



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO REGIONAL
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA SUCROALCOOLEIRA



**INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE ÁCIDO FOSFÓRICO NA OTIMIZAÇÃO
DA CLARIFICAÇÃO DO CALDO DE CANA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

EDIVALDO ALEXANDRE BEZERRA DA SILVA

JOÃO PESSOA - PB

2025

EDIVALDO ALEXANDRE BEZERRA DA SILVA

**INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE ÁCIDO FOSFÓRICO NA OTIMIZAÇÃO
DA CLARIFICAÇÃO DO CALDO DE CANA**

Trabalho de Conclusão do Curso de Tecnologia em Produção Sucroalcooleira no Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional da Universidade Federal da Paraíba, como requisito para a Graduação de Tecnologia em Produção Sucroalcooleira.

Orientadora: Profa. Dra. Erika Adriana de Santana

João Pessoa - PB

Abril de 2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586i Silva, Edivaldo Alexandre Bezerra da.
Influência da concentração de ácido fosfórico na
otimização da clarificação do caldo de cana / Edivaldo
Alexandre Bezerra da Silva. - João Pessoa, 2025.
41 f. : il.

Orientação: Erika Adriana de Santana.
TCC (Graduação) - UFPB/CTDR.

1. Clarificação. 2. Caldo de cana. 3. Ácido
fosfórico. 4. Cor do caldo. 5. Otimização. I. Santana,
Erika Adriana de. II. Título.

UFPB/CTDR

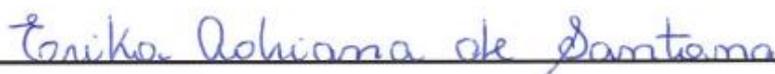
CDU 664.113:543.216.185

EDIVALDO ALEXANDRE BEZERRA DA SILVA

**INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE ÁCIDO FOSFÓRICO NA OTIMIZAÇÃO
DA CLARIFICAÇÃO DO CALDO DE CANA**

TCC aprovado em 29/04/25 como requisito para a conclusão do curso de Tecnologia em
Produção Sucroalcooleira da Universidade Federal da Paraíba.

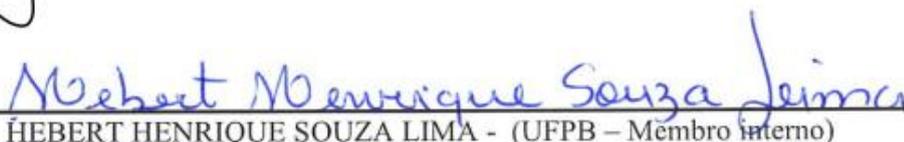
BANCA EXAMINADORA:



PROF. Dr. ÉRIKA ADRIANA DE SANTANA - (UFPB – Orientadora)



JOSÉ EDUARDO DE MATOS PAZ - (Membro externo)



HEBERT HENRIQUE SOUZA LIMA - (UFPB – Membro interno)

João Pessoa - PB

Abril de 2025

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado força, sabedoria e saúde durante toda essa caminhada.

Aos meus pais e à minha família, pelo amor incondicional, apoio e incentivo constantes em cada etapa dessa jornada.

À minha orientadora, Profa. Dra. Erika Adriana, pela dedicação, paciência e orientações valiosas que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Operações Unitárias do CTDR/UFPB, pelo suporte e auxílio durante a realização dos experimentos.

Ao meu supervisor e encarregado, pelo apoio prático, pelas contribuições técnicas e por acreditarem na importância deste estudo.

Aos meus colegas de trabalho e da Universidade, que estiveram presentes nos momentos difíceis e compartilharam comigo essa etapa com amizade e companheirismo.

À Usina Central Olho D'Água, pela colaboração, pelo espaço cedido e pela confiança depositada neste projeto.

A todos vocês, o meu mais sincero muito obrigado.

RESUMO

A clarificação do caldo de cana é uma etapa essencial no processo de produção de açúcar, influenciando diretamente na qualidade e eficiência. Em geral, o caldo de cana possui, em média, cerca de 250 ppm de ácido fosfórico, mas algumas variedades de cana produzem caldos com baixo teor, dificultando o processo de tratamento. Portanto, à medida que a sua concentração no caldo aumenta a clarificação se torna mais eficiente. Neste trabalho foi avaliada a influência da adição de ácido fosfórico no caldo de cana na etapa de clarificação em usinas sucroalcooleiras, com o objetivo de otimizar a remoção de impurezas, otimizando a decantação. O trabalho foi realizado em uma usina sucroalcooleira em Pernambuco, avaliando os dados de impurezas minerais no recebimento da cana, índice de cor, pH e P_2O_5 do caldo misto e clarificado durante a safra 24/ 25, em paralelo foram realizados testes, verificando o impacto da adição de diferentes concentrações de ácido fosfórico (200, 400, 600 e 800 ppm) no caldo de cana *in natura* e em amostras do processo industrial, essas coletadas nos mesmos pontos da avaliação dos dados. Os valores médios obtidos para índice de cor, pH e P_2O_5 na safra 24/ 25 para o caldo misto (19.976; 5,00 e 480,00) e caldo clarificado (15.104; 7,11 e 74,70). Os testes com o caldo *in natura* mostraram que a concentração de 800 ppm reduziram em 30,55% de cor. Os experimentos com as amostras do processo indicaram que a concentração ideal de ácido fosfórico de 800 ppm maximizou a eficiência da floculação-coagulação, proporcionando a redução na cor e turbidez iniciais no caldo, otimizando o desempenho operacional, obtendo uma redução de 57,87% na cor e 87,71% na turbidez dos caldos misto e caleado, respectivamente. Foi utilizado o Statistic para avaliar os dados operacionais pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), o qual indicou que as maiores concentrações de ácido fosfórico otimizam a cor e a turbidez, entretanto, sem diferença estatisticamente significativa. Também foi possível verificar que é necessário monitorar a qualidade da cana e as condições operacionais de: temperatura, pH, agitação bem como o local de adição do ácido fosfórico para que o mesmo atue de forma eficiente na clarificação do caldo. Portanto, neste estudo foi possível otimizar a clarificação do caldo misto e caleado na usina, através da adição do ácido fosfórico e ajustes operacionais, sendo fundamental monitorar a concentração dos insumos utilizados para evitar o uso excessivo, reduzindo os custos e alinhando a qualidade do açúcar a sustentabilidade.

Palavras-chave: Clarificação, caldo de cana, ácido fosfórico, cor do caldo, otimização.

ABSTRACT

Clarification of sugarcane juice is an essential step in the sugar production process, directly influencing quality and efficiency. In general, sugarcane juice contains an average of approximately 250 ppm of phosphoric acid, but some cane varieties produce juice with low levels, making the treatment process more difficult. Therefore, as the concentration of phosphoric acid in the juice increases, clarification becomes more efficient. This study evaluated the influence of phosphoric acid addition to sugarcane juice during the clarification stage in sugar-ethanol mills, aiming to optimize impurity removal and improve settling efficiency. The research was conducted at a sugar-ethanol mill in Pernambuco, analyzing data on mineral impurities at cane reception, color index, pH, and P_2O_5 levels of mixed and clarified juice during the 2024/2025 harvest. In parallel, tests were carried out to assess the impact of adding different concentrations of phosphoric acid (200, 400, 600, and 800 ppm) to raw cane juice and industrial process samples collected from the same evaluation points. The average values obtained during the 2024/2025 harvest for the mixed juice were: color index 19,976; pH 5.00; and P_2O_5 480.00 ppm, and for the clarified juice: color index 15,104; pH 7.11; and P_2O_5 74.70 ppm. Tests on raw juice showed that an 800 ppm concentration reduced color by 30.55%. Experiments with industrial process samples indicated that 800 ppm was the ideal phosphoric acid concentration, maximizing flocculation-coagulation efficiency and reducing initial juice color and turbidity, resulting in reductions of 57.87% in color and 87.71% in turbidity for mixed and limed juice, respectively. Statistical analysis using the Tukey test ($p < 0.05$) indicated that higher concentrations of phosphoric acid improved color and turbidity, although the differences were not statistically significant. The study also confirmed the need to monitor cane quality and operational conditions such as temperature, pH, agitation, and the point of acid addition to ensure efficient juice clarification. Therefore, this study demonstrated that it is possible to optimize the clarification of mixed and limed juice in the mill through phosphoric acid addition and operational adjustments, emphasizing the importance of monitoring input concentrations to prevent excessive use, reduce costs, and align sugar quality with sustainability.

Keywords: Clarification, sugarcane juice, phosphoric acid, juice color, optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma de preparo do leite de cal.	18
Figura 2: Distribuição de espécies de fosfato em função do pH.	20
Figura 3: Experimento de decantação do caldo de cana realizado no laboratório industrial ...	34
Figura 4: Redução da cor do caldo de cana com diferentes concentrações de ácido fosfórico.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados safra 24/25.....	30
Tabela 2: Médias dos valores das impurezas minerais (Kg/ tc) na safra 24/25.....	31
Tabela 3: Análises físico-químicas dos caldos misto e caleado, retirados do processo de produção de açúcar da usina.....	33
Tabela 4: Teste estatístico Tukey ($p < 0,05$) amostras caldo processo usina	36

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	10
2.REVISÃO DA LITERATURA	12
2.1 Produção de açúcar.....	12
2.2 Clarificação do caldo de cana	13
2.3 Controle do pH do caldo na clarificação.....	15
2.4 Reações durante a clarificação	16
2.5 Solução de Hidróxido de Cálcio (Cal)	18
2.6 Influência do fosfato na clarificação do caldo	19
2.7 Influência da qualidade da cana na clarificação.....	21
2.8 Influência das variáveis operacionais na clarificação do caldo de cana	22
2.9 Análise estatística – STATISTIC, Teste Tukey.....	23
3. METODOLOGIA	25
3.1 Clarificação do caldo de cana <i>in natura</i> , adicionando fosfato	25
3.2 Clarificação do caldo de cana em processo, adicionando fosfato	26
3.2.1 Avaliação estatística dos dados experimentais da clarificação do caldo em processo.....	26
3.3 Análise físico-química no caldo de cana.....	26
3.3.1 Análise de fosfato em caldo de cana	26
3.3.2 Análise pH em caldo de cana	26
3.3.3 Análise de cor ICUMSA em caldo de cana.....	27
3.3.4 Análise de turbidez em caldo de cana	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1 Avaliação dados de clarificação do caldo de cana na safra 24/25.....	30
4.2 Clarificação caldo <i>in natura</i> em laboratório.....	32
4.3 Clarificação caldo do processo da usina	32
4.4 Avaliação estatística dos dados experimentais de clarificação do caldo em processo.....	36
5. CONCLUSÃO	38
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é a principal matéria-prima da indústria sucroalcooleira no Brasil. Seu processamento envolve etapas como o fornecimento da matéria-prima, o manejo de insumos e resíduos, a definição entre produção de açúcar ou etanol, além do armazenamento e comercialização dos produtos. A eficiência dessas etapas depende da aplicação de boas práticas de gestão (ALCARDE, 2022).

Dentre as etapas da produção de açúcar o tratamento do caldo tem uma atuação relevante, devido ao quantitativo de insumos utilizados, visando eliminar as impurezas presentes, tanto as que são solúveis quanto as insolúveis, como areia, restos de bagaço e argila. Para isso, são utilizadas etapas como: peneiramento, aquecimento, aplicação de produtos químicos, decantação e a filtragem (USINA SANTA ADÉLIA, 2025).

A presença de ácido fosfórico no caldo de cana-de-açúcar é fundamental para a eficiência do processo de clarificação. Em média, a concentração natural desse ácido no caldo é de aproximadamente 250 mg/L, porém esse valor pode variar conforme a variedade da cana e as condições de cultivo. Algumas variedades, conhecidas como “refratárias”, apresentam teores muito baixos, em torno de 200 mg/L ou até 50 mg/L, o que compromete a clarificação. Nessas situações, recomenda-se a adição de ácido fosfórico antes da etapa de defecação, visando alcançar a concentração mínima ideal de 300 mg/L para um tratamento eficaz (HUGOT, 1969).

Há muitos anos é reconhecida a importância dos fosfatos na clarificação do caldo e na remoção de cor durante o tratamento. Esse efeito é especialmente evidente em condições alcalinas: caldos com teor naturalmente elevado de P_2O_5 tendem a clarificar com mais facilidade e apresentar coloração mais clara em comparação com aqueles com baixos níveis desse composto. No entanto, a concentração de fosfato no caldo de cana costuma ser bastante reduzida. Por isso, tornou-se prática comum a adição de ácido fosfórico junto com a cal. As reações envolvidas resultam na formação de um precipitado denso e floculento de fosfato tricálcico [$Ca_3(PO_4)_2$], que atua retendo não apenas impurezas, mas também uma quantidade significativa de substâncias corantes (ALBUQUERQUE, 2016).

Este trabalho tem como foco a avaliação da adição de fosfato em diferentes concentrações no caldo de cana-de-açúcar, com o objetivo de otimizar o processo de clarificação e decantação em usinas sucroalcooleiras. O setor sucroenergético está em constante busca por melhorias operacionais, e estudos demonstram que a dosagem de ácido fosfórico

antes da etapa de caleação pode influenciar positivamente parâmetros como cor e turbidez do caldo clarificado. Esses fatores são cruciais para o controle operacional, contribuindo para a redução da cor ao longo do processo. No entanto, desafios como a qualidade da matéria-prima ainda impactam os resultados obtidos. Com este estudo, busca-se reforçar a importância de um controle operacional eficiente desde as etapas iniciais do processo, promovendo maior qualidade no tratamento de caldo e otimização do uso de insumos químicos. Demonstrando que a presença de fosfatos, sejam eles naturalmente presentes na matéria-prima ou adicionados intencionalmente, contribui significativamente para a eficiência da floculação.

O trabalho está estruturado de forma a apresentar as etapas envolvidas no processo de produção de açúcar, detalhando a importância da clarificação do caldo. A metodologia mostra como foi realizada a análise estatística dos dados da safra 2024/2025, bem como os métodos analíticos utilizados na avaliação físico-química do caldo de cana e os efeitos das diferentes concentrações de ácido fosfórico. Os resultados apresentam os dados: da safra 24/ 25, dos experimentos realizados em laboratório e no processo produtivo. Por fim, temos a conclusão com uma visão analítica e operacional desse estudo.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência do teor de ácido fosfórico na clarificação do caldo de cana.

1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar os dados de índice de cor, pH e P_2O_5 no caldo misto e clarificado na safra 24/ 25 da usina sucroalcooleira;
- Avaliar a interferência das concentrações de fosfato (200, 400, 600 e 800 ppm) na clarificação do caldo de cana in natura através das análises de: índice de cor, pH e P_2O_5 do caldo;
- Avaliar a interferência das concentrações de fosfato (200, 400, 600 e 800 ppm) na clarificação do caldo de cana misto e caleado, através das análises de: índice de cor, pH, P_2O_5 e turbidez do caldo;
- Relacionar os dados dos teores de ácido fosfórico avaliados com a qualidade da cana.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Produção de açúcar

No início do século XX, a produção açucareira do país estava quase confinada ao mercado interno, sofrendo uma grande crise que culminou com a intervenção governamental no setor, no início da década de 1930, criando-se uma série de mecanismos estatais de proteção do setor açucareiro. Como órgão federal agente da intervenção estatal, foi criado o Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA) e em 1941 surgiu o Estatuto da Lavoura Canavieira, que regulava o fornecimento de cana, seu preço e uma série de normas que permitiram a modernização do setor (LOPES, 2011).

O processo de fabricação do açúcar começa nas lavouras de cana-de-açúcar. Após um período de crescimento que leva de um a um ano e meio, a cana atinge o ponto ideal para a colheita. Esse trabalho é feito, na maioria das vezes, por máquinas colheitadeiras, mas também pode ser realizado manualmente por profissionais treinados com facões. Essa seleção cuidadosa garante que apenas canas no estágio certo de maturação sejam colhidas, assegurando um produto final de boa qualidade (FOX BOMBAS, 2023).

O processamento da cana de açúcar começa com a colheita e o transporte para a usina, onde a cana é limpa e moída para extração do caldo. Esse caldo passa por tratamento com aquecimento, produtos químicos e decantação para remoção de impurezas. Em seguida, é evaporado para concentrar a sacarose, cozido para cristalizar e centrifugado para separar o açúcar. Por fim, o produto é seco, resfriado e armazenado para consumo (NOVACANA, 2023).

A cana de açúcar é uma matéria-prima que se deteriora com facilidade, começando a perder suas propriedades logo após a colheita, o que compromete suas características tecnológicas para o processo industrial.

A produção de açúcar a partir da cana-de-açúcar envolve diversas etapas que dependem diretamente da qualidade da matéria-prima. A deterioração da cana ocorre, principalmente pela ação de microrganismos como o *Leuconostoc mesenteroides*, sendo essencial que o processamento ocorra rapidamente. Essa bactéria produz dextrana, que interfere em etapas importantes como a clarificação e decantação, comprometendo a eficiência e a qualidade do açúcar. Assim, torna-se indispensável o controle rigoroso da matéria-prima e da logística nas usinas para garantir um bom aproveitamento da cana (LOPES, 2011).

O caldo extraído da cana-de-açúcar é um líquido espesso, de coloração amarelo-

esverdeada e aparência turva, com uma composição química bastante diversa e sujeita a variações (PAYNE, 1989). Ele é formado predominantemente por água (cerca de 80%) e por sólidos solúveis (aproximadamente 20%). Entre esses sólidos, os principais são os açúcares, destacando-se a sacarose (17%), a glicose (0,4%) e a frutose (0,2%). Além dos açúcares, também estão presentes compostos orgânicos não açucarados, como substâncias nitrogenadas, lipídios, ceras, pectinas, ácidos orgânicos e pigmentos, bem como componentes inorgânicos representados pelas cinzas (STUPIELLO, 1987).

O caldo extraído da cana contém diferentes tipos e quantidades de impurezas, tanto solúveis quanto insolúveis. O tratamento inicial do caldo tem como principal finalidade remover ao máximo as impurezas insolúveis, como areia, argila e fragmentos de bagaço, que podem representar de 0,1% a 1,0% do conteúdo. Essa remoção é essencial para melhorar o desempenho do processo, prolongar a durabilidade dos equipamentos, também como evitar obstruções e contribuir para a produção de um açúcar de melhor qualidade (NUNES; FINZER, 2019).

O caldo de cana contém substâncias dissolvidas e em suspensão coloidal, como açúcares e proteínas. O tratamento visa remover essas impurezas por meio de processos físicos, como filtração e decantação, e químicos, como a adição de leite de cal e gás sulfito (LOPES, 2011).

2.2 Clarificação do caldo de cana

A clarificação tem como finalidade essencial remover o maior número possível de impurezas do caldo de cana, buscando obter um líquido claro, transparente e reluzente, por meio da coagulação eficaz dos colóides e da geração de precipitados capazes de adsorver e arrastar as impurezas, sendo essencial para a produção de um açúcar de qualidade (SOUZA, 1988). Fatores como a formação adequada de flocos, o controle da temperatura e do pH são determinantes nesse processo, pois sua ausência pode comprometer a eficiência da decantação.

O caldo proveniente da etapa de extração contém uma quantidade significativa de pequenos fragmentos de bagaço. Esses resíduos podem causar problemas no processamento subsequente, como entupimentos em equipamentos, especialmente nos aquecedores. A maior parte desse material pode ser facilmente removida por meio do peneiramento do caldo, geralmente realizado com o uso de peneiras rotativas. O bagaço separado nesse processo, conhecido como bagacilho, é geralmente retornado à planta de extração. O caldo proveniente da etapa de moagem pode conter aproximadamente 3 kg de sólidos insolúveis por 100 kg de

caldo bruto. O processo de peneiramento costuma reduzir essa quantidade para cerca de 0,5 kg de sólidos, sendo a maioria composta por partículas finas que não representam maiores problemas e são posteriormente removidas na etapa de clarificação (REIN, 2013).

A peneira rotativa é um equipamento utilizado no tratamento primário do caldo de cana, composto por um cilindro giratório com tela perfurada que retém sólidos como o bagacilho. Possui capacidade de retenção de até 83% e se destaca pela facilidade de limpeza e desinfecção, o que favorece sua aceitação em usinas e destilarias (LOPES, 2011).

Entre as diversas etapas do processo de produção de açúcar, a clarificação se destaca como uma das mais relevantes, pois a eficiência dessa fase influencia diretamente o desempenho e a operação das etapas seguintes, como evaporação, cozimento, cristalização e esgotamento. Em resumo, uma clarificação bem realizada contribui significativamente para a melhoria da qualidade e do rendimento do produto final (ALBUQUERQUE, 2016).

O processo de clarificação do caldo consiste, de forma geral, nas etapas de sulfitação, onde há contato em contracorrente entre o caldo e o gás SO_2 , calagem com a adição de leite de cal e uso de polímeros de cadeia longa. Durante esse processo, o caldo é aquecido, passa pela decantação e, como resultado, obtém-se o caldo clarificado, que é então direcionado para a etapa de evaporação (TFOUNI et al., 2007).

Após o aquecimento, o caldo chega ao tanque flash (ou balão flash) a cerca de 102 °C a 105 °C, onde sofre evaporação instantânea ao entrar em contato com a pressão atmosférica. Esse processo remove bolhas de ar aderidas às partículas sólidas, facilitando sua posterior sedimentação na clarificação (HUGOT, 1969).

A etapa mais crucial do processo de clarificação, na realidade, acontece antes do decantador. Trata-se da floculação, que consiste na formação de flocos capazes de reunir os sólidos em suspensão, facilitando sua sedimentação em uma velocidade adequada. Sem uma floculação eficiente, a separação dos componentes não açucarados torna-se ineficaz, já que, conforme a Lei de Stokes, não há diferença de densidade suficientemente significativa entre as partículas e o meio (ALBUQUERQUE, 2016).

Após a etapa de decantação, o processo segue para a filtração do lodo do caldo de cana, uma fase crucial na produção de açúcar, responsável por remover impurezas sólidas (torta de filtro) e contribuir para a elevação da qualidade do produto final. Historicamente, essa operação era realizada com filtros rotativos a vácuo (FRV). Contudo, com a evolução tecnológica, os filtros prensa de correia a vácuo (FVP) passaram a ser empregados, proporcionando melhorias expressivas no desempenho do processo (POLONIO, 2009).

2.3 Controle do pH do caldo na clarificação

O controle rigoroso do pH é fundamental para a eficiência da clarificação do caldo de cana-de-açúcar. A adição de leite de cal deve ser feita de forma criteriosa, visando alcançar uma faixa ideal de pH entre 7,6 a 8,2, que favorece a formação de flocos estáveis e a precipitação eficiente das impurezas (HUGOT, 1969). Nessa fase, é comum a aplicação da solução de hidróxido de cálcio, também chamada de leite de cal, que promove o aumento controlado da alcalinidade. Esse processo facilita a remoção de substâncias indesejáveis como proteínas, fosfatos e outros compostos coloidais (CASTRO; ANDRADE, 2007). Manter essa faixa adequada garante melhores resultados na caleação e na decantação, otimizando a qualidade do caldo clarificado.

O pH do caldo de uma cana-de-açúcar madura e em condições normais pode variar de 4,7 a 5,6, embora os valores mais frequentes estejam na faixa de 5,2 a 5,4 (ALBUQUERQUE, 2016).

O monitoramento preciso do pH é fundamental para evitar a inversão da sacarose, especialmente quando o caldo é exposto a altas temperaturas em ambiente ácido. A velocidade dessa inversão tende a crescer conforme a temperatura aumenta, mesmo que o pH permaneça constante. O ajuste adequado do pH é uma etapa essencial na clarificação do caldo de cana-de-açúcar, pois impacta diretamente a eficiência na eliminação de impurezas e na formação de flocos estáveis (CASTRO; ANDRADE, 2007).

O principal aspecto do controle da clarificação é a regulação do pH do caldo, que sofre influência da vazão do próprio caldo, da quantidade de cal adicionada e da temperatura. Para isso, recomenda-se, de forma geral, a utilização de sistema de controle contínuo de pH em malha fechada, complementado pelo controle da vazão do caldo e da temperatura no aquecedor (REIN, 2013).

O aumento do pH favorece a precipitação de não açúcares inorgânicos, como fosfatos, sesquióxidos e ácido silícico. Porém, acima de pH 8,5, pode haver redissolução de compostos proteicos e elevação do teor de nitrogênio. A redução do pH durante o aquecimento e decantação está relacionada à presença de fosfato (P_2O_5), e não à atividade microbiana. A cal reage com os fosfatos formando compostos insolúveis, que reduzem o pH. Cerca de 80% das proteínas e não açúcares orgânicos são removidos junto com o fosfato de cálcio no pH ideal de 6,8 a 7,2 (ALBUQUERQUE, 2016).

2.4 Reações durante a clarificação

Diversas reações ocorrem no caldo, podendo ser agrupadas conforme sua origem: aquelas provocadas pela variação do pH, as decorrentes da alteração na concentração de cálcio (Ca^{2+}) e as que resultam do aumento da temperatura. Essas reações podem ser divididas em químicas e físicas. Dentre as reações químicas, destaca-se a interação entre o cátion cálcio (Ca^{2+}) e o íon fosfato (PO_4^{3-}), que leva à formação de fosfatos intermediários e à precipitação de trifosfato de cálcio ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) (REIN, 2013).

Os fundamentos teóricos e práticos da clarificação têm origem no tradicional processo de caleação, que envolve o aquecimento e a adição de cal. É essencial compreender a atividade dos íons cálcio e fosfato, bem como o mecanismo de reação entre eles e o comportamento dos compostos fosfatados durante os processos de adsorção e absorção de coloides orgânicos e outras substâncias não açucaradas presentes no caldo da cana (ALBUQUERQUE, 2016).

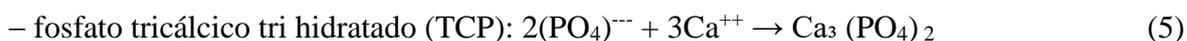
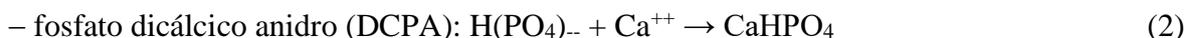
Com o aquecimento, as proteínas são desnaturadas — processo que depende do pH — e passam a recobrir partículas e flocos de fosfato, adquirindo carga negativa. A caleação a quente é mais eficaz, pois a maioria das proteínas tem ponto isoelétrico abaixo de pH 6,0, portanto, desnaturá-las, torna o processo de remoção mais eficiente. Aminoácidos são pouco afetados, mas em pH elevado podem reagir com açúcares redutores, escurecendo o caldo. A degradação alcalina de hexoses escurece o caldo ao formar compostos fenólicos e aromáticos, dificultando a clarificação e comprometendo a qualidade do açúcar. De acordo com Luo et al. (2020), os produtos de degradação alcalina de glicose e frutose possuem estruturas poliaromáticas e grupos fenólicos, responsáveis por absorção intensa na região visível, o que explica a coloração escura observada após o tratamento alcalino. Esses compostos são difíceis de remover em processos convencionais, como sulfitação ou decantação, sendo necessária a aplicação de métodos mais avançados de clarificação quando há degradação significativa. Esses açúcares são geralmente estáveis, mas se degradam com pH alto e temperaturas acima de 100 °C, sendo essa degradação cinco vezes maior a cada unidade de pH. Já a sacarose se inverte em pH baixo com alta temperatura. Ceras, gomas e pectinas sofrem desnaturação, mas sem grandes alterações. Fosfatos (PO_4^{3-}) e silicatos (SiO_4^{2-}) são parcialmente precipitados pelo cálcio (Ca^{2+}), enquanto potássio (K^+), sódio (Na^+) e cloreto (Cl^-) praticamente não sofrem mudanças. O cálcio se eleva temporariamente, mas retorna a níveis próximos ao inicial, e o magnésio (Mg^{2+}) pode ser reduzido em até 20%, dependendo do pH final (REIN, 2013).

No processo de clarificação o ácido fosfórico livre reage com a cal, produzindo o fosfato

tricálcico ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) insolúvel, que ao flocular e sedimentar arrastam as impurezas depositando no fundo do decantador. O teor de fosfato no caldo pode variar de 200 - 1000 mg/L. Porém quando as concentrações de fosfato são menores que 150 mg/L são considerados baixos, entre 150 - 500 mg/L são considerados normais, teores maiores do que 500 (mg/L) são considerados altos e que proporciona uma boa decantação está entre 300 a 350 mg/L (HONIG, 1974; MARTINS, 2004 *apud* ARAÚJO, 2017).

A formação de fosfatos de cálcio, juntamente com os precipitados de silício, alumínio e ferro, desempenha um papel importante na purificação do caldo. Mesmo caldos com baixo teor de P_2O_5 , considerados refratários, podem reagir de forma eficaz durante a sulfitação, desde que fosfatos solúveis sejam adicionados previamente ao caldo misto. Quando há fosfatos solúveis na solução açucarada e um excesso de íons cálcio, forma-se um precipitado coloidal, gelatinoso e cristalino, que se sedimenta lentamente. Esse processo também ocorre quando há excesso de fosfatos. No entanto, quando a formação do fosfato de cálcio ocorre em proporções quase estequiométricas entre cálcio e fosfato, a eficiência do processo de clarificação é consideravelmente melhor (ALBUQUERQUE, 2016).

O caldo contém fosfatos inorgânicos ácidos solúveis, que, após a adição do leite de cal ou sacarato de cálcio reagem produzindo fosfatos de cálcio em vários graus de saturação do ânion fosfato com o cátion cálcio (Ca^{++}) (fosfato de monocálcico, fosfato dicálcico, tricálcico), conforme as Equações de 1 a 5, aumentando o pH, inibindo a inversão da sacarose. Partículas insolúveis de fosfatos de cálcio também são responsáveis pela formação dos flocos, portanto, são fundamentais no processo de tratamento de purificação do caldo.



O fosfato de dicálcio (CaHPO_4), Equação (3), pode estar presente no caldo da cana de açúcar nas formas mono hidratado ($\text{CaHPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e di hidratado ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Equações (2) e (3), respectivamente. Essas estruturas hidratadas podem combinar-se entre si produzindo novas estruturas semelhantes a um sal duplo homogêneos mais insolúveis, como o octafosfato de cálcio e hidróxi apatita (DOHERTY, 2009 *apud* ARAÚJO, 2017).

O uso de polímeros adequados (aniônicos) no processo de floculação melhora a clarificação do caldo, acelerando a decantação, reduzindo o lodo e aumentando a claridade. A

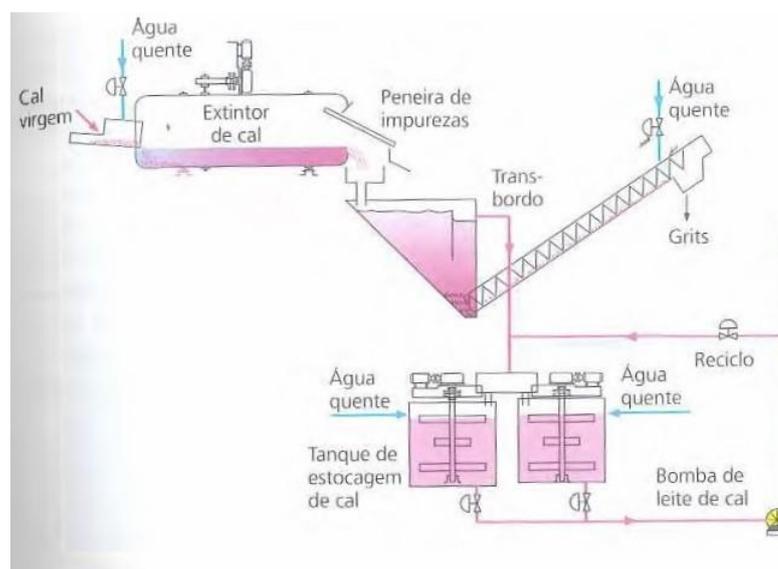
eficácia dos polímeros depende de fatores como agitação, tempo de abertura da cadeia polimérica, concentração de íons, pH, dosagem e a presença de cálcio e P_2O_5 no caldo. As poliácridamidas parcialmente hidrolisadas são destacadas na indústria açucareira, mas, quando em excesso, podem estabilizar os coloides e dificultar a floculação. Para melhor desempenho, o polímero deve ter o grau de hidrólise, peso molecular e carga elétrica adequados, e ser utilizado com o pH entre 8 e 10. A diluição deve ser feita com água a temperaturas abaixo de 50°C para evitar a degradação do polímero (ALBUQUERQUE, 2016).

2.5 Solução de Hidróxido de Cálcio (Cal)

Quando o óxido de Cálcio, conhecida como (cal virgem) é adicionada em água, ocorre uma reação química, altamente exotérmica, que forma o hidróxido de cálcio, conforme representado na Equação (6). O resultado é uma suspensão coloidal e pouco homogênea de hidróxido em água, devido à baixa solubilidade da substância. Para evitar a sedimentação do hidróxido, o local de armazenamento deve manter agitação constante. A preparação do hidróxido de cálcio envolve sua mistura inicial com 2 a 3 partes de água, seguida de diluição até atingir uma concentração de 4 a 5%, conforme a Figura 1. Para obter uma suspensão com partículas finas, recomenda-se utilizar água aquecida no processo de dissolução (LOPES, 2011).



Figura 1: Fluxograma de preparo do leite de cal.



Fonte: Rein, 2013.

O sistema da Figura 1 mostra o preparo do leite de cal, utilizado no tratamento de caldo na indústria sucroalcooleira. A cal virgem (CaO) é hidratada com água quente no extintor de cal, formando o leite de cal (Ca(OH)₂). Em seguida, o produto passa por uma peneira que remove impurezas e partículas não reagidas (grits), que são separadas. O leite de cal é então armazenado em tanques com agitação contínua, garantindo homogeneidade, e é distribuído por meio de uma bomba para os pontos de aplicação no processo industrial.

A calagem, também chamada de defecação simples, é o processo em que se adiciona cal hidratada (leite de cal) ao caldo de cana, em quantidade suficiente para neutralizar os ácidos orgânicos presentes. Normalmente, utilizam-se entre 500 e 800 gramas de cal por tonelada de cana ou solução a 15° Baumé, com o objetivo de ajustar o pH do caldo para uma faixa entre 7,0 e 7,5. Esse ajuste evita a decomposição da sacarose em glicose e frutose (reação de inversão), promovendo a precipitação das impurezas presentes no caldo (LOPES, 2011).

Após essa etapa, o caldo tratado com cal é submetido ao aquecimento, atingindo temperaturas entre 90 e 105°C (HONIG, 1953).

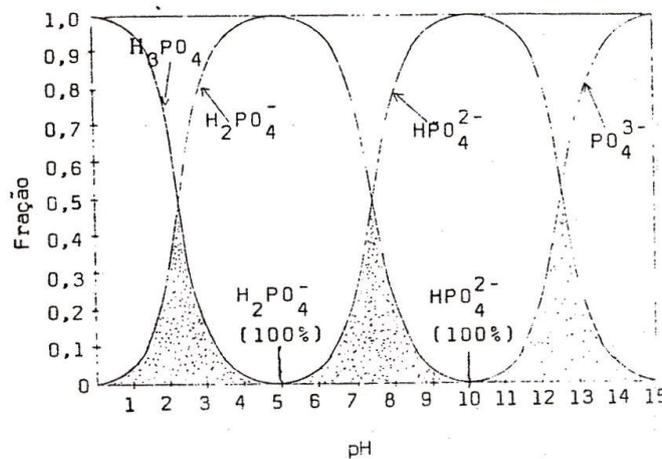
Quando se utiliza um regulador automático de pH, como o modelo Mecí, o leite de cal pode ser aplicado com densidade de 10° Baumé para a dosagem fixa, não sendo recomendável ultrapassar 20°, pois valores mais altos tendem a causar obstruções frequentes em bombas e tubulações. No entanto, para a dosagem variável controlada pelo sistema automático, a concentração não deve exceder 5° Baumé, pois isso comprometeria a precisão do ajuste. Geralmente, essa dosagem variável é mantida entre 2 e 3° Baumé (HUGOT, 1969).

A adição de cal (Ca(OH)₂), juntamente com o aumento da temperatura, provoca a formação de um precipitado floculento com composição complexa. Esse floco contém fosfato de cálcio, sais de ácidos orgânicos, proteínas desnaturadas como a albumina, além de gorduras, ceras e gomas. Esse material precipitado atua adsorvendo e arrastando grande parte das partículas em suspensão no caldo, que são posteriormente removidas por meio do processo de decantação (HUGOT, 1977).

2.6 Influência do fosfato na clarificação do caldo

Em função do pH, o fosfato pode se apresentar em soluções diluídas sob diferentes formas químicas, tais como H₃PO₄, H₂PO₄⁻, HPO₄²⁻ e PO₄³⁻. A variação dessas espécies em relação ao pH pode ser visualizada por meio do diagrama de distribuição, representado na Figura 2.

Figura 2: Distribuição de espécies de fosfato em função do pH.



Autor: DELGADO; CESAR, 1977.

Como mostrado na Figura 2, até pH 5 temos a presença apenas de H_3PO_4 e $H_2PO_4^-$ onde a concentração de cada espécie química depende do pH.

Em função do pH, de forma geral, o ácido fosfórico pode passar pelas seguintes fases de dissociação química, conforme apresentado nas Equações 7, 8 e 9:



Durante a etapa de caleagem na qual o pH do caldo misto é elevado de aproximadamente 5,0 (variando entre 4,8 e 5,3) para valores em torno de 7,7 (intervalo de 7,2 a 8,2) o fosfato tende a precipitar predominantemente na forma de fosfato monocálcico ($CaHPO_4$). Embora a formação de fosfato tricálcico ($Ca_3(PO_4)_2$) pudesse ser considerada uma reação complementar e conclusiva desse processo, sua ocorrência é limitada, uma vez que tal composto somente se forma em presença significativa do íon PO_4^{3-} no meio (DELGADO; CDER, 1977).

Para que ocorra uma clarificação eficiente do caldo, é necessário um teor superior, entre 300 e 350 ppm e apenas os fosfatos solúveis participam da alcalinização, ou seja, o fosfato orgânico, cerca de 10% do total, está em forma coloidal e não contribui para a precipitação. Contudo, altos teores de fosfato não garantem boa clarificação se houver excesso de substâncias coloidais. A floculação depende do pH e do cálcio, e a adição de P_2O_5 é útil em caldos refratários. Teores residuais elevados de P_2O_5 indicam má saturação e risco de incrustações nos evaporadores (ALBUQUERQUE, 2016).

A deficiência de fosfato deve ser suprida por meio da adição de grau alimentício, o qual reage com os íons cálcio introduzidos durante o processo de calagem, formando precipitados flocculentos compostos por fosfato dicálcico e tricálcico. Ao se precipitarem, essas substâncias promovem a remoção de partículas em suspensão e de certos colóides por meio de adesão (LOPES, 2011).

A separação de fosfatos inorgânicos é mais eficiente com pH alto, mas valores acima de 8,0 podem destruir açúcares redutores e aumentar os sais de cálcio no caldo clarificado. Assim, a dosagem de reagentes deve ser ajustada conforme as condições locais. A formação do flóculo depende do pH e do conteúdo de cálcio, sendo que o pH tem efeito reduzido acima de 7,0 (ALBUQUERQUE, 2016).

As reações que se fazem presente no processo estão apresentadas nas Equações 10 e 11



Na Equação 10, ocorre a formação do fosfato monocálcico (CaHPO_4), um composto com baixa solubilidade em água. A precipitação do sal sólido acontece quando os íons cálcio (Ca^{2+}) interagem com os íons hidrogenofosfato (HPO_4^{2-}) em solução.

Na Equação 10 ocorre a reação de forma rápida e tende a se desenvolver principalmente no sentido direto. Ainda avaliando a Equação 11 a reação ocorre, quando o pH é superior a 10, tornando predominante devido à dissociação do íon hidrogenofosfato (HPO_4^{2-}) em íons H^+ e fosfato (PO_4^{3-}) (DELGADO; CESAR, 1977).

Na Equação 11, ocorre a formação do fosfato tricálcico ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), um composto sólido insolúvel em água. O sal se origina da união de três íons cálcio com dois íons fosfato presentes na solução.

Segundo Hugot (1969), os fosfatos apresentam melhor aproveitamento quando aplicados antes da caleação. Caso a dosagem ocorra em locais inadequados do processo, sua eficácia é reduzida, o que pode resultar em maior consumo de insumos químicos e aumento nos custos operacionais.

2.7 Influência da qualidade da cana na clarificação

A variedade da cana-de-açúcar é o principal fator determinante da qualidade da matéria-prima, pois influencia diretamente nos teores de sólidos solúveis e insolúveis presentes em sua composição tecnológica. Entre os solúveis, encontram-se os açúcares e outros compostos como

os fenólicos, amido, fosfato inorgânico e aminoácidos que variam conforme a variedade. Já entre os insolúveis, destacam-se a fibra e seu teor, que contribuem como fonte de energia no processo produtivo (ALBUQUERQUE, 2011).

Quando se utiliza matéria-prima em boas condições, ocorre uma floculação eficiente das partículas em suspensão, o que resulta em uma decantação rápida e em um caldo mais limpo. Por outro lado, o processamento de cana deteriorada ou de baixa qualidade dificulta a obtenção de um caldo claro e compromete a eficiência da decantação. A presença de um caldo com aspecto esbranquiçado, semelhante ao leite, é um indicativo de cana envelhecida ou azeda. Esse problema está relacionado à presença de dextrana, que, ao interagir com os coloides, forma uma barreira que impede uma floculação adequada (CASTRO; ANDRADE, 2007).

A cana-de-açúcar, quando apresenta elevada proporção de impurezas vegetais ou minerais, compromete a pureza do caldo e aumenta a carga de sólidos a ser removida durante o tratamento. O conteúdo de material mineral na cana, conhecido como teor de cinzas, é um parâmetro relevante para avaliar sua aptidão à industrialização, especialmente na produção de açúcar. Os minerais influenciam diretamente as etapas de clarificação, evaporação e cristalização do caldo, e quando presentes em concentrações acima dos limites adequados, podem comprometer a qualidade do açúcar final (LOPES, 2011).

A lavagem da cana de forma ineficiente pode resultar na presença de partículas indesejáveis, como terra e fibras, que dificultam a sedimentação e afetam negativamente a eficiência da clarificação. Além disso, o processo de extração, quando mal conduzido, pode liberar componentes celulares em excesso, elevando a turbidez e exigindo maiores dosagens de insumos químicos para o tratamento. Assim, o controle rigoroso dessas variáveis é essencial para garantir um caldo de melhor qualidade e, conseqüentemente, uma clarificação mais eficiente (CASTRO; ANDRADE, 2007).

2.8 Influência das variáveis operacionais na clarificação do caldo de cana

As variáveis operacionais do processo de produção de açúcar, como: eficiência da lavagem e extração do caldo, exercem influência direta sobre os resultados da clarificação. Atualmente, as usinas estão cada vez mais focadas na qualidade do produto e, por isso, têm adotado outros indicadores, como a presença de precursores de cor no açúcar, como os compostos fenólicos, e substâncias que podem causar problemas durante a produção, como o amido e a dextrana (LOPES, 2011).

O aquecimento do caldo é uma etapa essencial no processamento da cana-de-açúcar, pois eleva a temperatura do caldo, que inicialmente pode estar próximo à temperatura ambiente ou em torno de 60 °C (quando extraído), para valores poucos graus acima do ponto de ebulição, normalmente antes de sua entrada no clarificador. Esse aquecimento facilita a remoção de impurezas e gases dissolvidos, melhora a eficiência da clarificação e promove economia de vapor ao permitir o aproveitamento de condensados ou vapor de baixa pressão. Dessa forma, contribui significativamente para a qualidade e o rendimento da produção de açúcar (REIN, 2013).

O monitoramento da qualidade da água usada para diluir o polímero no tratamento do caldo é fundamental para garantir a eficiência da clarificação. A presença de cloro ou outras impurezas na água pode interferir na atuação do floculante, comprometendo tanto a decantação quanto a qualidade final do caldo (FERMENTEC, 2025). Isso implica dizer que, o controle das variáveis operacionais antes da etapa de tratamento de caldo pode influenciar diretamente na clarificação.

2.9 Análise estatística – STATISTIC, Teste Tukey

A avaliação estatística, utilizado um software (STATISTIC 5.0) e a análise de variância (ANOVA), pelo teste F, realiza a comparação das médias pelo teste de *Tukey* em nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$), permitindo verificar a diferença estatística entre os dados experimentais, possibilitando uma melhor avaliação dos resultados.

Sarubbo *et al*, 2019, estudaram a clarificação do caldo de cana por caleação, adição de ácido fosfórico em diferentes concentrações e centrifugação contínua, avaliando os parâmetros físico-químicos de: pH, °Brix, turbidez, condutividade e cor ICUMSA. Adotou-se para os resultados experimentais um planejamento fatorial 2^2 (STATISTICA 7.0) para avaliar a representação estatística e a interação entre as variáveis dependentes. Os resultados das análises físico-químicas indicaram que as melhores condições operacionais que causaram a maior redução de cor e turbidez foi utilizando a temperatura de 90°C e 150 ppm de ácido fosfórico. No planejamento estatístico, a redução de cor não apresentou significância e a turbidez foi estatisticamente significativa, sendo possível apresentar a análise de variância (ANOVA) e o coeficiente de correlação.

O planejamento experimental foi utilizado para avaliar a clarificação do caldo de cana-de-açúcar por carbonatação, onde foram analisados: pH, turbidez, cinzas condutimétricas,

acidez, °Brix, % açúcares redutores totais, sacarose, amido, fosfato inorgânico, cor ICUMSA. Os resultados foram submetidos a análise de variância, pelo teste F, comparado com as médias das análises pelo teste de *Tukey* em nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$). A interação dos dados e os níveis de associação foram determinados pelo software (STATISTICA 7.0). Nesse estudo apenas o teor de dureza e as cinzas condutimétricas dos caldos clarificados apresentaram influência significativa (HAMERSKI; AQUINO; NDIAYE, 2011).

O planejamento experimental foi utilizado para avaliar a clarificação do caldo de cana-de-açúcar, aplicando elétrons acelerados, relacionando com: pH, °Brix, açúcar redutores, açúcar redutores totais, acidez total, cor ICUMSA, compostos fenólicos, flavonoides. Os dados obtidos foram avaliados pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), utilizando o SAS (*Statistical Analysis System*) versão 9.0. Os resultados mostraram algumas alterações significativas ($p < 0,05$) para os parâmetros de pH, °Brix e acidez, mas que não comprometeram as características do caldo, mantendo o propósito de redução de cor ICUMSA do caldo de cana-de-açúcar em aproximadamente 49% de redução quando a dose de irradiação com feixe elétrons aplicados foi máxima (20 kGy) e cerca de 30% para amostras com irradiação gama (LIMA, 2012).

3. METODOLOGIA

Inicialmente, foi realizada uma avaliação dos dados referentes a clarificação do caldo de cana e dados de impurezas minerais no recebimento da cana na safra 24/ 25 da usina sucroalcooleira, mais especificamente se referindo aos resultados de cor, pH, teores de fosfato (P_2O_5) e Kg de impurezas/ tc, verificando a influência da concentração de fosfato e presença de impurezas na cor do caldo misto e clarificado durante o processo.

Na segunda etapa foram realizados experimentos de decantação em duplicata com as dosagens de: 200, 400, 600 e 800 ppm de ácido fosfórico 85%, grau alimentício, em caldos *in natura* no laboratório de Operações Unitárias do Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional da UFPB, para avaliação de cor, pH e P_2O_5 , antes e depois do processo de decantação.

A terceira etapa foi realizada no laboratório industrial da usina, avaliando amostras em duplicata de caldo misto, caleado e clarificado do processo de produção de açúcar. Para essa avaliação foram utilizadas as mesmas dosagens de: 200, 400, 600 e 800 ppm de ácido fosfórico 85%, grau alimentício, tendo como base as análises de cor, pH, P_2O_5 e turbidez.

Os resultados referentes de clarificação do caldo de cana da safra 24/ 25 são representados pelas médias dos dados mensais e média safra.

Os equipamentos utilizados nos experimentos foram devidamente calibrados para assegurar os dados experimentais gerados neste Trabalho de Conclusão de Curso.

3.1 Clarificação do caldo de cana *in natura*, adicionando fosfato

Para os testes experimentais de clarificação do caldo de cana, realizados em laboratório, foi utilizada cana, colhida no CTDR, da variedade RB92579, o caldo extraído foi submetido às análises de cor ICUMSA, pH e P_2O_5 , em seguida o caldo foi dividido em 8 amostras, pois as avaliações das dosagens de ácido fosfórico (200, 400, 600 e 800 ppm) foram realizadas em duplicata. O procedimento de clarificação foi realizado seguindo as seguintes etapas: Colheita da cana, extração do caldo em moenda elétrica, peneiramento, agitação, pré-aquecimento (60° à 70°C), pré-tratamento com leite de cal (pH entre 8,0 e 8,2), dosagem de ácido fosfórico, caleação (pH entre 7,5 e 7,8), aquecimento (95°C), decantação em proveta utilizando polímero à 1% de concentração. Insumos como leite de cal e polímero foram preparados em laboratório, com 10° Baumé e 0,5% respectivamente.

3.2 Clarificação do caldo de cana em processo, adicionando fosfato

Os teores de ácido fosfórico, grau alimentício a 85%, adicionados ao caldo misto e caleado, coletados do processo de produção de açúcar na usina sucroalcooleira, foram: 200, 400, 600 e 800 ppm.

A avaliação dos teores de fosfato, utilizando amostras do tanque de caldo misto, tanque de caldo caleado e caldo clarificado na saída do decantador do processo de produção de açúcar, coletadas e levadas ao laboratório industrial da usina, onde foi realizado o procedimento semelhante ao dos testes em laboratório com caldo caleado, porém utilizando os insumos do próprio processo. Esses testes foram realizados em duplicata.

3.2.1 Avaliação estatística dos dados experimentais da clarificação do caldo em processo

Os resultados da caracterização físico-química das amostras de caldo de cana em processo foram avaliados por análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas, usando o teste de Tukey, com 5% de significância, e o software Statistic v. 5.0 (STATSOFT, 1995).

3.3 Análise físico-química no caldo de cana

3.3.1 Análise de fosfato em caldo de cana

Para a avaliação dos teores de fosfato no caldo da cana foi utilizado o método FTCQ-05/012 - Determinação de Fósforo (P_2O_5) em caldos (Prensa Hidráulica / PCTS, Primário, Misto, Dosado, Clarificado / Decantado e Pré-Evaporado) (FERMENTEC, 2014).

3.3.2 Análise pH em caldo de cana

A medição do índice do pH no caldo da cana foi realizada de acordo com o método de Caldas, (2012).

Aferição do potenciômetro

- Ligar o potenciômetro à rede elétrica
- Ajustar o botão de controle de temperatura para o valor médio da temperatura ambiente

– Emergir o eletrodo na água destilada, enxugar levemente com papel higiênico macio e transferir para a solução tampão de pH 6,86. Girar o botão “E” até obter o 6,86.

Deixar estabilizar

– Emergi-lo, lavar com água destilada, enxugar e mergulhar na solução tampão de pH 4,01. Girar o botão “% sen” até obter o valor 4,01. Deixar estabilizar

– Deixar o eletrodo mergulhado em água destilada ou em cloreto de potássio 3M

Determinação

– Lavar o eletrodo com água destilada, enxugar e imergi-lo na amostra, estando esta à temperatura ambiente.

– Esperar que os números no visor se estabilizem e anotar o valor do pH.

– Lavar o eletrodo com esguichos de água destilada e deixá-lo mergulhado em água destilada ou cloreto de potássio 3M.

Cálculos

$pH = \text{Leitura do potenciômetro}$

3.3.3 Análise de cor ICUMSA em caldo de cana

Para a avaliação do índice de cor no caldo da cana foi utilizado o método de cor ICUMSA GS1/3-7 por colorimetria de acordo com Caldas, (2012).

Reagentes e soluções

– Solução de hidróxido de sódio 0,1N

– Solução de ácido clorídrico 0,1N

Preparo das soluções

Solução de hidróxido de sódio 0,1N: Pesar 4g de hidróxido de sódio (NaOH) e dissolver em um pouco de água destilada. Transferir para balão volumétrico de 1000mL e completar o volume com água destilada.

Solução de ácido clorídrico 0,1N: Pipetar 8,28mL de ácido clorídrico (HCl), concentrado para balão volumétrico de 1000mL. Adicionar aos poucos 800mL de água destilada, sob agitação. Esperar esfriar e completar o volume com água destilada.

Técnica

– Preparar uma solução com aproximadamente 5°Brix. Por exemplo, se o Brix do caldo for 13,25° então para fazer 100g da solução a 5°Brix deve-se pesar: $(100/13,25) \times 5 = 37,74\text{g}$ de caldo e completar o peso para 100g com água destilada;

– Dividir a solução preparada em 2 béquers de 250mL, designando as soluções de S1 e S2.

Nota:

A divisão desta solução é para determinação de cor ICUMSA e também da turbidez de uma mesma solução, ou seja, de uma mesma amostra.

– Preparar um conjunto de filtração a vácuo, usando membrana com 0,45mm de abertura;

– Filtrar a solução S2, desprezando os primeiros filtrados;

– Transferir o filtrado para um béquer de 100mL;

– Ajustar o pH para $7 \pm 0,1$ com uma solução de ácido clorídrico ou hidróxido de sódio, ambas 0,1N;

– Medir o Brix refratométrico da solução S2;

– Medir a absorvância (AS2) da solução filtrada e neutralizada em uma cubeta de 10mm (1cm) estando o espectrofotômetro ajustado em 420nm e aferido em 0,0 de absorvância e 100% de transmitância com água destilada;

– Ajustar o pH para $7 \pm 0,1$ da solução não filtrada, S1, com uma solução de ácido clorídrico ou hidróxido de sódio, ambas 0,1N;

– Medir o Brix refratométrico da solução S1;

– Medir a absorvância (AS1) da solução não filtrada e neutralizada em uma cubeta de 10mm (1cm) estando o espectrofotômetro ajustado em 420nm e aferido em 0,0 de absorvância e 100% de transmitância com água destilada. Calcular utilizando a Equação (12).

Cálculos

$$\text{Cor ICUMSA} = \left[\frac{AS2}{(b \times c)} \right] \times 1.000 \quad (12)$$

Onde:

AS2 → Absorvância da solução lida diretamente no espectrofotômetro ajustado em 420nm

b → Comprimento interno da cubeta, em centímetros

c → Concentração do filtrado em g/mL, em função do Brix

Nota: A concentração da solução (g/mL) pode ser obtida de acordo com a Equação (13):

$$\text{Concentração} \left(\frac{\text{g}}{\text{mL}} \right) = \frac{(\text{Brix \% solução S2} \times \text{densidade aparente})}{100} \quad (13)$$

3.3.4 Análise de turbidez em caldo de cana

A medição do índice da turbidez no caldo da cana foi realizada de acordo com o método de Caldas, 2012.

Para este método, a solução lida deve ser a mesma preparada na determinação de cor ICUMSA, sem filtração, ou seja, com o mesmo Brix, ressaltando que se deve:

- Deixar a solução em repouso por 5 minutos para eliminação das bolhas.
- Colocar a amostra a ser lida na célula de leitura do turbidímetro e proceder a leitura da turbidez, estando este calibrado com padrões e procedimentos indicados no manual de operação do equipamento.

Cálculo

Turbidez (NTU) = L

Onde: L → Leitura obtida no turbidímetro

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação dados de clarificação do caldo de cana na safra 24/25

As médias mensais dos valores referentes as análises do caldo misto e clarificado obtidos durante a safra 24/25 na usina em Pernambuco estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados safra 24/25.

Parâmetros avaliados	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Safra
Cor misto (UI)	22.313	18.118	16.770	14.886	16.687	19.562	24.367	27.410	19.976
Cor clarificado (UI)	16.085	13.064	11.413	11.271	12.527	15.986	18.718	21.952	15.104
% redução cor	27,91	27,89	31,94	24,28	24,93	18,28	23,18	19,91	24,39
pH misto	5,09	5,12	5,08	5,03	5,00	5,03	4,82	4,77	5,00
pH clarificado	7,12	7,19	7,12	7,13	7,02	7,08	6,96	7,19	7,11
P ₂ O ₅ misto (ppm)	495	430	419	534	532	575	459	527	480
P ₂ O ₅ clarificado (ppm)	126	90	38	81	96	68	36	58	75
% redução P ₂ O ₅ (ppm)	74,55	79,07	90,93	84,83	81,95	88,17	92,16	88,99	84,38

Fonte: Autor, 2025.

Os dados de safra 24/ 25, apresentados na Tabela 1, permitiram identificar que os meses de fevereiro e março os caldos apresentaram maiores valores de cor, calculando com relação a novembro, onde detectamos os menores valores da safra, obtivemos aumento de 63,7% e 84,13% para os caldos mistos e 66,07% e 94,77% para os caldos clarificados.

A média da safra quanto a redução de cor foi de 24,39%, demonstrando a importância do monitoramento contínuo e da adaptação do processo de clarificação conforme as variações na qualidade do caldo ao longo dos meses, contribuindo para a melhoria da qualidade do caldo destinado à produção de açúcar.

A média do pH nos caldos misto e clarificado foram de 5,00 e 7,11, apresentando poucas variações durante a safra. Essa correção é fundamental para a estabilização do caldo e para evitar a degradação de sacarose durante o processamento. Mesmo nos meses com pH inicial mais baixo, como fevereiro (4,82) e março (4,77), o tratamento foi eficaz em elevar o pH para valores próximos da neutralidade, refletindo um bom controle da adição de cal e indicando eficiência química no processo de clarificação. Mas, a literatura ressalta que a adição de leite de cal deve ser feita de forma criteriosa, visando alcançar uma faixa ideal de pH entre 7,6 a 8,2, a qual favorece a formação de flocos estáveis e a precipitação eficiente das impurezas (HUGOT,

1969), ou seja, o monitoramento no pH, durante a operação de tratamento do caldo, favorece a decantação das impurezas. De acordo com Albuquerque, (2016) quando a formação do fosfato de cálcio ocorre em proporções quase estequiométricas entre cálcio e fosfato, a eficiência do processo de clarificação é consideravelmente melhor e ainda indica que teores residuais elevados de P_2O_5 indicam má saturação e risco de incrustações nos evaporadores.

Ao longo da safra, observa-se uma relação entre a redução do teor de P_2O_5 e a eficiência na redução da cor do caldo, onde essa teve uma redução média de 24,39 % após a clarificação, enquanto o teor de P_2O_5 diminuiu de 74 a 92% aproximadamente. Essa correlação sugere que a diminuição do fósforo contribui significativamente para a melhoria da clarificação, uma vez que o P_2O_5 pode formar complexos com impurezas coloidais, dificultando sua remoção. A faixa residual no caldo clarificado deve se manter em 30 a 50 mg/L, pois, níveis residuais altos de P_2O_5 sugerem uma saturação inadequada e aumentam o risco de formação de incrustações nos evaporadores (ALBUQUERQUE, 2016). Assim, o controle do fósforo é essencial para alcançar caldos mais claros e de melhor qualidade.

A eficiência da clarificação pode ser otimizada através do balanceamento entre os teores de cálcio e fosfato, acompanhamento da qualidade da cana, conforme ilustra a Tabela 2, bem como intensificação do controle da água de lavagem, devido ao aumento das impurezas minerais, nos períodos chuvosos como observado nos meses de agosto, setembro de 2024 e fevereiro e março de 2025.

Tabela 2: Médias dos valores das impurezas minerais (Kg/ tc) na safra 24/25.

Impurezas	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Safra 24/ 25
Kg/tc	20,95	13,63	13,85	13,41	14,87	22,92	36,99	44,31	22,91

Fonte: Autor, 2025.

Os dados apresentados na Tabela 2 (Kg/tc) representam a quantidade de impurezas minerais presentes por tonelada de cana processada, e mostram um aumento de 175,84% e 230,43% nos meses de fevereiro e março, respectivamente, isso com relação aos dados de novembro, mês que teve os menores índices de impurezas. Representando uma maior carga de sólidos indesejáveis no caldo a ser tratado, compromete a qualidade do caldo, aumenta os custos operacionais, devido ao consumo de insumos, desgaste de equipamentos e maior número de paradas para manutenção, exigindo maior atenção no controle operacional para garantir a eficiência do processo e a qualidade do produto final.

As impurezas minerais, como argilas e partículas do solo, contribuem diretamente para o escurecimento do caldo, dificultando a clarificação e exigindo maior esforço no tratamento. Portanto, o controle dessas impurezas é essencial para garantir uma menor carga de cor, refletindo diretamente na eficiência do processo industrial e na qualidade final do produto (CASTRO; ANDRADE, 2007).

Essa avaliação de dados da safra 24/ 25 permitiu associar os padrões mensais de cor do caldo, pH e teores de fosfato com as impurezas minerais, detectando possíveis desvios no processo, contribuindo para a otimização das dosagens de fosfato e cálcio na clarificação do caldo.

4.2 Clarificação caldo *in natura* em laboratório

Os ensaios de clarificação com caldo *in natura* apresentaram o melhor resultado com a concentração de 800 ppm de ácido fosfórico, atingindo uma redução de cor de 30,55%, ou seja, foi obtido um valor compatível com os melhores dados da safra 24/ 25, mês de outubro de 2024. Nesse mesmo experimento o pH foi ajustado de 5,54 para 7,66, o que favoreceu a formação de flocos e a precipitação de impurezas, procedimento essencial para uma clarificação eficiente. Em contrapartida, a clarificação sem a adição de ácido fosfórico (branco) resultou em uma redução de cor de apenas 3,78%, reforçando a importância da presença de fosfato como agente clarificante.

4.3 Clarificação caldo do processo da usina

A Tabela 3 ilustra as análises físico-químicas dos caldos misto e caleado, retirados do processo de produção de açúcar da usina.

Tabela 3: Análises físico-químicas dos caldos misto e caleado, retirados do processo de produção de açúcar.

Parâmetros	Cor (UI)		pH 1		Turbidez 1		P ₂ O ₅	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
Caldo misto	33.256	31.891	3,87	4,55	–	–	517	472
Caldo caleado	21.231	18.689	7,45	7,53	–	–	187	146
Caldo clarificado	20.809	16.161	7,14	7,19	69,5	51,9	22	18
200 (ppm)	16.350	18.158	7,20	6,98	10,66	37,9	33	41
400 (ppm)	15.227	17.634	7,13	7,08	9,15	29,5	34	39
600 (ppm)	14.858	17.504	7,09	7,11	8,92	27,1	38	32
800 (ppm)	14.011	15.785	7,00	6,96	8,54	26,7	41	38

Fonte: Autor, 2025.

A Tabela 3 apresenta os resultados dos tratamentos de clarificação aplicados ao caldo de cana, utilizando diferentes quantidades de fosfato para avaliar o impacto nas variáveis de cor, pH, turbidez e teor de fósforo resultante. Observa-se que o caldo misto apresentou os maiores valores de cor e de fósforo, além de um pH mais ácido, indicando alta carga de impurezas e contaminação, levando em consideração que foi coletado no mês de março. Com a aplicação do tratamento com cal (caleado), houve uma significativa redução da cor e do fósforo, além do aumento do pH (com a adição do leite de cal), demonstrando melhoria nas condições para precipitação de impurezas. Os testes com ácido fosfórico em diferentes concentrações mostraram resultados progressivamente melhores com o aumento da dosagem, sendo 800 ppm o mais eficiente, com os menores valores de cor e turbidez e um pH estável em torno de 7,00. Esses dados confirmam que a combinação do controle de pH e da adição de ácido fosfórico é fundamental para a clarificação eficaz do caldo, melhorando a qualidade. É importante ressaltar a coerência deste ensaio com os dados da safra 24/ 25, pois demonstra que a suplementação da dosagem de ácido fosfórico na etapa de caleação, otimiza a clarificação do caldo.

A Figura 3 mostra o ensaio de decantação realizado com as amostras de caldo retidas do processo de produção de açúcar.

Figura 3: Experimento de decantação do caldo de cana realizado no laboratório industrial.



Fonte: Autor, 2025.

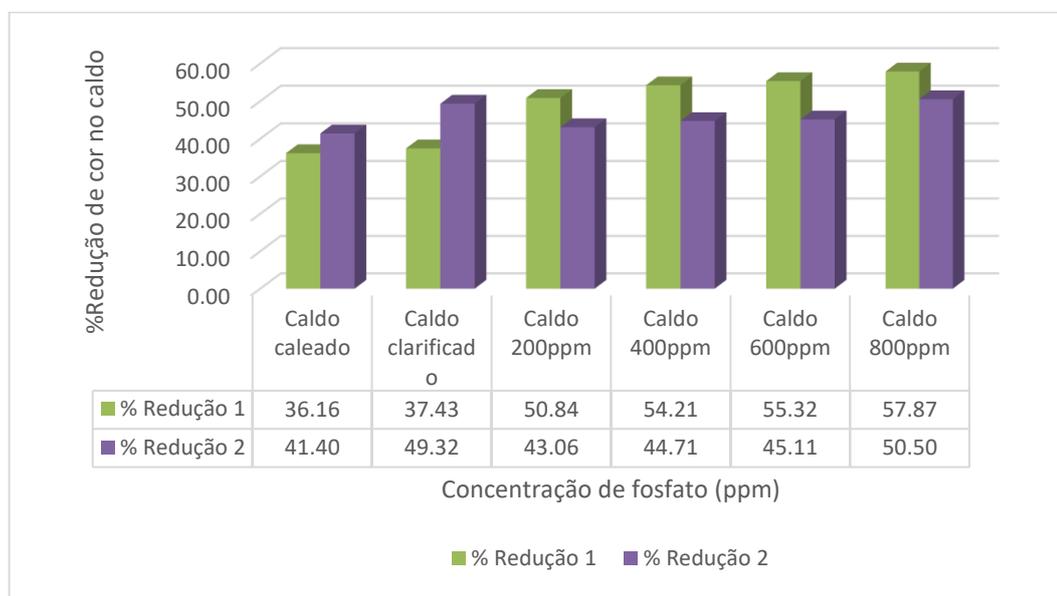
Avaliando o experimento da Figura 4 foi possível observar as respostas das diferentes dosagens de ácido fosfórico, comprovando a otimização através das análises de cor, pH, P_2O_5 e turbidez. Nas provetas que foram dosados 200 ppm e 400 ppm, o caldo apresentou coloração mais escura e turva, indicando maior concentração de impurezas em suspensão. Já nas provetas com 600 ppm e 800 ppm, o líquido está visivelmente mais claro, sugerindo uma maior eficiência na remoção das impurezas. Esse resultado visual está em consonância com os dados da Tabela 3, que demonstraram redução nos valores de cor com o aumento da concentração do tratamento. Portanto, a imagem reforça, de forma prática, o que foi evidenciado nos dados: quanto maior a concentração de fosfato no tratamento, melhor é a clarificação do caldo, resultando em uma cor mais clara e, um produto final de melhor qualidade.

Esses experimentos foram realizados no mês de março, onde os resultados apresentam coerência com os dados avaliados da safra 24/ 25 (Tabela 1), tanto quanto a cor e a influência das impurezas minerais (Tabela 2).

A Figura 4 mostra a redução percentual da cor do caldo, utilizando as diferentes concentrações de fosfato. Pode-se perceber que os resultados estão otimizados quando comparados com os dados da safra 24/ 25, com a maior redução de 57,87% na dosagem de 800 ppm, e menor redução de 43,06% na dosagem de 200 ppm, ou seja, mesmo com a menor

dosagem os valores obtidos foram melhores do que a média do processo da safra atual (24, 39%).

Figura 4: Redução da cor do caldo de cana com diferentes concentrações de ácido fosfórico.



Fonte: Autor, 2025.

Quanto ao pH o mesmo apresentou-se estável e próximo a neutralidade, após a clarificação com valor médio de 7,07. O caldo misto apresentou um pH mais ácido em comparação a média safra, mas foi coerente com o mês de março, período de realização dos experimentos.

A turbidez apresentou bons resultados em comparação com a safra 24/ 25 com uma redução de 87,71% na maior dosagem e 26,97% com a menor dosagem de ácido fosfórico (200 ppm).

Quanto as dosagens das concentrações de ácido fosfórico (200, 400, 600 e 800 ppm), após o processo de decantação foram obtidos valores entre 32 e 41 ppm. Esses valores por sua vez estão dentro da faixa estabelecida por Albuquerque (2016), que seriam entre 30 e 50 ppm. Sendo importante ressaltar a condição do processo atual, onde a dosagem de ácido fosfórico é realizada no tanque de caldo misto, havendo a necessidade de mudança, pois de acordo com Hugot (1969) essa dosagem tem mais efetividade antes do processo de caleação.

Na condição atual do processo de produção de açúcar da usina a dosagem de ácido fosfórico no tratamento do caldo é realizada no tanque de caldo misto, antes do pré-aquecimento e da pré-caleação, mas nessa etapa as cargas aniônicas do leite de calagem com o fosfato

presente. Entretanto, quando o caldo chega na caleação e na decantação a concentração de fosfato encontra-se reduzida, como mostram os níveis de fosfato do caldo caleado, Tabela 4, influenciando na eficiência da decantação, como foi comprovado com os resultados desses experimentos, realizando a dosagem antes da caleação.

4.4 Avaliação estatística dos dados experimentais de clarificação do caldo em processo

A Tabela 4 apresenta os resultados estatísticos, utilizando o teste de Tukey ($p < 0,05$), nas análises físico-químicas do caldo de cana em processo, clarificado com diferentes dosagens de ácido fosfórico.

Tabela 4: Teste estatístico Tukey ($p < 0,05$) amostras caldo do processo.

Tratamento	pH	P2O5	Turbidez (NTU)	Cor
Caldo misto	4,21 ^a ± 0,34	494,33 ^a ± 22,50	-	32574,33 ^a ± 682,50
Caldo caleado	7,49 ^a ± 0,04	166,33 ^b ± 20,50	-	19960 ^b ± 1271,00
Caldo clarificado	7,33 ^a ± 0,19	20,00 ^c ± 2,00	60,70 ^a ± 8,80	18485 ^{bc} ± 2324,00
Caleado200ppm	7,54 ^a ± 0,08	-	-	19643 ^b ± 1944,00
Caleado400ppm	7,51 ^a ± 0,03	-	-	18484,33 ^{bc} ± 1659,00
Caleado600ppm	7,51 ^a ± 0,05	-	-	17460,33 ^{bc} ± 2172,50
Caleado800ppm	7,53 ^a ± 0,01	-	-	16061 ^{bc} ± 2229,00
Clarificado200ppm	7,09 ^a ± 0,11	37,00 ^c ± 4,00	24,29 ^b ± 13,62	17254 ^{bc} ± 904,00
Clarificado400ppm	7,10 ^a ± 0,02	36,33 ^c ± 2,52	19,32 ^b ± 10,17	16430,33 ^{bc} ± 1203,50
Clarificado600ppm	7,10 ^a ± 0,01	35,00 ^c ± 3,00	18,01 ^b ± 9,09	16181 ^{bc} ± 1323,00
Clarificado800ppm	6,98 ^a ± 0,02	39,33 ^c ± 1,53	17,61 ^b ± 9,08	14898 ^c ± 887,00

Fonte: Autor, 2025.

Analisando a Tabela 4, podemos observar que os valores que compartilham a mesma letra dentro de uma coluna não diferem estatisticamente entre si. Já valores com letras distintas indicam diferenças estatisticamente significativas.

Todos os caldos apresentaram pH ajustado para a faixa entre 6,98 e 7,54, ideal para a formação de flocos e precipitação de impurezas, com nenhuma diferença significativa estatística entre eles (mesma letra “a”). O caldo misto, utilizado como controle, não passou por tratamento, apresentando pH ácido típico do caldo *in natura*. Esse mesmo caldo também apresentou o maior teor de fosfato (P₂O₅), com valor de 494,33a. Já o caldo caleado (166,33b)

mostrou uma redução significativa de P_2O_5 após o tratamento. Os caldos clarificados, inclusive aqueles com adição de ácido fosfórico, dosagens entre ~ 20 - 39 ppm, apresentaram baixos níveis residuais de P_2O_5 , estatisticamente diferentes dos caldos misto e caleado, mas dentro da faixa ideal de 30–50 ppm, conforme recomendado por Albuquerque (2016). Em relação à turbidez, o caldo clarificado convencional (60,7a) apresentou valor elevado. Apesar da redução de P_2O_5 , a formação de flocos não foi suficientemente eficiente. Por outro lado, os caldos clarificados com ácido fosfórico, valores entre ~ 24 -17 NTU, apresentaram turbidez significativamente menor, destacando-se a dosagem de 800 ppm, que obteve o melhor desempenho. Quanto à cor, o caldo misto (32.574a) apresentou coloração elevada, como esperado em caldos brutos. O caldo caleado (19.960b) teve uma boa redução de cor após o tratamento. Os caldos clarificados, com valores entre ~18.000 e 16.000, apresentaram resultados semelhantes entre si e estatisticamente iguais. Destacando o caldo clarificado com 800 ppm (14.898c), que obteve o menor valor de cor, sendo estatisticamente diferente dos demais.

O aumento da concentração de fosfato contribuiu significativamente para a eficiência do processo de remoção de impurezas, refletido em uma redução de 57,87% na cor e 87,71% na turbidez. Ou seja, além da remoção de cor, também ocorreu a redução na concentração de fosfato residual, indicando a eficiência da floculação. Isso influenciou positivamente na diminuição da turbidez, pois caso o fosfato estivesse em excesso, teríamos partículas coloidais em suspensão, aumentando a turbidez.

5. CONCLUSÃO

A clarificação do caldo de cana é uma etapa fundamental para garantir a qualidade do produto final na indústria sucroalcooleira, e a concentração de ácido fosfórico demonstrou ser um fator determinante para a otimização desse processo.

Os dados obtidos ao longo da safra 24/25, bem como os ensaios conduzidos em laboratório e em condições industriais, evidenciaram que a adição controlada de ácido fosfórico promove ganhos significativos na eficiência da floculação e da decantação. Destaca-se, dentre as concentrações de fosfato testadas, que quando a dosagem de 800 ppm apresentou os melhores resultados em termos de redução de cor (57,87%) e turbidez (87,71%) do caldo.

A análise estatística dos resultados, utilizando o teste de Tukey ($p < 0,05$), confirmou que os tratamentos com fosfato apresentaram diferenças significativas em comparação ao controle, com destaque para o tratamento de 800 ppm, que obteve os menores valores de turbidez e índice de cor de forma estatisticamente superior. Essa evidência reforça os dados experimentais e valida a eficácia da intervenção.

A correlação observada entre os altos teores de impurezas minerais e o aumento da coloração nos meses finais da safra reforça a necessidade de ajustes operacionais dinâmicos, considerando a variabilidade da matéria-prima ao longo do período produtivo.

Foi possível verificar que a eficiência da decantação das impurezas é potencializada quando a dosagem de ácido fosfórico ocorre antes da caleação, conforme também indicado na literatura técnica.

Este estudo comprovou que os teores de fosfato podem ser elevados acima dos valores estabelecidos na literatura (>500 ppm) em casos de altos índices de cor, como os ocasionados por canas deterioradas ou de baixa qualidade. Desde que a dosagem ocorra no caldo antes da caleação, como realizado neste estudo, o fosfato estará disponível para atuar na clarificação. Os valores de turbidez para as dosagens de fosfato com 800 ppm não apresentaram diferença estatística em relação às demais dosagens, demonstrando que os fosfatos não permaneceram em suspensão, pois foram utilizados no processo de clarificação. Ou seja, o aumento da dosagem de ácido fosfórico beneficiou a clarificação do caldo e, provavelmente, não sobrecarregará a evaporação com incrustações. Portanto, o presente estudo confirmou que a suplementação estratégica de fosfato, associada ao controle adequado do pH, à qualidade da matéria-prima e ao monitoramento rigoroso das condições operacionais, é essencial para garantir um caldo mais limpo e estável.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, Fernando Medeiros de. *Processo de Fabricação do Açúcar*. 4. ed. Capivari – SP: STAB – Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 2016.

ALBUQUERQUE, Fernando Medeiros de. *Processo de Fabricação do Açúcar*. Editora Universitária UFPE, Recife, 3. ed., 2011.

ALCARDE, André Ricardo. Processamento da cana-de-açúcar. Embrapa - Agência de Informação Tecnológica, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pos-producao/processamento-da-cana-de-acucar>. Acesso em: 19 abr. 2025.

ARAÚJO, Frederico Augusto Dantas de. *Intensificação do processo de purificação do caldo da cana-de-açúcar por decantação química e adsorção*. 2017. 233 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

CASTRO, Sebastião Beltrão de.; ANDRADE, Samara Alvachian Cardoso. *Tecnologia do açúcar*. 1. ed. Recife: Editora Universitária-UFPE, 2007.

CALDAS, Celso. *Novo manual para laboratórios sucroalcooleiros*. Piracicaba: STAB - Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 2012.

DELGADO, Afrânio Antônio; CESAR, Marco Antônio Azeredo. *Elementos de tecnologia e engenharia do açúcar de cana*. 2. ed. Piracicaba: Promoção de Zanini SA equipamentos pesados, 1977.

FERMENTEC. *Métodos analíticos para o controle da produção de açúcar e álcool*. 5. ed. Piracicaba: Fermentec, 2014.

FERMENTEC. Qualidade da água de preparo de polímero. 15 fev. 2021. Disponível em: <https://fermentec.com.br/2021/02/15/qualidade-da-agua-de-preparo-de-polimero/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

FOX BOMBAS. Conheça o processo de produção do açúcar e o papel das bombas helicoidais nesta indústria. 22 ago. 2023. Disponível em: <https://foxbombas.com.br/conheca-o-processo-de-producao-do-acucar-e-o-papel-da-bombas-helicoidais-nesta-industria>. Acesso em: 19 abr. 2025.

HAMERSKI, Fabiane; AQUINO, Arislete Dantas; NDIAY, Papa Matar. Clarificação do caldo de cana-de-açúcar por carbonatação - ensaios preliminares. *Acta Scientiarum. Technology*. Maringá, v. 33, n. 3, p. 337-341, 2011.

HONIG, Peter. *Principles of sugar technology*. New York: Elsevier Publishing Company, v. 1, 1953.

HUGOT, Emile. *Manual da Engenharia Açucareira*. São Paulo: Mestre Jou, v.1, 1977.

HUGOT, Emile. *Manual da Engenharia Açucareira*. 1.ed. Tradução de Irmtrud Miocque. São Paulo: Editora Mestre Jou, 1969.

LIMA, Roberta Bergamin. *Processo de clarificação do caldo de cana-de-açúcar aplicando elétrons acelerados*. 2012. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

LOPES, Cláudio Hartkopf (Org.). *Tecnologia de produção de açúcar de cana*. São Carlos: EdUFSCar, 2011. 183 p. (Coleção UAB-UFSCar). ISBN 978-85-7600-269-7.

LUO, Xi et al. *Structural elucidation of high-molecular-weight alkaline degradation products of glucose and fructose using ultrahigh performance liquid chromatography–quadrupole/time-of-flight mass spectrometry*. *Food Science & Nutrition*, [S.l.], v. 8, n. 11, p. 6192–6202, nov. 2020. Wiley. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/fsn3.1966>. Acesso em: 24 abr. 2025.

NOVACANA. Como é feito o processamento da cana-de-açúcar. 2023. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar>. Acesso

em: 19 abr. 2025.

NUNES, Thiago dos Santos; FINZER, José Roberto Delalibera. *A importância do tratamento do caldo de cana-de-açúcar para a produção de açúcar e etanol*. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 5, n. 11, p. 24816–24823, nov. 2019.

PAYNE, Jonh Howard. *Operações unitárias na produção de açúcar de cana*. São Paulo, Nobel: STAB, p. 245, 1989.

POLONIO, Walter Luiz. Filtração direta de lodo de caldo de cana. *Revista Meio Filtrante*, São Paulo, n. 39, p. 1-5, jul./ago. 2009. Disponível em: <https://www.meiofiltrante.com.br/Artigo/1359/filtracao-direta-de-lodo-de-caldo-de-cana>. Acesso em: 24 abr. 2025.

REIN, Peter. *Engenharia do açúcar de cana*. Tradução de César Miranda e Ericson Marino. Berlim: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2013.

STATSOFT. 1995. *Statistic (software)*. Versão 5.0. Tulsa: Statsoft.

SOUZA, Juarez de. *Estudo da eficiência de alguns polielitrólitos utilizados na clarificação do caldo de cana*. 1988. Dissertação (Mestrado) - ESALQ, Piracicaba.

STUPIELLO, José Paulo. *A cana-de-açúcar como matéria-prima*. In: PARANHOS, S. B. *Cana-de-açúcar: cultivo e utilização*. Campinas: Fundação Cargill, p. 30-51. 1987.

TFOUNI, Silvia Amélia Verdiani.; VITORINO, Silvia Helena Pereira.; TOLEDO, Maria Cecília de Figueiredo. *Efeito do processamento na contaminação de cana-de-açúcar e derivados por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos*. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 27, n. 1, p. 76-82, 2007.

USINA SANTA ADÉLIA. *Fabricação de açúcar*. Disponível em: <https://site.usinasantaadelia.com.br/negocios/processos/fabricacao-de-acucar>. Acesso em: 19 abr. 2025.