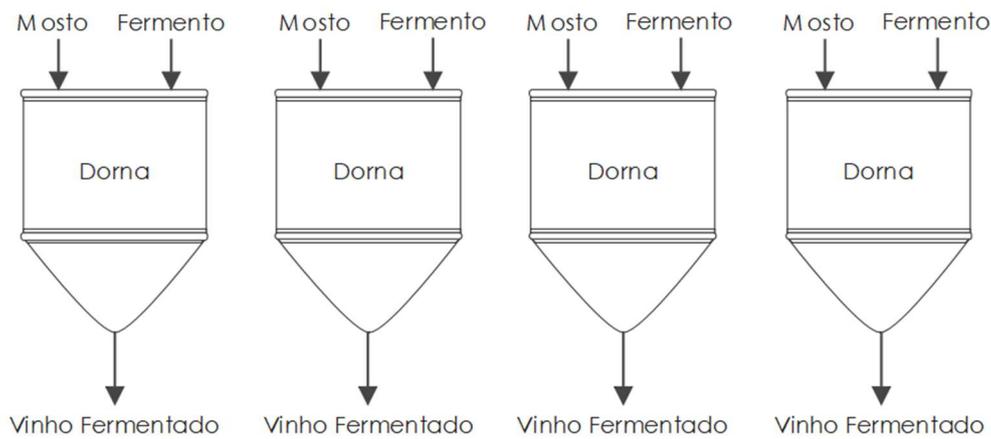
Fonte: (BATISTA, 2008)

O rendimento da reação de fermentação é influenciado por fatores químicos, físicos e biológicos, como temperatura, pH, concentração de levedura, pressão osmótica, contaminação bacteriana, teor alcoólico, acidez do meio e presença de sulfito. Dentre estas, a temperatura é uma das principais variáveis de interferência. A temperatura ideal para a produção de etanol pelas leveduras é na faixa de 26 °C e 35 °C, sendo que pode ocorrer produção em temperaturas elevadas até 40 °C. Porém acima desse valor a produtividade é prejudicada por ser um ambiente propício à contaminação bacteriana, visto que as bactérias se reproduzem nessa temperatura enquanto as leveduras sofrem inibição, ou seja, redução da atividade fermentativa. Além disso, em temperaturas elevadas ocorre também desenvolvimento de maior volume de espuma (FERRO, 2023). Caso condições específicas não sejam atingidas, a levedura pode ser afetada por uma situação de estresse celular, que afeta diretamente o rendimento da fermentação.

A fermentação também é afetada pela presença do próprio etanol e açúcar no meio. Caso as concentrações alcoólicas atinjam valores acima de 15 g/L, o efeito inibitório do produto às leveduras é considerável, assim como o efeito de inibição do açúcar em concentrações maiores que 150 g/L. Dessa forma, a levedura sofre inibição do seu metabolismo pelo próprio etanol que produz, ou seja, há redução do rendimento da fermentação, pois os microrganismos não conseguem captar a glicose na sua taxa máxima (PORTO, 2005).

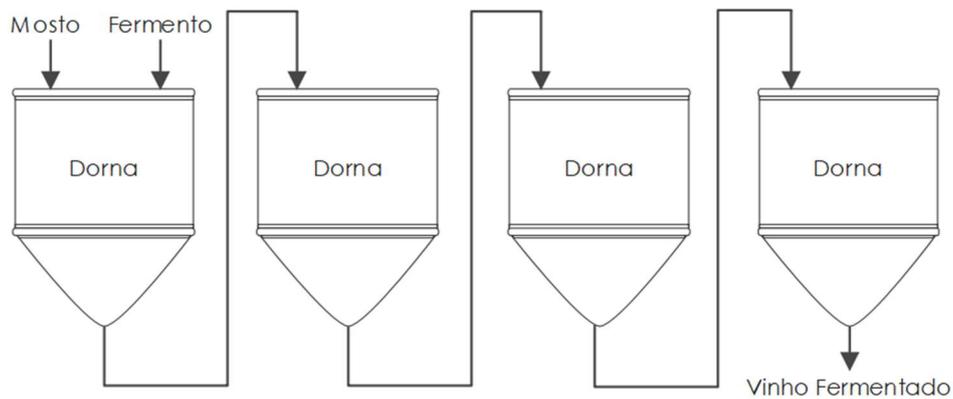
De acordo com STEINLE (2013) e LIMA *ET AL.* (2001), a etapa fermentativa para produção de etanol pode ser segmentada em três etapas: preliminar, tumultuosa e complementar. A fase preliminar se inicia quando o substrato é adicionado juntamente com as células e ocorre multiplicação elevada de leveduras em razão do consumo do açúcar ser direcionado à reprodução, observando leve aumento de temperatura e baixa produção de CO₂. Já a etapa tumultuosa apresenta intensa conversão dos açúcares fermentescíveis em etanol e desprendimento de CO₂, o que gera movimentação do mosto e formação de espuma como consequência, além de um aumento de temperatura que deve ser compensado com trocadores de calor. Por fim, na fase complementar há redução da atividade fermentativa em razão da redução dos açúcares e diminuição da temperatura. Outrossim, a fermentação pode ocorrer de três maneiras diferentes: processo em batelada, contínuo ou batelada alimentada com reciclo de células, conhecido como método Melle-Boinot. No processo descontínuo (batelada) o mosto é introduzido nas dornas com as leveduras e se aguarda até a finalização da fermentação. A vantagem desse procedimento é a possibilidade de assepsia nos reatores ao final de cada bateada e a desvantagem é que pode levar a baixos rendimentos e produtividades em razão de todo o substrato ser adicionado a uma única etapa. Já no processo contínuo, a primeira de uma série de dornas é alimentada intermitentemente com o mosto, e em seguida, passa por dornas subsequentes até que a concentração de açúcar na última dorna esteja próxima de zero, o que significa a finalização do processo fermentativo. Esse tipo de fermentação alcoólica apresenta maior rendimento quando comparado a batelada, porém está mais suscetível a contaminação bacteriana devido ao longo tempo retenção do vinho fermentado (SCHIMIDELL; FACCIOTTI, 2001). A fermentação contínua e descontínua (batelada) são apresentadas nas figuras 7 e 8 respectivamente.

Figura 7. Fermentação em batelada.



Fonte: (AUTORA, 2024)

Figura 8. Fermentação contínua.



Fonte: (AUTORA, 2024)

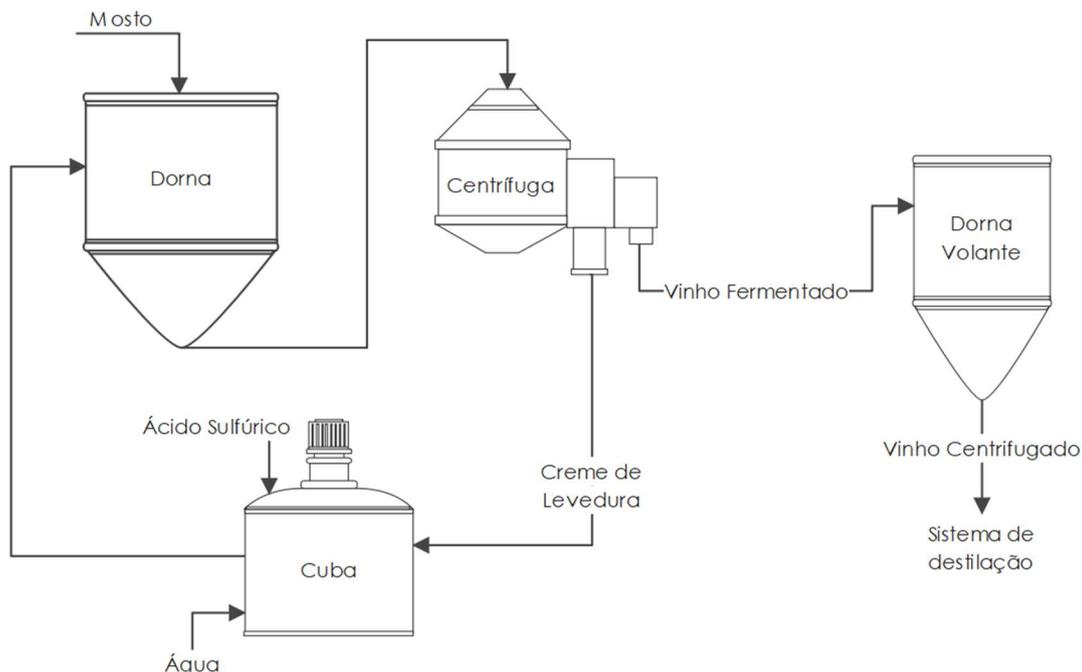
O processo em batelada alimentada é descrito pela alimentação gradual do mosto até que determinado volume da dorna seja atingido, no qual os produtos permanecem até o final da fermentação. Esse método é utilizado quando é desejado controle da concentração de açúcar, de modo que o efeito inibitório causado pelo excesso de substrato seja minimizado (CARVALHO & SATO, 2001). Tal metodologia apresenta valores altos de rendimento fermentativo, menor tempo fermentativo e maior estabilidade processual. O principal ponto negativo é o custo de instalação do sistema, que é elevado quando comparado aos anteriormente descritos.

Encerrado o processo fermentativo, o método Melle-Boinot é caracterizado pelo reciclo do fermento, o qual é separado do mosto fermentado, tratado agora como vinho fermentado. Essa separação ocorre através de centrífugas, em que o vinho centrifugado é

direcionado ao sistema de destilação enquanto o fermento segue para tratamento químico. Nessa etapa, há adição de água e ácido sulfúrico em uma cuba, onde as bactérias e células velhas de levedura são eliminadas em razão da alta concentração de íons hidrogênio, enquanto as células jovens resistem ao baixo pH. Esse fermento tratado é chamado de “pé de cuba” e retorna às dornas de fermentação como creme de levedura depois de um período de agitação (BORGES, 2008).

Além disto, a concentração de leveduras após o tratamento químico é maior do que ao sair das dornas por ação da reprodução das células, conhecido como brotamento, fato que gera uma maior capacidade de fermentação do mosto, caso haja ambiente nutritivo o suficiente para atender as necessidades fisiológicas do fermento. Essa reutilização da levedura no processo fermentativo gera economia na reposição de microrganismos e garante possibilidade de a operação ter seguimento sem as leveduras precisarem consumir substrato para fase de crescimento, além delas estarem adaptadas ao meio fermentativo (FERRO, 2023). A fermentação em batelada juntamente com o reciclo de leveduras (método Melle-Boinet) pode ser observado na Figura 9.

Figura 9. Fermentação em batelada com reciclo de leveduras.



Fonte: (AUTORA, 2024)

De acordo com LOPES *et al* (2016), a fermentação em batelada alimentada contém vantagens quando comparada à contínua, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Diferenças entre tipos de fermentação.

Características	Sistema de Fermentação	
	Contínuo	Batelada Alimentada
Rendimento fermentativo	87 - 89,5	88,9 - 90,5
Contaminação bacteriana do mosto (UFC/ml)	3,8 - 9,9.10 ⁷	2,0 - 3,9.10 ⁷
Ácido sulfúrico (g/L de etanol produzido)	8 - 14 g/L	6 - 7 g/L
Antibióticos (g/L de etanol produzido)	5,7 - 13 g/L	3,8 - 8 g/L
Anti-espumante (g/L de etanol produzido)	0,47 - 0,75 g/L	0,45 - 0,70 g/L

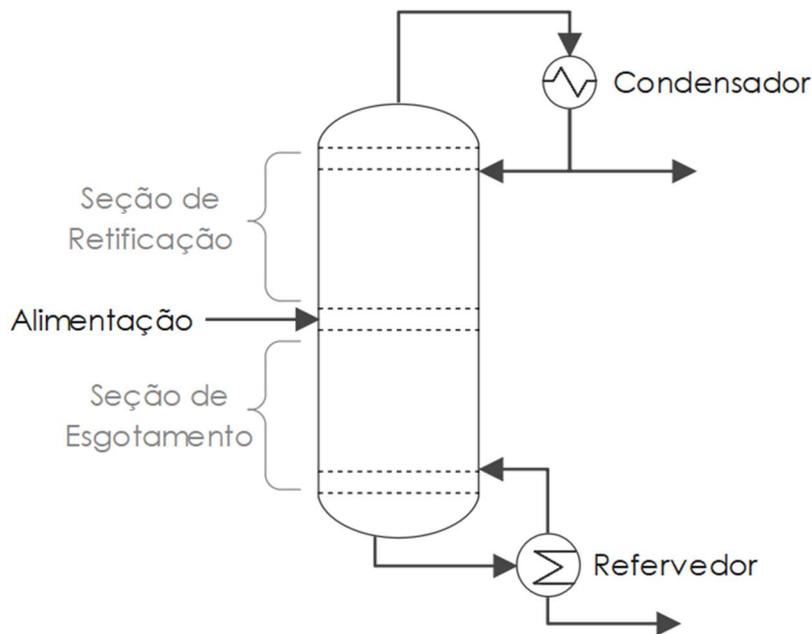
Fonte: (Adaptado de Lopes, 2016)

2.2.6. Destilação

Destilação é uma operação utilizada na separação de componentes presentes em uma mistura de líquidos, sendo um processo baseado na diferença de volatilidade entre as substâncias a serem separadas, em que os produtos mais voláteis são os primeiros a serem destilados (SCHIMIDELL; FACCIOTTI, 2001).

O processo de destilação alcoólica de etanol é realizado em colunas de pratos ou bandejas, que são divididas em duas regiões distintas: a primeira região, localizada entre o prato de alimentação e o topo da coluna, é a região enriquecedora ou seção retificadora, em que a vazão ascendente é maior que o líquido descendente, fazendo com que o vapor seja enriquecido dos componentes mais voláteis; e a segunda região, chamada de seção de exaustão ou esgotamento, localizada entre o prato de alimentação e a base da coluna, ocorre o oposto da região anterior, ou seja, a vazão do líquido descendente é maior que o vapor ascendente, concentrando o elemento menos volátil no líquido descendente (MCCABE et al., 1993). A Figura 10 representa as regiões de uma coluna de destilação contínua.

Figura 10. Coluna de destilação fracionada.

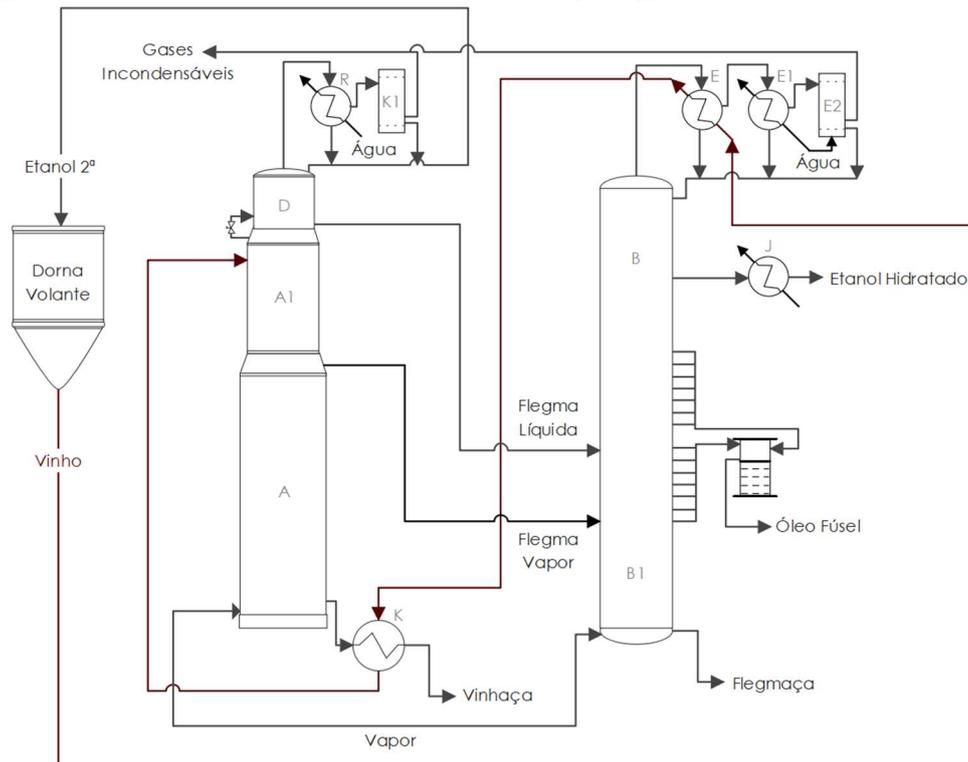


Fonte: (AUTORA, 2024)

Os denominados pratos ou bandejas das colunas permitem o enriquecimento dos compostos mais voláteis na fase de vapor conforme ascende na coluna nos diversos estágios. Para o processo de vaporização, podem ser utilizados os refeedores, conhecidos pelo aquecimento indireto, ou o método de aquecimento por “borbotagem”, ou também chamado de aquecimento direto, em que vapor vegetal a uma pressão de 0,7 kgf/cm², oriundo de vapor de escape dos evaporadores utilizados no processo produtivo do açúcar (SILVEIRA, 2021).

Existem diferentes configurações para destilação do etanol hidratado combustível, sendo a configuração mais empregada nas usinas sucroalcooleiras descrita na Figura 11. Nesse sistema, há duas colunas: a coluna A, segmentada em A, A1 e D e a coluna B, dividida em B e B1 (FONSECA, 2014)

Figura 11. Sistema de destilação convencional para produção de etanol hidratado.



Fonte: (AUTORA, 2024)

O vinho proveniente do processo de fermentação passa por um condensador para troca de energia com o vapor destilado da Coluna B e por um trocador de calor, onde é aquecido até a temperatura do estágio onde o vinho é alimentado (90-94 °C). A seção A1 recebe alimentação de vinho no topo e tem a função de desassociar os compostos mais voláteis presentes no vinho, sendo que a energia para tal advém da injeção direta de vapor na seção A. Esta seção contém três saídas: o produto de topo, direcionado a seção D; a flegma vapor, que é direcionada para a coluna B; e a corrente de fundo denominada vinhoça, utilizada para fertirrigação devido à composição rica em potássio, mineral imprescindível na absorção de nutrientes pela planta (BATISTA, 2008).

A seção D, que recebe o produto de topo de A1, gera um destilado denominado de álcool de 2ª, o qual possui um teor alcoólico próximo de 90 °GL, sendo insuficiente para comercialização como etanol hidratado e, por essa razão, este álcool retorna para o sistema por meio da dorna volante, onde posteriormente será inserido novamente no sistema de destilação incorporado no vinho centrifugado. A corrente de fundo desta seção, conhecida como flegma líquida, é direcionada à coluna B (FURLAN, 2012).

A coluna B é responsável pela retificação do etanol hidratado. A seção B1 realiza o esgotamento da flegma, ou seja, retirada do etanol presente na corrente, possuindo duas correntes de saída: o óleo fúsel e a flegmaça. O óleo fúsel é composto por álcoois de

na região inferior e sua saída é majoritariamente na corrente de fundo, a flegmaça, que retorna a dorna volante. Apesar de possuir um custo mais baixo de implantação em relação aos aparelhos convencionais de destilação e a eliminação das perdas na flegmaça, visto que essa retorna para o fluxo de produção, o sistema Flegstil apresenta desvantagens como o aumento do volume de vinhaça e não gera economia de vapor, pois o que não é utilizado na coluna B deve ser adicionado na coluna A para destilar novamente a flegmaça que retornou para o sistema.

2.3. Absorção

Durante a metabolização dos açúcares pelas leveduras durante a fermentação, ocorre a produção de CO₂, que, no caso de processo com dornas abertas, é liberado para a atmosfera. Com esse procedimento, a perda de etanol por evaporação pode variar de 1 a 2% em relação ao etanol presente no meio fermentativo (REBELATO, 2012). Segundo COUTINHO (2015), A quantidade percentual de etanol perdido pela evaporação depende de variáveis como temperatura e teor alcoólico do meio fermentativo. A Tabela 5 exemplifica a perda percentual de álcool etílico pela evaporação relacionado com a temperatura e teor alcoólico do meio.

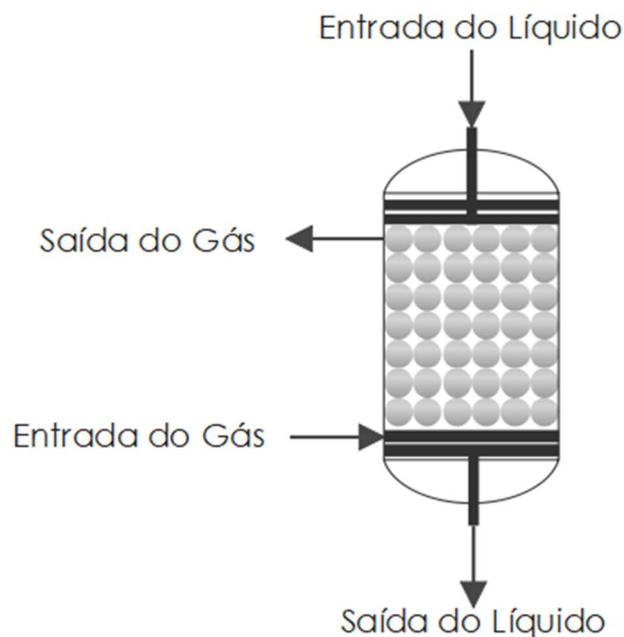
Tabela 5. Perdas percentuais de etanol por evaporação.

Temperatura (°C)	°GL					
	6	7	8	9	10	11
30	0,80	0,91	1,01	1,11	1,16	1,21
31	0,85	0,96	1,07	1,17	1,24	1,31
32	0,90	1,01	1,13	1,24	1,32	1,41
33	0,96	1,06	1,19	1,30	1,39	1,49
34	1,01	1,11	1,25	1,37	1,47	1,58
35	1,06	1,16	1,29	1,43	1,55	1,68
36	1,12	1,24	1,37	1,52	1,65	1,79
37	1,18	1,31	1,44	1,61	1,75	1,90
38	1,24	1,39	1,52	1,69	1,84	2,00
39	1,30	1,41	1,59	1,78	1,94	2,11
40	1,36	1,54	1,67	1,87	2,04	2,22

Fonte: (COUTINHO, 2015)

Nesse sentido, a recuperação do etanol é feita por meio da canalização do gás carbônico procedente das dornas fechadas juntamente com parte do vinho contendo etanol evaporado para a torre de absorção, que funciona por meio da lavagem do CO₂ em contracorrente com a água. Ela consiste em uma coluna de formato cilíndrico, provida da entrada de líquido no topo por um distribuidor, proporcionando escoamento uniforme e formação de um filme sobre a superfície do recheio, com inserção do gás na parte inferior, fluindo de forma ascendente através do recheio da coluna, entrando em contato com o líquido (BREMM, 2016). A Figura 13 exibe um desenho ilustrativo de uma coluna de recheio.

Figura 13. Coluna de absorção com recheio aleatório.



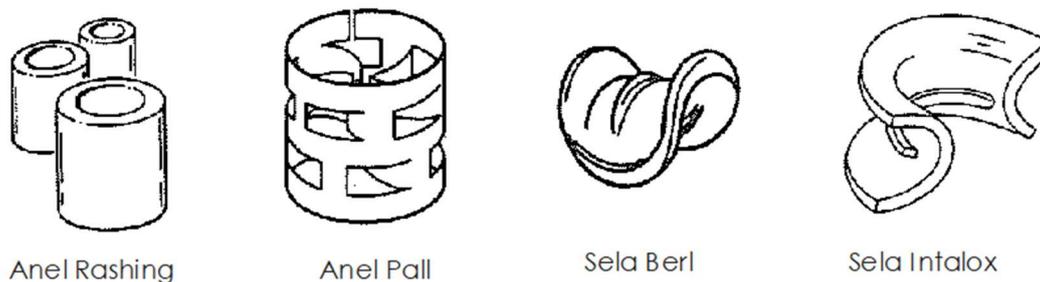
Fonte: (Adaptado de CREMASCO, 2002)

A absorção gasosa trata-se de um processo que tem como objetivo a remoção de um ou mais componentes de uma mistura gasosa, através do contato com uma corrente líquida, onde há a dissolução destes constituintes. Nesta operação unitária a corrente gasosa é composta pelo gás inerte e pelo gás transferido para fase líquida, denominado de soluto. A fase líquida é composta do solvente para dissolver o soluto (BIRD, STEWART, LIGHTFOOT, 1969). Este é um processo de transferência de massa, que utiliza as diferenças de solubilidade entre os gases e líquidos dos diferentes componentes de uma mistura. Em vista disso, um fator importante para uma separação eficaz é a determinação

do solvente, além de uma corrente com baixa concentração do soluto a ser removido. Nas usinas sucroalcooleiras, a absorção gasosa do etanol utiliza a água como solvente, devido a sua eficiência, vinculada ao seu baixo custo. A capacidade que um solvente tem de absorver um soluto gasoso é função da sua pressão parcial e esta relação depende da temperatura e do tipo de solvente utilizado. O princípio da operação da coluna de absorção é baseado no gás com o soluto que entra na seção inferior da coluna e flui para cima por meio dos poros do recheio, de forma contracorrente ao fluxo do líquido. Nesse processo, o soluto do gás é absorvido pelo líquido e o gás sai no topo, enquanto o líquido enriquecido com o soluto de interesse flui descendentemente e tem a saída pelo fundo da coluna (CREMASCO, 2002). No caso da torre de recuperação de etanol (coluna de absorção), o gás é o CO₂, contendo como soluto etanol e o líquido utilizado como solvente é a água. Dessa forma, pelo princípio de absorção, o gás carbônico entra em contato com a água de modo que ocorre a dissolução do etanol presente no gás no líquido, formando uma solução hidroalcoólica muito diluída com aproximadamente de 1% de etanol (m/m) e compostos secundários presentes no vinho fermentado.

Os recheios utilizados nas colunas visam o aumento da superfície de contato entre as fases que compõem a coluna (CREMASCO, 2002), sendo dois principais grupos: os recheios randômicos e os estruturados. Segundo MCCABE *et al.* (1993), os estruturados são menos utilizados, pois pela montagem de forma ordenada, ocorre a geração de canais preferencias para o escoamento das fases. Já os randômicos recebem essa nomenclatura pois o recheio não precisa ser posicionado com uma disposição específica. Estes são feitos de materiais inertes e baratos, como polietileno, e também são usados anéis metálicos de parede fina de aço ou alumínio (MCCABE *et al.*, 1993). Alguns dos recheios randômicos mais comuns são: anéis de Rashing, anéis Pall, sela Berl e sela Intalox, como apresentados na Figura 14. É importante mencionar, que a coluna utilizada na usina objeto de estudo utiliza recheios do tipo Anéis Pall em polipropileno, que são ideais para o processo porque não absorvem a água utilizada como solvente.

Figura 14. Tipos de recheios randômicos.



Fonte: (Adaptado de MCCABE, 1993)

O processo de absorção é influenciado pela hidrodinâmica e a escolha do equipamento varia em função da razão entre vazão líquida e gasosa, grau de separação desejado, solubilidade do soluto, impureza dos fluidos e propriedades físicas do sistema (SOLETTI, 2022).

Na usina fonte do presente estudo, esse álcool proveniente do arraste do gás retorna ao processo por meio da dorna volante. A problemática relativa é a redução no percentual alcoólico do vinho, visto que o sistema recebe uma solução com água e, com isso, mais vapor será necessário para que a destilação ocorra. Somado a isso, há o retorno da flegmaça para a dorna volante resultado do sistema Flegstil, o que também reduz o °GL do vinho. De acordo com Zarpelon (2020), uma redução em 1 °GL no vinho aumenta o consumo de vapor por °GL de vinho em 0,4 kgvapor/litro de álcool hidratado, como indicado na Tabela 6.

Tabela 6. Consumo de vapor por °GL do vinho

°GL do vinho	Consumo de vapor por °GL (kgvap/LAH)
7	3,4
8	3,0

Fonte: (ZARPELON, 2020)

KWIATKOWSKI *et al.* (2006), em um estudo sobre o processo de obtenção de etanol pela fermentação do milho, explica que pela redução do percentual alcoólico e custo elevado do direcionamento da solução à destilação, a alternativa é o retorno ao processo de fermentação. Sob esse contexto, tem-se como hipótese o direcionamento da

solução hidroalcoólica para as cubas de tratamento de fermento ou para o diluidor de mosto. Em ambas as possibilidades há economia de água utilizada como solvente para diluição, porém, o local de destinação dessa solução não pode apresentar aumento na contaminação microbiológica, visto que isso interfere na viabilidade celular do fermento, e conseqüentemente, no rendimento do processo (CARVALHO & SATO, 2001).

2.4. Contaminação microbiológica

No processo de fermentação alcoólica para produção de etanol hidratado o fermento sofre interferências externas oriunda dos compostos que formam o mosto (caldo, mel e água) e do ambiente fermentativo, tornando-se susceptível a contaminação por outros microrganismos como bactérias e leveduras selvagens, que são aquelas não colocadas no processo. Dessa forma, é fundamental o constante monitoramento do processo fermentativo (LUCENA, 2010; MADALENO *et al*, 2019).

A origem da contaminação pode ser resultante da cana-de-açúcar, devido à microrganismos epifíticos que crescem e vivem sobre a superfície vegetal, sendo estes a principal origem da contaminação do caldo de cana (CEBALLOS-SCHIAVONE, 2009), e também pela insuficiência de controle das condições assépticas, que somado a grande quantidade de nutrientes disponíveis no mosto o torna muito propício para a propagação bacteriana (COSTA, 2017). A contaminação do fermento é um fator limitante e prejudicial para a produção de etanol, pois resulta em perdas de 2 a 22% da produção total (BECKNER, IVEY, PHISTER, 2011) e, em casos extremos, a interferência pode chegar de 20 a 30% (BREXÓ, SANT'ANA, 2017). Segundo Francisco (2020), a contaminação na dorna pode reduzir o rendimento fermentativo conforme mostrado na Tabela 7.

Tabela 7. Relação entre contaminação e redução no rendimento fermentativo

Contaminação na dorna	Redução no rendimento fermentativo
Abaixo de 10^6	Até 1%
Entre 10^6 e 10^7	De 1 a 3%
Entre 10^7 e 10^8	De 3 a 5%
Acima de 10^8	Acima de 5%

Fonte: (FRANCISCO, 2020)

As consequências operacionais de um sistema fermentativo contaminado são a competição do açúcar e nutrientes do processo entre as leveduras industriais, nativas e bactérias (BASSO *et al*, 2008; LOPES *et al*, 2016), sendo que a multiplicação das bactérias ocorre 12 vezes mais rápido que a das leveduras (FRANCISCO, 2020), além da geração de ácidos orgânicos, que são tóxicos para a levedura, floculação do fermento, inibição e morte das leveduras (RAVANELI *et al*, 2011). Existem valores de referência relativos aos limites de contaminação aceitáveis nas correntes do processo produtivo de etanol hidratado conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8. Limites de contaminação por corrente processual

Corrente processual	Limite de contaminação
Mel	$<10^3$
Caldo	$<10^3$
Água de diluição do mosto	Isento
Água de diluição do fermento	Isento
Saída do trocador de calor do mosto	$<10^4$
Torre de CO ₂	Isento
Dornas	$<10^8$
Cubas	$<10^8$

Fonte: (FRANCISCO, 2020)

O controle do crescimento bacteriano em fermentações alcoólicas em indústrias sucroenergéticas tem sido um dos fatores de maior relevância para o aumento da eficiência fermentativa (GODOY *et al*, 2008), porém gera custos adicionais no processo produtivo devido ao uso de produtos químicos para controle dos efeitos da contaminação, como antiespumantes, antibiótico e ácido sulfúrico (NAGHSHBANDI *et al*, 2019).

Dependendo do sistema de condução de fermentação, as indústrias podem utilizar de 3,8 até 13 g/L de antibiótico para o controle da contaminação bacteriana (LOPES *et al*, 2016). No Brasil, os antibióticos mais utilizados são a penicilina, tetraciclina e os medicamentos à base de monensina. Na usina tratada neste trabalho, utiliza-se o Kamoran®, que age seletivamente tanto como bactericida, ou seja, sendo capaz de matar as bactérias, quanto bacteriostático, que impede o crescimento e multiplicação desses microrganismos sem eliminá-los completamente.

A partir de 2007 foram incorporados novos compostos antimicrobianos para o controle da contaminação bacteriana, em consequência a pressão para redução do uso de antibióticos devido ao efeito residual na biomassa das leveduras, visto que não é permitido utilizar leveduras que contenham resíduos desse grupo medicamentoso para a produção de ração animal ou alimentação humana (MENECHIN *et al*, 2008; LOPES *et al*, 2016). O dióxido de cloro é um dos antimicrobianos usado como alternativa aos antibióticos, sendo utilizado como agente sanitizante (GODOY *et al*, 2008; LOPES *et al*, 2016). A aplicação deste produto em concentrações de 10 a 125 ppm foram eficazes para o controle do crescimento de bactérias encontradas comumente no processo de fermentação alcoólica, possuindo efeito similar ao Kamoran® na concentração de 3 ppm (MENECHIN *et al*, 2008). Além disso, o uso de dióxido de cloro nas destilarias brasileiras diminuiu em até 30% o emprego de ácido sulfúrico, um decréscimo de sete vezes no custo com insumos por metro cúbico de etanol produzido quando comparado aos métodos convencionais, e aumentou até 5% o rendimento do processo a partir do quinto ciclo de fermentação (P&S, 2016).

2.5. Método da diluição seriada e plaqueamento

A avaliação das condições do fermento no sistema influencia o rendimento produtivo, visto que apenas células viáveis são ativas na fermentação. Com o decorrer do processo fermentativo, há a reprodução e morte das leveduras, além de interferências negativas pelas condições ambientais ou contaminação por outros microrganismos, tornando-se inviáveis para a produção. A diferenciação das células que não contribuem com o processo mostra a conversão real feita pelas células viáveis e a necessidade de um possível ajuste no sistema. Com isso, métodos baseados no plaqueamento ou contagem direta são utilizados para estimar a proporção de células que são viáveis no processo fermentativo (MONGELO, 2012).

O método da diluição seriada tem como princípio de que cada colônia de microrganismos é oriunda de uma célula viável, conhecida como unidade formadora de colônia – UFC (VIEIRA, FERNANDES, 2012). Esse mesmo método que, determina a quantidade de leveduras viáveis no sistema é utilizado também para a identificação e contagem de bactérias contaminantes, modificando-se apenas as diluições e o meio de cultura, que variam de acordo com material analisado e o índice de contaminação relativo.

O cultivo dos microrganismos em condições laboratoriais utiliza os meios de cultura, que são o conjunto de nutrientes necessários para ocorrer a multiplicação ou manutenção das células. Existe uma vasta variedade de preparações nutricionais utilizadas para induzir tal crescimento, que se modifica com as exigências nutritivas e condições físicas dos tipos de bactérias (SILVA; JUNQUEIRA; SILVEIRA, 1997). Na contagem de bactérias totais, normalmente é utilizado o meio de cultura à base de extrato de levedura triptoma-dextrose-ágar, conforme representado na Tabela 9.

Tabela 9. Extrato de levedura triptona-dextrose-ágar (PCA – Plate Count Agar).

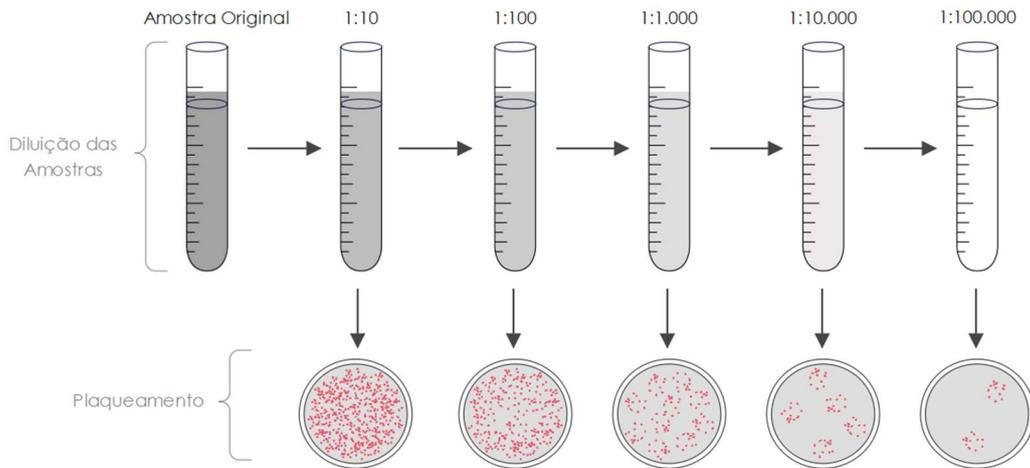
Extrato de levedura	2,5 g
Triptona	5,0 g
Dextrose	1,0 g
Ágar	15,0 g
Água destilada	1000 ml

Fonte: (AMORIM, 1996)

Como o meio de cultura PCA demanda cerca de 72h de período de incubação, há o método RAC (Rapid Aerobic Count), que é um meio de cultura pré-preparado que permite a rápida detecção e quantificação de bactérias aeróbicas nas amostras, facilitando a enumeração da colônia em apenas 24 horas. O meio é otimizado para permitir um rápido crescimento bacteriano, e, por isso, as colônias podem ser contadas em um período menor do que os métodos tradicionais de contagem de placas (MIRANDA, 2013).

Para determinação da quantidade de UFCs em um volume são realizadas sucessivas diluições e a cada nova diluição uma alíquota é semeada em uma placa (SANTOS, 2022), como representado na Figura 15. Na microbiologia, a diluição seriada é utilizada para diluir as colônias de bactérias, de modo que a contagem destas após o período de incubação de 24h à 35 °C se torne mais fácil. Além de que, essa contagem deve ser feita preferencialmente nas placas que contenham de 30 a 300 colônias, pois um número muito alto destas pode reprimir algumas células, interferindo no valor final contado (TORTORA, FUNKE e CASE, 2017).

Figura 15. Método da diluição seriada e plaqueamento.



Fonte: (AUTORA, 2024)

O cálculo da concentração das UFCs deve considerar as respectivas diluições realizadas e ser a média do valor de duas placas semeadas com a mesma diluição. Dessa forma, o número de unidades formadoras de colônias por volume de amostra (UFC/ml) é feito a partir do valor médio de unidades contadas nas duas placas multiplicado pelo fator de diluição utilizado (LUCARINI; SILVA; BIANCHI, 2004).

2.6. Ferramentas de análise estatística

Uma das ferramentas da estatística para estudar sistemas com duas ou mais variáveis e a relação entre elas é o coeficiente de correlação de Pearson (r). Ele pode ser definido como uma medida de associação linear entre variáveis. Dois conceitos são empregados para explicar a correlação tratada: associação e linearidade (MATOS; RODRIGUES, 2019).

Em termos estatísticos, duas variáveis se associam quando elas guardam semelhanças na distribuição das frequências ou no compartilhamento de variância. No caso da correlação de Pearson (r), este é uma medida da variância compartilhada entre variáveis. Com relação à linearidade, um modelo denominado linear supõe que o aumento ou decréscimo de uma unidade na variável X gera o mesmo impacto em Y . No caso de gráficos, a relação linear ilustra o padrão de comportamento entre duas variáveis através de uma linha reta. Destarte, a correlação de Pearson (r) necessita de um compartilhamento

de variância e que essa variação seja distribuída linearmente (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2009). O coeficiente de correlação Pearson varia de -1 até 1, sendo que o sinal indica direção positiva ou negativa da associação e o valor sugere a força da relação entre as variáveis. Uma correlação denominada de perfeita (-1 ou 1) indica que o escore de uma variável pode ser determinado exatamente ao se saber o escore da outra. Já o oposto, uma correlação com resultado de zero indica que não existe relação linear entre as variáveis. A interpretação dos resultados entre -1 e 1 é discutida entre pesquisadores, sendo que para Blyth (1994), a classificação é mostrada na Tabela 10.

Tabela 10. Classificação do coeficiente de correlação de Pearson.

r	Classificação
0	Nula
0,10 - 0,30	Fraca
0,40 - 0,60	Moderada
0,60 - 0,90	Forte
0,90 - 0,99	Muito forte
0,99 - 1	Perfeita

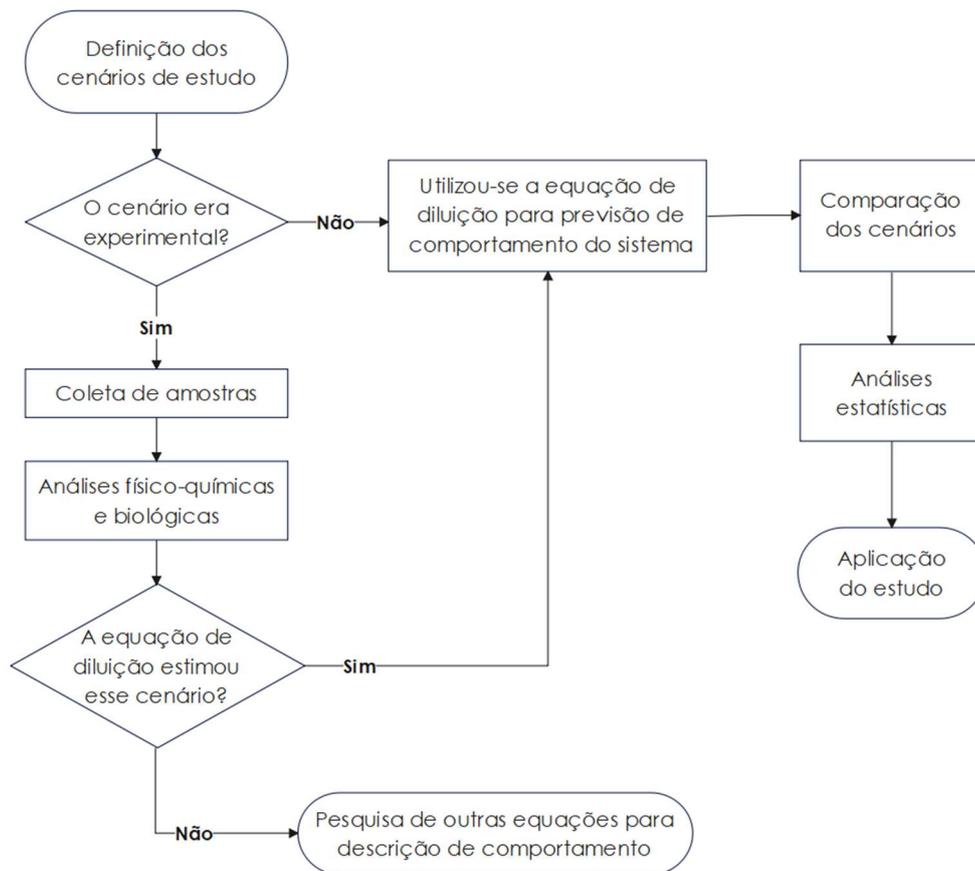
Fonte: (BLYTH, 1994)

Nessa ferramenta estatística de correlação, a média influência fortemente o coeficiente de Pearson. Por essa razão, um dos pressupostos centrais para que essa medida seja adequadamente utilizada é que os valores sigam uma distribuição normal. O estudo de normalidade pode ser feito por um teste, em que um resultado não significativo ($p > 0,05$) indica normalidade. Em relação à análise gráfica, utiliza-se comumente a utilização de histogramas e Q-Q plots para analisar o formato da distribuição. Além disso, a presença de *outliers* tende a distorcer o valor da média e, conseqüentemente, o valor do coeficiente de correlação. Com isso, a presença de *outliers* compromete as estimativas do estudo. Para evitar esse erro, pode-se utilizar a ferramenta boxplot, que mostra a distribuição e os valores atípicos dos dados de uma amostra (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2009).

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do trabalho, definiram-se cenários de estudo. Para os cenários experimentais foram realizadas coletas de amostras, análises físico-químicas e biológicas, além da validação da equação de diluição a ser utilizada nos cenários estimados por cálculo. Os resultados foram comparados e submetidos à análise estatística. Com os melhores cenários definidos foi realizada a aplicação do estudo. O fluxograma da Figura 16 descreve as etapas do trabalho.

Figura 16. Fluxograma das etapas do trabalho.



Fonte: (AUTORA, 2024)

Foram estudados seis cenários processuais distintos, que abrangem o comportamento do °GL na dorna volante, interferência de contaminação na cuba e no diluidor de mosto, conforme Tabela 11.

Tabela 11. Cenários de estudo.

Cenários	Estudos	Justificativas dos Estudos
1	°GL na dorna volante com solução hidroalcoólica	Compreender na prática o valor de grau alcoólico na dorna volante com a solução e estimar se o valor de grau alcoólico na dorna volante irá aumentar com a retirada.
2	°GL na dorna volante sem solução hidroalcoólica	
3	Contaminação nas cubas sem solução hidroalcoólica	Compreender na prática o nível de contaminação nas cubas sem a inserção da solução e estimar em quanto irá aumentar com o acréscimo.
4	Contaminação nas cubas com solução hidroalcoólica	
5	Contaminação no diluidor de mosto sem solução hidroalcoólica	Compreender na prática o nível de contaminação no diluidor de mosto sem a inserção da solução e estimar em quanto irá aumentar com o acréscimo.
6	Contaminação no diluidor de mosto com solução hidroalcoólica	

Fonte: (AUTORA, 2024)

A diferença entre os cenários é a presença ou ausência da solução hidroalcoólica nos locais estudados. Os cenários 1, 3 e 5 são relativos aos procedimentos que ocorriam na usina no momento do estudo, e por isso, as análises foram realizadas de forma experimental. Os cenários 2, 4 e 6 foram estimativas realizadas por cálculos para previsão de comportamento do sistema em caso de alteração. O objetivo destes estudos foi comprovar que o grau alcoólico na dorna volante sem a solução hidroalcoólica iria aumentar, ou seja, o cenário 2 seria vantajoso, e com isso essa corrente teria que ser direcionada às cubas de tratamento de fermento ou ao diluidor de mosto, que se trata dos estudos dos cenários 4 e 6. Os dados obtidos para a realização do presente trabalho, foram retirados do boletim industrial, um documento informativo com os indicadores analíticos processuais (análises físico-químicas e biológicas) e informações de análises extras de plaqueamento realizadas pelo Laboratório da indústria. Para avaliação do comportamento dos cenários, foi elaborado um modelo matemático de previsibilidade baseado em equação de diluição para os cenários estudados, que correspondem as Equações 1 a 6.

- Cenário 1

$$^{\circ}\text{GL}_{\text{Vinho}} = \frac{\left(\frac{^{\circ}\text{GL}_{\text{Vinho Centrifugado}}}{V_{\text{Vinho Centrifugado}}}\right) * \left(\frac{^{\circ}\text{GL}_{\text{Etanol de 2}^{\text{a}}}}{V_{\text{Etanol de 2}^{\text{a}}}}\right) * \left(\frac{^{\circ}\text{GL}_{\text{Flegmaça}}}{V_{\text{Flegmaça}}}\right) * \left(\frac{^{\circ}\text{GL}_{\text{Óleo Fúsel}}}{V_{\text{Óleo Fúsel}}}\right) * \left(\frac{^{\circ}\text{GL}_{\text{Solução}}}{V_{\text{Solução}}}\right)}{V_{\text{Vinho}}} \quad (1)$$

onde °GL se refere aos valores de grau alcoólico e V aos de volume.

- Cenário 2

$$^{\circ}\text{GL}_{\text{Vinho}} = \frac{\left(\frac{^{\circ}\text{GL}_{\text{Vinho Centrifugado}}}{V_{\text{Vinho Centrifugado}}}\right) * \left(\frac{^{\circ}\text{GL}_{\text{Etanol de 2}^{\text{a}}}}{V_{\text{Etanol de 2}^{\text{a}}}}\right) * \left(\frac{^{\circ}\text{GL}_{\text{Flegmaça}}}{V_{\text{Flegmaça}}}\right) * \left(\frac{^{\circ}\text{GL}_{\text{Óleo Fúsel}}}{V_{\text{Óleo Fúsel}}}\right)}{V_{\text{Vinho}}} \quad (2)$$

- Cenário 3

$$C_{\text{Levedura Tratada}} = \frac{\left(\frac{C_{\text{Creme de Levedura}}}{V_{\text{Creme de Levedura}}}\right) * \left(\frac{C_{\text{Água de diluição}}}{V_{\text{Água de diluição}}}\right)}{V_{\text{Levedura Tratada}}} \quad (3)$$

onde C se refere aos valores de contaminação das correntes e V aos de volume.

- Cenário 4

$$C_{\text{Levedura Tratada}} = \frac{\left(\frac{C_{\text{Creme de Levedura}}}{V_{\text{Creme de Levedura}}}\right) * \left(\frac{C_{\text{Água de diluição}}}{V_{\text{Água de diluição}}}\right) * \left(\frac{C_{\text{Solução}}}{V_{\text{Solução}}}\right)}{V_{\text{Levedura Tratada}}} \quad (4)$$

- Cenário 5

$$C_{\text{Mosto}} = \frac{\left(\frac{C_{\text{Caldo+Mel}}}{V_{\text{Caldo+Mel}}}\right) * \left(\frac{C_{\text{Água de diluição}}}{V_{\text{Água de diluição}}}\right)}{V_{\text{Mosto}}} \quad (5)$$

- Cenário 6

$$C_{\text{Mosto}} = \frac{\left(\frac{C_{\text{Caldo+Mel}}}{V_{\text{Caldo+Mel}}}\right) * \left(\frac{C_{\text{Água de diluição}}}{V_{\text{Água de diluição}}}\right) * \left(\frac{C_{\text{Solução}}}{V_{\text{Solução}}}\right)}{V_{\text{Mosto}}} \quad (6)$$

No caso dos cenários experimentais, as Equações 1, 3 e 5 foram testadas para confirmar se havia concordância entre a previsão matemática e os dados obtidos empiricamente. No caso de semelhança entre os valores, houve indicativo de previsibilidade do sistema e então, as Equações 2, 4 e 6 foram utilizadas nos cenários supostos por cálculo. O número de dias para amostragem, quantidade de amostras por dia e total de amostras realizadas para o estudo de cada cenário são mostrados na Tabela 12.

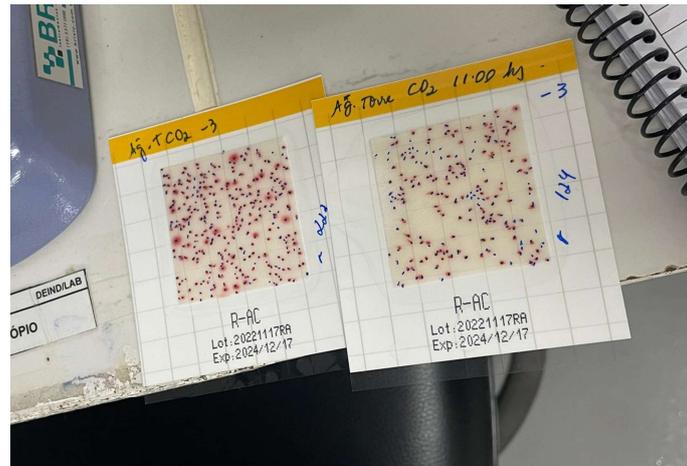
Tabela 12. Informações acerca da coleta de amostras

Cenários	Número de dias para amostragem	Quantidade de amostras por dia	Total de amostras
1	5	1	5
2	5	1	5
3	15	1	15
4	15	1	15
5	15	1	15
6	15	1	15

Fonte: (AUTORA, 2024)

Os valores do volume das correntes foram retirados dos balanços de massa realizado na usina foco do trabalho. A técnica utilizada para estudo da análise de contaminação nos cenários 3 a 6 foi o método da diluição seriada e plaqueamento, sendo que meio de cultura utilizado para a análise das correntes foi o RAC (Rapid Aerobic Count), como mostrado na Figura 17.

Figura 17. Análise de contaminação com meio de cultura RCA.



Fonte: (AUTORA, 2024)

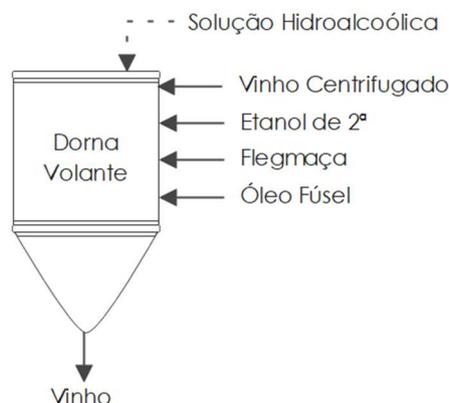
O método da diluição seriada foi realizado de acordo com a literatura de VIEIRA & FERNANDES, 2012. Foi coletado 1 ml da amostra e transferida para um tubo de cultura com 9 ml de solução salina esterilizada (diluição 1:10 ou 10^{-1}). A solução foi homogeneizada em um agitador de tubos. Em seguida, pipetou-se 1 ml da diluição anterior para outro tubo com 9 ml de solução salina esterilizada, obtendo-se uma diluição 1:100 ou 10^{-2} . Essa solução também foi homogeneizada em um agitador de tubos. Para a diluição 1:1000 ou 10^{-3} , pipetou-se 1 ml da solução diluída anteriormente para outro tubo com 9 ml de solução salina esterilizada, com homogeneização em um agitador de tubos. Para a semeadura, pipetou-se 1 ml e adicionou ao meio de cultivo a uma temperatura de 45-46°C. Para distribuir as células com uniformidade, agitou-se a placa com movimentos horizontais. Foram semeadas 2 placas de cada diluição e escolhidas 3 diluições. O período de incubação foi de 24h a 32°C. A contagem de cada placa foi feita para estimar o número de colônias e as placas escolhidas foram as que apresentem de 30 a 300 colônias, multiplicando o valor encontrado pelo fator de diluição para se obter o número de colônias. Com os cálculos de todos os cenários feitos, determinou-se qual seria o mais vantajoso, podendo então ser aplicado na usina, e o mais prejudicial ao sistema, que não deve ser efetuado no processo. Esses cenários conclusivos foram submetidos ao tratamento dos dados com análise estatística por meio do software Minitab®. Desse modo, foram feitos os gráficos boxplot das correntes, teste de normalidade e correlação de Pearson para o cenário mais vantajoso e mais prejudicial.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Cenário 1 - °GL na dorna volante com a solução hidroalcoólica

Nessa etapa do trabalho foi analisado o primeiro cenário do estudo com o objetivo de determinar o valor do grau alcoólico do vinho, que é a saída da dorna volante, com a inserção da solução hidroalcoólica. Esse cenário era a realidade processual da usina no momento da pesquisa, logo as correntes foram estudadas de forma experimental e submetidas posteriormente a uma equação baseada na diluição para corroborar a previsibilidade do sistema e não pelo modelo matemático. As correntes relativas a este estudo são representadas na Figura 18.

Figura 18. Correntes estudadas no cenário 1.



Fonte: (AUTORA, 2024)

Os dados foram obtidos por meio do boletim industrial com uma frequência de coleta de uma vez no dia por um período de 5 dias e são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Dados das correntes processuais do cenário 1.

Amostra	Vinho Centrifugado (°GL)	Etanol de 2ª (°GL)	Óleo Fúsel (°GL)	Flegmaça (°GL)	Solução Hidroalcoólica (°GL)	Vinho (°GL)
1	7,46	91,95	64,51	13,58	0,98	7,85
2	7,48	91,96	64,67	13,72	1,04	7,89
3	7,51	91,98	64,93	13,58	0,97	7,9
4	7,46	91,99	64,80	13,53	1,02	7,86
5	7,49	91,91	64,78	13,56	0,98	7,87
Média	7,48	91,96	64,74	13,59	1,00	7,87

Fonte: (AUTORA, 2024)

Observando a Tabela 13 é possível constatar, que o vinho apresentou um valor de 7,87 °GL considerando a presença da solução hidroalcoólica na dorna volante. Os volumes de cada corrente (Tabela 13) foram retirados dos balanços de massa e estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. Volumes das correntes de entrada e saída da dorna volante.

Correntes	Volume (m³)
Vinho Centrifugado	220
Etanol de 2	0,50
Óleo Fúsel	0,03
Flegmaça	20
Solução Hidroalcoólica	10

Fonte: (AUTORA, 2024)

Foram utilizados os dados das correntes das Tabelas 13 e 14 para estimar o grau alcoólico do vinho que sai da dorna volante utilizando a Equação 1, com a finalidade de validar se a equação consegue prever o comportamento do sistema que foi medido experimentalmente. Esses resultados estão demonstrados na Tabela 15 e foram comparados com o valor do °GL do vinho obtido pelo boletim industrial.

Tabela 15. Comparação entre valores de °GL vinho para o cenário 1.

Amostra	°GL do Vinho do Boletim Industrial	°GL do Vinho por Cálculo
1	7,85	7,87
2	7,89	7,90
3	7,9	7,91
4	7,86	7,86
5	7,87	7,89
Média	7,87	7,88

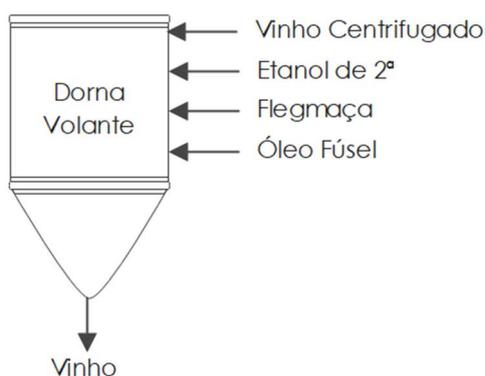
Fonte: (AUTORA, 2024)

De acordo com a Tabela 15, a diferença entre a média do dado obtido experimentalmente (7,87) e o calculado (7,88) foi de 0,01 °GL, logo foi possível usar o modelo matemático para obter uma previsão do comportamento relativo ao grau alcoólico da dorna volante com a retirada da solução hidroalcoólica, que corresponde ao cenário 2.

4.2. Cenário 2 - °GL na dorna volante sem a solução hidroalcoólica

Nessa etapa do trabalho foi analisado o cenário 2 com o objetivo de comprovar que, sem a solução hidroalcoólica na dorna volante, o °GL do vinho que sai do sistema deveria aumentar. Esse cenário não era a realidade processual da usina no momento da pesquisa, logo as correntes foram baseadas segundo o modelo matemático adequado. As correntes estudadas estão representadas na Figura 19.

Figura 19. Correntes estudadas no cenário 2.



Fonte: (AUTORA, 2024)

Os dados das correntes de vinho centrifugado, etanol de 2º, óleo fúsel e flegmaça se mantiveram os mesmos utilizados no cenário anterior na Tabela 13 e foram aplicados na Equação 2 para determinar o grau alcoólico do vinho caso a solução hidroalcoólica fosse retirada da dorna volante. Os valores de volume adotados para o cálculo se referem aos da Tabela 14. Com isso, foi possível obter dados para elaboração da Tabela 16.

Tabela 16. Comparação entre valores de °GL vinho nos cenários 1 e 2.

Amostra	°GL do Vinho no Cenário 1	°GL do Vinho no Cenário 2
1	7,85	8,15
2	7,89	8,18
3	7,9	8,20
4	7,86	8,15
5	7,87	8,18
Média	7,87	8,17

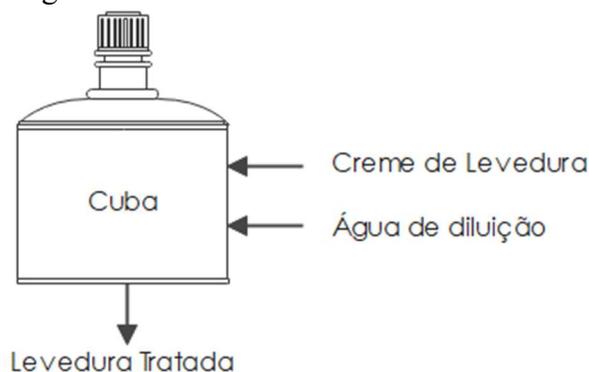
Fonte: (AUTORA, 2024)

Segundo a Tabela 16, o valor médio do °GL encontrado no vinho nesse caso corresponde a 8,17, enquanto para o cenário anterior foi de 7,87, possuindo uma diferença de 0,30 °GL. Logo, comparando os valores de grau alcoólico nos cenários 1 e 2, pode-se observar que o sistema sem a solução hidroalcoólica apresenta um °GL maior, visto que uma quantidade de água é retirada do sistema. Por esse valor alcoólico ser mais elevado, o processo de destilação demanda um consumo menor de vapor, consequência positiva para o processo de produção de etanol hidratado na usina relatada neste trabalho, visto que há deficiência dessa energia no sistema. Assim sendo, o cenário 2 é o mais vantajoso quando comparado com o cenário 1. Além disso, há um ganho de capacidade no sistema de destilação, ou seja, é possível que o sistema processe uma mistura mais alcoólica e com isso possa destilar mais etanol, sendo que no cenário com a solução hidroalcoólica era destilada a água contida nesta. A partir de balanços de massa realizados pela usina, um vinho que entra nas colunas de destilação com 7,87 °GL tem uma produção máxima de etanol em torno de 16.988 L/h. Ao aumentar o grau alcoólico em 0,30 (8,17) é possível produzir, no máximo, 17.600 L/h de álcool. A diferença entre os dois é o aumento de capacidade, que neste caso corresponde a 612,00 L/h de etanol hidratado, equivalente a 3,48% da produção diária total.

4.3. Cenário 3 - Contaminação nas cubas sem a solução hidroalcoólica

Com o objetivo de avaliar o cenário 3, estuda-se a contaminação da corrente de levedura tratada da cuba sem a solução hidroalcoólica, em que as correntes foram estudadas de forma experimental e submetidas posteriormente a uma outra equação também baseada na diluição para corroborar a previsibilidade do sistema pelo modelo matemático elaborado. As correntes relativas podem ser visualizadas na Figura 20.

Figura 20. Correntes estudadas no cenário 3.



Fonte: (AUTORA, 2024)

Para os dados relativos ao creme de levedura, água de diluição e levedura tratada foram coletadas 15 amostras na saída de cada corrente e foi aplicado o método de diluição seriada e plaqueamento. Os valores da contaminação microbiológica estão exibidos na Tabela 17.

Tabela 17. Dados das correntes processuais do cenário 3.

Amostra	Água Bruta (UFC/ml)	Creme de Levedura (UFC/ml)	Levedura Tratada (UFC/ml)
1	$1,50 \times 10^3$	$3,62 \times 10^7$	$1,90 \times 10^7$
2	$1,57 \times 10^3$	$3,62 \times 10^7$	$1,89 \times 10^7$
3	$1,62 \times 10^3$	$3,66 \times 10^7$	$1,95 \times 10^7$
4	$1,63 \times 10^3$	$3,72 \times 10^7$	$1,97 \times 10^7$
5	$1,67 \times 10^3$	$3,72 \times 10^7$	$1,98 \times 10^7$
6	$1,67 \times 10^3$	$3,74 \times 10^7$	$2,00 \times 10^7$
7	$1,68 \times 10^3$	$3,75 \times 10^7$	$2,01 \times 10^7$
8	$1,68 \times 10^3$	$3,76 \times 10^7$	$1,99 \times 10^7$
9	$1,69 \times 10^3$	$3,77 \times 10^7$	$2,00 \times 10^7$
10	$1,70 \times 10^3$	$3,77 \times 10^7$	$2,01 \times 10^7$
11	$1,71 \times 10^3$	$3,82 \times 10^7$	$2,03 \times 10^7$
12	$1,72 \times 10^3$	$3,84 \times 10^7$	$2,04 \times 10^7$
13	$1,73 \times 10^3$	$3,84 \times 10^7$	$2,03 \times 10^7$
14	$1,74 \times 10^3$	$3,89 \times 10^7$	$2,07 \times 10^7$
15	$1,76 \times 10^3$	$3,94 \times 10^7$	$2,10 \times 10^7$
Média	$1,67 \times 10^3$	$3,76 \times 10^7$	$2,00 \times 10^7$

Fonte: (AUTORA, 2024)

Conforme a Tabela 17, o valor relativo à levedura tratada é de $2,00 \times 10^7$ UFC/ml, número contido dentro do limite de contaminação por corrente processual apresentado na Tabela 8 da revisão bibliográfica. Os volumes de cada corrente mostrada na Tabela 17 foram retirados dos balanços de massa da usina e estão representados na Tabela 18.

Tabela 18. Volumes das correntes de entrada e saída das cubas no cenário 3.

Correntes	Volume (m³)
Água Bruta	35
Levedura	40
Levedura Tratada	75

Fonte: (AUTORA, 2024)

Os valores das correntes da água de diluição, que é a água bruta, e creme de levedura da Tabela 17 e seus respectivos volumes mostrados na Tabela 18 foram inseridos na Equação 3, de forma a estimar a contaminação das cubas. Os resultados foram comparados com os dados obtidos experimentalmente da levedura tratada na Tabela 18 e esta comparação foi mostrada na Tabela 19.

Tabela 19. Contaminação da levedura tratada por análise experimental e cálculo.

Amostra	Contaminação da Levedura Tratada por Análise Experimental (UFC/ml)	Contaminação da Levedura Tratada por Cálculo (UFC/ml)
1	1,90 x 10 ⁷	1,93 x 10 ⁷
2	1,89 x 10 ⁷	1,93 x 10 ⁷
3	1,95 x 10 ⁷	1,95 x 10 ⁷
4	1,97 x 10 ⁷	1,98 x 10 ⁷
5	1,98 x 10 ⁷	1,99 x 10 ⁷
6	2,00 x 10 ⁷	2,00 x 10 ⁷
7	2,01 x 10 ⁷	2,00 x 10 ⁷
8	1,99 x 10 ⁷	2,00 x 10 ⁷
9	2,00 x 10 ⁷	2,01 x 10 ⁷
10	2,01 x 10 ⁷	2,01 x 10 ⁷
11	2,03 x 10 ⁷	2,04 x 10 ⁷
12	2,04 x 10 ⁷	2,05 x 10 ⁷
13	2,03 x 10 ⁷	2,05 x 10 ⁷
14	2,07 x 10 ⁷	2,07 x 10 ⁷
15	2,10 x 10 ⁷	2,10 x 10 ⁷
Média	2,00 x 10⁷	2,01 x 10⁷

Fonte: (AUTORA, 2024)

Analisando a Tabela 19 é perceptível, que a diferença entre a contaminação obtida experimentalmente ($2,00 \times 10^7$ UFC/ml) e a calculada ($2,01 \times 10^7$ UFC/ml) foi de 1×10^5 unidades formadoras de colônias por mililitro da corrente de levedura tratada. Pela proximidade dos valores, considerou-se que equação obteve uma previsão do comportamento relativo à contaminação da levedura tratada, que sai da cuba e então esta foi utilizada no estudo com a adição da solução hidroalcoólica, que corresponde ao próximo cenário de estudo.

4.4. Cenário 4 - Contaminação nas cubas com a solução hidroalcoólica

Para a avaliação do cenário 4, se tem a hipótese de contaminação da levedura tratada nas cubas com solução hidroalcoólica. Esse cenário não era a realidade processual da usina no momento da pesquisa, logo as correntes foram estimadas por um modelo matemático adequado e estão representadas na Figura 21.

Figura 21. Correntes estudadas no cenário 4.



Fonte: (AUTORA, 2024)

Neste estudo os volumes variam quando comparados ao cenário 3. A água bruta utilizada correspondia a 35 m^3 como mostrado na Tabela 18, porém com a adição da solução, o volume dessa corrente diminui para 25 m^3 devido aos 10 m^3 proveniente da coluna de absorção. Desse modo, ao inserir a solução hidroalcoólica, economiza-se água de diluição utilizada para o tratamento do fermento. Os volumes utilizados para avaliar o cenário 4 são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20. Volumes das correntes de entrada e saída das cubas no cenário 4.

Correntes	Volume (m³)
Água Bruta	25
Solução Hidroalcoólica	10
Levedura	40
Levedura Tratada	75

Fonte: (AUTORA, 2024)

Os dados coletados experimentalmente das correntes de água bruta e creme de levedura são os mesmos representados na Tabela 17, enquanto a contaminação da corrente de solução hidroalcoólica é mostrada na Tabela 21.

Tabela 21. Contaminação da corrente de solução hidroalcoólica.

Amostra	Solução Hidroalcoólica (UFC/ml)
1	$1,90 \times 10^4$
2	$8,21 \times 10^4$
3	$1,70 \times 10^4$
4	$1,74 \times 10^5$
5	$2,14 \times 10^5$
6	$8,92 \times 10^4$
7	$2,16 \times 10^5$
8	$9,30 \times 10^4$
9	$1,43 \times 10^5$
10	$1,97 \times 10^5$
11	$1,04 \times 10^5$
12	$6,23 \times 10^4$
13	$6,30 \times 10^4$
14	$6,62 \times 10^4$
15	$5,37 \times 10^4$
Média	$1,06 \times 10^5$

Fonte: (AUTORA, 2024)

Esses dados relativos as correntes de água bruta, creme de levedura e solução

hidroalcoólica contidos nas Tabelas 17 e 21 foram aplicados na Equação 4. Os valores de volume adotados para o cálculo referem-se aos da Tabela 20. Com isso, gerou-se uma previsão de qual seria o valor de contaminação da levedura tratada perante a adição da solução alcoólica e foi possível obter valores para elaboração da Tabela 22.

Tabela 22. Comparação entre contaminação microbiológica nos cenários 3 e 4.

Amostra	Contaminação da cuba no Cenário 3 (UFC/ml)	Contaminação da cuba no Cenário 4 (UFC/ml)
1	1,90 x 10 ⁷	1,93 x 10 ⁷
2	1,89 x 10 ⁷	1,93 x 10 ⁷
3	1,95 x 10 ⁷	1,95 x 10 ⁷
4	1,97 x 10 ⁷	1,99 x 10 ⁷
5	1,98 x 10 ⁷	1,99 x 10 ⁷
6	2,00 x 10 ⁷	2,00 x 10 ⁷
7	2,01 x 10 ⁷	2,00 x 10 ⁷
8	1,99 x 10 ⁷	2,00 x 10 ⁷
9	2,00 x 10 ⁷	2,01 x 10 ⁷
10	2,01 x 10 ⁷	2,01 x 10 ⁷
11	2,03 x 10 ⁷	2,04 x 10 ⁷
12	2,04 x 10 ⁷	2,05 x 10 ⁷
13	2,03 x 10 ⁷	2,05 x 10 ⁷
14	2,07 x 10 ⁷	2,08 x 10 ⁷
15	2,10 x 10 ⁷	2,10 x 10 ⁷
Média	2,00 x 10⁷	2,01 x 10⁷

Fonte: (AUTORA, 2024)

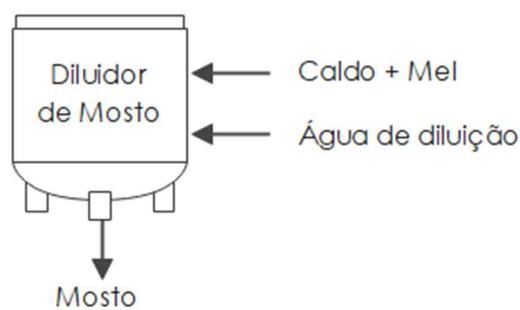
De acordo com Comparação entre contaminação microbiológica nos cenários 3 e 4 (Tabela 22), o valor médio da contaminação da corrente de levedura tratada com a inserção da solução hidroalcoólica foi de 2,01 x 10⁷ UFC/ml. Esse número está dentro do limite de contaminação por corrente processual apresentado na revisão bibliográfica (Tabela 8). A diferença entre este valor estimado por cálculo no cenário 4 (2,01 x 10⁷ UFC/ml) e o obtido experimentalmente no cenário 3 (2,00 x 10⁷ UFC/ml) é de 1 x 10⁵ UFC/ml, o que significa que a inserção da solução nas cubas de tratamento de fermento aumenta a quantidade de unidades formadoras de colônias, porém em um local que é

passível de tratamento para o controle bacteriano. Dessa maneira, o cenário 4 é vantajoso, porém faz-se necessário estudar se enviar a solução para o diluidor de mosto seria mais recomendado, ou seja, se o sistema teria uma contaminação menor, que se trata do estudo 6. Foi calculado a quantidade de dióxido de cloro necessário para tratar o aumento da contaminação nas cubas com a adição solução hidroalcoólica. Considerando a dosagem de 200 mg/L, uma vazão de 10m³/h e o valor do aumento contaminação da cuba (1 x 10⁵ UFC/ml), tem-se que a dosagem deste produto seria de 48 kg/dia. Com o valor do quilograma de R\$ 9,80 cotado com o fornecedor deste produto da usina, o gasto diário adicional ao processo em caso de necessidade de combate a infecção na cuba devido à solução adicionada seria de R\$ 470,40.

4.5. Cenário 5 - Contaminação no diluidor de mosto sem a solução hidroalcoólica

Para a avaliação do cenário 5, cujo objetivo é estudar o nível de contaminação no diluidor de mosto sem a solução hidroalcoólica, que era o cenário que ocorria na usina no momento do trabalho, as correntes foram estudadas de forma experimental e submetidas posteriormente a um modelo matemático baseado na diluição para corroborar a previsibilidade do sistema pelo modelo matemático. Foram realizadas amostragens das correntes relativas a Figura 22.

Figura 22. Correntes estudadas no cenário 5.



Fonte: (AUTORA, 2024)

Para os dados relativos à água bruta, caldo somado a mel e mosto foram coletadas 15 amostras na saída de cada corrente e foi aplicado o método de diluição seriada e plaqueamento. Os valores da contaminação microbiológica estão representados na Tabela 23.

Tabela 23. Dados das correntes processuais do cenário 5.

Amostra	Água Bruta (UFC/ml)	Caldo+Mel (UFC/ml)	Mosto (UFC/ml)
1	1,50 x 10 ³	5,85 x 10 ³	5,11 x 10 ³
2	1,57 x 10 ³	6,38 x 10 ³	5,56 x 10 ³
3	1,62 x 10 ³	5,87 x 10 ³	5,15 x 10 ³
4	1,63 x 10 ³	6,43 x 10 ³	5,63 x 10 ³
5	1,67 x 10 ³	5,71 x 10 ³	5,03 x 10 ³
6	1,67 x 10 ³	5,95 x 10 ³	5,22 x 10 ³
7	1,68 x 10 ³	5,53 x 10 ³	4,88 x 10 ³
8	1,68 x 10 ³	6,28 x 10 ³	5,40 x 10 ³
9	1,69 x 10 ³	5,68 x 10 ³	5,01 x 10 ³
10	1,70 x 10 ³	6,16 x 10 ³	5,41 x 10 ³
11	1,71 x 10 ³	6,13 x 10 ³	5,39 x 10 ³
12	1,72 x 10 ³	5,60 x 10 ³	4,95 x 10 ³
13	1,73 x 10 ³	5,76 x 10 ³	5,09 x 10 ³
14	1,74 x 10 ³	5,96 x 10 ³	5,26 x 10 ³
15	1,76 x 10 ³	6,37 x 10 ³	5,60 x 10 ³
Média	1,67 x 10³	5,98 x 10³	5,24 x 10³

Fonte: (AUTORA, 2024)

Segundo a Tabela 23, a contaminação relativa ao mosto que sai do diluidor é de $5,24 \times 10^3$ UFC/ml. Esse valor está dentro do limite de contaminação por corrente processual apresentado na Tabela 8 da revisão bibliográfica. Os volumes de cada corrente mostrada na Tabela 23 foram retirados dos balanços de massa da empresa tratada neste trabalho e estão representados na Tabela 24.

Tabela 24. Volumes das correntes do diluidor de mosto no cenário 5.

Correntes	Volume (m³)
Água Bruta	30
Caldo + Mel	150
Mosto	180

Fonte: (AUTORA, 2024)

Os valores das correntes da água bruta e de caldo somado a mel da Tabela 23 e

os volumes da Tabela 24 foram inseridos na Equação 5, de forma a estimar a contaminação do diluidor de mosto. Os resultados foram equiparados com os dados obtidos experimentalmente do mosto na Tabela 23 e esta comparação foi mostrada na Tabela 25.

Tabela 25. Contaminação no diluidor de mosto por análise experimental e cálculo.

Amostra	Contaminação no Diluidor de Mosto por Análise Experimental (UFC/ml)	Contaminação no Diluidor de Mosto por Cálculo (UFC/ml)
1	5,11 x 10 ³	5,12 x 10 ³
2	5,56 x 10 ³	5,58 x 10 ³
3	5,15 x 10 ³	5,16 x 10 ³
4	5,63 x 10 ³	5,63 x 10 ³
5	5,03 x 10 ³	5,04 x 10 ³
6	5,22 x 10 ³	5,24 x 10 ³
7	4,88 x 10 ³	4,89 x 10 ³
8	5,40 x 10 ³	5,51 x 10 ³
9	5,01 x 10 ³	5,02 x 10 ³
10	5,41 x 10 ³	5,42 x 10 ³
11	5,39 x 10 ³	5,40 x 10 ³
12	4,95 x 10 ³	4,95 x 10 ³
13	5,09 x 10 ³	5,09 x 10 ³
14	5,26 x 10 ³	5,26 x 10 ³
15	5,60 x 10 ³	5,60 x 10 ³
Média	5,24 x 10³	5,26 x 10³

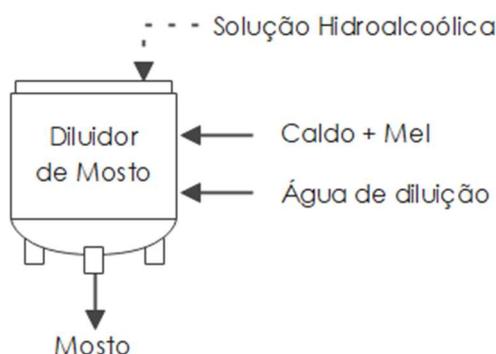
Fonte: (AUTORA, 2024)

Conforme a Tabela 25, a diferença entre a média do dado obtido experimentalmente (5,24 x 10³ UFC/ml) e o calculado (5,26 x 10³ UFC/ml) foi de 20 UFC/ml. Pela proximidade dos valores, considerou-se que equação obteve uma previsão do comportamento relativo à contaminação no diluidor de mosto e, dessa forma, poderia ser utilizada também no estudo com a adição da solução hidroalcoólica, que corresponde ao cenário 6.

4.6. Cenário 6 - Contaminação no diluidor de mosto com a solução hidroalcoólica

Para a avaliação do cenário 6, estuda-se a hipótese de contaminação no diluidor de mosto com solução hidroalcoólica. Esse cenário não era a realidade processual da usina no momento da pesquisa, logo as correntes foram estimadas por uma equação e estão representadas na Figura 23.

Figura 23. Correntes estudadas no cenário 6.



Fonte: (AUTORA, 2024)

Neste estudo os volumes variam quando comparados ao cenário 5. A água bruta usada para diluir o caldo com mel correspondia a 30 m^3 , porém com a adição da solução, o volume dessa corrente diminui para 20 m^3 devido aos 10 m^3 advindos da torre de absorção. Dessa forma, ao inserir a solução hidroalcoólica, economiza-se água de diluição do mosto. Os volumes relativos utilizados para avaliar o cenário 6 são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26. Volumes das correntes do diluidor de mosto no cenário 6.

Correntes	Volume (m^3)
Água Bruta	20
Solução Hidroalcoólica	10
Caldo + Mel	150
Mosto	180

Fonte: (AUTORA, 2024)

Os dados coletados experimentalmente das correntes de água bruta e caldo somado a mel são os mesmos utilizados no cenário anterior na Tabela 23, enquanto os

relativos à solução hidroalcoólica estão na Tabela 21. Todos esses dados foram aplicados na Equação 6. Os valores de volume adotados para o cálculo se referem aos da Tabela 26. Com isso, gerou-se uma previsão de qual seria o valor de contaminação do mosto que sairia do diluidor perante a adição da solução alcoólica e foi possível obter valores para elaboração da Tabela 27.

Tabela 27. Comparação entre contaminação microbiológica nos cenários 5 e 6.

Amostra	Contaminação do diluidor de mosto no Cenário 5 (UFC/ml)	Contaminação do diluidor de mosto no Cenário 6 (UFC/ml)
1	$5,11 \times 10^3$	$6,10 \times 10^3$
2	$5,56 \times 10^3$	$1,01 \times 10^4$
3	$5,15 \times 10^3$	$6,02 \times 10^3$
4	$5,63 \times 10^3$	$1,52 \times 10^4$
5	$5,03 \times 10^3$	$1,68 \times 10^4$
6	$5,22 \times 10^3$	$1,01 \times 10^4$
7	$4,88 \times 10^3$	$1,68 \times 10^4$
8	$5,40 \times 10^3$	$1,06 \times 10^4$
9	$5,01 \times 10^3$	$1,29 \times 10^4$
10	$5,41 \times 10^3$	$1,63 \times 10^4$
11	$5,39 \times 10^3$	$1,11 \times 10^4$
12	$4,95 \times 10^3$	$8,32 \times 10^3$
13	$5,09 \times 10^3$	$8,50 \times 10^3$
14	$5,26 \times 10^3$	$8,84 \times 10^3$
15	$5,60 \times 10^3$	$8,49 \times 10^3$
Média	$5,24 \times 10^3$	$1,11 \times 10^4$

Fonte: (AUTORA, 2024)

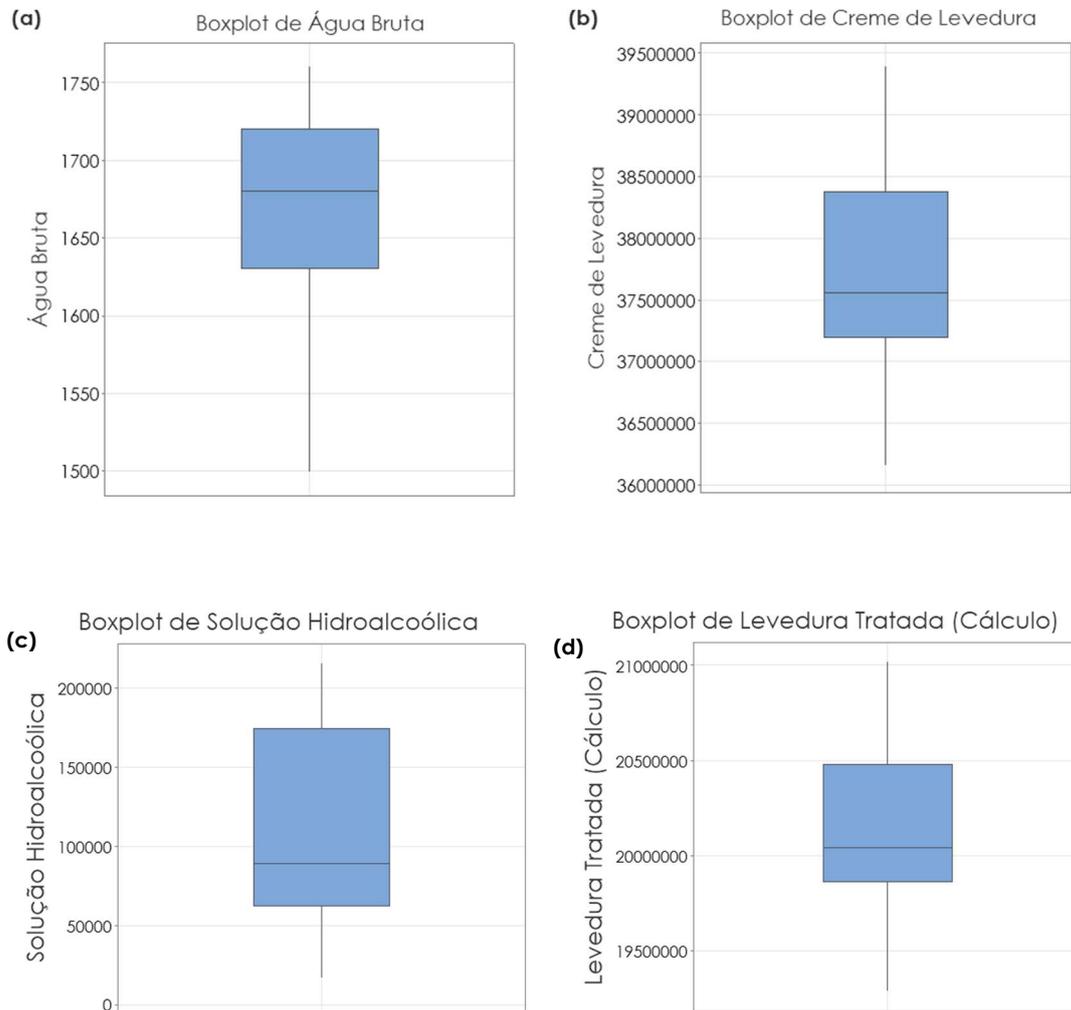
Os dados apresentados na Tabela 27, mostram, que valor médio da contaminação no diluidor de mosto com a inserção da solução foi de $1,11 \times 10^4$ UFC/ml. Esse número não está dentro do limite de contaminação por corrente processual apresentado na Tabela 8 da revisão bibliográfica. A diferença entre este valor e o obtido experimentalmente no cenário 5 ($5,24 \times 10^3$ UFC/ml) é de $5,86 \times 10^3$ UFC/ml, o que significa que a inserção da solução no diluidor de mosto aumenta a contaminação, sem a possibilidade de tratamento nesse cenário, sendo então um cenário prejudicial para a produção.

4.7. Comparação dos cenários

Com relação aos cenários 1 e 2, que tratam do grau alcoólico do vinho, foi demonstrado pelos cálculos que a contexto mais vantajoso é o 2, ou seja, desviar a solução hidroalcoólica da dorna volante. A justificativa foi que o aumento do °GL diminui o consumo de vapor do processo, pois uma quantidade de água é retirada do sistema, e isso é positivo pelo fato do sistema de destilação da usina ter uma deficiência da quantidade de vapor necessária. Além disto, também há o ganho de capacidade relativo à possibilidade de se destilar mais etanol em detrimento da solução hidroalcoólica. Esse aumento máximo na produção que pode chegar até 612 L/h de etanol representa 14.688 L/dia do biocombustível, um aumento de 3,48% da capacidade de produção diária total. Considerando uma média do valor do litro de etanol hidratado, isso gera um montante de cerca de R\$29.000,00 de etanol por dia com o desvio da solução hidroalcoólica da dorna volante.

Nos cenários 3 e 4, que estudaram a contaminação microbiológica na cuba, obteve-se como resultado, que a adição da solução hidroalcoólica no sistema aumentaria o valor da contaminação, porém em uma escala muito baixa comparada ao nível de contaminação já existente na cuba sem a solução. Portanto, a contaminação no cenário 4 estaria na faixa aceitável para a corrente de saída da cuba conforme Tabela 8, não oferecendo prejuízos ao sistema. Para um melhor entendimento de como a contaminação na saída das cubas está correlacionada com as correntes de entrada do quarto estudo, foi realizado uma análise estatística. Para detecção da presença de *outliers*, o boxplot de água bruta, creme de levedura, solução hidroalcoólica e levedura tratada foram feitos (Figura 24). É importante mencionar, que o boxplot tem como finalidade detectar outliers, ou seja, valores discrepantes nas amostras.

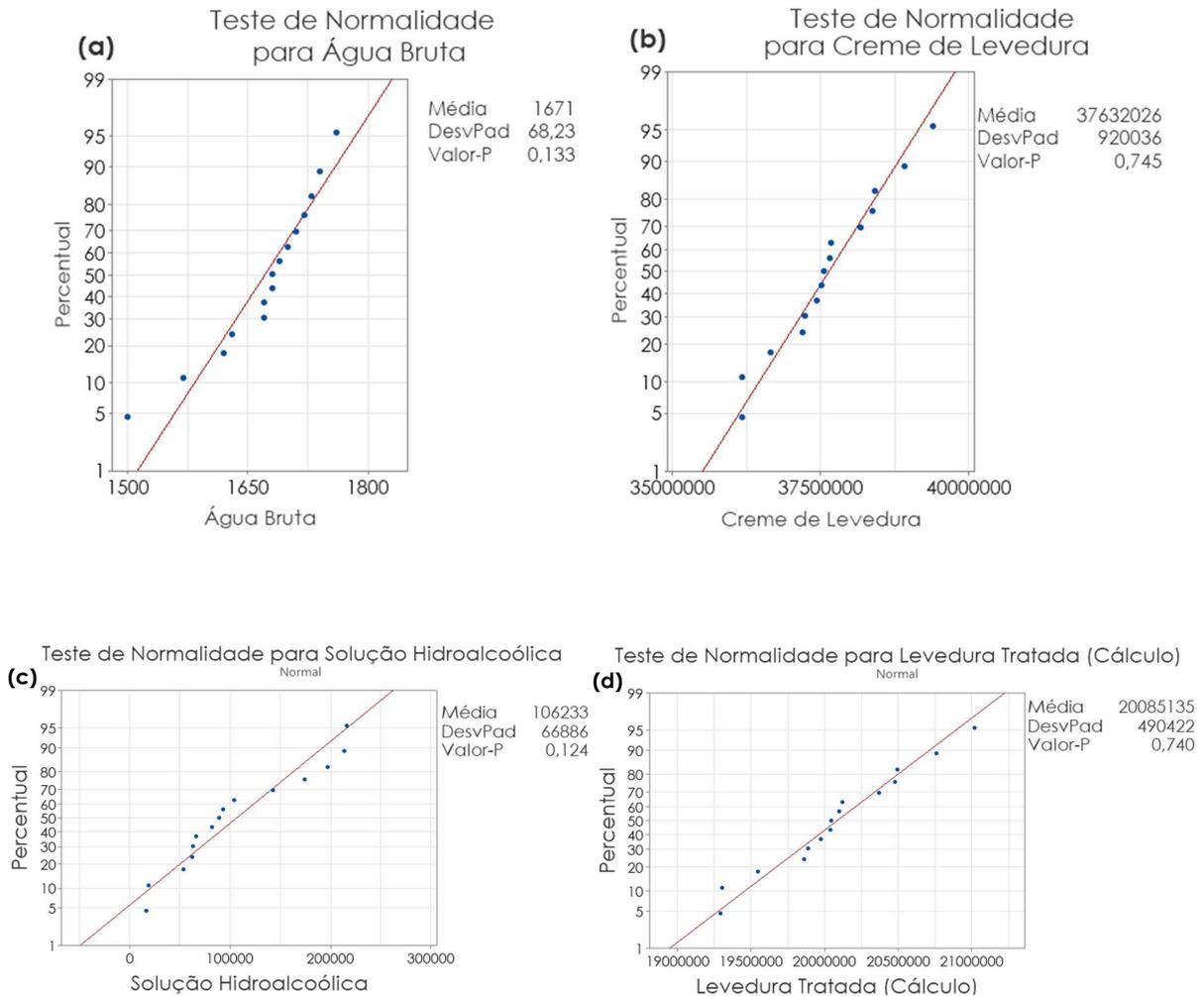
Figura 24. Boxplot das correntes do cenário 4.



Fonte: (AUTORA, 2024)

De acordo com a Figura 24 não há presença de outliers nos dados, logo foi possível seguir para os testes de normalidade, apresentados na Figura 25.

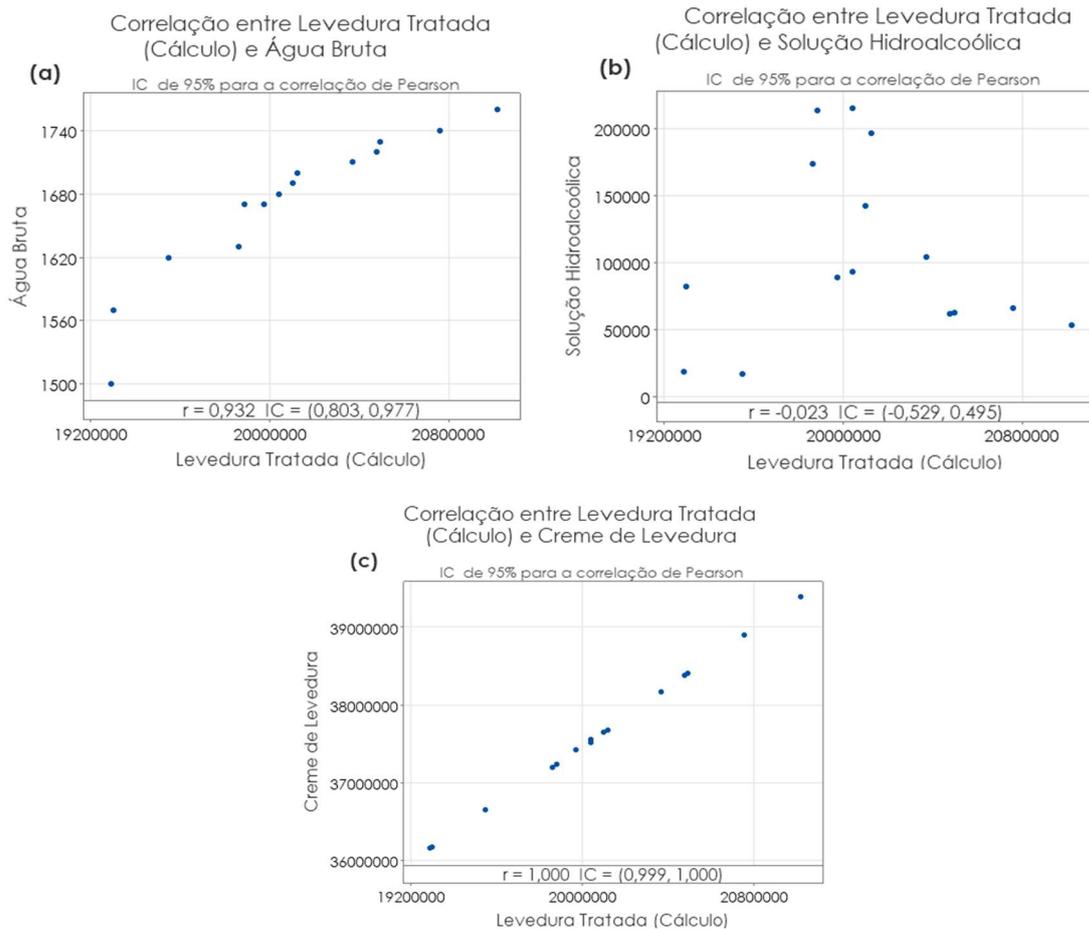
Figura 25. Teste de Normalidade das correntes do cenário 4.



Fonte: (AUTORA, 2024)

O valor p é uma medida contínua da compatibilidade entre os dados e todo o modelo utilizado para o seu cálculo e por ser maior que 0,05 indica que a distribuição dos dados é normal, o que significa que os dados seguem um padrão. Portanto, foi possível aplicar a correlação de Pearson, exibida na Figura 26.

Figura 26. Correlação de Pearson das correntes do cenário 4.

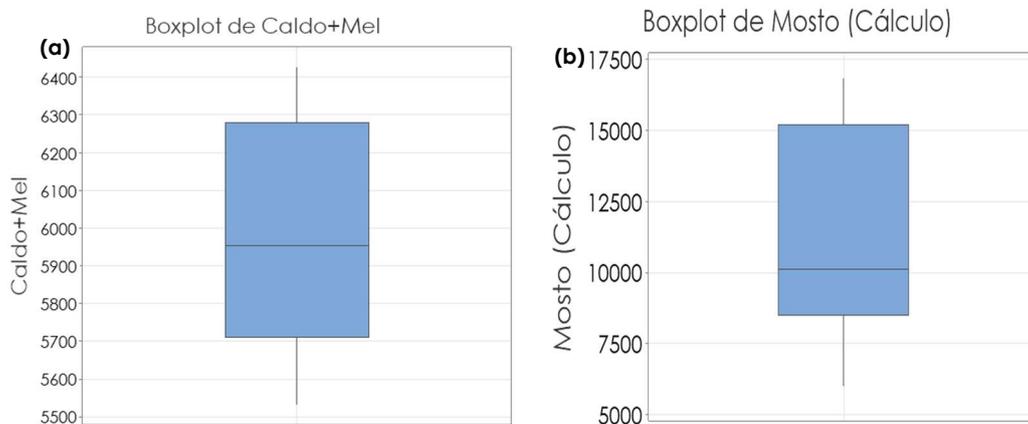


Fonte: (AUTORA, 2024)

O coeficiente de Pearson (r) entre levedura tratada, que é a saída da cuba, e água bruta foi de 0,932, indicando uma forte correlação entre as correntes de acordo com a Tabela 10 da revisão bibliográfica. O valor de -0,023 foi encontrado como correlação entre a levedura que sai do sistema e a solução hidroalcoólica, classificada como nula. Por fim, o coeficiente relativo à levedura tratada e ao creme de levedura que entra na cuba é de 1, mostrando uma correlação denominada como perfeita. Com essa análise, a corrente de entrada na cuba que teve a correlação mais forte com a contaminação na saída foi o creme de levedura, ou seja, o fermento que está entrando no reservatório para o tratamento. Isso revelou que a solução hidroalcoólica não é a corrente de maior relação com a contaminação da cuba. Dessa forma, o cenário 4 indicou ser o mais vantajoso, corroborando os resultados anteriores, que a solução hidroalcoólica deveria ser enviada para as cubas de tratamento de fermento.

Já os cenários 5 e 6, onde foi estudada a contaminação microbiológica no diluidor de mosto, o resultado mostrou que a adição da solução hidroalcoólica no sistema aumentaria o valor da contaminação em cerca de duas vezes. Portanto, a contaminação no cenário 6 não estaria na faixa desejada para a corrente de saída do diluidor de mosto conforme Tabela 8, oferecendo prejuízos ao sistema. Para um melhor entendimento de como a contaminação na saída do diluidor de mosto está correlacionada com as correntes de entrada do sexto estudo, faz-se o uso da análise estatística. Para detecção da presença de *outliers*, foi feito boxplot de caldo somado a mel e mosto (Figura 27). O boxplot relativo à água bruta pode ser visualizado na Figura 24 (a)

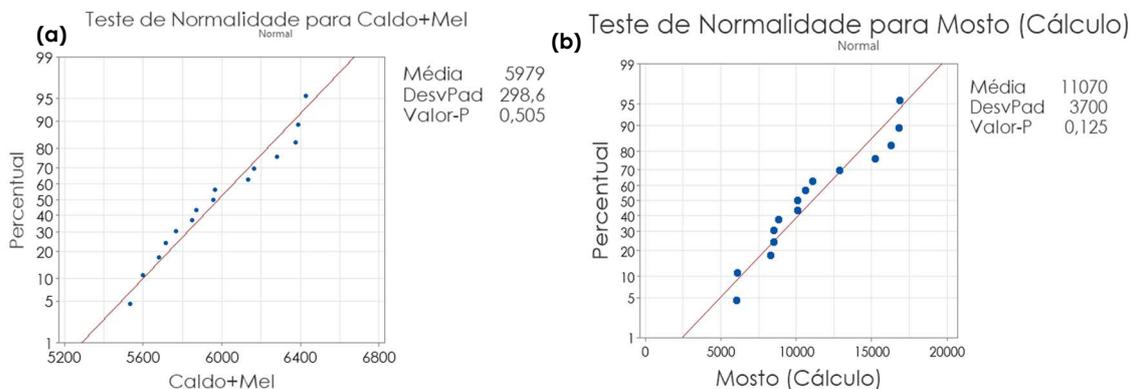
Figura 27. Boxplot das correntes do cenário 6.



Fonte: (AUTORA, 2024)

Segundo a Figura 27 não há presença de outliers nos dados, portanto, foi possível seguir para os testes de normalidade, apresentados na Figura 28. O teste para água bruta está sendo exibido na Figura 25 (a).

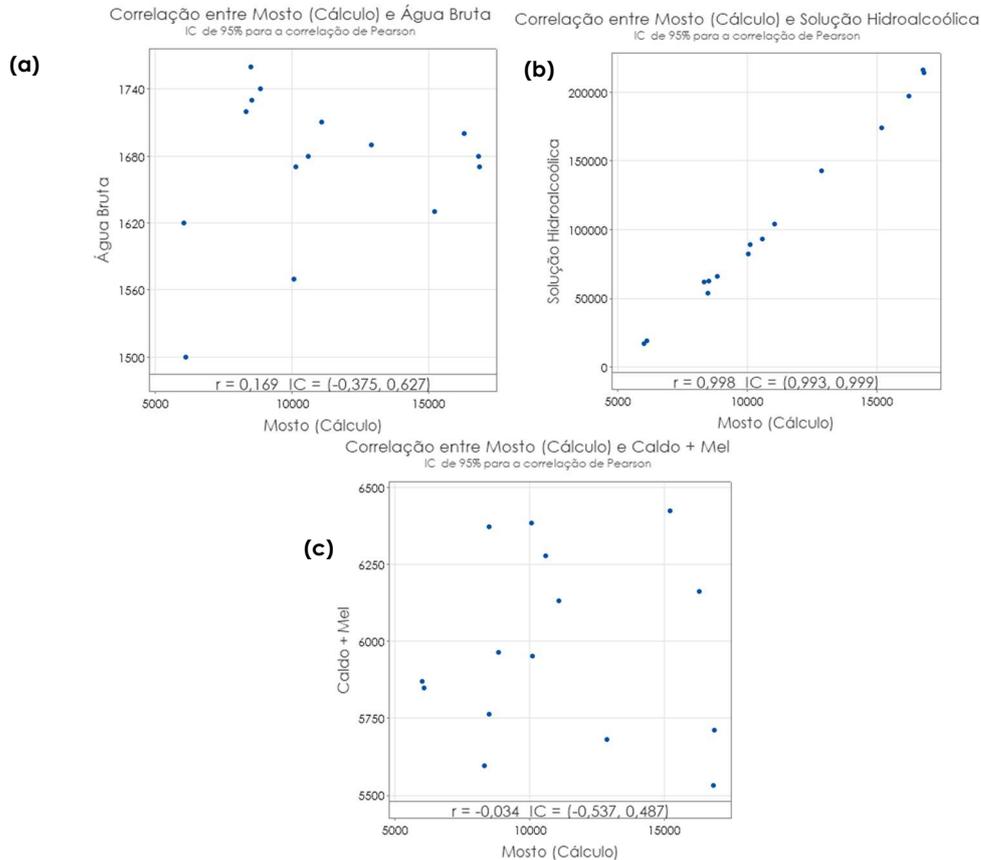
Figura 28. Teste de Normalidade das correntes do cenário 6.



Fonte: (AUTORA, 2024)

Com o valor $p > 0,05$, há o indicativo que a distribuição dos dados é normal. Portanto, foi possível aplicar a correlação de Pearson, mostrada na Figura 29.

Figura 29. Correlação de Pearson das correntes do cenário 6.



Fonte: (AUTORA, 2024)

O coeficiente de Pearson (r) entre mosto e água bruta foi de 0,169, indicando uma correlação fraca; entre mosto e solução hidroalcoólica foi de 0,998, ou seja, correlação muito forte; e entre mosto e corrente de caldo com mel foi de -0,034, classificada como nula. Com essa análise, a corrente de entrada no diluidor de mosto que tem é a correlação mais forte com contaminação na saída é a solução hidroalcoólica, ou seja, o mosto na saída do sistema tem seu valor de contaminação atrelado com a solução hidroalcoólica. Esse fato diverge do cenário 4, em que a solução diluída não era a corrente de maior correlação com a contaminação presente na saída da cuba. Desse modo, o cenário 6 se manifestou como mais prejudicial, confirmando, que a solução hidroalcoólica não deveria ser enviada para o diluidor de mosto, corroborando como vantajoso direcionar para as cubas de tratamento de fermento de modo demonstrado no cenário 4.

4.8. Aplicação dos estudos

Como o cenário 2 indicou a solução hidroalcoólica necessitaria ser desviada da dorna volante e o cenário 4 mostrou que as cubas deveriam receber esta corrente advinda da coluna de absorção, a solução hidroalcoólica foi redirecionada para as cubas de tratamento de fermento na usina localizada no MS. Durante as semanas anteriores e seguintes foram realizadas análises de plaqueamento para analisar o comportamento da contaminação, sendo os dados mostrados na Tabela 28

Tabela 28. Dados de contaminação nas cubas.

Período	Contaminação nas Cubas
Antes do redirecionamento	$2,01 \times 10^7$
Antes do redirecionamento	$1,85 \times 10^7$
Antes do redirecionamento	$1,89 \times 10^7$
Depois do redirecionamento	$1,95 \times 10^7$
Depois do redirecionamento	$2,01 \times 10^7$
Depois do redirecionamento	$1,87 \times 10^7$

Fonte: (AUTORA, 2024)

A contaminação calculada no cenário 4 para a corrente de saída da cuba foi de $2,01 \times 10^7$ UFC/ml, valor condizente com os dados reais de como o sistema se comportou após a mudança apresentados na Tabela 28. Dessa maneira, é possível concluir que a estimativa de cálculo do cenário 4 foi satisfatória. É importante salientar, que os dados desta tabela são relativos ao tratamento do fermento apenas com ácido sulfúrico e nutrientes, sem a dosagem de dióxido de cloro. Por fim, o vinho que saia da dorna volante aumentou em $0,28$ °GL após o desvio da solução hidroalcoólica na data da mudança do redirecionamento e tal fato foi constatado pelo boletim industrial. Esse valor também foi condizente com o calculado de $0,30$ °GL.

5. CONCLUSÃO

Comparando os cenários 1 e 2 estudados, o segundo apresentou melhor desempenho, visto que obteve um aumento do °GL do vinho e conseqüentemente ocorreu a diminuição do consumo de vapor na coluna de destilação. Outra consequência associada a mudança da retirada da solução alcoólica da dorna volante segundo o cenário 2, foi o ganho de capacidade da produção diária total de álcool de até 3,48%. Desse modo, a usina passou a ter a possibilidade de uma maior produção diária de álcool hidratado.

Na avaliação dos cenários 3 e 4, a adição da solução hidroalcoólica nas cubas de tratamento, ou seja, o quarto cenário mostrou-se mais vantajoso, uma vez que não houve um aumento expressivo na contaminação. Os testes realizados na usina comprovaram os resultados, pois os valores de contaminação da levedura com a mudança se mantiveram na mesma faixa de quando não recebiam a solução ($2,00 \times 10^7$ UFC/ml), como previsto pelos cálculos.

A partir dos estudos dos cenários 5 e 6 foi constatado que o diluidor de mosto não deve receber a solução proveniente da coluna de absorção, pois com a adição desta o sistema iria aumentar a contaminação e extrapolar o limite de contaminação aceitável, que é de 10^4 UFC/ml.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, F. M. **Processo de Fabricação do Açúcar**. 3º ed., Editora Universitária da UFPE. Recife, 2011.

AMORIM, H. V.; LEAO, R. M. **Fermentação Alcoólica: Ciência e Tecnologia**. Piracicaba: Fermentec, 1996. 433 p. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001450127>. Acesso em: 20 jun 2024.

ARAÚJO, F. A. D. **Intensificação do processo de purificação do caldo da cana-de-açúcar por decantação química e adsorção**. Recife, 2017. Tese de Doutorado – Engenharia Química. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/28385>. Acesso em: 06 mai. 2024.

BASSO, L. C.; AMORIM, H. V.; OLIVEIRA, A. J.; LOPES, M. L. **Yeast selection for fuel ethanol production in Brazil**. FEMS Yeast Research., v. 8, n. 7, p. 1155-1163, 2008. Disponível em: <https://academic.oup.com/femsyr/article/8/7/1155/493485>. Acesso em: 22 jun 2024.

BASTOS, V. D. **Etanol, alcoolquímica e biorrefinarias**. BNDS Setorial, Rio de Janeiro, 25, p. 5-38, 2007. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2527>. Acesso em: 20 jun 2024.

BATISTA, F. R. M. **Estudo do processo de destilação alcoólica contínua: Simulação de Plantas Industriais de Produção de Álcool Hidratado, Álcool Neutro e Cachaça**. Campinas, 2008. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Alimentos). Disponível em: <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/1328038?show=full>. Acesso em: 18 mai 2024.

BECKNER, M.; IVEY, M. L.; PHISTER, T. G. **Microbial contamination of fuel ethanol fermentations**. Letters in Applied Microbiology, v. 53, n. 4, p. 387-394, 2011. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21770989/>. Acesso em: 12 jun 2024.

BIRD R. B., STEWART W. E., LIGHTFOOT E. N. **Transport Phenomena**. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969. Disponível em:

<https://archive.org/details/transportphenome0002bird/page/n3/mode/2up>. Acesso em: 22 abr 2024.

BLYTH, S. **Karl Pearson and the Correlation Curve**. 1994. International Statistical Review. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1403769>. Acesso em: 22 jun 2024.

BORGES, P. C. S. **Otimização dinâmica da fermentação alcoólica no processo em batelada alimentada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/15105/1/Patricia.pdf>. Acesso em: 16 mai. 2024.

BRASIL. Resolução ANP Nº 907, de 18 de novembro de 2022 - DOU de 23-11-2022. **Dispõe sobre as especificações do etanol combustivel e suas regras de comercialização em todo o território nacional**. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-907-2022>. Acesso em: 06 jun 2024.

BREMM, T. **Enriquecimento de biogás: modelagem da absorção de CO₂ utilizando água como solvente**. 2016. Cerro Largo. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental). Disponível em: <https://rd.uffs.edu.br/bitstream/prefix/613/1/BREMM.pdf>. Acesso em: 10 jun 2024.

BREXO, R. P.; SANTANA, A. S. **Impact and significance of microbial contamination during fermentation for bioethanol production**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 73, p. 423-434, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117301624> Acesso em: 12 jun 2024.

CALDAS, C. S. **Escurecimento do açúcar branco: influência do processo e do tempo de armazenamento**. Recife, 2012. Tese de Doutorado. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/9069>. Acesso em: 6 mai.2024.

CARVALHO, João Carlos Monteiro de e SATO, Sunao. **Fermentação descontínua**. Biotecnologia industrial: engenharia bioquímica. Tradução. São Paulo: Edgard Blücher,

2001. v. 2. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001222316>. Acesso em: 22 jun 2024.

CEBALLOS-SCHIAVONE, C. H. M. **Tratamento térmico do caldo de cana-de-açúcar visando a redução de contaminantes bacterianos - Lactobacillus na produção de etanol e eficiência de tratamento do fermento por etanol**. 2009. 177 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Escola Superior de agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil, 2009. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11141/tde-09112009-144530/pt-br.php>. Acesso em: 22 jun 2024.

CECCATO-ANTONINI, S. R. **Conventional and nonconventional strategies for controlling bacterial contamination in fuel ethanol fermentations**. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v.34, n. 6, p. 80, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11274-018-2463-2>. Acesso em: 22 jun 2024.

COSTA, M. A. S. **Efeito do sistema de fermentação, da adição de etanol ao tratamento ácido e da contaminação por Lactobacillus sp na produção de etanol**. 2017. 91 f. Dissertação (Mestrado em em produção vegetal e associados bioprocessos) – Universidade Federal de São Carlos, Araras, SP, Brasil. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/9342>. Acesso em: 21 jun 2024.

COUTINHO, T. C. H. P. **Avaliação da viabilidade financeira da implantação de sistema de recuperação de etanol evaporado na fermentação alcoólica em destilaria autônoma**. 2015. Marília. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção). Disponível em: <https://aberto.univem.edu.br/handle/11077/1457>. Acesso em: 10 jun 2024.

CREMASCO, M. A. **Fundamentos de Transferência de Massa**. 2.ed. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2002. Disponível em: https://www.academia.edu/32904253/Funtamentos_de_transfer%C3%AAncia_de_massa_Cremasco. Acesso em: 10 jun 2024.

FACCIOTTI, M.C.R. **Biotecnologia Industrial – Engenharia Bioquímica**. In:

Schimidell, W.; Lima, U.A.; Aquarone, E.; Borzani, W. vol 2. Disponível em: https://www.academia.edu/31932965/Biotecnologia_Industrial_Vol_2_Willibaldo_Schimidell?auto=download. Acesso em: 16 mai. 2024.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. 3ª Edição. 2011.

FERRO, J. V. **Modelagem, simulação, controle e otimização de processo de fermentação alcoólica da *Saccharomyces cerevisiae***. Maceió, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/123456789/11888>. Acesso em: 17 mai. 2024.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. **Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r)***. Revista Política Hoje, Vol. 18, n. 1, 2009. Disponível em: https://dirin.s3.amazonaws.com/drive_materias/1666287394.pdf. Acesso em: 23 jun 2024.

FONSECA, G. C. **Modelagem e simulação de uma destilaria autônoma de produção de etanol de primeira geração (E1G)**. 2014. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4136>. Acesso em: 20 jun 2024.

FRANCISCO, B. H. **Manual de Produção Açucareira**. 2020. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/541874736/Manual-de-ProduA-A-o-AA-ucareira-Bruno-Francisco-Ebook>. Acesso em: 20 jun 2024.

FURLAN, F.F., C.B.B. COSTA, G.C. FONSECA, R.P. SOARES, A.R. SECCHI, A.J.G. CRUZ, et al. **Assessing the production of first and second generation bioethanol from sugarcane through the integration of global optimization and process detailed modeling**. Computers and Chemical Engineering. p 1–9. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0098135412001032>. Acesso em: 20 jun 2024.

GARCIA, J. R.; LIMA, D. A. L.; VIEIRA, A. C. P. **A nova configuração da estrutura produtiva do setor sucroenergético brasileiro: panorama e perspectivas.** Revista de Economia Contemporânea, v. 19, n. 1, p. 162-184, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rec/a/WzZQQ7GzZZfpTNzT3PBSPjz/>. Acesso em: 15 jul 2024.

GODOY, A.; AMORIM, H. V.; LOPES, M. L.; OLIVEIRA, A. J. **Continuous and batch fermentation processes: advantages and disadvantages of these processes in the Brazilian ethanol production.** International Sugar Journal. 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/289874380_Continuous_and_batch_fermentation_processes_Advantages_and_disadvantages_of_these_processes_in_the_Brazilian_ethanol_production. Acesso em: 20 jun 2024.

KWIATKOWSKI, JASON R., ANDREW J. MCALOON, FRANK TAYLOR, DAVID B. JOHNSTON. **Modeling the Process and Costs of Fuel Ethanol Production by the Corn Dry-grind Process.** Industrial Crops and Products. 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669005000944>. Acesso em: 23 jun 2024.

LIMA, L. da R.; MARCONDES, A. de A. **Álcool Carburante Uma Estratégia Brasileira.** 67. ed. Curitiba: Ed. UFPR, 2002.

LIMA, U. A.; BASSO, L. C.; AMORIM, H. V. **Produção de etanol.** In: Lima, U. A. et al. (coord.). Biotecnologia Industrial: Processos Fermentativos e Enzimáticos. São Paulo, Edgar Blücher, p.3: 1 – 43,2001.

LOPES, M. L.; PAULILLO, S. C. L.; GODOY, A.; CHERUBIN, R. A.; LORENZI, M. S.; GIOMETTI, F. H. C.; BERNARDINO, C. D.; NETO, H. B. A.; AMORIM, H. V. **Ethanol production in Brazil: a bridge between Science and industry.** *Brazilian Journal of Microbiology.* v. 47, n. 1, p. 64-76, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1517838216310346>. Acesso em: 10 jun 2024.

LUCARINI, A.C.; SILVA, L.A. da; BIANCHI, R.A.C. **Um sistema para contagem semi automática de microorganismos.** Revista pesquisa e tecnologia FEI, São Bernardo

do Campo, v. 26, p. 36-40, 2004. Disponível em: <https://fei.edu.br/~rbianchi/publications/RevistaFEI2004-a.pdf>. Acesso em: 23 jun 2024.

LUCENA, B. T.; DOS SANTOS, B. M.; MOREIRA, J. L.; MOREIRA, A. P. B.; NUNES, A. C.; AZEVEDO, V.; MIYOSHI, A.; THOMPSON, F. L.; DE MORAIS, M. A *et al.* **Diversity of lactic acid bacteria of the bioethanol process.** BMC Microbiology, v. 10, n.1, p.298, 2010. Disponível em: <https://bmcmicrobiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/1471-2180-10-298>. Acesso em: 22 jun 2024.

MADALENO, L. L.; ARMOA, M. H.; SALAIJO, M. C. F. **Controle da contaminação na água de diluição usada na preparação de mosto de melão.** Ciência & Tecnologia, v. 11, n. 1, p. 5-14, 2019. Disponível em: <https://publicacoes.fatecjaboticabal.edu.br/citec/article/view/7>. Acesso em: 15 jun 2024.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **SAPCANA - Sistema de Acompanhamento da Produção Canavieira. Acompanhamento da Produção.** 2022. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/acompanhamento-da-producao-sucroalcooleira/arquivos-2023-2024/Acompanhamentodaproduo2324_010424_2.PDF. Acesso em: 15 jul 2024.

MARQUINI, M. F. et al. **Simulação e análise de um sistema industrial de colunas de destilação de etanol.** Acta Sci. Technol, v.29, p 23-28, 2007. Disponível em: https://www.academia.edu/57008434/Simula%C3%A7%C3%A3o_e_an%C3%A1lise_de_um_sistema_industrial_de_colunas_de_destila%C3%A7%C3%A3o_de_etanol. Acesso em: 20 jun 2024.

MATOS, D. A. S. M.; RODRIGUES, E. C. **Análise Fatorial.** Brasília – DF. Enap. 2019. 74 p. Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/4790/1/Livro%20An%c3%a1lise%20Fatorial.pdf>. Acesso em: 22 jun 2024.

MCCABE, W. L.; SMITH J.C.; HARRIOTT P. **Unit Operations of Chemical Engineering.** Fifth Edition. McGraw Hill. Disponível em:

https://www.academia.edu/8444514/Unit_Operations_Of_Chemical_Engineering_5th_Ed_Mc_Cabe_And_Smith. Acesso em: 12 jun 2024.

MENEGHIN, S. P.; REIS, F. C.; ALMEIDA, P. G.; CECCATO-ANTONINI, S. R. **Chlorine dioxide against bacteria and yeasts from the alcoholic fermentation.** Brazilian Journal of Microbiology, v. 39, n. 2, p. 337-343, 2008. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24031227/#:~:text=This%20work%20aimed%20to%20verify%20the%20effect%20of,as%20its%20effect%20on%20the%20industrial%20yeast%20inoculum>. Acesso em: 22 jun 2024.

MIRANDA, R. O. **Desenvolvimento do meio de cultura Rafinose-Propionato Mupirocina de Lítio, seletivo para bifidobactérias, e avaliação de sua associação com o Petrifilm™ Aerobic Count.** 2013. 66f. Dissertação (Mestrado em Medicina Veterinária) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2013. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/20270/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 22 jun 2024.

MONGELO, A. I. **Validação de Método Baseado em Visão Computacional para Automação da Contagem de Viabilidade de Leveduras em Indústrias Alcooleiras.** Campo Grande - Mato Grosso do Sul. 2012. Dissertação de Mestrado em Biotecnologia. Disponível em: <http://www.gpec.ucdb.br/pistori/orientacoes/dissertacoes/arnaldo2012.pdf>. Acesso em: 23 jun 2024.

NAGHSHBANDI, M. P.; TABATABAEI, M.; AGHBASHLO, M.; GUPTA, V. K.; SULAIMAN, A.; KARIMI, K.; MOGHIMI, H.; MALEKI, M. **Progress toward improving ethanol production through decreased glycerol generation in *Saccharomyces cerevisiae* by metabolic and genetic engineering approaches.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 115, p. 109353, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119305611>. Acesso em: 20 jun 2024.

OLIVEIRA, B. G.; CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C.; FEIGL, B. J. **Fluxos de gases de efeito estufa no solo provenientes da aplicação de vinhaça em**

áreas brasileiras de cana-de-açúcar. Geoderma, v. 200–201, junho de 2014, p. 77-84. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11138/tde-08022011-151022/pt-br.php>. Acesso em: 15 jul 2024.

PATIL, A. G., KOOLWAL, S. M., BUTALA, H. D. 2002. **Fusel oil: composition, removal and potential utilization.** International Sugar Journal, vol. 104, p 51-63, 2002. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/289443589_Fusel_oil_Composition_removal_and_potential_utilization. Acesso em: 20 jun 2024.

PAYNE, J. H. Operações unitárias na produção de açúcar de cana. São Paulo: Nobel/Stab, 1989. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/519236358/Operacoes-unitarias-na-producao-de-acucar-de-cana-John-Howard-Payne>. Acesso em: 20 jun 2024.

PORTO, L. M. **Modelagem de processo industrial de fermentação alcoólica contínua com reatores de mistura ligados em série.** Campinas, 2005. (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <https://revistas.unibh.br/dcet/article/view/2203#:~:text=A%20fermenta%C3%A7%C3%A3o%20ocorre%20em%20bioreatores%20e%20pode%20ser,uma%20usina%20aut%C3%B4noma%20localizada%20no%20munic%C3%ADpio%20de%20Linhares-ES..> Acesso em: 17 mai. 2024.

PRATI, P.; CAMARGO, G. A. **Características do caldo de cana e sua influência na estabilidade da bebida.** Revista Brasileira De Engenharia De Biosistemas. v.2, n.1, p. 37-44. 2008. Disponível em: <https://seer.tupa.unesp.br/index.php/BIOENG/article/download/50/51/105>. Acesso em: 03 mai. 2024.

RAVANELI, G. C.; GARCIA, D. B.; MADALENO, L. L.; MUTTON, M. A.; STUPIELLO, J. P.; MUTTON, M. J. R. **Spittlebug impacts on sugarcane quality and ethanol production.** Pesquisa Agropecuaria Brasileira, v. 46, n. 2, p. 120-129, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/KCP6vf7HsdhZRPZYRhyP5jK/>. Acesso em: 15 jun 2024.

REBELATO, M. G. *et al.* **Análise da Viabilidade econômica de uma planta para captura de CO₂ na indústria alcooleira.** Revista Gestão e Tecnologia, v. 12, n. 2, p. 64-88, 2012. Disponível em: <https://revistagt.fpl.emnuvens.com.br/get/article/view/387>. Acesso em: 10 jun 2024.

RIDESA. Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético. **50 anos de variedade RB de cana-de-açúcar.** Curitiba, 2021. Disponível em: https://www.ridesa.com.br/_files/ugd/242756_f3e42975bd9a42589327663cde52e255.pdf. Acesso em: 03 mai. 2024.

SANTOS, F. C. **Métodos de monitoramento de fermentação alcoólica.** 2022. Trabalho de Graduação - Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/16765>. Acesso em: 22 jun 2024.

SILVA, N., JUNQUEIRA, V., SILVEIRA, N. **Contagem total de microorganismos Mesófilos, Aeróbios Psicrotrófilos e Bolores e Leveduras em placas.** In: Manual de métodos de análise microbiológica de alimentos. p. 7-29, 1997.

SILVEIRA, C. F. S. B. **Simulação e otimização do processo de destilação para a produção de etanol hidratado.** Maceió, 2021. Trabalho de Conclusão do Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Alagoas. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/handle/123456789/9366>. Acesso em: 18 mai 2024.

SOLETTI, João Ricardo Carvalho. **Modelagem, simulação e otimização do processo de absorção gasosa, visando a recuperação do etanol evaporado, durante a fermentação alcoólica.** 2023. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2022. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/123456789/11646>. Acesso em: 06 jun 2024.

STEINLE, L. A. **Fatores que interferem na fermentação alcoólica.** Sertãozinho, 2013. Monografia de Pós-Graduação em Gestão do Setor Sucroenergético -MTA. Disponível

em: <https://www.mta.ufscar.br/arquivos/publicacoes/sertaozinho-iii/luis-antonio-steinle.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2024.

TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. **Microbiologia**. 12ª edição. Porto Alegre: Artmed, 2017. Disponível em: <https://www.meulivro.biz/microbiologia/423/microbiologia-tortora-12-ed-pdf/>. Acesso em: 22 jun 2024.

VASCONCELOS, J. N. **Fermentação Etanoica**. In: SANTOS, F., BORÉM, A., CALDAS, C., Cana-de-Açúcar – Bioenergia, Açúcar e Álcool. Editora UFV, Minas Gerais, 2010.

VIEIRA, D. A. P.; FERNANDES, N. Q. **Microbiologia Aplicada**. Rede e-Tec Brasil. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. 2012. Disponível em: https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/413/2018/12/04_microbiologia_aplicada.pdf. Acesso em: 22 jun 2024.

VIEIRA FILHO, José Eustáquio Ribeiro; VIEIRA, Adriana Carvalho Pinto et al. **Diagnóstico e desafios da agricultura brasileira**. Rio de Janeiro: IPEA, 2019. 340 p. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/9507>. Acesso em: 15 jul 2024.