

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

GUILHERME ALEXANDRINO

**ANÁLISE E RESOLUÇÃO DE DESVIOS NO PROCESSO
DE FERMENTAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE ETANOL
HIDRATADO EM UMA USINA SUCROALCOOLEIRA
“X” DO NOROESTE PAULISTA**

SÃO CARLOS - SP
2023

GUILHERME ALEXANDRINO

**ANÁLISE E RESOLUÇÃO DE DESVIOS NO PROCESSO DE FERMENTAÇÃO PARA
PRODUÇÃO DE ETANOL HIDRATADO EM UMA USINA SUCROALCOOLEIRA “X”
DO NOROESTE PAULISTA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos, para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Química

Orientador: André Bernardo

São Carlos - SP
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa do Trabalho de Conclusão de Curso do candidato Guilherme Alexandrino, realizada em 14/03/2023:

Prof. Dr. André Bernardo
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Rosineide Gomes da Silva Cruz
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Vádila Giovana Guerra Béttega
Universidade Federal de São Carlos

AGRADECIMENTOS

Gostaria de iniciar essa dedicatória agradecendo, primeiramente, a Deus por sempre me guiar e me dar forças nos momentos mais difíceis, e aos meus pais Maria Antônia e Domair, por terem me sustentado, educado, e por sempre estarem presentes, me apoiando e encorajando em cada etapa da minha vida.

Agradeço os amigos que fiz ao longo da graduação pela amizade e apoio nesses últimos anos e os amigos do estágio, que me ensinaram muito sobre produção de açúcar e etanol, contribuindo diretamente para o meu desenvolvimento profissional e para a realização desse trabalho.

Agradeço também a EQ Júnior e a EPEQ UFSCar por suas contribuições, me capacitando e fomentando o desenvolvimento de soft-skills que foram de extrema importância na faculdade e nesse início de vida profissional.

Agradecimentos especiais ao professor André Bernardo pela orientação e apoio na realização desse Trabalho de Conclusão de Curso.

E a todos que de alguma forma contribuíram direta ou indiretamente para a minha formação até aqui deixo o meu muito obrigado.

RESUMO

O uso indiscriminado de energias não renováveis, como o petróleo e o carvão mineral, vem reduzindo drasticamente as fontes de combustíveis fósseis e ocasionando graves prejuízos ambientais, como o agravamento do natural efeito estufa, o conhecido aquecimento global, devido ao lançamento excessivo de Dióxido de Carbono (CO₂), dentre outros gases-estufa, como o metano, na atmosfera. Tal fato tem chamado atenção para a importância de um desenvolvimento sustentável, realizando uma mudança intensa na matriz energética mundial, amplificando, assim, a utilização de energias renováveis tais como a eólica, solar, da biomassa, dentre outras. Nesse prisma, destaca-se, no Brasil, a produção de etanol, concentrada na região centro-sul do país e cuja principal matéria prima é a cana-de-açúcar. O país é o segundo maior produtor mundial, responsável por 29,6% do etanol utilizado no mundo, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, que fornecem 54,4% do total. No entanto, apesar de estar atrás dos EUA, o Brasil apresenta uma grande vantagem produzindo etanol a partir da cana-de-açúcar, em relação aos EUA, cuja matéria prima principal é o milho, pois a cana é uma das culturas mais antigas e consolidadas do país, datando desde a sua colonização e, hoje, com todas as tecnologias desenvolvidas ao longo dos anos é possível produzir cerca de duas vezes mais etanol por área plantada de cana do que de milho. Diante disso, o objetivo desse estudo é avaliar os indicadores do processo de fermentação para produção de etanol hidratado combustível e os seus desvios mais relevantes na Safra 22'23 em uma usina sucroalcooleira "X" do noroeste paulista, com suas características gerais e particularidades, assim como os planos de ação tomados para a resolução de cada desvio e para a normalização dos índices de desempenho, analisando, especialmente, a concentração do creme de leveduras na saída das centrífugas de vinho e a floculação do fermento, bem como a relação entre esses parâmetros, as principais causas das suas variações e as medidas corretivas adotadas.

Palavras-chave: etanol; cana-de-açúcar; indicadores; fermentação.

ABSTRACT

The indiscriminate use of non-renewable energy sources, like petroleum and coal has been dramatically reducing the fossil fuel sources and causing serious environmental damage, such as the worsening of the natural greenhouse effect, the well known global warming due to the excessive release of carbon dioxide (CO₂), among other greenhouse gases, like the methane, on the atmosphere. This fact has drawn attention to the importance of sustainable development, achieving an intense change in the global energy matrix, thus amplifying the use of renewable energies, such as Wind, solar, biomass, among others. In this scenario, ethanol production stands out in Brazil, concentrated in the South-central region of the country, and using sugarcane as main raw material. The country is the second largest producer in the world, accounting for 29.6% of the ethanol used in the world, second only to the United States, which provides 54.4% of the total. However, despite being behind the US, Brazil has a great advantage by producing ethanol from sugarcane, in relation to the USA, whose main raw material is corn, because sugarcane is one of the oldest and most consolidated crops in the country, dating since its colonization and, today, with all technologies developed over the years it is possible to produce about twice as much ethanol per planted area of sugarcane than corn. Therefore, the objective of this study is to evaluate the indicators of the fermentation process for the production of hydrated ethanol fuel and its most relevant deviations in crop 22'23 in a sugar-alcohol plant "X" in northwestern São Paulo, with its general characteristics and particularities, as well as the action plans taken for the resolution of each deviation and for the normalization of performance indexes, analyzing, especially, the concentration of yeast cream at the exit of the wine centrifuges and yeast flocculation, as well as the relationship between these parameters, the main causes of their variations and the corrective measures adopted.

Keyword: hydrated ethanol fuel; sugarcane; indicators; fermentation.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Quadro comparativo dos modos de operação da fermentação	13
Quadro 2 - Estratégia de operação da fermentação na Usina “X”	35

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Prejuízos causados pelas bactérias à fermentação alcoólica	16
Figura 2 - Esquema de uma célula de levedura	18
Figura 3 - Reações enzimáticas das diferentes rotas metabólicas de uma levedura	19
Figura 4 – Fluxograma simplificado do processo de produção de etanol	20
Figura 5 - Centrífugas de vinho da Usina “X”	21
Figura 6 - Centrífuga de vinho realizando a separação	22
Figura 7 - Esquema de Torre de recuperação de CO ₂	25
Figura 8 - Béquer de 200ml, centrífuga de bancada e tubo de centrífuga graduada de fundo cônico	27
Figura 9 - Amostra de creme de leveduras já centrifugada	28
Figura 10 - Béquer de 200ml, proveta de 100ml e cronômetro	29
Figura 11 - Fermento flotado	29
Figura 12 - Calibrador de bicos de centrífuga	30
Figura 13 - Entradas e saídas do processo de fermentação	32
Figura 14 - Fluxograma do processo de fermentação na Usina “X”	34
Figura 15 - Acompanhamento da concentração de fermento, em %, ao longo da Safra 22’23	36
Figura 16 - Acompanhamento da concentração de fermento, em %, de 19/04 a 18/08	37
Figura 17 - Acompanhamento da concentração de fermento, em %, de 18/08 a 16/10	37
Figura 18 - Acompanhamento da floculação de fermento, em %, ao longo da Safra 22’23	38
Figura 19 - Acompanhamento da floculação de fermento, em %, de 19/04 a 18/08	38
Figura 20 - Acompanhamento da floculação do fermento, em %, de 18/08 a 18/11	39
Figura 21 - Visão mensal do consumo específico, em g/m ³ de etanol produzido, de cal.	40
Figura 22 Visão mensal do consumo específico, em g/m ³ de etanol produzido, de polímero floculante.	40
Figura 23 - Acompanhamento da concentração do fermento, em %, de 16/10 a 18/11	42

LISTA DE SIGLAS

ART – Açúcares reductores totais

°BRIX – Grau BRIX

°GL – Grau Gay-Lussac

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA	11
2.1.1 CLASSIFICAÇÕES DA FERMENTAÇÃO	12
2.1.2 INDICADORES E PARÂMETROS DA FERMENTAÇÃO	14
2.2 <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	17
2.3 RECICLO DE CÉLULAS	20
2.3.1 UNIDADES DE SEPARAÇÃO DE CÉLULAS (CENTRIFUGAÇÃO)	20
2.3.2 TRATAMENTO ÁCIDO	23
2.4 RECUPERAÇÃO DE CO ₂	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 ANÁLISE LABORATORIAL DE CONCENTRAÇÃO DE FERMENTO	27
3.2 ANÁLISE LABORATORIAL DE FLOCULAÇÃO DO FERMENTO	28
3.3 MEDIÇÃO DOS BICOS DAS CENTRÍFUGAS DE VINHO	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1 DADOS DA PLANTA DA USINA “X”	31
4.2 ENTRADAS E SAÍDAS DA FERMENTAÇÃO	32
4.3 FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE FERMENTAÇÃO DA USINA “X”	32
4.3.1 ESTRATÉGIA DE OPERAÇÃO DA FERMENTAÇÃO NA USINA “X”	34
4.4 ACOMPANHAMENTO DE PARÂMETROS: RELAÇÃO ENTRE A FLOCULAÇÃO E A CONCENTRAÇÃO DO FERMENTO	35
5 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

As técnicas de produção de etanol a partir da fermentação são dominadas pelo homem desde os primórdios da civilização, quando foi descoberto que qualquer líquido que continha açúcares, como sucos de fruta, se deixado armazenado sob condições adequadas de temperatura, transformava-se numa bebida apreciável (LOPES, 2011).

No Brasil, assim como em outras partes do mundo, o processo de fermentação é muito antigo. No período colonial, o foco era a produção de cachaça, produto de grande importância para a economia do país na época, a partir da fermentação e da subsequente destilação do caldo de cana (DARÉ, 2008).

Até o início do século XX, o processo produtivo de etanol no país sofreu poucas alterações, sendo voltado principalmente para a confecção de bebidas. Foi a partir da década de 30, com o incentivo do governo para a produção de motores a álcool para carro, que produção de álcool combustível teve um aumento significativo, crescendo ainda mais em 1975, com o advento do Proálcool, e com o aumento exponencial da demanda do etanol como combustível (AMORIM, 2005).

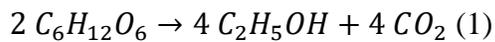
Após a implementação do Proálcool, de todos os processos dentro do setor sucroalcooleiro, o de fermentação foi o que obteve maiores progressos de modo a aumentar cada vez mais a produção de etanol combustível. Dentre os avanços tecnológicos, destacam-se o aumento do controle operacional e microbiológico, o uso de leveduras selecionadas bem como as melhorias da sua nutrição, além do controle do enchimento das dornas e das perdas nas centrífugas (VASCONCELOS, 2006).

Diante disso, o objetivo desse estudo é analisar os indicadores do processo de fermentação para produção de etanol hidratado combustível e os seus desvios mais relevantes na Safra 22'23 em uma usina sucroalcooleira "X" do noroeste paulista, estudando, mais especificamente, a relação entre a floculação do fermento e os problemas para a obtenção de um creme de leveduras de concentração elevada nas centrífugas de vinho, além dos planos de ação tomados para a resolução e normalização desses desvios.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA

A fermentação alcoólica em escala industrial consiste na utilização de leveduras da espécie *Saccharomyces cerevisiae*, que geralmente são selecionadas em laboratório para terem um maior rendimento em etanol ou outras características desejáveis ao processo industrial de fermentação, para transformar os ART (glicose, frutose e sacarose) contidos no mosto em etanol e CO₂, simplificada pela reação representada pela Equação 1, abaixo (FERNANDES, 2003).



O processo industrial de produção de etanol pode ser feito em destilarias autônomas, utilizando o caldo de cana concentrado como mosto, ou pode ter início na produção de açúcar, o que explica porque muitas usinas sucroalcooleiras têm sua destilaria anexa à fábrica de açúcar. Nesse caso, utiliza-se o mel final ou melaço, um subproduto retirado da centrifugação contínua de massa B para produção de açúcar que, por ainda ter uma quantidade considerável de ART, é misturado com o caldo obtido na moagem (mais comum) ou extração difusiva da cana-de-açúcar para constituir o mosto (ANDRIETTA, 1994).

Esse mosto é alimentado de forma contínua ou descontínua, a depender do modo de operação da usina, em grandes biorreatores denominados dornas de fermentação, podendo, antes, ter adição de suplementos com fósforo ou outros componentes de valor nutritivo para as leveduras. Ali, ele é fermentado por cerca de 6 a 10 horas, sendo possível perceber o final do processo fermentativo pela redução do °BRIX da mistura e pelo fim do desprendimento de CO₂. Findada a fermentação, o mosto transforma-se no vinho levedurado, uma mistura alcoólica de grau °GL entre 7 e 11, que, além de etanol, contém água, leveduras, restos de ART que não foram fermentados e impurezas provenientes do próprio metabolismo celular, como o glicerol (AMORIM, 2005).

O vinho levedurado, por sua vez é centrifugado para que as células de levedura sejam recicladas e retornem para o processo, após passarem por tratamento ácido, e, a sua parte líquida, denominada vinho de levedurado é alimentada nas colunas de destilação, que separam o etanol dessa mistura até atingir um °GL de 99,6, que é o teor alcoólico mínimo para que o etanol seja classificado como hidratado (ZAPERLON, 2008).

Para que seja possível alcançar o melhor rendimento alcoólico durante o processo de fermentação é necessário acompanhar uma série de indicadores, como temperatura, pH, acidez, concentração de leveduras, dentre outros. Nesse contexto, a viabilidade celular das leveduras é determinante na estabilidade desses indicadores, sendo altamente influenciada por fatores como variação de matéria-prima, contaminação bacteriana, e floculação (LIMA, 2001).

Portanto, para que o processo industrial de fermentação se mantenha saudável e apresente uma alta performance, tais indicadores devem ser monitorados e controlados, caso contrário, uma série de problemas poderá ocorrer, como a queda da viabilidade celular, formação de glicerol, contaminações bacterianas e o consequente aumento nas concentrações de aldeídos e dos ácidos láctico e acético, formados pelo metabolismo dessas bactérias, além do gasto excessivo com antibióticos industriais (ANDRIETTA, 1994).

2.1.1 CLASSIFICAÇÕES DA FERMENTAÇÃO

A classificação da fermentação é feita com base na entrada de mosto (substrato) no sistema e com a retirada de vinho (produto). Daí tem-se o modelo de fermentação em batelada alimentada e o modelo de fermentação contínua, sendo que, em ambos os processos, utiliza-se o sistema de serpentinas ou trocadores de calor de placas para a manutenção de uma temperatura mais próxima possível da ótima para o processo fermentativo (ANDRIETTA, 1994).

A fermentação em batelada alimentada se dá pela formação do pé de cuba, que consiste na adição do fermento previamente tratado com água clorada, ácido sulfúrico e antibióticos (quando necessário), depois pela adição do mosto, iniciando o processo fermentativo, até que complete o nível de operação da dorna, girando em torno de 85 a 92% para que a mesma não transborde por conta da formação de espuma durante a fermentação. Cessada a alimentação, a dorna fica em processo fermentativo por cerca de 5 horas, cujo final é evidenciado pela queda e estabilização do °BRIX e pelo fim do aparecimento de bolhas, que indicam a formação do CO₂ a partir da transformação dos ART em etanol. Quando as dornas apresentam essas características, elas são usualmente chamadas de “dornas mortas”, ou seja, dornas que já terminaram o processo de fermentação. Então, o produto é retirado até que a dorna se esvazie e enviado para as centrífugas de vinho (ANDRIETTA, 1994).

Já, no modelo contínuo, tanto a entrada de mosto e fermento como a saída de vinho são feitas de forma ininterrupta, com a vazão de saída de produto determinando a vazão de alimentação, de modo que as dornas de fermentação operem em estado estacionário. Geralmente esse tipo de fermentação tem uma configuração de 3 ou 4 dornas em série, com o mosto e fermento sendo alimentado na primeira e o vinho sendo retirado da última, que é a única dorna “morta” do sistema. Se a última dorna apresentar vestígios de que ela não terminou o processo de fermentação, como a formação de bolhas ou ART residual no vinho, deve-se aumentar o tempo de residência para que os ART do mosto sejam totalmente consumidos, evitando desperdícios no processo. (ANDRIETTA, 1994).

No Quadro 1, abaixo, encontra-se uma comparação ponto a ponto de ambos os tipos de fermentação.

Quadro 1 - Quadro comparativo dos modos de operação da fermentação

Tipo	Rendimento	Uso de insumos	Instalação	Volume (m³)
Batelada alimentada	Maior	Menor	Mais cara	Maior
Contínua	Menor	Maior	Mais barata	Menor

Fonte: do autor

Ao final de ambos os processos, o vinho levedurado é centrifugado para que a parte líquida seja enviada às colunas de destilação e o creme/leite de leveduras seja reciclado no processo, sendo direcionadas para as cubas de tratamento.

Na Usina “X”, a fermentação é do tipo batelada alimentada, com 9 dornas de fermentação e 2 cubas de tratamento de fermento. Comparativamente com as fermentações contínuas, que geralmente trabalham com 3 ou 4 dornas em série, pode-se perceber que esse tipo de fermentação tem uma instalação mais cara, entretanto, tem um volume reacional muito maior e, por permitir a assepsia das dornas entre cada ciclo de fermentação (que o tipo contínuo não permite), tem uma menor incidência de contaminação, reduzindo os gastos com insumos e, conseqüentemente, aumentando o rendimento fermentativo. Outra vantagem dessa fermentação é a possibilidade de isolar um problema ocorrido nas dornas, evitando que se propague para o resto do processo. Por

exemplo, se por algum motivo houver um problema no resfriamento da Dorna 1 e a sua temperatura chegar a 40°C, grande parte das leveduras irão morrer e a viabilidade celular irá cair, mas esse problema ficará restrito apenas à Dorna 1. No entanto, se esse problema acontecesse em uma das dornas de um sistema de fermentação contínua, a viabilidade celular de todas as outras dornas também cairia.

2.1.2 INDICADORES E PARÂMETROS DA FERMENTAÇÃO

Para que o processo fermentativo apresente bons resultados, acompanha-se uma série de indicadores para que seja possível controlar os diversos fatores que afetam o seu desempenho. Dentre eles, destacam-se a temperatura, pH, grau alcoólico (°GL), contaminação bacteriana e floculação.

O controle da temperatura é primordial para a fermentação, já que ela está intimamente ligada com a atividade metabólica das leveduras. Temperaturas entre 25°C e 30°C favorecem a produção de biomassa, sendo 28°C a temperatura ótima (para *Saccharomyces cerevisiae*). Já, a faixa de temperatura que favorece a produção de etanol é mais ampla, entre 26°C e 35°C, com a faixa ótima entre 32°C e 34°C (SOUSA et al., 2011). Temperaturas mais elevadas facilitam a proliferação de bactérias, levando ao aumento da formação de metabólitos secundários como o glicerol, além de aumentar a sensibilidade da levedura à toxicidade do álcool que, em altas temperaturas, danifica irreversivelmente a membrana celular, além das enzimas presentes nas células de levedura poderem ter perda de atividade e sofrerem desnaturação (ANDRIETTA, 1994).

As células de levedura têm a capacidade de controlar o pH no seu interior através da seletividade da membrana celular e do transporte ativo, utilizando a energia obtida do catabolismo de açúcares para “bombear” prótons para fora da célula de modo a controlar o seu pH interno dentro da faixa de 5,9 a 6,4 (ANDRIETTA, 1994). Assim, é possível conduzir a fermentação alcoólica numa ampla faixa de pH, mas, como o pH ótimo para o crescimento de bactérias contaminantes produtoras de ácido é em torno de 5,1, utiliza-se o tratamento ácido do fermento para ajustar o pH das dornas indiretamente para valores mais baixos, iniciando a fermentação numa faixa de pH entre 2,2 e 3,0 e terminando próximo de 3,5 a 4,0 (SOUSA et al., 2011).

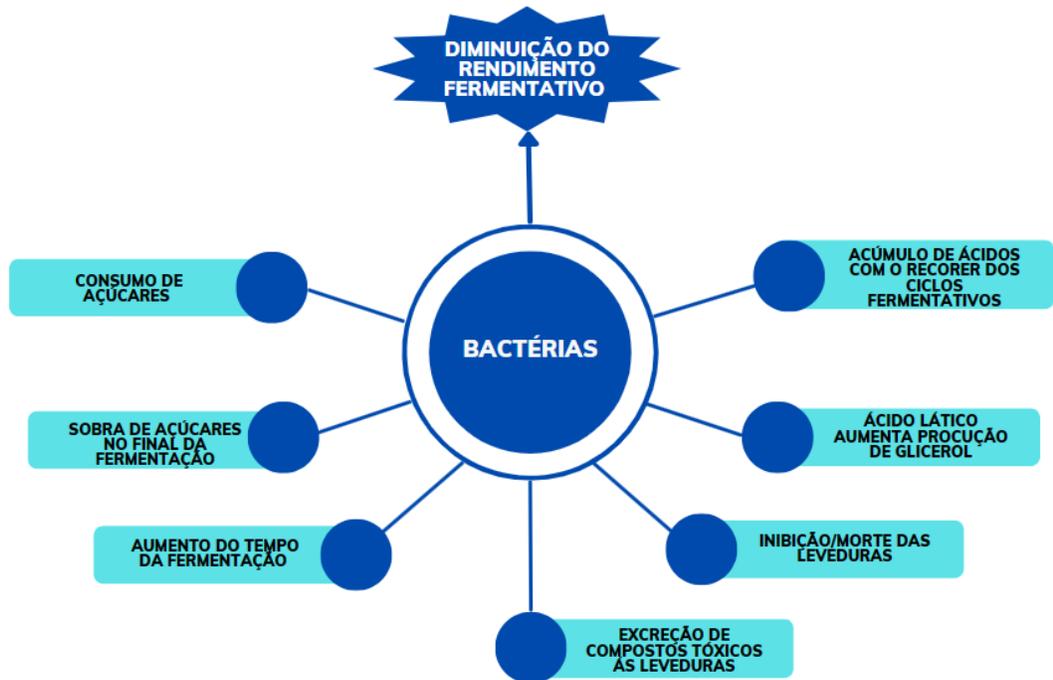
Portanto, trabalhar com um pH mais baixo na fermentação reduz a contaminação bacteriana e melhora o rendimento em etanol do processo, pois restringe-se o crescimento das leveduras e, conseqüentemente, reduz a produção de glicerol (LIMA, 2001). No entanto, deve-se atentar para não utilizar um pH abaixo de 2,0 por tempos prolongados, pois nessa faixa, os ácidos orgânicos, que estão em seu estado não ionizado, podem penetrar mais facilmente nas células de levedura, causando a inibição das mesmas e podendo propiciar a seleção de bactérias mais resistentes e leveduras selvagens que provocariam uma queda no rendimento etanólico (DORTA, 2006).

Apesar de ser o produto de interesse, o etanol é um inibidor do próprio processo de fermentação alcoólica, apresentando toxicidade para as leveduras quando em concentrações acima de 11°GL (BANAT, 1998). Esse efeito tóxico é agravado em temperaturas mais elevadas, situação na qual o etanol altera a fluidez da membrana plasmática das leveduras, reposicionando as proteínas responsáveis pelo transporte ativo de uma série de compostos, como substratos, prótons e contaminantes, para dentro e para fora da célula. Isso afeta significativamente a capacidade da levedura em preservar os gradientes de concentração dessas substâncias, acarretando, dentre outras situações, na inibição da taxa máxima de captação de glicose (MONTEIRO, 2016).

Um dos contaminantes que mais aparece nos processos de fermentação alcoólica são as bactérias, destacando-se as Gram-positivas dos gêneros *Lactobacillus*, *Bacillus* e *Leuconostoc* (CECCATO-ANTONINI, 1998). Essa contaminação frequente se dá pelo ambiente propiciar o aparecimento dessas bactérias, pois muitas usinas ainda têm dificuldades em trabalhar com um processo totalmente esterilizado desde a recepção da matéria prima até a saída de produto (ÁLCOOLBRÁS, 2005). Sempre há a presença dessas bactérias nos processos de fermentação, mas quando há um aumento significativo na sua população, acima de 10^7 bastonetes/ml, deve-se agir rapidamente para conter a contaminação, visto que esses micro-organismos são capazes de dobrar a sua população em apenas 28 minutos. A primeira ação aplicável para a contenção é a dosagem de antibióticos, mas esses são extremamente caros e não é recomendado aplicar doses acima de 10Kg por dia em cada Dorna de 300m³ (ÁLCOOLBRÁS, 2005). Diante disso, há outras ações que podem ajudar nesse controle, como fazer a limpeza da moenda e das tubulações, a assepsia das instalações da fermentação (Dornas, cubas e tubulações) ao final de cada ciclo fermentativo, o tratamento ácido do fermento, o descarte de fundos de dorna, e a re-centrifugação

do fermento (CECCATO-ANTONINI, 1998). São inúmeros os prejuízos causados por essas bactérias, como ilustra a Figura 1, abaixo.

Figura 1 - Prejuízos causados pelas bactérias à fermentação alcoólica



Fonte: (CECCATO-ANTONINI, 2010)

Portanto, percebe-se que o excesso de agentes bacterianos provoca uma série de prejuízos ao processo de fermentação, dentre os quais destacam-se a redução na produção, aumento da morte celular, de contaminantes, como o glicerol, e dos ácidos orgânicos produzidos pelas próprias bactérias, como o acético e o lático.

Outro fator que deve ser monitorado é a floculação do fermento. Sob condições de estresse, como temperatura e pH inadequados, contato com gomas sintetizadas por bactérias ou com as próprias bactérias indutoras de floculação, ou até mesmo a contaminação por leveduras selvagens floculantes, fazem com que as células de levedura, até então em suspensão no meio fermentativo, se agrupem em conglomerados maiores como um mecanismo de defesa frente à essas condições adversas. Esses grandes flocos sedimentam-se rapidamente ou flutam impulsionados pelas bolhas de CO₂ liberadas na reação de fermentação, diminuindo a superfície de contato entre as leveduras e o meio líquido e, conseqüentemente, reduzindo a produção de etanol e deixando sobras de ART

no vinho. O tratamento ácido do fermento, além de apresentar outros benefícios, é eficaz na desfloculação, sendo o ácido sulfúrico, portanto, essencial para os processos de fermentação industrial com reciclo de células (CECCATO-ANTONINI, 2010).

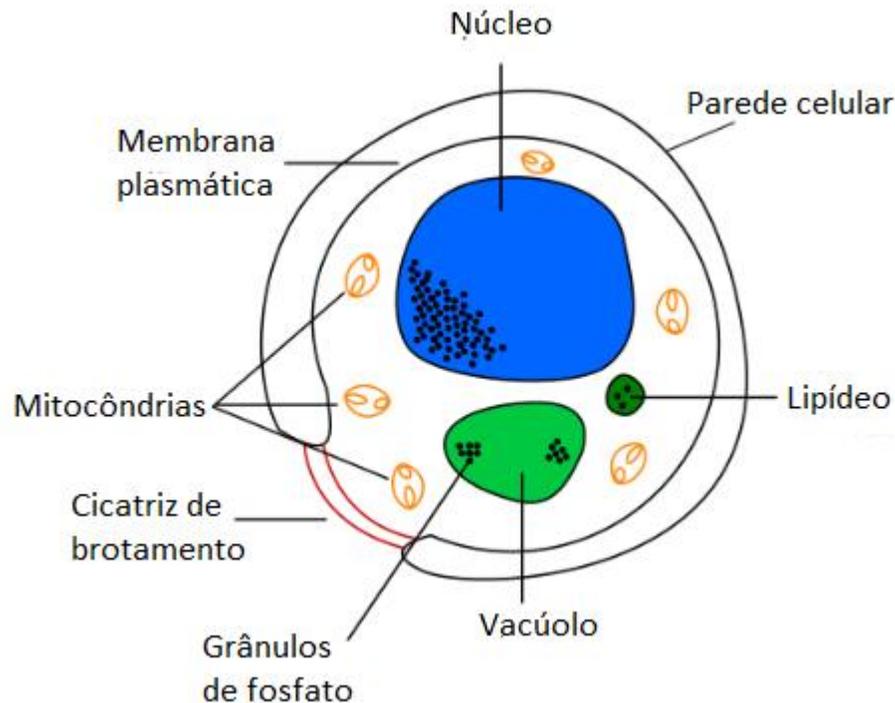
Assim como as bactérias, as leveduras selvagens também constituem uma fonte de contaminação. No entanto, diferentemente de como é feito com as infecções bacterianas, não é possível utilizar agentes antimicrobianos para conter as leveduras selvagens, visto que as leveduras selecionadas do processo também seriam afetadas e teriam sua viabilidade reduzida. A ocorrência de leveduras selvagens é prejudicial ao processo, pois elas competem com as leveduras engenheiradas pelo substrato contido no mosto, chegando a predominar na população de células presentes. Como as suas características são imprevisíveis, a ocorrência desses micro-organismos frequentemente provoca quedas significativas na eficiência industrial, podendo provocar diminuições no rendimento fermentativo, aumentos nos tempos de fermentação e nas taxas de floculação, bem como ocasionar maior formação de espuma e aumentar a viscosidade do meio (CECCATO-ANTONINI, 2010).

2.2 *Saccharomyces cerevisiae*

De todos os micro-organismos capazes de produzir etanol, as leveduras da espécie *Saccharomyces cerevisiae* são as mais utilizadas como micro-organismo agente de transformação nas unidades produtoras de etanol. Sua ampla utilização se dá por conta de uma série de características favoráveis ao processo, como a sua grande robustez e versatilidade, sendo capazes de suportar condições extremas, como a presença de inibidores (sendo um deles o próprio etanol), se adaptando a novas condições de processo rapidamente. (ANDRIETTA, 1994).

As leveduras *Saccharomyces cerevisiae* são micro-organismos unicelulares pertencentes ao reino Fungi, o reino dos fungos, o que explica a sua grande variação morfológica, podendo ser esféricas, ovoides, cilíndricas, ou até mesmo alongadas em pseudomicélio. Esses organismos são heterotróficos, o que significa que não produzem o seu próprio alimento, necessitando consumir fontes de energia externas para sobreviverem. As leveduras são seres eucarióticos, ou seja, possuem seu material genético organizado dentro de um núcleo, diferentemente das células bacterianas, cujo material genético fica disperso no citoplasma (CECCATO-ANTONINI, 2010). Na Figura 2 encontra-se um esquema de uma célula de levedura.

Figura 2- Esquema de uma célula de levedura



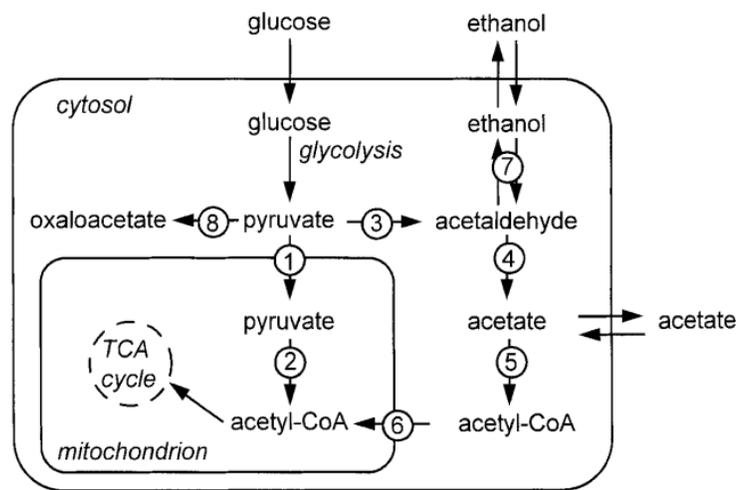
Fonte: (WIKIMEDIA COMMONS, 2023)

Além disso, as leveduras são micro-organismos facultativos em relação às condições de crescimento, ou seja, podem proliferar na presença ou ausência de O_2 , sendo a primeira situação, favorável à multiplicação de células, enquanto, a segunda, favorável à produção de etanol. (DARÉ, 2008). No entanto, quando as concentrações de açúcares no meio estão altas, mas não o suficiente para que ocorra inibição da fermentação por substrato, a fermentação predomina sobre a respiração, mesmo em condições aeróbicas. (FERNANDES et al., 2009).

No início de toda safra, a usina “X” compra uma cepa de leveduras selecionadas em laboratório e promove a multiplicação dessas células injetando ar e nutrientes à base de fósforo juntamente com o mosto, que é alimentado lentamente nas dornas de fermentação. Esse processo é denominado multiplicação de leveduras. Após a realização da multiplicação, as condições operacionais são mudadas, sendo colocado nas dornas somente o mosto e as leveduras, sem a injeção de ar, para que o processo fermentativo predomine e obtenha-se maior rendimento em etanol.

Quanto à forma de reprodução das leveduras, predomina a forma assexuada por brotamento, mas ainda assim, geralmente em situações de suprimento nutricional limitado, elas podem se reproduzir de forma sexuada pela formação de ascósporos, trocando material genético entre as células e podendo gerar outras variantes de leveduras em processo. Essa forma de reprodução é indesejável, pois a troca de material genético entre as leveduras selecionadas e as selvagens, que inevitavelmente entram no processo através da própria matéria-prima, faz com que surjam novos tipos de leveduras com características imprevisíveis que, geralmente, diminuem a eficiência fermentativa.

Figura 3- Reações enzimáticas das diferentes rotas metabólicas de uma levedura



Fonte: (PRONK, 1996)

A transformação dos ARTs em etanol pelas leveduras ocorre através de um grande número de reações catalisadas por enzimas, como mostrado na Figura 3, que são fortemente afetadas por temperatura e pH. A faixa ótima de temperatura para que o melhor rendimento fermentativo seja alcançado está entre 32°C e 34°C, e qualquer variação dessa faixa pode ter efeito significativo nas reações metabólicas das leveduras. Já, em relação ao pH, as leveduras preferem meios ácidos, com pH entre 4,0 e 4,5, mas seus limites de tolerância variam entre 2,2 e 8,0 a depender da espécie. (PELCZAR, REID & CHAN, 1980).

Além de produzir etanol, as leveduras também consomem ART para produzir uma série de subprodutos e contaminantes indesejáveis ao processo, dentre os quais o glicerol, é produzido em maior quantidade, e outros compostos em menor quantidade como ácidos orgânicos, ésteres, aldeídos e álcoois superiores. Esse processo é denominado desvio de rota metabólica, sendo

provocado majoritariamente pelo descontrole de parâmetros de processo como temperatura e pH do meio, e diminuindo a eficiência fermentativa, já que se utiliza o substrato para produzir compostos indesejados em detrimento de etanol. (PRONK, 1996).

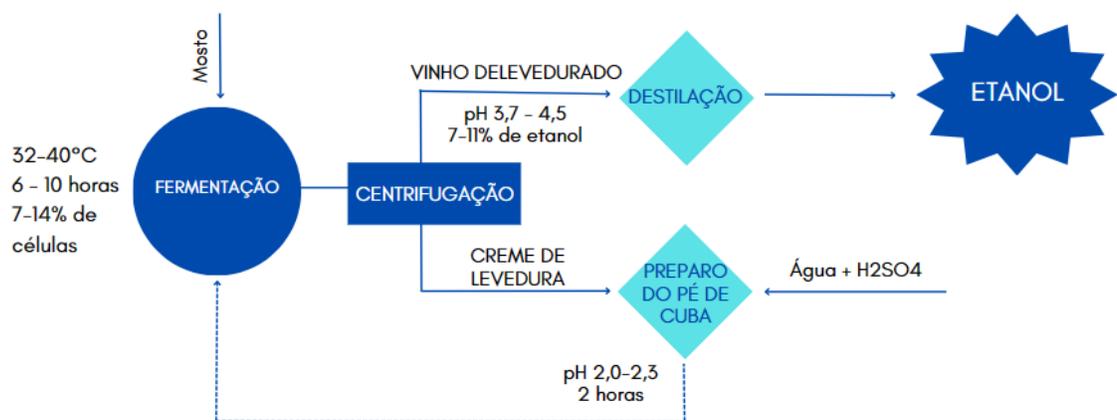
2.3 RECICLO DE CÉLULAS

A maior parte dos processos fermentativos industriais funcionam com reciclo de células, seguindo o processo patenteado das usinas de Melle, devido ao alto custo associado à compra constante de *Saccharomyces cerevisiae* ao longo da Safra caso não houvesse esse reaproveitamento (Valsechi, 1944).

O reciclo consiste em separar as leveduras contidas no vinho levedurado através de centrifugação e trata-las com água e ácido sulfúrico para recuperar as suas células saudáveis, expurgando células velhas e diluindo contaminantes resultantes de ciclos fermentativos anteriores, para depois retorná-las para a sua Dorna correspondente e realizar outro ciclo fermentativo (Valsechi, 1944).

Na Figura 4, abaixo, encontra-se uma simplificação do fluxograma do processo de produção industrial de etanol.

Figura 4 – Fluxograma simplificado do processo de produção de etanol



Fonte: (CECCATO-ANTONINI, 2010)

2.3.1 UNIDADES DE SEPARAÇÃO DE CÉLULAS (CENTRIFUGAÇÃO)

Terminada a fermentação, as células de levedura devem ser separadas do vinho para a reutilização nos próximos ciclos fermentativos. Essa recuperação era feita originalmente por

gravidade, deixando o vinho levedurado em repouso na dorna para que a fase sólida (leveduras), mais densa, se sedimentasse e se depositasse no fundo e a fase líquida (vinho), menos densa, ficasse na parte superior do reator, entretanto o tempo dessa operação era excessivo. Esses longos tempos de repouso são prejudiciais ao vinho e às leveduras, que ficam mais suscetíveis a contaminações bacterianas. Esse cenário mudou a partir do século XIX, quando as centrífugas passaram a ser difundidas na indústria sucroalcooleira (LOPES, 2011).

Na Figura 5, abaixo, encontra-se uma foto das centrífugas de vinho da Usina “X”.

Figura 5 - Centrífugas de vinho da Usina “X”

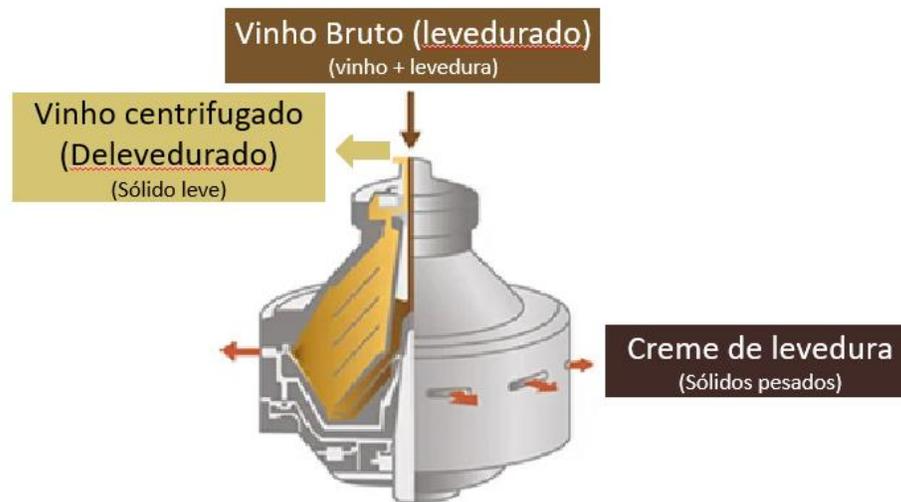


Fonte: do autor

O processo de centrifugação de vinho levedurado consiste em utilizar a força centrífuga para acelerar a separação entre as fases sólida (leveduras) e líquida (vinho). O vinho levedurado é alimentado dentro do rotor da centrífuga pela sua parte superior, esse rotor apresenta orifícios denominados bicos ou boquilhas na lateral, por onde sai o fermento na forma de creme (LOPES, 2011).

Na Figura 6, abaixo, pode-se observar um esquema de funcionamento de uma centrífuga de vinho levedurado.

Figura 6- Centrífuga de vinho realizando a separação



Fonte: (ALFA LAVAL, 2023)

Essa é uma das etapas mais importantes do processo fermentativo, pois é na centrifugação que é definida a qualidade do fermento tratado. Uma centrífuga operando adequadamente fornece um creme de levedura com concentração elevada, de pelo menos 65%, e um vinho delevedurado com baixa concentração de células. Dentre os fatores que afetam a eficiência da centrifugação estão:

- Vazão de alimentação de vinho levedurado: sempre deve-se buscar uma vazão de alimentação constante de modo que o balanço de massa da centrífuga seja obedecido;
- Concentração de células no vinho levedurado: Ao fim da fermentação, cessa-se a liberação das bolhas de CO₂ que mantinham o fermento em suspensão e este começa a decantar, o que é acentuado caso haja floculação elevada. Isso gera um gradiente de concentração de células no interior da dorna, fazendo com que, no início da centrifugação obtenha-se um creme de levedura com concentração mais elevada e que esta vai caindo até o final do processo. Essa variação na concentração de células na saída da centrífuga compromete o funcionamento do equipamento;
- Floculação: O fermento floculado dificulta muito a centrifugação, não somente por formar gradientes de concentração no vinho de alimentação, mas também pelas características do creme de leveduras gerado. Os flocos, por serem hidrofóbicos, não misturam bem com o vinho e causam problemas de escoamento pelos bicos da centrífuga, não permitindo uma compactação adequada da massa celular e fazendo com que as centrífugas não consigam

gerar um creme de leveduras de concentração adequada. Além disso, quando a floculação está alta, há um maior retorno de vinho das centrífugas para as cubas de tratamento, prejudicando-o;

- Diâmetro dos bicos da centrífuga: o diâmetro dos bicos de uma centrífuga deve variar de acordo com a massa celular alimentada. Assim, se o diâmetro dos bicos que estão sendo utilizados é menor do que o necessário há perda de massa celular pelo vinho de levedurado, prejudicando a viabilidade do fermento. Já, caso o diâmetro dos bicos seja maior, o creme de levedura ficará com uma concentração de células menor do que o desejado e haverá mais retorno de vinho para as cubas de tratamento, junto com as impurezas decorrentes da fermentação, fazendo com que o tratamento seja mais difícil e menos eficiente. É importante fazer uma verificação periódica do diâmetro desses bicos e trocá-los, quando necessário, pois eles se desgastam ao longo do tempo, ocasionando o problema supramencionado.

2.3.2 TRATAMENTO ÁCIDO

Após a sua separação na centrífuga, o fermento é direcionado para uma cuba de tratamento, ou pré-fermentador, que são tanques agitados mecanicamente, geralmente com uma capacidade de 30 a 40% do volume das dornas de fermentação, onde será diluído com água clorada e tratado com ácido sulfúrico e antibióticos, quando necessário, sob agitação e aeração (LOPES, 2011).

A condução dessa etapa é necessária para recuperar as células de levedura para o próximo ciclo de fermentação. Isso se dá, principalmente, devido ao fato de que quando as células de levedura crescem em anaerobiose, condição encontrada nas Dornas de fermentação, e na ausência de fontes de lipídeos, elas são incapazes de sintetizar alguns componentes da sua membrana celular, fundamental para a sua sobrevivência em meios muito ácidos. Assim, a célula mãe, ao gerar um broto, passa metade das substâncias que não foi capaz de sintetizar para a célula filha, degenerando a sua membrana. As células de levedura que morrem na dorna se rompem e passam a funcionar como substrato para as demais células vivas, mas só isso não supre as suas necessidades. Por isso, se faz necessário que as células fiquem um tempo no ciclo respiratório, para que sintetizem tais componentes e regenerem suas membranas celulares. Isso ocorre na etapa de tratamento do

fermento, que é a única etapa do processo fermentativo na qual o O_2 fica disponível para as leveduras (ANDRIETTA, 1994).

O tratamento do fermento em batelada alimentada tem início com a formação de um colchão d'água na cuba, que corresponde de 30 a 70% do total de água que será adicionado ao longo desse processo. Essa água deve ser clorada, contendo um residual de cloro entre 0,5 e 1,0 ppm para evitar a proliferação de micro-organismos indesejados, como bactérias. Em seguida, a cuba pode receber o creme de levedura proveniente da dorna que está sendo centrifugada e ter o restante de água tratada adicionado. Depois, é adicionado ácido sulfúrico até que o pH da cuba atinja um valor entre 2,0 e 2,3. Após a adição do ácido, aguarda-se de 1h30 a 2h para poder transferir o fermento tratado, agora denominado pé de cuba, para uma dorna de fermentação e iniciar a alimentação de mosto (ANDRIETTA, 1994).

A adição de água tratada nessa etapa da fermentação tem a função de:

- Diluir o creme de levedura, diminuindo também a concentração de contaminantes e inibidores, como o etanol e ácidos orgânicos. Deve-se manter nas cubas uma concentração celular entre 25 e 35% e um °GL de 4,0 no máximo;
- Abaixar a temperatura do fermento a ser tratado até cerca de 30°C, diminuindo o efeito tóxico do etanol para as leveduras e tornando a adição de ácido menos agressiva a elas;
- Diminuir o poder tampão do fermento a ser tratado, pela diluição do etanol e das impurezas presentes no vinho que retornou para as cubas através do creme de leveduras, diminuindo, assim, a quantidade de ácido sulfúrico necessária para ajustar o seu pH;
- Suprir a quantidade mínima de oxigênio dissolvido no meio para que as células de levedura possam alternar para o ciclo respiratório e sintetizarem componentes necessários à sua manutenção, como o esterol;

O ajuste de pH através da adição de ácido sulfúrico auxilia na desfloculação do fermento, melhorando a sua fluidez, e no controle da contaminação da cuba, pois ao contrário das leveduras, as bactérias contaminantes não sobrevivem nas faixas de pH entre 2,0 e 2,3. Além disso, serve para regular indiretamente o pH das dornas pois não há adição de ácido na fase de fermentação, apenas no tratamento de fermento. Sem essa adição de ácido, o pH das dornas chegaria a valores próximos de 5,1, propício à proliferação de bactérias produtoras de ácidos orgânicos provenientes do mosto. Entretanto, apesar da adição de ácido sulfúrico gerar esses benefícios, a exposição prolongada das

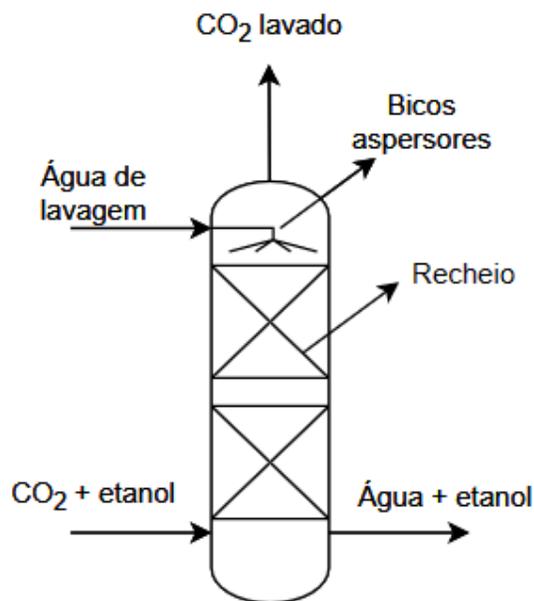
leveduras pode causar efeitos adversos, por isso, a partir do início da dosagem de ácido, o tratamento do fermento não deve levar mais do que 2 horas (ANDRIETTA, 1994).

2.4 RECUPERAÇÃO DE CO₂

Como já visto na Equação 1, ao transformar os ART do mosto em etanol, a reação de fermentação libera CO₂, que se desprende do vinho e é liberado na atmosfera. Tais gases arrastam uma porção do álcool contido no vinho que, dependendo da temperatura do meio fermentativo, pode chegar até a 2% do total produzido (LOPES, 2011).

Nas primeiras usinas, as dornas de fermentação eram abertas, e esse etanol arrastado pelos gases era perdido na atmosfera, mas, diante desse desperdício, passou-se a investir em dornas fechadas e sistemas de recuperação de CO₂. Para evitar as perdas, todo o CO₂ gerado deve ser lavado, de modo que o etanol se misture com a água e volte para o processo. Essa lavagem é feita em torres de recuperação de CO₂ com enchimento, cuja função é aumentar o trajeto do gás no interior da torre e formar um filme líquido descendente de água, aumentando a área de contato entre os fluidos e ajudando no processo de transferência de massa (LOPES, 2011).

Figura 7- Esquema de Torre de recuperação de CO₂



Fonte: do autor

Como visto na Figura 7, nessas torres, o gás com etanol entra na parte inferior e a água é pulverizada na parte superior por meio de bicos aspersores. Os fluidos escoam em contracorrente dentro dos enchimentos da torre e, após o processo de transferência de massa, a água contendo o etanol recuperado sai embaixo do equipamento e o gás carbônico, agora livre de álcool, é liberado na atmosfera (LOPES, 2011).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho foi um estudo de caso do sistema de fermentação da Usina “X”. Estudo, este, dividido nas etapas de reconhecimento da planta e coleta e tratamento de dados. Primeiro foram levantados os equipamentos do sistema de fermentação bem como seus inputs e outputs, os quais foram organizados em um fluxograma. Depois foi feita a seleção de duas variáveis para serem estudadas: a concentração do creme de leveduras e a floculação do fermento, que são analisadas diariamente pelo laboratório de qualidade industrial e os dados gerados por eles são estudados em reuniões diárias de gestão de processos para que o time elabore planos de ação e trate os desvios apresentados.

3.1 ANÁLISE LABORATORIAL DE CONCENTRAÇÃO DE FERMENTO

Para fazer a análise da concentração do creme de leveduras utiliza-se um béquer de 200ml, uma centrífuga de bancada e tubos centrífuga de 15ml com fundo cônico, ilustrados na Figura 8, abaixo.

Figura 8 - Béquer de 200ml, centrífuga de bancada e tubo de centrífuga graduada de fundo cônico



Fonte: do autor

Primeiro deve-se coletar o creme de leveduras diretamente da saída da centrífuga de vinho utilizando um béquer de 200ml e homogeneizar a amostra. Depois, transfere-se 15ml da amostra para um tubo de centrífuga graduada de fundo cônico que, posteriormente, deve ser colocado em um dos espaços da centrífuga de bancada. Balanceia-se a centrífuga colocando um tubo contendo 15 ml de água na posição oposta àquela onde foi colocado o tubo com as 15ml de creme de

levedura. Liga-se a centrífuga na velocidade de 3500 rpm por 10 minutos e retira-se o tubo contendo a amostra do equipamento.

Como pode-se notar pela Figura 9 abaixo, as células de levedura se compactam no fundo do tubo de centrífuga e o vinho fica na parte de cima. A razão entre o volume de sólidos e o volume total de 15ml da amostra, multiplicada por 100, representa a concentração do creme de leveduras, em porcentagem.

Figura 9 - Amostra de creme de leveduras já centrifugada



Fonte: do autor

3.2 ANÁLISE LABORATORIAL DE FLOCULAÇÃO DO FERMENTO

Para fazer a análise da floculação utiliza-se um béquer de 200ml, uma proveta de 100ml e um cronômetro, ilustrados na Figura 10 abaixo.

Figura 10- Béquer de 200ml, proveta de 100ml e cronômetro



Fonte: do autor

Primeiro coleta-se o creme de leveduras diretamente da saída da centrífuga utilizando um béquer de 200ml e faz-se a homogeneização da solução, depois coloca-se o fermento homogeneizado na proveta até que o menisco atinja a marcação de 100ml. Então espera-se 15 minutos, marcando no cronômetro, para que a parte floculada do fermento, mais leve do que o restante da amostra, flote. O volume flotado representa o valor da floculação em %. Por exemplo, na Figura 11 abaixo, dos 100ml de fermento, 50ml flotaram, indicando que a amostra em questão estava 50% floculada.

Figura 11- Fermento flotado



Fonte: do autor

3.3 MEDIÇÃO DOS BICOS DAS CENTRÍFUGAS DE VINHO

A medição dos bicos de centrífuga é feita com um calibrador próprio para isso. Esse equipamento apresenta uma série de insertos, cada um com uma espessura diferente, que são

inseridos no bico de espessura correspondente, devendo se ajustar corretamente. Se, ao inserir no bico, o inserto ficar largo, significa que o bico está desgastado, o que pode ser confirmado inserindo outros insertos de espessuras maiores, até que se ajustem corretamente.

Na Figura 12, abaixo, pode-se observar um bico de centrífuga sendo medido com o calibrador apropriado.

Figura 12- Calibrador de bicos de centrífuga



Fonte: do autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DADOS DA PLANTA DA USINA “X”

É importante, antes de tudo, apresentar as configurações da Usina “X”, deixando claras as suas particularidades e modos de operação das operações unitárias mais importantes para o processo de fermentação:

- O mosto deve ter um °BRIX em torno de 23, sendo produzido a partir da mistura de caldo filtrado, com °BRIX entre 7 e 9, e o mel final resultante da centrifugação contínua de massa B na Fábrica de açúcar. É importante ressaltar que, além de ART, o mosto apresenta, também, uma quantidade considerável de insumos do processo de tratamento de caldo, como cal e polímeros eletrolíticos, utilizados nas etapas de decantação e filtração, que atrapalham no processo de fermentação por aumentar a taxa de floculação das leveduras;
- Antes de ser alimentado nas Dornas de fermentação, o mosto passa por trocadores de calor de placas a fim de abaixar a sua temperatura para cerca de 34°C. O ideal seria abaixar para cerca de 30°C, mas devido às condições operacionais da Usina “X” e às condições climáticas da região, esse valor dificilmente é alcançado;
- A fermentação opera em batelada alimentada, com 9 dornas de fermentação, de 300m³, 2 dornas volantes, de 300m³, para armazenamento de vinho e 2 cubas de tratamento de fermento, de 70m³;
- Cada dorna de fermentação é equipada com um sistema de recirculação de vinho constituído por uma bomba centrífuga e um trocador de calor de placas para agitar e resfriar o vinho contido nela;
- As dornas de fermentação são fechadas para que o CO₂ liberado no processo seja coletado e passe por uma coluna de absorção a fim de recuperar o etanol arrastado pelo gás e direcioná-lo para as dornas volantes;
- O vinho levedurado produzido nas dornas de fermentação é centrifugado para separar o creme de levedura da parte líquida, denominada vinho delevedurado;
- O creme de leveduras é tratado nas cubas com água clorada e ácido sulfúrico até atingir um pH entre 2,2 e 2,3, e, quando necessário, outros insumos, como antibióticos, para controlar infecções bacterianas, nutrientes à base de fósforo, para melhorar a viabilidade do fermento, e dispersante para evitar a formação de espuma;

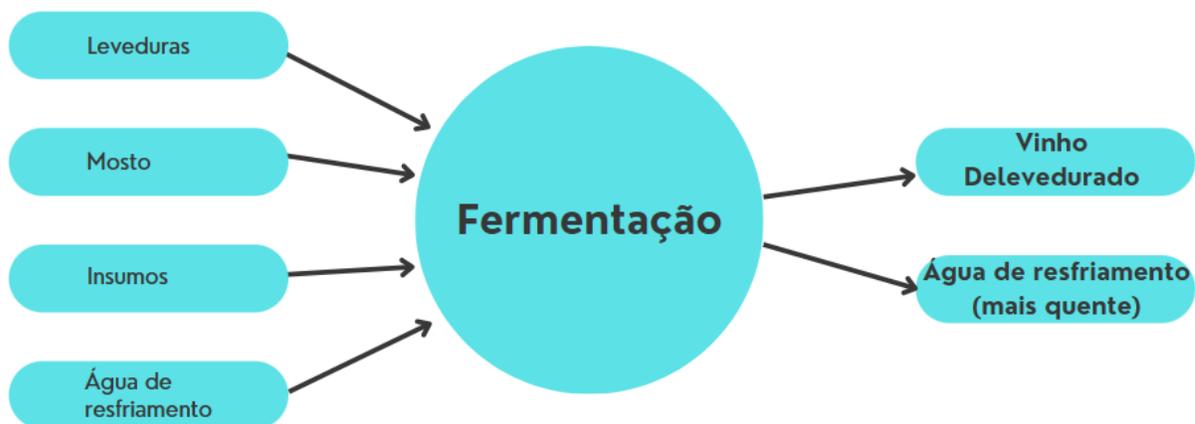
- O vinho delevedurado deve ter um °GL entre 7 e 11 e é armazenado nas dornas volantes, que servem como tanques-pulmão, ajudando a manter uma vazão de alimentação de vinho estável para as colunas de destilação;

4.2 ENTRADAS E SAÍDAS DA FERMENTAÇÃO

Isolando-se a fermentação do resto do processo produtivo de etanol como um volume de controle, é possível analisar todas as suas entradas e saídas de forma mais minuciosa. Como entradas, tem-se o mosto, as leveduras, insumos, como nutrientes, antibióticos e controladores de espuma, e água de resfriamento, utilizada para resfriar o mosto antes da sua alimentação e o vinho contido nas dornas de fermentação. Já, as saídas são o vinho delevedurado e a água de resfriamento após as trocas térmicas.

Na Figura 13 abaixo, apresenta-se a fermentação como um volume de controle, facilitando a visualização de todos os inputs e outputs do processo.

Figura 13- Entradas e saídas do processo de fermentação



Fonte: do autor

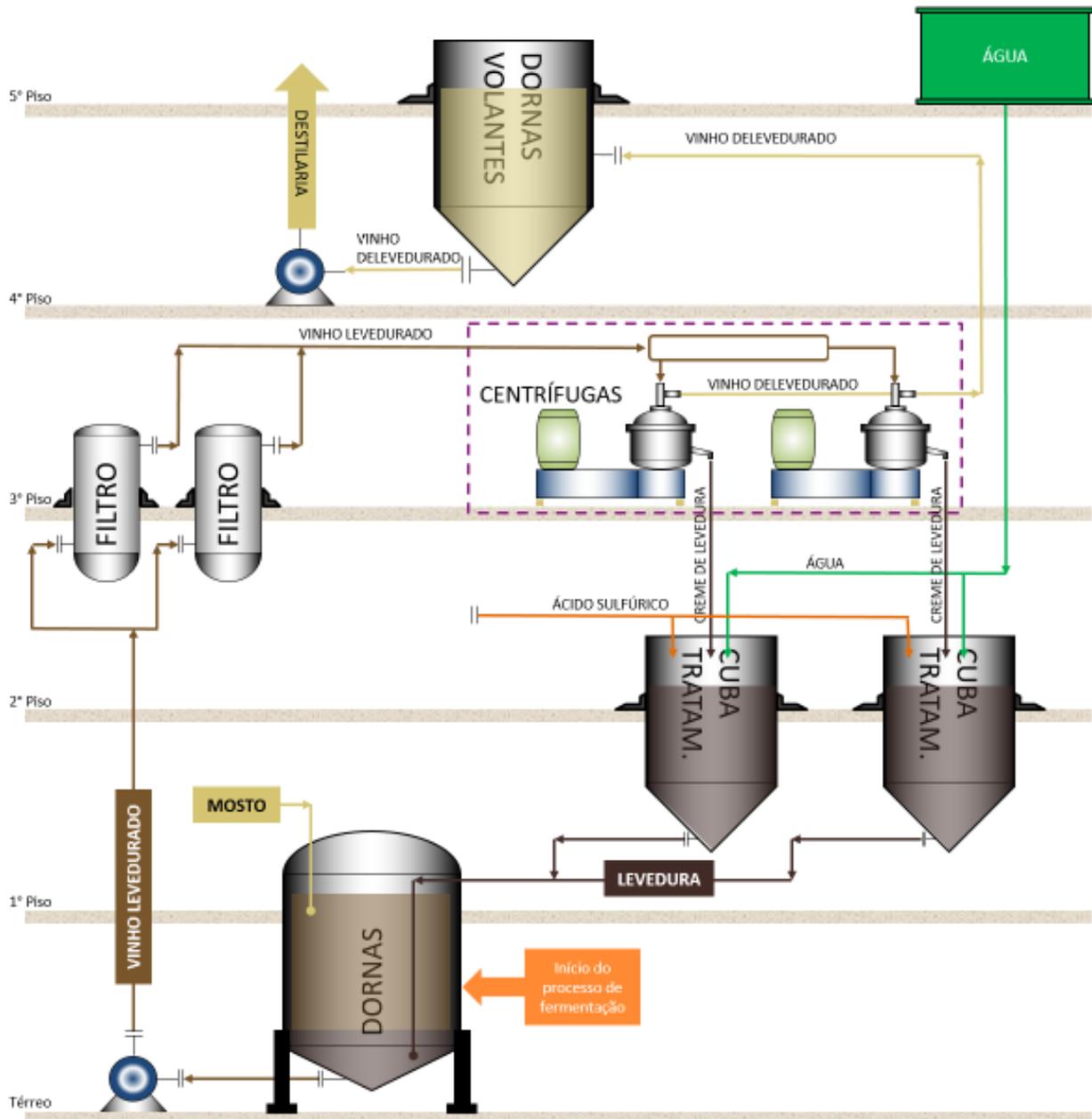
4.3 FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE FERMENTAÇÃO DA USINA “X”

O setor de fermentação na Usina “X” tem 9 dornas de fermentação com 300m³ cada, 2 cubas de tratamento de fermento, com 70 m³ cada, 4 centrífugas de vinho para fazer a separação e o reciclo das células, 1 dorna de mel de 300m³, que armazena o mel proveniente da centrifugação

da massa B na fábrica de açúcar para o preparo do mosto no setor de Tratamento de caldo, e 2 dornas volantes para armazenamento de vinho delevedurado, com 300m³ cada.

O processo fermentativo tem início com a injeção de flegma (vapor alcoólico de 50°GL retirado das colunas de destilação) por meio de bicos em cabeçotes rotativos na dorna de fermentação que irá iniciar o próximo ciclo fermentativo para fazer a sua assepsia. Após essa etapa, inicia-se preparo do pé de cuba, que é o momento em que o fermento já tratado é transferido para a dorna de fermentação, então inicia-se a alimentação do mosto seguindo a estratégia de operação da usina para que as 9 dornas, que operam em batelada alimentada, garantam uma vazão de vinho contínua para as centrífugas. Assim inicia-se o ciclo fermentativo, com uma duração média de 9 horas, sendo 5 horas com alimentação de mosto e mais cerca de 4 horas fermentando até que a dorna “morra”, ou seja, fique com °BRIX constante e não apresente ART residual. Quando a dorna “morre”, ela entra na espera para ser “turbinada”, momento no qual o seu vinho é enviado para as centrífugas separarem a parte líquida (vinho delevedurado) da parte sólida (creme de leveduras), passando, antes, pelos filtros de vinho, de modo que esses retenham qualquer peça metálica que possa vir a danificar as centrífugas. O vinho é então enviado para as Dornas Volantes, onde ele é armazenado para posteriormente ser destilado. Já, o creme de leveduras, retorna ao processo, sendo direcionado para uma cuba, onde é feita a adição de água clorada e ácido sulfúrico para tratar o fermento e prepará-lo para o próximo ciclo de fermentação. O fluxograma do processo está ilustrado abaixo na Figura 14.

Figura 14- Fluxograma do processo de fermentação na Usina “X”



Fonte: do autor

4.3.1 ESTRATÉGIA DE OPERAÇÃO DA FERMENTAÇÃO NA USINA “X”

Numa usina cujas dornas de fermentação operam em batelada alimentada é necessário ajustar as suas vazões de alimentação de mosto, e traçar uma estratégia adequada para que a vazão de vinho para as centrífugas e, conseqüentemente, para a destilaria seja mantida constante.

Na Usina “X”, a estratégia de operação da fermentação segue o Quadro 2, abaixo.

Quadro 2 - Estratégia de operação da fermentação na Usina “X”

Dorna1	Dorna2	Dorna3	Dorna4	Dorna5	Dorna6	Dorna7	Dorna8	Dorna9
92%	69%	46%	23%	T	Cheia	Cheia	Cheia	Cheia
Cheia	92%	69%	46%	23%	T	Cheia	Cheia	Cheia
Cheia	Cheia	92%	69%	46%	23%	T	Cheia	Cheia
Cheia	Cheia	Cheia	92%	69%	46%	23%	T	Cheia
Cheia	Cheia	Cheia	Cheia	92%	69%	46%	23%	T
T	Cheia	Cheia	Cheia	Cheia	92%	69%	46%	23%
23%	T	Cheia	Cheia	Cheia	Cheia	92%	69%	46%
46%	23%	T	Cheia	Cheia	Cheia	Cheia	92%	69%
69%	46%	23%	T	Cheia	Cheia	Cheia	Cheia	92%

Fonte: do autor

Percebe-se, pelo Quadro 2, que sempre se trabalha com a fermentação de modo a manter 4 dornas sendo alimentadas, 1 sendo “turbinada” e 4 dornas cheias (com vinho, no máximo, em 92% da sua capacidade), das quais 3 ficam terminando o processo de fermentação e 1 já está “morta” esperando para ser “turbinada”. Operando dessa forma, garante-se uma retirada contínua de vinho das 9 dornas em conjunto, mesmo que elas operem individualmente em batelada alimentada, além de evitar que uma dorna morta fique muito tempo parada em espera para ser turbinada, diminuindo, assim, a incidência de infecção bacteriana do vinho e seus efeitos negativos na viabilidade do fermento.

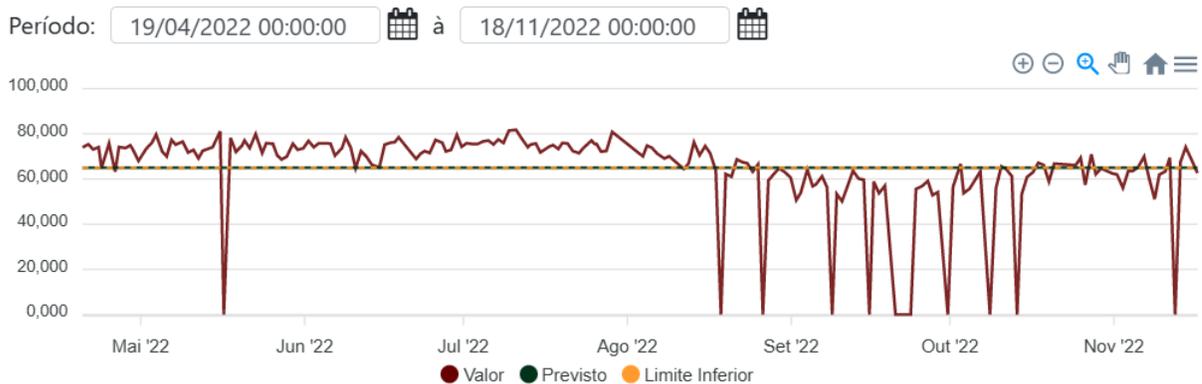
4.4 ACOMPANHAMENTO DE PARÂMETROS: RELAÇÃO ENTRE A FLOCULAÇÃO E A CONCENTRAÇÃO DO FERMENTO

Como já foi dito, a centrifugação é uma das partes mais importantes da fermentação, pois é ela que determina a qualidade do fermento tratado. Para se obter um creme de leveduras de

concentração elevada (acima de 65%) é necessário que as centrífugas estejam funcionando adequadamente, o que depende de uma série de fatores, como os bicos do equipamento estarem bem dimensionados e o fermento apresentar baixos índices de floculação.

Na Figura 15, está o gráfico da concentração de creme de levedura, em porcentagem, durante a Safra 22'23 toda, iniciada em 19/04/2022 e terminada em 18/11/2022. A média da concentração do creme de leveduras na safra foi de 64,96%, bem próxima do valor mínimo desejável, de 65%.

Figura 15- Acompanhamento da concentração de fermento, em %, ao longo da Safra 22'23



Fonte: do autor

No gráfico da Figura 15, pode-se identificar 3 momentos distintos. No primeiro momento, do início da safra, em 19/04/2022, até 18/08/2022, as centrífugas não apresentavam dificuldades para produzir um creme de leveduras bem concentrado, chegando a alcançar valores de concentração de células de até 82%, como o gráfico da Figura 16 ilustra, e mantendo uma média bem satisfatória de 73% no período.

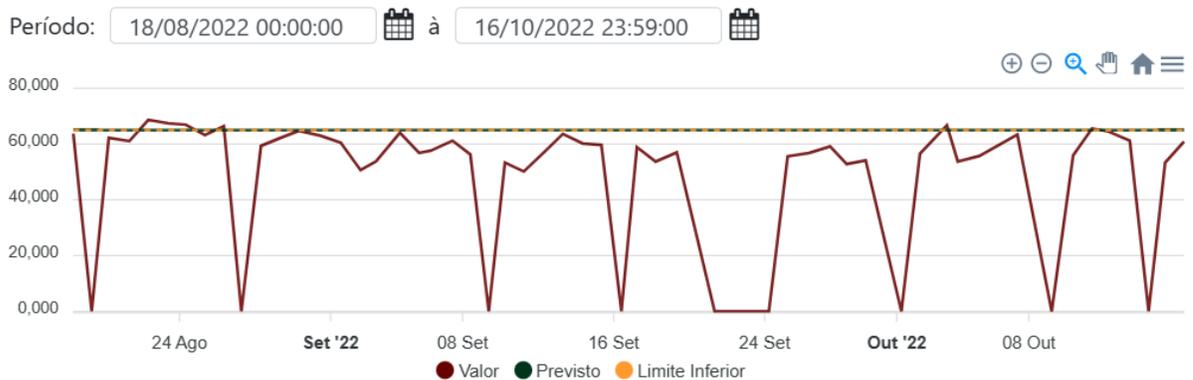
Figura 16- Acompanhamento da concentração de fermento, em %, de 19/04 a 18/08



Fonte: do autor

No entanto, a partir de 18/08, esse cenário mudou, e as centrífugas começaram a ter dificuldades em concentrar o fermento. A Figura 17, abaixo, ilustra detalhadamente esse período e dela pode-se constatar que foram poucos os momentos entre 18/08 e 16/10 em que o creme de leveduras chegou a alcançar o valor mínimo desejado de concentração, de 65%, sendo, a média de concentração nesse período de 49,80%.

Figura 17- Acompanhamento da concentração de fermento, em %, de 18/08 a 16/10

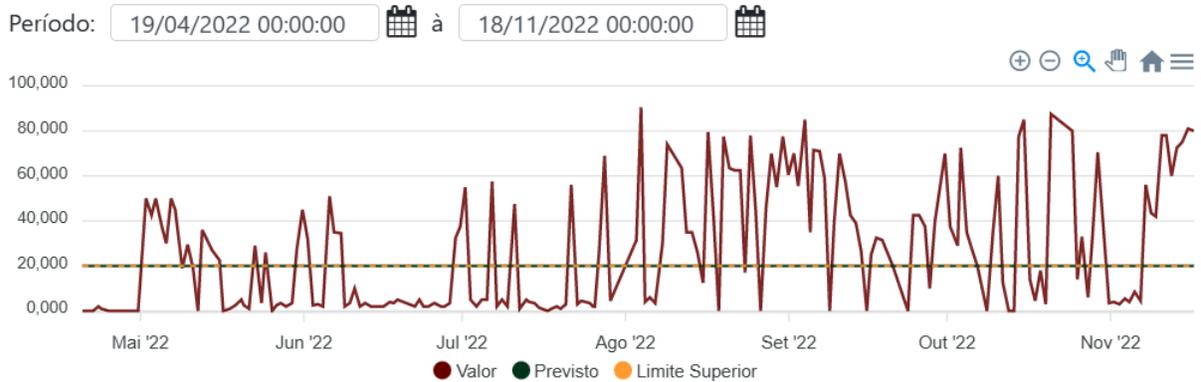


Fonte: do autor

Logo no início desse período, quando o time de processos percebeu essa dificuldade de controle na concentração do creme de leveduras, também foi percebido um aumento muito significativo na floculação, que, conhecidamente é um fator que atrapalha muito o funcionamento das centrífugas, não somente por formar gradientes de concentração de células no vinho alimentado no equipamento, mas também pelas características do creme de leveduras gerado. Os flocos de fermento são hidrofóbicos e não misturam bem com o vinho, causando problemas de escoamento

pelos bicos da centrífuga e não permitindo uma compactação adequada da massa celular. Isso faz com que as centrífugas não consigam gerar um creme de leveduras de concentração adequada. O gráfico da floculação do fermento ao longo da safra está ilustrado na Figura 18, abaixo.

Figura 18- Acompanhamento da floculação de fermento, em %, ao longo da Safra 22'23

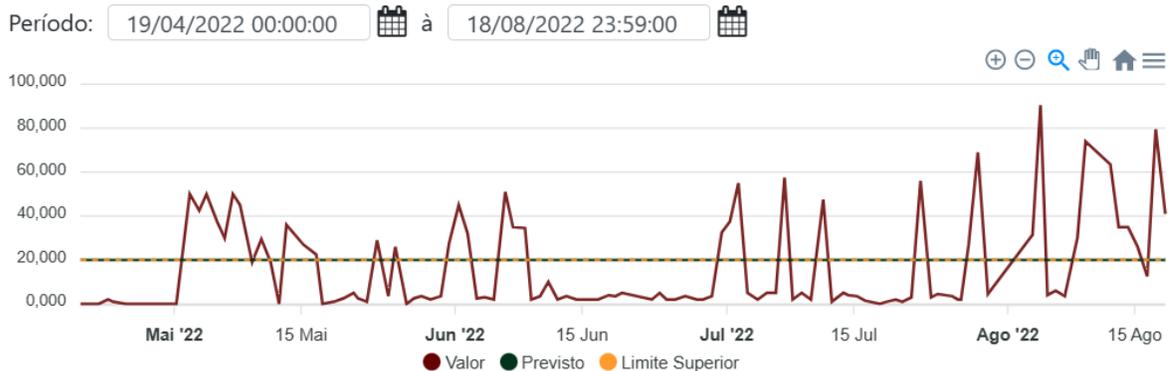


Fonte: do autor

Analisando a floculação do fermento ao longo da Safra 22'23, é possível perceber dois comportamentos distintos. Do início da safra até 18/08 o fermento apresentou valores mais baixos de floculação. Em contrapartida, de 18/08 até o final da safra começaram a aparecer problemas nesse parâmetro.

Até 18/08 houveram poucos momentos em que a floculação ficou acima de 20%, que deve ser o máximo aceitável, como ilustra o gráfico da Figura 19. A média do parâmetro nesse período foi satisfatória, ficando em torno de 16%.

Figura 19- Acompanhamento da floculação de fermento, em %, de 19/04 a 18/08



Fonte: do autor

Como nesse período a floculação manteve-se controlada na maior parte do tempo, ela não representou um problema para as centrífugas produzirem um creme de leveduras de concentração elevada, acima de 65%. O que explica os resultados vistos na Figura 16 e a média de 73% de concentração do creme de leveduras no período.

No entanto, após 18/08, a floculação do fermento ficou acima de 20% na maior parte do tempo, como pode-se perceber analisando a Figura 20, fazendo com que a média do parâmetro nesse momento ficasse em torno de 40%.

Figura 20- Acompanhamento da floculação do fermento, em %, de 18/08 a 18/11

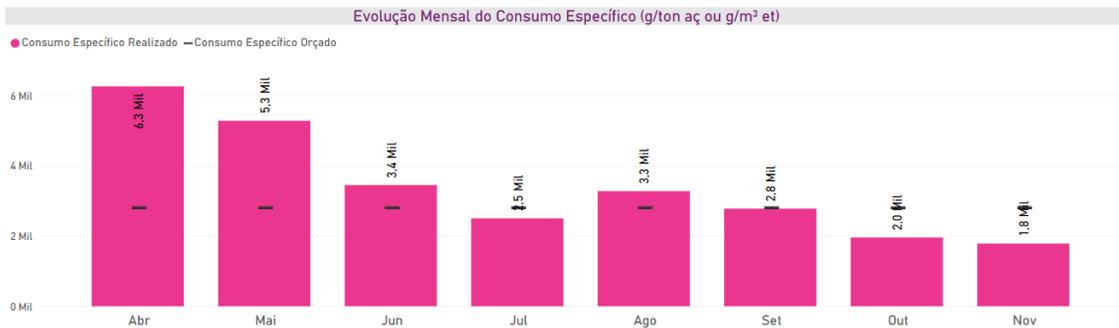


Fonte: do autor

Há diversos fatores que podem aumentar consideravelmente a floculação do fermento, dentre eles, excesso de cal e polímeros eletrolíticos floculantes no mosto, utilizados na etapa de tratamento de caldo para clarificá-lo, infecção bacteriana durante a fermentação, ou a entrada de leveduras selvagens com características floculantes no processo.

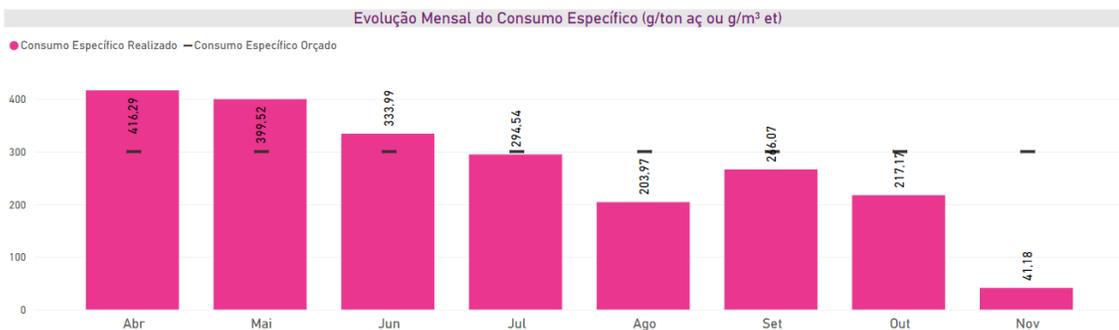
As primeiras duas hipóteses foram descartadas como possíveis causas para os problemas de floculação de fermento vistos a partir de 18/08, pois não foram notados aumentos no consumo de cal e de polímeros floculantes no mês de agosto nem nos meses que seguiram, com relação ao início da safra, como mostram as figuras 21 e 22. Além disso, apesar de infecções bacterianas aumentarem as taxas de floculação, elas são contidas com muita rapidez pela aplicação imediata de antibióticos no tratamento de fermento, não provocando, assim, um aumento persistente na floculação de leveduras como o observado.

Figura 21- Visão mensal do consumo específico, em g/m³ de etanol produzido, de cal.



Fonte: do autor

Figura 22 Visão mensal do consumo específico, em g/m³ de etanol produzido, de polímero flocculante.



Fonte: do autor

No início de cada mês da Safra, a empresa terceirizada que fornece as leveduras selecionadas em laboratório para a Usina “X” coleta amostras de fermento para fazer testes de cariotipagem. A finalidade disso é verificar se essa levedura ainda está em processo ou se ela já perdeu espaço para as leveduras selvagens, provenientes da mutação da própria levedura selecionada durante os brotamentos e do cruzamento delas com leveduras contaminantes que entram no processo através da matéria-prima. O teste do mês de agosto concluiu que apenas 50% da levedura em processo era do mesmo tipo da levedura selecionada que havia sido comprada no início da safra, portanto, a partir daquele momento foi considerado que as leveduras selvagens, com fortes características flocculantes, passaram a ser dominantes no meio fermentativo.

Diante desse resultado, o time de gestão de processos da Usina “X” concluiu que esse foi o principal causador da flocculação elevada vista no gráfico da Figura 20. Pois, enquanto a levedura selecionada em laboratório era predominante, houveram momentos pontuais nos quais a flocculação ficou descontrolada, em decorrência de infecções bacterianas ou de variações de processo, mas a

partir de agosto, com a predominância das leveduras selvagens no meio, esse problema ficou muito mais persistente, alcançando, várias vezes, valores na casa dos 80%, quatro vezes maior que o valor limite aceitável de 20%, e mantendo uma média de 40,77% no período.

Para tentar reduzir os efeitos da floculação, ainda no mês de agosto, abaixou-se o pH do nas cubas de tratamento de fermento, que geralmente é mantido entre 2,0 e 2,3, por meio do aumento da dosagem de H_2SO_4 , para 1,9 por dois ciclos fermentativos, mas não houve redução na floculação, levando à decisão de voltar para o pH normal de operação, já que não é recomendado expor as leveduras a pH's mais baixos do que 2,0 por tempos prolongados.

Como a causa principal da floculação era a natureza da levedura predominante no processo, esse deixou de ser um problema passível de resolução e procurou-se atuar em outros problemas para que as centrífugas voltassem a concentrar o fermento adequadamente. Primeiro, entre o final de agosto e o começo de setembro, aumentou-se a frequência de limpeza desses equipamentos, visando desentupir os seus bicos mais vezes e facilitar o escoamento dos fluidos no seu interior, pois com o fermento mais floculado, as centrífugas passaram a apresentar esses problemas com maior intensidade, fazendo com que parte do fermento fosse perdido para o vinho centrifugado e o retorno de vinho para as Cubas de tratamento através do creme de leveduras (de concentração abaixo da adequada) aumentasse. Entretanto, essa medida não surtiu efeito, como pode-se inferir pelo gráfico da Figura 20.

Foi só no final de setembro que foi notado um terceiro problema: os bicos das quatro centrífugas de vinho estavam desgastados, apresentando um diâmetro interno de 0,1mm maior do que o diâmetro nominal. Nessa situação, inevitavelmente o creme de leveduras teria uma queda na concentração, pois quando os bicos da centrífuga apresentam um diâmetro maior do que o projetado há um maior retorno de vinho por eles, diluindo as células presentes no creme, além de ocasionar problemas no mesmo pois isso aumenta recirculação de etanol e diversos contaminantes como glicerol, ácido láctico e bactérias no processo. Em 16/10 trocaram-se todos os 48 bicos (12 de cada centrífuga) e, a partir dessa data, conseguiu-se obter resultados melhores de concentração do fermento, como ilustra a Figura 23, que representa o gráfico das concentrações do creme de leveduras, em %, entre 16/10 e o final da safra em 18/11.

Figura 23 - Acompanhamento da concentração do fermento, em %, de 16/10 a 18/11



Fonte: do autor

Analisando a Figura 23 acima, percebe-se que após a troca dos bicos desgastados houve uma melhora significativa no desempenho das centrífugas, que passaram a concentrar melhor o fermento, mantendo valores de concentração próximos de 65% na maior parte do tempo, e resultando na média de 61,89% no período, um pouco abaixo do adequado. Esse resultado é em decorrência da soma de dois fatores: as centrífugas trabalhando corretamente e com bicos bem dimensionados, e a taxa de floculação elevada do fermento, atrapalhando o bom funcionamento do equipamento. Isso explica por que, após essa medida corretiva, a média de concentração do fermento subiu de 49,80% para 61,89% ao invés de subir para um valor próximo de 73%, como era antes dos problemas de floculação do fermento agravados a partir de 18/08 devido, principalmente, à saída das leveduras selecionadas do processo fermentativo da Usina “X”.

5 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando a concentração do creme de leveduras gerado pelas centrífugas de vinho durante a Safra 22'23 na Usina “X” percebeu-se 3 momentos distintos.

Entre o início da safra e 18/08, não houveram problemas para concentrar o fermento, em decorrência das suas baixas taxas de floculação, chegando a alcançar valores de 82% e mantendo uma média de cerca de 73% no período.

No entanto, a partir de 18/08 o fermento começou a apresentar altos índices de floculação, problema que até então só tinha ocorrido em momentos pontuais devido a variações de processo, como infecções bacterianas. Tudo isso atrapalhou muito o funcionamento das centrífugas, que passaram a ter dificuldades em concentrar o fermento, derrubando a média dessa concentração no período de 18/08 a 16/10 para 49,80%.

Como não houveram aumentos nos consumos de cal e polímeros floculantes em agosto e nos meses que seguiram, descartou-se a hipótese de consumo excessivo desses insumos como possível causa para o aumento da floculação a partir de 18/08, levando o time de processos da Usina “X” a analisar outras hipóteses.

No teste de cariotipagem do início do mês de agosto, concluiu-se que a levedura selecionada em laboratório não era mais predominante no processo, tendo perdido espaço para leveduras selvagens com fortes características floculantes. Concluiu-se, então, que esse foi o principal motivo por esse aumento da floculação.

Abaixou-se o pH do tratamento de fermento para 1,9 por um tempo, mas a medida não surtiu efeito na diminuição da floculação. Aumentou-se a frequência de limpeza das centrífugas de vinho, mas isso também não ajudou na melhora da concentração do fermento. Só no final de setembro foi percebido que os bicos das centrífugas estavam desgastados, o que influencia diretamente na baixa concentração do creme de leveduras, devido ao maior retorno de vinho para as cubas pelo creme de leveduras, de concentração abaixo do adequado. Então, em 16/10, foram trocados esses bicos e a melhora na concentração de fermento foi imediata, mantendo uma média de 61,89% dessa data até o final da safra, em 18/11.

Apesar da medida corretiva de trocar os bicos desgastados ter surtido efeito, a média de concentração de fermento nunca chegou próxima dos 73%, como no início da safra, pois, naquele momento, a floculação estava controlada, não atrapalhando o desempenho das centrífugas.

REFERÊNCIAS

ALCOOLBRÁS. **Guerra contra as bactérias**. São Paulo: ALCOOLbrás, n. 91, 2005. Disponível em: [Edição 91 - Revista ALCOOLbras](#) Acesso em: 05 jan. 2023.

ALFA LAVAL. **How centrifugal separation works: designs for different separation duties. Designs for different separation duties**. 2023. Disponível em: <https://www.alfalaval.com/products/separation/centrifugal-separators/separators/innovations/separator-innovator/how-separation-works/>. Acesso em: 26 fev. 2023.

AMORIM, H. V.; LEAO, R. M. **Fermentação alcoólica: ciência e tecnologia**. [S.l: s.n.], 2005.

ANDRIETTA, S. R.; **Modelagem, Simulação e Controle de Fermentação Alcoólica Contínua em Escala Industrial** – Universidade de Campinas – Faculdade de Engenharia de Alimentos, 1994. 163p. Tese (Doutorado).

BANAT, I. M.; NIGAM, P.; SINGH, P.; MARCHANT, R.; McHALE, A. P. **Review: ethanol production at elevated temperatures and alcohol concentration: Part i – Yeast in general**. World Journal of Microbiology and Biotechnology, v.14, n.6, p.809-821, 1998

CECCATO-ANTONINI, S. R. **Microbiologia da fermentação alcoólica: a importância do monitoramento microbiológico em destilarias**. São Carlos: EdUFSCar, n. 5, 2010, p.16-20.

CECCATO-ANTONINI, S. R. **Monitoramento microbiológico em destilarias: uma necessidade**. STAB, Piracicaba, v. 16, n. 5, p. 18-19, 1998.

DARÉ, R. M. **Avaliação de coeficientes de rendimento e modelagem do processo fermentativo de produção de etanol**. São Carlos: UFSCar, 2009.

DORTA, C.; OLIVA-NETO, P.; ABREU-NETO, M. S.; NICOLU-JUNIOR, N.; NAGASHIMA, A. I. Synergism among lactic acid, sulfite, pH and ethanol in alcoholic fermentation of *Saccharomyces cerevisiae* (PE-02 and M-26). World Journal of Microbiology and Biotechnology, Amsterdam, v. 22, p. 177-182, 2006.

FERNANDES, A. C.; **Cálculos na agroindústria de cana-de-açúcar**, 2ed. Piracicaba, STAB – Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 2003. 240p.

FERNANDES, P. M. B.; FERNANDES, A. A. R.; GHELFI, A.; PADDON, C.; ABBOTT, D.; BELISSIMI, E.; BRAVIM, F.; KEALEY, J.; GALAZZO, J.; ZAHN, K.; BENJAMIN, K.; DI CIERO, L. **Levedura: do pão à biotecnologia**. Vitória: EDUFES, 2009. 118 p.

LIMA, U. A., AQUARONE, E., BORZANI, W., SCHMIDELL, W. **Biotecnologia industrial: Processos fermentativos e enzimáticos**. São Paulo: Blucher, 2001.

LOPES, C. H.; GABRIEL, A. V. M. D.; BORGES, M. T. M. R. **Produção de etanol a partir da cana-de-açúcar**: tecnologia de produção de etanol. São Carlos: EdUFSCar, 2011, p.58-71.

MONTEIRO, B. M. D. S. **Produção de etanol combustível: efeito da suplementação nitrogenada na fermentação de mosto de caldo de cana com alta concentração de açúcar**. Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Piracicaba, 2016.

PELCZAR, M.; REID, R.; CHAN, E. C. S. **Microbiologia**. São Paulo: McGraw-Hill, 1980. 566 p.
PRONK, J. T., STEENSMA, H. Y., VAN DIJKEN, J. P. Pyruvate Metabolism in *Saccharomyces cerevisiae*. John Wiley & Sons, v.12, 1996, p.1607-1633.

SOUSA, J. L. U.; MONTEIRO, R. A. B. Fatores interferentes na fermentação alcoólica para produção de etanol. Uberaba: FAZU em Revista, n.8, p.100-107, 2011.

VALSECHI, OCTAVIO. O processo melle-boinot de fermentação na sociedade de usinas de açúcar brasileira, de Piracicaba. An. Esc. Super. Agric. Luiz de Queiroz 1, 1944.

VASCONCELOS, J. N. Flashes de Destilaria. STAB, Vol. 25 n^o2, p.34-38, 2006.

ZAPERLON, F. As Especificações do Álcool Focadas para o Mercado Mundial. Brasília: EMBRAPA, 2008. Disponível em:

WIKIMEDIA COMMONS. **A simple, diagram labelled in English showing a yeast cell**. 2022. Disponível em:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Yeast_cell_english.svg#/media/File:Yeast_cell_english.svg. Acesso em: 26 fev. 2023.