Ciência & Tecnologia
Fatec-JB

ISSN: 2178-9436

APLICAÇÃO DE POLÍMEROS SINTÉTICOS E NATURAIS NO TRATAMENTO DO CALDO NA PRODUÇÃO DE AÇÚCAR

APPLICATION OF SYNTHETIC AND NATURAL POLYMERS IN SUGARCANE JUICE TREATMENT FOR SUGAR PRODUCTION

Vitória Viviane de Lima[I]
Leonardo Lucas Madaleno[II]

RESUMO

O uso de auxiliares de sedimentação, como polímeros, na produção de açúcar é importante para obter um caldo de melhor qualidade. Então, nas etapas subsequentes ao tratamento do caldo, produzir cristais de sacarose com características que atendam às exigências do mercado consumidor. O objetivo do presente trabalho foi realizar uma revisão da literatura sobre a aplicação de polímeros no tratamento do caldo da produção de açúcar. Artigos, livros e teses foram consultados na elaboração da revisão. No trabalho, identificaram-se as impurezas a serem removidas do caldo extraído, a formação de flocos primários e o efeito de coagulação secundária decorrente da aplicação dos auxiliares de decantação. O polímero de acrilamida iônica é o mais utilizado pelas indústrias. No entanto, estudos estão sendo realizados para a aplicação de polímeros obtidos a partir de extratos de plantas, em substituição aos sintéticos, como floculantes lignocelulósicos, quitosana/carboximetilcelulose, *Hibiscus vitifolius*/*Aloe vera*, moringa, acácia negra e alga vermelha.

Palavras-chave: cristais de sacarose; clarificação; sintético; natural.

ABSTRACT

The use of clarification aids, such as polymers in sugar production, is essential to obtain higher-quality juice. Consequently, in the subsequent processing stages, sucrose crystals with characteristics that meet market requirements, such as ICUMSA color, can be produced. The objective of this study was to conduct a literature review on the application of polymers in the treatment of sugarcane juice for sugar production. Scientific articles, books, and other sources were consulted to support this review. The study identified the impurities to be removed from the extracted juice, the formation of primary flocs, and the effect of secondary coagulation resulting from the application of clarification aids. Ionic acrylamide-based polymers are the most widely used by industry. However, studies have examined the use of plant-derived polymers as substitutes for synthetic polymers, including lignocellulosic flocculants, chitosan/carboxymethylcellulose, *Hibiscus vitifolius*/*Aloe vera*, moringa, black wattle, and red algae.

Keywords: sucrose crystals; clarification; synthetic. natural.

Data de submissão do artigo: 01/04/2026.
Data de aprovação do artigo: 31/08/2026.
DOI: https://doi.org/10.52138/citec.v8i1.585

[I] Graduada em Bicombustíveis, Centro Paula Souza, Fatec Nilo De Stéfani, vitoria.lima5@aluno.cps.sp.gov.br
[II] Doutor em Agronomia, Centro Paula Souza, Fatec Nilo De Stéfani, leonardo.madaleno@cps.sp.gov.br

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de açúcar do mundo e, na safra 2024/2025, a produção de açúcar na região Centro-Sul totalizou 40,17 milhões de toneladas (Unica, 2025). Dentre os tipos de açúcar produzidos pelas indústrias brasileiras, destacam-se a produção do "Very High Polarization" (VHP) e do cristal branco direto. O açúcar VHP é o tipo bruto e, após o refino, torna-se o açúcar refinado (Rein, 2017).

O açúcar cristal branco chega à mesa do consumidor. Porém, a maior utilização é nas indústrias, que o empregam em produtos industrializados, como refrigerantes, sucos, doces, sorvetes, entre outros. Nesses produtos, a quantidade de não-açúcares (moléculas orgânicas e inorgânicas) no cristal deve ser reduzida, o que exige sua remoção para não comprometer o padrão de qualidade.

O mercado açucareiro adotou a cor do cristal como indicador de qualidade do produto. A cor, pelo método da International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis (ICUMSA), é determinada por meio da diluição do açúcar em água, da filtração e da correção do pH para neutralidade. Por fim, a leitura da amostra é realizada em um espectrofotômetro. Após a obtenção da absorbância, a cor é expressa em unidades internacionais (U. I.), que variam de valores próximos de zero (transparente) a valores elevados (cor escura) (Centro de Tecnologia Canavieiro, 2011)

O açúcar VHP deve ter cor entre 400 e 1000 U.I., sendo os de menor cor os mais valorizados pelas refinarias. Por outro lado, a cor do açúcar branco direto dependerá das exigências das indústrias que o vão utilizar e do consumidor, tendo variadas denominações, conforme a usina: tipo 1 (100 U.I.), tipo 2A (150 U.I), tipo 2B (150 U.I.) e tipo 2C (150 U. I), sendo que, o que diferencia o tipo 2, a quantidade de pontos pretos (resíduos do próprio processo) aceitáveis. Para atender a essas exigências, o tratamento do caldo no processamento da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é fundamental, pois determina o tipo de açúcar a ser produzido (ICUMSA, 2011).

No fluxograma de produção de açúcar, a cana-de-açúcar é colhida por máquinas e transportada até a usina. Na indústria, passa pelo preparo da cana e, em seguida, pela extração do caldo. O caldo de cana contém sólidos solúveis, divididos em açúcares aproveitados pela indústria sucroenergética (sacarose, glicose e frutose) e não-açúcares (moléculas orgânicas e inorgânicas de interesse industrial não imediato). Os não-açúcares podem ser divididos em orgânicos, como amido, ácidos orgânicos, pigmentos, proteínas, lipídios, compostos fenólicos, entre outros. Além disso, há os inorgânicos, que correspondem aos nutrientes do caldo: N, P, K, Ca, Mg, S, Fe e outros.

Os não-açúcares são solúveis e requerem a aplicação de reagentes e auxiliares no tratamento do caldo para torná-los insolúveis e, assim, removê-los do caldo da cana. Por exemplo, a permanência de proteínas, compostos fenólicos, pigmentos e outras moléculas no caldo, que será evaporado e cristalizado, pode, no momento da formação dos cristais, ser incorporada, o que pode incrementar a cor ICUMSA do produto. Portanto, a remoção dos não-açúcares torna-se primordial para melhorar a qualidade do produto.

No tratamento do caldo do açúcar VHP, realiza-se a caleagem com adição de leite de cal (hidróxido de cálcio) até pH neutro. Os níveis de P_2O_5 devem estar adequados, dando início à formação dos flocos primários por meio do fosfato de cálcio, que será completada com o aumento da temperatura até a ebulição (100 a 105 °C) e com a finalização do coloide primário por meio da incorporação de substâncias insolúveis. Para o açúcar branco direto, realiza-se a sulfitação, com redução do pH do caldo, seguida da aplicação do leite de cal até a neutralidade.

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

O enxofre possui propriedades descolorantes que reduzem a cor do cristal e forma flocos primários, compostos principalmente por sulfito de cálcio.

Ambos os tratamentos para VHP e cristal passam pelo balão de flash para degasagem e recebem adição de polímero para formar coloides secundários. Os flocos primários finalizados apresentam cargas iônicas, e o polímero (aniônico ou catiônico) aplicado equilibra essas cargas, promovendo a formação do coloide secundário (sem carga), mais denso e, portanto, com maior facilidade para se separar do caldo clarificado por meio da sedimentação do lodo (coloide secundário). A sedimentação ocorre em aparelhos denominados decantadores, que separam o caldo clarificado do lodo. O resíduo é enviado para filtração, com o objetivo de recuperar a sacarose aderida, enquanto o caldo clarificado segue para evaporação, cozimento, cristalização, centrifugação e operações finais de produção (secagem, peneiramento, armazenamento, entre outras).

Os polímeros são aplicados em concentração baixa (1 a 5 ppm), porém, estudos demonstram que podem ficar aderidos aos cristais e, em baixas concentrações, ser carcinogênicos para humanos. Então, os tipos de polímero vêm sendo aprimorados, embora ainda predomine a acrilamida aniônica na produção de açúcar. Além disso, os polímeros naturais derivados de substâncias extraídas de plantas vêm ganhando destaque e demonstrando desempenho semelhante ao dos polímeros sintéticos.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica para identificar novas tecnologias aplicáveis aos polímeros empregados na produção de açúcar.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foi realizado um estudo sistemático, de 1988 a 2025, de artigos científicos nacionais e internacionais sobre o uso de polímeros no tratamento do caldo na produção de açúcar, com o auxílio da ferramenta Google Acadêmico e do acesso às bases de dados do CNPq/Capes, sendo selecionados os mais relevantes pelos autores para a construção da revisão. Além disso, foram consultados livros de referência do setor sucroenergético. Em seguida, foram realizadas verificações dos tipos de polímeros sintéticos e naturais empregados, das dosagens aplicadas e das comparações de efetividade na remoção de impurezas.

Por fim, foram apresentadas as considerações finais, após a verificação dos tipos de polímeros disponíveis para o tratamento do caldo de produção de açúcar.

3 QUALIDADE DA MATÉRIA-PRIMA PARA A COLHEITA DA CANA

Para a unidade industrial, a cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) deve atender a uma combinação de parâmetros tecnológicos e microbiológicos, que constituem os ativos que contribuem para a qualidade final do açúcar (Delgado; César; Silva, 2019). Os principais fatores que afetam a qualidade da cana e do processo industrial são: a escolha de variedades de cana, do meio ambiente, com fatores bióticos, como pragas e doenças, e abióticos, como o estresse hídrico (Stupiello *et al.*, 2025).

Além disso, o planejamento agrícola, como o plantio, a maturação e o manejo da colheita, é essencial para o sucesso da agroindústria. Esses fatores, não devidamente contemplados, podem aumentar a quantidade de biomoléculas prejudiciais ao processamento industrial. Pois, por exemplo, os compostos fenólicos aparecem quando a cana-de-açúcar é atacada por pragas e, se não forem removidos, podem influenciar a cor do açúcar produzido (Madaleno *et al.*, 2023).

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

Na busca pela qualidade, a matéria-prima deve ser avaliada de acordo com o período útil de industrialização (PUI), no qual as características químico-tecnológicas se apresentam em melhores condições para a recuperação de sacarose na fábrica, na forma de cristais de açúcar (Stupiello *et al.*, 2025). Para a determinação do PUI, consideram-se os parâmetros tecnológicos no estádio de maturação. Dentre estes, destaca-se que os colmos, que devem apresentar entre 86% e 92% de caldo e entre 8% e 14% de fibra. No caldo extraído, haverá em torno de 75% de água e 18% de sólidos solúveis, medidos através do Brix refratométrico (Delgado; César; Silva, 2019).

Além desses parâmetros, para a produção de açúcar, o teor de sacarose deverá estar acima de 85% em relação a todos os sólidos solúveis disponíveis (Albuquerque, 2011). Por exemplo, se o caldo possui 18 °Brix, o teor mínimo de sacarose para a cana estar em PUI adequado é de 15,3% (Stupiello *et al.*, 2025). A partir desse momento, a variedade passa a ser processável industrialmente.

Na escolha de variedades para plantio, há uma divisão em três períodos para o planejamento da colheita. Os genótipos são considerados precoces, com o PUI atingido entre meados de abril e o final de junho. As variedades de meio de safra atingem o PUI entre meados de julho e o final de setembro, e os genótipos tardios, entre outubro e o final de novembro. Existem aquelas que possuem o PUI adequado para colheita entre junho e o final de novembro, sendo consideradas em uso do meio até o final da safra (Fernandes, 2011).

Quando a cana é colhida fora do PUI, o teor de não-açúcares eleva-se, o que pode reduzir a eficiência do processamento industrial e a qualidade dos produtos obtidos. Entre os não-açúcares, encontram-se moléculas como ácidos orgânicos, compostos fenólicos, amido, dextrana e outros interferentes na produção do açúcar (Lopes, 2013).

A cana-de-açúcar pode ser colhida de duas formas principais na produção de açúcar: manualmente e mecanicamente. Na colheita manual, a cana é colhida por trabalhadores com facões chamados de podões. Geralmente, a cana precisa ser queimada antes da colheita para eliminar as folhas secas e facilitar o corte. A colheita manual ainda é usada em áreas de difícil acesso para máquinas. Na colheita mecanizada, a cana é colhida por máquinas autopropelidas, o que a torna mais rápida e eficiente, prática comum em grandes lavouras, evitando a queima da cana e tornando-a mais sustentável (Lavanholi, 2008).

Atualmente, a forma mais moderna e eficiente é a colheita mecanizada, que utiliza máquinas colhedoras que cortam, limpam e picam a cana em toletes de 15 a 20 cm (Testa *et al.*, 2023). A colhedora possui facas que cortam a ponta da cana e outras que cortam o colmo na base. O material entra na máquina que separa as folhas e outras impurezas vegetais, por meio de dois extratores (Martins *et al.*, 2023).

Após o corte, a cana é carregada e transportada até as unidades industriais. Considerando que não há colheita manual, o carregamento é realizado por meio de transbordos, equipamentos que se deslocam junto às colhedoras de cana. Após a carga completa do transbordo, o auxiliar de colheita deposita a matéria-prima em caminhões à beira do campo de colheita (Almeida; Garcia; Fonseca, 2022).

Os caminhões semirreboques transportam a cana colhida até a usina. Após a chegada, os caminhões são direcionados à pesagem (aferição da massa de cana) e, em seguida, alguns são sorteados para amostragem, com o objetivo de avaliar a qualidade da matéria-prima. Após a amostragem, todos os semirreboques serão descarregados ao lado da mesa lateral, iniciando o processamento industrial (De Souza Dias *et al.*, 2015).

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

4 PREPARO DA CANA E EXTRAÇÃO DO CALDO

Na unidade industrial de produção de açúcar, o caldo da cana é extraído por meio de moagem ou de difusor. Porém, antes desta etapa, deve ser preparada e desintegrada o máximo possível para que a extração da sacarose seja mais eficiente (Albuquerque, 2011). Na preparação da cana, deve ocorrer o rompimento da estrutura dura, incluindo a casca, os nós e os entrenós, com o objetivo de abrir a fibra, de modo que as células parenquimatosas, onde a sacarose é armazenada, fiquem acessíveis aos métodos de extração (Stupiello *et al.*, 2025).

Nesse sentido, primeiro, a cana passa por um conjunto de navalhas que tem a função de cortar (picar) a cana-de-açúcar em pedaços pequenos e, depois, passa pelo desfibrador (desintegrador), que tem a função de dilacerar e abrir as fibras (Albuquerque, 2011). No entanto, algumas usinas não utilizam o sistema de navalhas devido ao advento da colheita mecanizada, que faz com que o corte da cana em colmos de 20 a 30 cm ocorra durante a própria colheita (Lavanholi, 2008).

Na etapa seguinte, a cana desfibrada é levada ao setor de extração, cujo objetivo é extrair maior quantidade de sacarose e produzir bagaço com níveis de sacarose de até 2% e umidade em torno de 50%, para que seja queimado nas caldeiras, gerando vapor e energia elétrica por meio do acionamento de turbinas (Lopes, 2013).

O processo de extração do caldo pode ser realizado por meio de moenda ou de difusor. Na moenda, o caldo é extraído por meio da pressão aplicada à cana desfibrada e adicionado ao processo de embebição em água, o que aumenta a eficiência de extração. Enquanto no difusor a sacarose é extraída por meio da lixiviação induzida pela inserção de água, a uma temperatura mínima de 75 °C (Albuquerque, 2011). Ambos os equipamentos podem atingir até 98% de eficiência na extração de caldo (Rein, 2017).

A moenda deve apresentar entre 4 e 6 ternos no tandem de moagem. Cada terno é formado por quatro rolos cilíndricos encamisados com chapa de ferro, contendo ranhuras que pressionam a cana (Delgado; César; Silva, 2019). No último terno da moenda, adiciona-se água a 75 °C, que auxilia na remoção de açúcares das células, marcando o início da embebição (Lopes, 2013). O caldo extraído é bombeado para o terno anterior e, assim, sucessivamente, até ser obtido no segundo terno: o caldo secundário. Entretanto, o primeiro terno não recebe embebição. Assim, a extração por moenda resulta em dois tipos de caldo: primário, destinado à fabricação de açúcar, e secundário (segundo terno e o resultado da extração de caldo dos demais ternos), encaminhado à fabricação de etanol (Albuquerque, 2011).

No difusor, a cana desfibrada é transportada pelo equipamento por meio de uma única esteira perfurada. Dentro do equipamento, a cana desfibrada recebe aspersão de água a 80 °C, constantemente próxima à saída, no bagaço úmido (Lopes, 2013). A água se infiltra no "colchão de cana" e remove os açúcares presentes nas células por meio da lixiviação (De Souza Dias *et al.*, 2015). Sob o difusor, há compartimentos que recebem o caldo extraído e o bombeiam para um ponto anterior; o caldo diluído é então despejado no colchão de cana preparada.

O processo de "lavagem da cana" ocorre na direção da entrada da cana desfibrada, com a obtenção do caldo misto nos compartimentos iniciais do equipamento (Rein, 2017). Na saída do difusor, o bagaço úmido, com a sacarose praticamente removida, passa por dois ternos de moenda para reduzir a umidade a cerca de 50% e recuperar o caldo residual ainda presente no bagaço. O líquido extraído retorna ao difusor para ser utilizado na aspersão sobre o colchão de cana (Delgado; César; Silva, 2019).

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

O caldo extraído (primário, secundário ou misto) é enviado para o sistema de tratamento, composto por equipamentos de limpeza física (peneiras) e físico-química, que visam à remoção das impurezas para as etapas subsequentes de evaporação, cozimento, cristalização, centrifugação, secagem, classificação, armazenamento e ensaque, finalizando, assim, o produto para a comercialização (De Souza Dias *et al.*, 2015). E para a produção de etanol, as etapas são: preparo do mosto, preparo do fermento, fermentação, centrifugação e destilação (Vandenberghe *et al.*, 2022).

5 TRATAMENTO DO CALDO PARA PRODUÇÃO DE AÇÚCAR

As impurezas no caldo que permanecerem durante o processamento do açúcar podem se acumular nos cristais, o que pode alterar a qualidade do produto (Oliveira; Madaleno, 2023). Por isso, o tratamento do caldo visa remover as impurezas sólidas e dissolvidas. Dentre as impurezas sólidas, observa-se a adição de bagacilho e de impurezas minerais (areia, pedras e argila) ao caldo (Delgado; César; Silva, 2019). As impurezas sólidas podem ser removidas por meio de peneiras cush-cush, Dutch State Mines (DSM) e rotativas, sendo a última a mais utilizada. As peneiras separam o caldo extraído do bagaço, que se misturou acidentalmente após a extração.

As impurezas minerais são removidas através do uso de hidrociclones, que através da centrifugação, remove a parte sólida do caldo, que tem o aparelho Dorrclone o mais utilizado nas indústrias. Outro modelo é o de sedimentação e decantação, proposto pelo equipamento Acosta (Delgado; César; Silva, 2019).

As impurezas dissolvidas no caldo devem passar pelo tratamento do caldo, que consiste em ajustar o pH e a temperatura do caldo para estimular a formação de coloides, tornando-os insolúveis e permitindo sua separação do caldo (Albuquerque, 2011). Os principais constituintes insolúveis são os não-açúcares, principalmente a fração orgânica, que se coagulam e formam flocos com massa suficiente para sedimentar (Rein, 2017). Os não-açúcares apresentam maior concentração quando a cana é colhida fora do PUI (Stupiello *et al.*, 2025).

Na primeira etapa do tratamento do caldo para a dissolução das impurezas, realiza-se a alteração do pH, seguida do aumento da temperatura (Oliveira; Madaleno, 2023). Essas duas modificações fazem com que substâncias solúveis, como proteínas, gorduras, aminoácidos e outros, se tornem insolúveis e sejam removidas do caldo da cana, o que melhora a qualidade do açúcar a ser obtido (Albuquerque, 2011).

Para a produção de açúcar, o pH do caldo extraído, que varia entre 4,5 e 5,5, deve ser corrigido para o próximo da neutralidade (pH = 7) por meio da adição de hidróxido de cálcio ou magnésio, com a metodologia da caleagem (Delgado; César; Da Silva, 2019). Existem duas formas de tratar o caldo, que definem o tipo de açúcar a ser produzido: somente caleagem e adição facultativa de fósforo para a produção do açúcar tipo Very High Polarization (VHP) (Oliveira; Madaleno, 2023). O fósforo deve ser adicionado se o teor for inferior a 250 a 300 mg/L de P_2O_5 (Stupiello *et al.*, 2025).

No açúcar tipo cristal, realiza-se a sulfitação (SO_2), com redução inicial do pH de 3,8 para 4,3. Em seguida, realiza-se a caleagem para elevar o pH de 7,0 para 7,2 (Albuquerque, 2011). O enxofre tem a propriedade de eliminar compostos que podem conferir cor ao cristal de açúcar, de modo que o processo é denominado, em muitos países, “produção de açúcar branco direto”. Na alteração do pH, forma-se, a princípio, o floco primário ou coloide (Stupiello *et al.*, 2025).

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

Após a correção do pH, o caldo dosado é encaminhado aos aquecedores de caldo, que elevam a temperatura para 100–105 °C. A temperatura elevada favorece a agregação dos compostos não-açúcares no coloide previamente formado, culminando na formação do floco primário (Rebelato; Madaleno; Rodrigues, 2011). Na sequência, o caldo é direcionado ao balão de flash para reduzir a pressão e a temperatura, com consequente degasagem, e, antes de ser adicionado aos aparelhos decantadores, recebe polímero (Lopes; Gabriel; Borges, 2011).

Existem vários tipos de polímeros auxiliares no tratamento do caldo, que contribuem para maior eficiência na sedimentação. O objetivo é formar o floco secundário, que possui maior massa e pode se separar mais rapidamente do caldo clarificado. O princípio do funcionamento do polímero será explicado no próximo item desta revisão.

No decantador, o caldo clarificado se separa do lodo (flocos secundários) por sedimentação. Na parte superior do equipamento, o caldo limpo é coletado por meio de decantação (Delgado; César; Da Silva, 2019). Isto ocorre devido à entrada contínua do caldo tratado no interior do aparelho de sedimentação, o que aumenta o volume interno e desloca o caldo clarificado para as bordas. Na base do decantador (aparelho) é separado o lodo (Albuquerque, 2011).

Existem dois tipos de decantadores, os de bandeja e os do Sugar Research Institute (SRI) (Delgado; César; Da Silva, 2019). O decantador de bandeja possui vários compartimentos, nos quais o lodo é separado e conduzido ao fundo do equipamento. O caldo clarificado é coletado de cada compartimento por decantação. O decantador SRI não possui bandeja e apresenta menor eficiência na separação do caldo clarificado do lodo, geralmente utilizado no tratamento do caldo para a produção de etanol (Lopes, 2013).

O caldo clarificado, separado, segue para as etapas seguintes do processo de produção de açúcar e etanol, enquanto o lodo deve ser filtrado para recuperar a sacarose contida no resíduo (Stupiello *et al.*, 2025). Para passar pelos filtros, é adicionado bagacilho (bagaço bem fino) para aumentar a eficiência da extração da sacarose (Albuquerque, 2011).

Os filtros contínuos de lodo ou borra são de dois tipos: tipo rotativo (Oliver) e tipo prensa (Delgado; César; Da Silva, 2019). Ambos os processos utilizam o vácuo e a embebição para remover a sacarose do lodo. A embebição é utilizada para lixiviar toda a sacarose presente no lodo, enquanto o vácuo remove o líquido que passa por telas de filtragem, deixando o material sólido retido. Após o vácuo, realiza-se a raspagem, obtendo-se a torta de filtro, ainda úmida, que será encaminhada para a secagem por compostagem (Lopes, 2013). No filtro do tipo prensa, ainda se realiza a prensagem do lodo + bagacilho, o que aumenta a eficiência de extração de sacarose do lodo em comparação com o filtro Oliver (Albuquerque, 2011).

Uma clarificação eficiente do caldo não só resulta na produção de açúcar com baixa coloração, juntamente com outras especificações do produto, como baixo resíduo insolúvel, baixa turbidez, etc., como existe uma relação direta entre a quantidade e a qualidade do açúcar produzido, um tratamento eficaz do caldo permite obter cristais de açúcar com baixa coloração e massas cozidas menos viscosas, o que facilita a separação do melaço, reduzindo o volume de água de lavagem dos cristais de açúcar e a quantidade de melaço produzido para reprocessamento (Leite; Barbosa, 2021).

O tratamento empregado na produção de etanol é semelhante ao aplicado no VHP de açúcar. Porém, a adição de caleagem ocorre até o pH 6 (caleagem branda), pois o objetivo é remover impurezas, mas não todos os nutrientes do caldo. Os nutrientes serão importantes para as leveduras (*Saccharomyces cerevisiae*), utilizadas na produção do biocombustível para formação de novas células, no reciclo do levedo na fermentação (Delgado; César; Silva, 2019).

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

6 FLOCULAÇÃO PRIMÁRIA E APLICAÇÃO DOS POLÍMEROS COMO AUXILIARES DO TRATAMENTO DO CALDO

A aplicação do tratamento do caldo com polímeros tem diversos propósitos, como a remoção de partículas coloidais responsáveis pela turbidez e de partículas que promovem o crescimento de micro-organismos, bem como a eliminação de vários compostos indesejados, principalmente polissacarídeos, compostos fenólicos e gomas (Swaminathan *et al.*, 2024). A adição do polímero estimula a floculação secundária, aumentando o tamanho das partículas, que irão sedimentar mais rapidamente (Thai; Doherty, 2013).

A coagulação é o termo empregado quando o aglomerado é composto por partículas coloidais que se aproximaram muito entre si (Shatat; Niazi; Batati, 2019). Dentre os coagulantes usados para melhorar a clarificação do caldo estão as poliaminas, a betonina, o Separan AP 30 e os floculantes de elevada massa molecular, como as poliacrilamidas (Mading Makur; Duraisamy; Birhanu, 2019).

A iniciação do floco primário no caldo de cana baseia-se na formação de $Ca_3(PO_4)_2$, por meio da adição de hidróxido de cálcio durante a caleagem e do fosfato presente no caldo extraído, quando o objetivo é a produção de açúcar do tipo VHP (Rein, 2017). Outra formação de floco primário é a obtida com sulfito de cálcio, por meio da sulfitação e da caleagem, na produção do açúcar cristal branco (Lopes, 2013). Segundo Greenwood, Rainey e Doherty (2007) e Thai, Moghaddam e Doherty (2015), as reações envolvendo a formação de fosfato de cálcio são as seguintes:

$Ca^{2+} + HPO_4^{2-} \Leftrightarrow CaHPO_4$. *(1)*
(fosfato dicálcico)

$Ca^{2+} + 2H_2PO^{-}{}_4 \rightarrow Ca(H_2PO_4)_2$, *(2)*
(fosfato monocálcico)

$3Ca^{2+} + 2PO_4^{3-} \rightarrow Ca_3(PO_4)_2$, *(3)*
(fosfato tricálcico)

$2CaHPO_4 + 2Ca_3(PO_4)_2 \rightarrow Ca_8H_2(PO_4)_6$, *(4)*
(fosfato de octacálcico)

$Ca_3(PO_4)_2 + 2Ca^{2+} + HPO^{2-}{}_4 + H_2O \rightarrow Ca_5(PO_4)_3OH + 2H^+$ *(5)*
(hidróxidoapatita)

A formação de fosfato dicálcico e monocálcico insolúveis (reações 1 e 2) e instáveis em água resulta na formação de fases intermediárias de fosfato de cálcio (reações 3 e 4) e, por fim, de apatita (por exemplo, hidroxiapatita, HAP), a forma mais estável desse fosfato (reação 5). O formato em que o fósforo estará disponível no caldo depende do pH, que, quando próximo da neutralidade, favorece a predominância da formação de $CaHPO_4$ e $Ca(H_2PO_4)_2$, insolúveis e que representam o início da formação dos aglutinados (Delgado; César; Silva, 2019). Além disso, o fosfato tricálcico amorfo é um dos principais compostos que formam flocos em sistemas aquosos, incluindo soluções de açúcar (Thai; Moghaddam; Doherty, 2015).

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

Outra forma de iniciar o floco primário é a adição de enxofre ao caldo, por meio da sulfitação (Albuquerque, 2011). O enxofre sólido é adicionado ao forno para queima e, a 300 a 400 °C, transforma-se em gás SO_2 (reação 7). O óxido de enxofre é conduzido em tubulação refrigerada para reduzir a temperatura do SO_2 a cerca de 23 °C, evitando a formação de SO_3 e de ácido sulfúrico (reações 12 e 13), que podem danificar os equipamentos de sulfitação (Lopes, 2013). Então, o SO_2 se mistura com a H_2O do caldo e forma o ácido sulfuroso (reações 8 e 9). Essa mistura pode ser realizada de várias maneiras; porém, a torre de sulfitação é o método mais utilizado nas usinas, na qual o gás sobe por meio de pratos perfurados, enquanto o caldo desce, promovendo a mistura entre os componentes (Rein, 2017).

A sulfitação reduz o pH do caldo para 3,8 a 4,3, o que, em seguida, requer caleagem rápida para evitar a inversão da sacarose em glicose e frutose (Leite, 2019). A adição de leite de cal estimula a formação do sulfito de cálcio ($CaSO_3$), insolúvel, que marca o início da coagulação das impurezas (reações 10 e 11).

$S + O_2 \rightarrow SO_2$ *(7)*

$2SO_2 + 2H_2O \rightarrow 2H_2SO_3^-$ *(8)*

$2H_2SO_3^- \rightarrow 2H+ + 2HSO_3^-$ *(9)*

(ácido sulfuroso)

$Ca^{2+} + 2HSO_3^- \rightarrow Ca(HSO_3)_2$ *(10)*

$2Ca^{2+} + 2Ca(HSO_3)_2 \rightarrow 4CaSO_3 + 4H_2O$ *(11)*

(Sulfito de cálcio)

Reação a ser evitada:

$SO_2 + O_1 \rightarrow SO_3$ *(12)*

$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$ *(13)*

(Ácido sulfúrico)

Além das reações de iniciação dos agregados, a temperatura do caldo é elevada rapidamente até a ebulição, entre 100 e 105 °C, com o objetivo de completar a formação do coloide primário (Lopes, 2013). Nisto, ocorre a desnaturação de proteínas, promovida pelo aumento da temperatura nos aquecedores, o que insolubiliza os compostos, que se agrupam no coloide primário formado (Thai; Moghaddam; Doherty, 2015). A densidade efetiva da estrutura produzida varia em função dos efeitos da carga superficial, que podem apresentar predominância positiva (cátions) ou negativa (ânions) (Albuquerque, 2011). Apesar da complexidade da mistura, as proteínas desnaturadas se comportam eletroforeticamente como uma dispersão homogênea, na qual as superfícies das partículas são caracteristicamente proteicas e carregam uma carga negativa líquida devido à ionização dos grupos carboxílicos (Crees, 1988).

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

Quando o sulfito de cálcio ou o fosfato de cálcio fica parcialmente coberto por moléculas proteicas, as cargas na superfície do agregado primário tornar-se-ão negativas, e estas aglutinarão mais partículas de sulfito de cálcio e de fosfato de cálcio nas suas superfícies externas. Estas, carregadas positivamente, atuarão, então, como pontes para a aglutinação das camadas do agregado primário, juntando-as progressivamente sob o efeito do empacotamento (De Souza, 1988).

A neutralização da carga reduz o potencial eletrocinético da dispersão coloidal, ou seja, o potencial zeta (ζ) (Swaminathan *et al.*, 2024). O tamanho das partículas ao término da floculação primária varia entre 0,5 e 5 micrômetros de diâmetro, com concentração numérica entre $2,5 \times 10^8$ e $1,2 \times 10^9$ L^{-1} (Doherty *et al.*, 2003). O potencial zeta mais próximo de zero indica que a floculação máxima de partículas coloidais em suspensão na solução de caldo de cana ocorrerá (Swaminathan *et al.*, 2024).

Na aplicação do polímero, ocorre a floculação secundária (Leão *et al.*, 2023) (Figuras 1 e 2). A adsorção de um copolímero de acrilato de sódio e acrilato de amônio (AAm) em partículas de microflocos pode ocorrer por meio de três mecanismos: (1) atração dos grupos acrilato carregados negativamente às cargas positivas na superfície das partículas de microflocos; (2) atração dos grupos acrilato carregados negativamente às "pontes" iônicas dipositivas (por exemplo, Ca^{2+}), que são adsorvidas às cargas negativas nas partículas de microflocos (Figura 3); e (3) ligações de hidrogênio ou dipolares entre os grupos AAm e as partículas de microflocos (Doherty *et al.*, 2003).

Assim, os polieletrólitos são definidos como polímeros sintéticos de alto peso molecular, solúveis em água, que, em solução, atuam como eletrólitos, podendo ser de natureza catiônica, aniônica ou não aniônica (Delgado; César; Silva, 2019). Os coagulantes neutralizam a carga dos coloides e estimulam a agregação dos flocos, o que aumenta a densidade e a massa, acelerando a sedimentação das impurezas (Swaminathan *et al.*, 2024).

Na aplicação dos polímeros, em geral, os flocos grandes, unidos por pontes poliméricas dinâmicas, serão mais resistentes do que os flocos frágeis formados pela coagulação primária. Isso, por sua vez, levará ao crescimento geométrico, em vez do crescimento aritmético, resultando em floculação rápida e morfologia macroscópica característica dos flocos gerados com floculante polimérico (Doherty *et al.*, 2003). Os polieletrólitos estão diante de um complexo sistema de cargas que utilizam seu potencial eletrocinético, buscando, por meio de uma movimentação constante, atingir seu ponto de equilíbrio (De Souza, 1988).

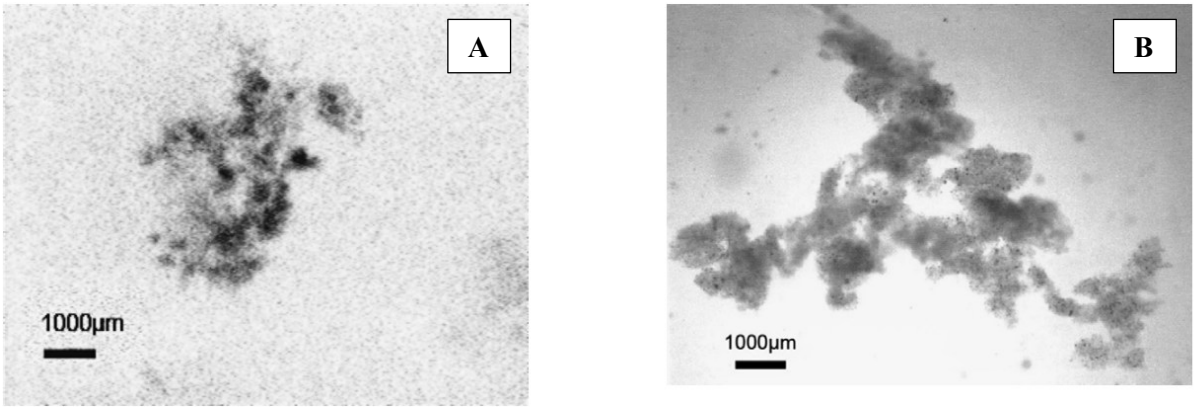
Considerando os tipos aniônicos, os polímeros parcialmente hidrolisados de acrilamida têm uma unidade repetida que forma uma longa cadeia de massa molecular muito alta (maior que 10^7) (Rein, 2017). Em quantidades muito pequenas - uma ou duas partes por milhão de caldo -, os polieletrólitos melhoram a floculação, favorecem uma decantação mais rápida e reduzem o volume de lodo sedimentado, sem alterar o pH. A quantidade aplicada varia entre 1 e 2 mg L^{-1}, podendo chegar a 5 mg L^{-1} (Payne, 1989). A adição de maior quantidade de polímero pode provocar o efeito oposto à agregação dos coloides, tornando a sedimentação mais difícil (Prati; Moretti, 2010).

Com relação aos pontos de aplicação no tratamento do caldo, as recomendações são as pertinentes à adição do polieletrólito logo após o tratamento com os reagentes normais de clarificação e ao aquecimento do caldo (Albuquerque, 2011). Então, o ponto de aplicação pode ocorrer antes do balão de flash, responsável pela degasagem do caldo tratado. Outro ponto é a tubulação que, após a degasagem, conduz o caldo tratado ao decantador. O importante, no ponto de adição do polieletrólito, é assegurar uma boa mistura entre a solução do polímero e o caldo (Delgado; César, 1977). É importante ressaltar que um caldo de uma determinada fábrica, pode

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

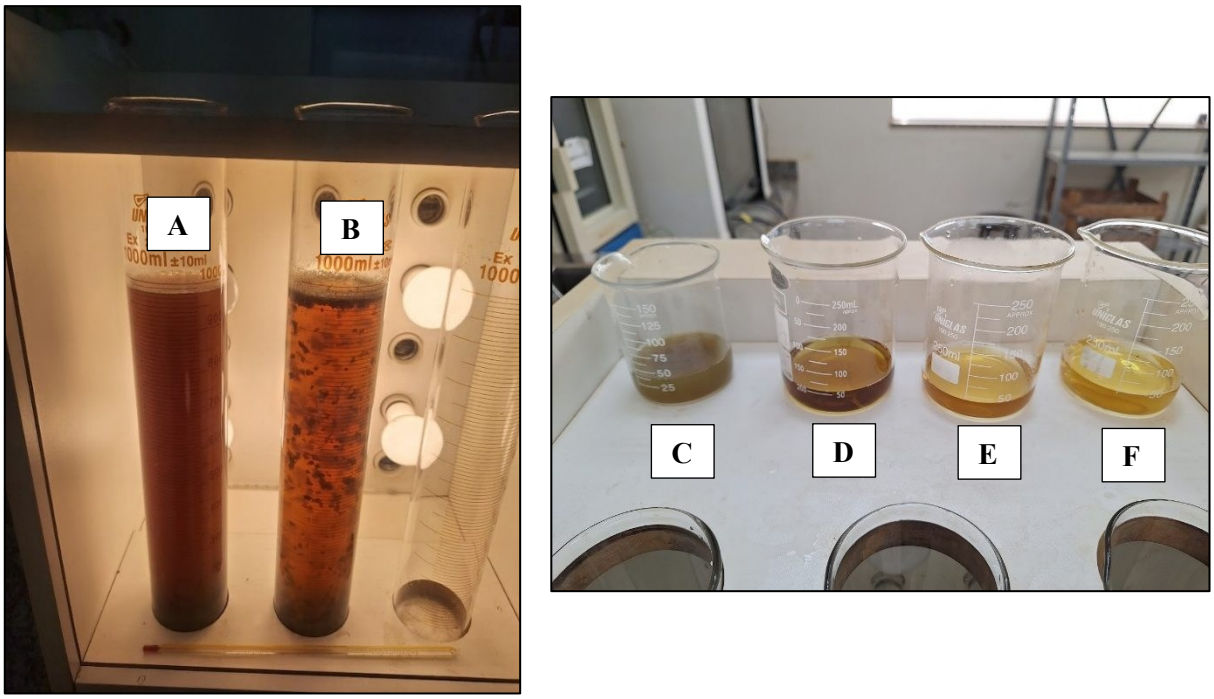
não dar a mesma resposta em outra como o mesmo polímero utilizado, que provavelmente viverá uma outra realidade em nível de região, condições de processamento e variedades (De Souza, 1988). Por isso, o teste de tipos de polímeros (Figura 2) é recomendado para identificar o ideal a ser utilizado na unidade industrial.

Figura 1 - Foto do fosfato de cálcio formado: A. sem floculante em água (floco primário) e B. com floculante em caldo de cana (floculação secundária)



Fonte: Greenwood, Rainey e Doherty (2007)

Figura 2 - Teste de sedimentação: A. sem floculante (apenas floco primário); B. com floculante em caldo de cana (floculação secundária); C. Caldo de cana original; D. caldo tratado apenas com caleagem; E. Caldo tratado com caleagem e polímero e F. caldo tratado com sulfitação, caleagem e polímero



Fonte: autoria própria (2025)

Em trabalho realizado em uma unidade açucareira na Índia, foram utilizadas duas variedades de cana-de-açúcar (B52298 e NCO334) para estudar os níveis de P_2O_5 de 158,6, 200, 300, 400 e 441,4 mg/L, e a aplicação do mesmo polímero em 0,59, 1, 2, 3 e 3,41 ppm, e

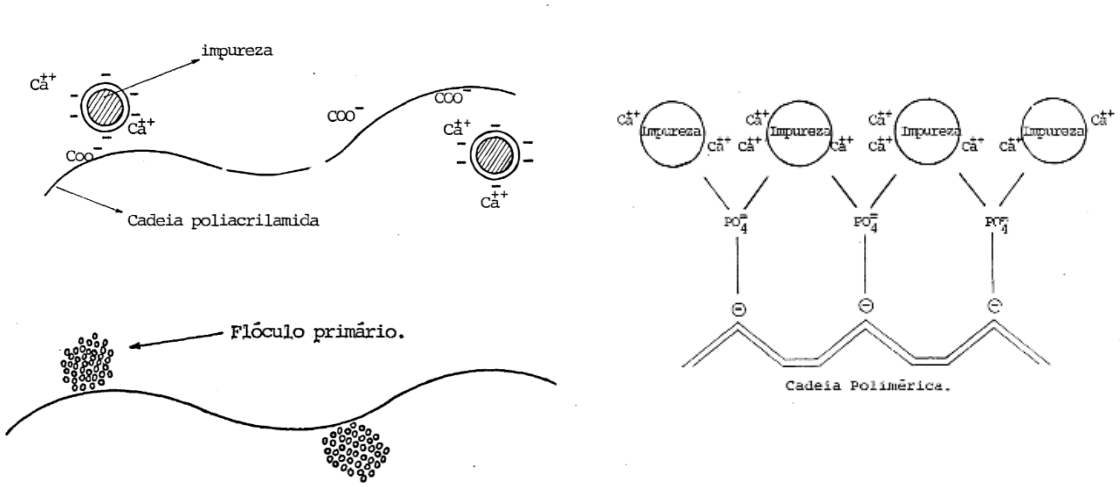
Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

em 0,17, 1, 3, 5 e 5,83 ppm para B52298 e NCO334, respectivamente. Para a variedade B52298, as faixas ótimas de nível foram de 192,2 a 270 mg/L de P_2O_5 e de 2,91 a 3,41 ppm de polímero. Para a variedade NCO334, as faixas ótimas foram de 229 a 264,5 mg/L de P_2O_5 e de 5,13 a 5,83 ppm de polímero (Mohammed; Solomon; Bultosa, 2016).

7 POLÍMEROS SINTÉTICOS

No tratamento do caldo, os polímeros sintéticos são amplamente utilizados e podem ser de vários tipos, sendo os principais: poliacrilamidas com carga positiva e negativa (anfotéricas), apenas aniônicas ou apenas catiônicas (Albuquerque, 2011). Nas indústrias de produção de açúcar, a poliacrilamida utilizada é de natureza aniônica e pode apresentar várias densidades de carga, com um elevado espectro de cargas elétricas que varia de 0% a 100% (Rabiee, 2010).

Figura 3 - Diagrama demonstrativo do ataque às partículas impuras pelas unidades de cadeia de poliacrilamida



Fonte: (De Souza, 1988)

Os polímeros de acrilamida (PAM) começaram a ser fabricados na década de 1950, principalmente de origem alemã (De Souza, 1988), e a produção vem se desenvolvendo ao longo dos anos (Rabiee, 2010). Dentre esses, os mais aplicados são: os copolímeros de acrilamida e acrilato de sódio, que podem ser preparados tanto por copolimerização direta dos dois monômeros quanto por polimerização da acrilamida, seguida de hidrólise (Crees, 1988).

Os polímeros à base de acrilamida são produzidos pela polimerização por radicais livres da acrilamida e de seus derivados, por meio de técnicas em massa, em solução, por precipitação, em suspensão, por emulsão e por copolimerização. Dentre essas, a polimerização em solução é a preferida devido à dificuldade de controle da temperatura e da agitação na polimerização em massa e ao custo de surfactantes e solventes na polimerização em suspensão, emulsão e precipitação (Rabiee, 2010).

O desempenho de floculantes para melhorar a sedimentação de partículas de caldo de cana-de-açúcar é avaliado por meio de medições da turbidez do caldo clarificado e da taxa de sedimentação do lodo (Doherty *et al.*, 2003). Cada tipo de caldo possui um ponto ideal de

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

concentração de polieletrólitos, entre 3 e 4 ppm, a ser utilizado para reduzir a cor do caldo clarificado e para que, a partir desse ponto, o índice de turbidez diminua (De Souza, 1988).

No Quadro 1, apresentam-se algumas marcas de polímeros comercializadas. Alguns coagulantes/floculantes à base de poliacrilamida disponíveis comercialmente e utilizados na clarificação do caldo de cana são: Sinofloc (catiônico), Magnafloc LT-525 (catiônico), Magnafloc LT-27 (poli(acrilamida-co-acrilato de sódio), aniônico), Accofloc A-110 (aniônico) e Separan AP 30 (Swaminathan *et al.*, 2024).

Quadro 1 - Tipos de polímeros sintéticos comercializados, por empresa, e tipos de produtos

Empresa	**Exemplos de produtos**
SNF/Floerger	*Magnafloc LT-27; Magnafloc LT-525*
BASF/Solenis	*Accofloc A-110*
Dow/Hercules	*Separan AP-30*
Qemifloc	*Chemifloc® 3000 – X*
Sinofloc	*Sinofloc 9218*
Outros utilizados em estudos científicos:	*Taloflot, Flonex 9076, Krilium, Lytron X-886, KMA 6634, Sedipur TF2, Zuclar 106, Genfloc 156, Superfloc A-110, Superfloc A-150, Talosep A-130, Primafloc A-10, Mqrarfloc A-40H, Dedenol OT, HyFlock, Califloc A*

Fonte: Adaptado de Swaminathan *et al.* (2024) e Souza (1988)

Em um sistema tão complexo quanto o caldo extraído, é evidente que nenhum floculante isolado proporcionará remoção ideal de todas as partículas em suspensão (Doherty *et al.*, 2003). Por exemplo, as impurezas vegetais, trazidas pela colheita mecanizada, podem alterar o comportamento de sedimentação dessas impurezas durante o tratamento do caldo. O ácido aconítico, presente em elevada quantidade na cana com impurezas, reage com o Ca^{2+} da caleagem e não se torna insolúvel, o que atrapalha a formação dos flocos primários para a separação do caldo (Thai; Moghaddam; Doherty, 2016). Além disso, os aconitatos de cálcio formados se acumulam nas incrustações dos aparelhos de evaporação, reduzindo a eficiência do processo de produção de açúcar ou ficando inclusos na formação dos cristais, o que aumenta as cinzas no produto (Stupiello *et al.*, 2025).

O ácido aconítico é um quelante conhecido e, portanto, se ligaria aos íons Ca^{2+}, reduzindo a quantidade disponível desses íons, além de exercer efeito tampão nas soluções do caldo. Portanto, os ácidos elevam a quantidade de calagem (como íons Ca^{2+}) adicionada ao caldo para atingir o pH final de calagem até a neutralidade (Thai; Moghaddam; Doherty, 2016).

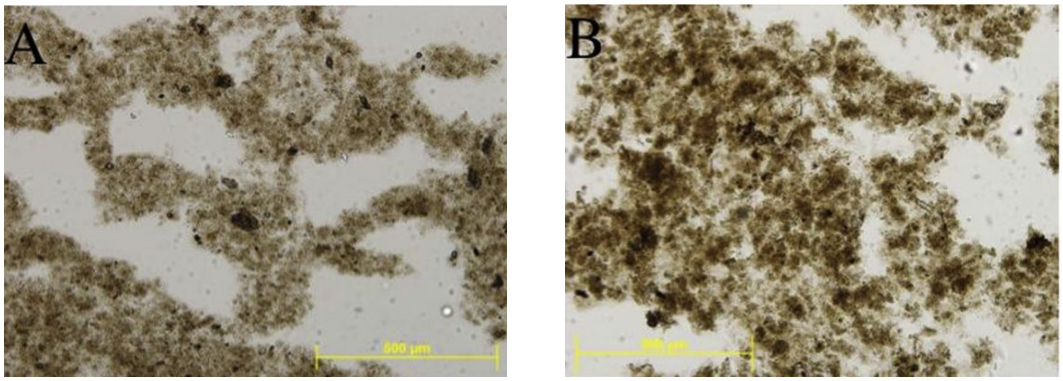
A presença de impurezas vegetais reduz as forças de atração de van der Waals entre as partículas, o que, por sua vez, diminui os processos de coagulação e floculação (Thai; Doherty, 2013). Além do ácido aconítico, a cana, que contém impurezas orgânicas e inorgânicas, forma flocos maiores, porém menos interconectados, devido à maior presença de sódio (ação dispersante), tornando-os mais leves e dificultando a sedimentação do lodo (Figura 4) (Thai; Moghaddam; Doherty, 2016).

O uso de polímero catiônico provavelmente agregaria partículas pequenas e altamente carregadas que não seriam adsorvidas apenas pelo floculante aniônico. A combinação de polímeros aniônicos e catiônicos poderia aumentar a eficiência na sedimentação de impurezas. Então, os copolímeros se mostraram mais eficazes do que os homopolímeros para auxiliar na floculação e na sedimentação das partículas de caldo de cana-de-açúcar, e os polímeros de

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

melhor desempenho são aqueles que atuam por meio do mecanismo de ponte (Doherty *et al.*, 2003) (Figura 3).

Figura 4 - Imagem microscópica (10×) da floculação secundária em caldo de cana-de-açúcar: A. Somente colmos de cana. B. Cana processada com folhas, palha e ponteiro.



Fonte: Thai, Moghaddam e Doherty (2016)

O desempenho de um novo copolímero catiônico enxertado polivinilpirrolidona-enxerto-poli(acrilamida-co-cloreto) (PVP-g-p(AM-co-DADMAC)), sintetizado por meio de técnica assistida por micro-ondas, foi comparado com diferentes quantidades dos monômeros acrilamida (AM) e cloreto de dialildimetilamônio (DADMAC) (Swaminathan *et al.*, 2024). Os autores apresentaram uma eficiência adequada do polímero enxertado, com redução dos valores de zeta e formação de coloides de grande tamanho no caldo tratado.

Apesar da recomendação da baixa concentração no tratamento do caldo, o uso dos principais polímeros sintéticos pode apresentar efeitos cancerígenos, se pequena quantidade de resíduos forem encontrados no açúcar branco, reduzindo a segurança do produto (Wang *et al.*, 2021). Esta questão é de grande importância, pois a molécula de acrilamida tem ação carcinogênica e neurotóxica em humanos e pode estar incorporada ao cristal de açúcar ou ao lodo (torta de filtro) utilizado como fertilizante (Costa *et al.*, 2018).

8 POLÍMEROS NATURAIS

Há uma busca incessante por melhorar a qualidade do processo e dos cristais obtidos na produção de açúcar. Quanto aos polímeros, os naturais têm sido estudados e alguns têm apresentado comportamento semelhante ao dos polímeros sintéticos, como no auxílio ao tratamento do caldo. Além disso, devem ser utilizados em baixa concentração para não se incorporarem aos cristais nem chegarem ao consumidor final, ou possuir propriedades biodegradáveis (Costa, 2021).

Em alguns países, o uso de açúcar com floculantes sintéticos é proibido. Essa restrição intensificou a busca por moléculas derivadas de fontes naturais, com propriedades que facilitem a clarificação do caldo e que não apresentem toxicidade, o que também pode aumentar o valor agregado dos cristais. Entre as fontes naturais estão os extratos de plantas, que poderiam ser cultivados na área agroindustrial, o que levaria a uma redução maior dos custos finais de produção dos cristais, por evitar o uso de polímeros sintéticos (Costa *et al.*, 2014).

Costa (2021) sintetizou floculantes lignocelulósicos a partir do bagaço da cana-de-açúcar (resíduo obtido na produção de açúcar de cana). Os polielétrolitos obtidos foram caracterizados, e a eficácia no tratamento do caldo de cana-de-açúcar, em diferentes

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

concentrações (100, 250 e 500 $mg.kg^{-1}$), foi avaliada e comparada à do polímero sintético (Flonex) adicionado a 6 $mg.kg^{-1}$. Os resultados mostraram que os polieletrólitos naturais à base de celulose apresentam melhor desempenho no tratamento do caldo de cana-de-açúcar em comparação com o polímero sintético, alcançando, em média, 99% de remoção de turbidez. A concentração do polieletrólito à base de celulose que apresentou os melhores resultados, independentemente da variável analisada, foi de 100 $mg.kg^{-1}$, embora as diferenças de eficiência entre as concentrações mais baixas tenham sido pequenas (Leão *et al.*, 2023).

Mahgoub *et al.* (2023) produziram três compósitos de biopolímeros baseados em quitosana e carboximetilcelulose. Os polímeros naturais foram caracterizados e aplicados como agentes floculantes no caldo de cana misto e no processo de refino de xarope bruto (caldo clarificado após a evaporação até 65 °Brix). Um dos compostos, que não foi identificado pelos autores, apresentou eficiência de remoção de cor do caldo e do xarope bruto de 15,8% e 40,7%, respectivamente, na dosagem de 200 ppm, em comparação com o método tradicional de clarificação (uso exclusivo de fosfatação). No estudo, não foi informado se houve comparação com polímeros sintéticos.

Mahadevaiah, Dezfuly e Demappa (2013) verificaram o efeito de floculantes naturais, como *Hibiscus vitifolius* e *Aloe vera*, sobre variedades de cana-de-açúcar selecionadas na região de Mandya, na Índia. Os resultados revelaram que os floculantes naturais foram superiores aos comerciais. Além disso, exigiram menor tempo de sedimentação e menor turbidez do caldo clarificado em comparação aos floculantes sintéticos.

O extrato de moringa (*Moringa oleifera* Lam.), é amplamente utilizado como floculante de impurezas presentes na água (Costa *et al.*, 2018). O nome árabe desta planta no Sudão é Shajar Elrawag, que significa "árvore com propriedades purificadoras", e suas sementes são usadas na purificação da água no oeste do país (Hamad; Hassan; Ahmed, 2016). O fenômeno de sedimentação ocorre devido à presença de uma proteína da família da S-albumina nas sementes de moringa, que apresenta características coagulantes e não é tóxica para humanos (Freire *et al.*, 2015).

A melhor técnica para extrair a proteína S-albumina das sementes de moringa, encontrada no trabalho de Costa *et al.* (2018), foi alcançada usando solução de $CaCl_2$ 0,1 mol/L. Neste trabalho, a melhor dosagem aplicada no caldo de cana-de-açúcar foi de 1300 mg/L, com qualidade de açúcar similar à alcançada com o polímero de acrilamida. Além da semente, o extrato de folha de moringa também poderia ser utilizado para coagular as impurezas do caldo. Na dosagem de 5 mg/L de extratos de folha, Costa *et al.* (2014) verificaram melhor qualidade no tratamento do caldo e no açúcar produzido, em comparação ao polímero sintético Flonex 9076, utilizado na dosagem de 1,5 mg/L.

Teixeira *et al.* (2023) estudaram a melhor forma de extrair o floculante da semente de Moringa e verificaram que o uso de extrato de moringa em solução salina de $CaCl_2$ 1 M (MO + $CaCl_2$) em uma concentração de 100 mg L^{-1} exibiu atividade potencial semelhante à do polímero sintético (Magnafloc, 1,5 mg L^{-1}) no processo de clarificação para remover as impurezas do caldo da cana.

Outra planta utilizada no tratamento do caldo é a acácia negra (*Acacia mearnsii*), utilizada na extração de tanino e na produção de açúcar e etanol (Suyenaga *et al.*, 2015), sendo muito empregada na produção de açúcar orgânico nas usinas. Os taninos são compostos naturais

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

com a habilidade de se combinar com proteínas, alcaloides e outros polímeros, sendo muito utilizados na indústria coureira, no tratamento de água e de efluentes, entre outras aplicações (Silva *et al.*, 2019).

Leite (2019) relatou que, na década de 1980, a empresa Tanac S.A. desenvolveu o Tanfloc, uma linha de polímeros orgânicos catiônicos de baixa massa molar, de origem essencialmente vegetal, ambientalmente favorável, que atuava como coagulante, floculante e auxiliar de coagulação. A acácia vem sendo utilizada para substituir o enxofre aplicado na sulfitação, pois o consumo excessivo de sulfitos tem sido uma preocupação internacional, e o açúcar cristal branco apresenta elevados teores de enxofre (Leite; Barbosa, 2021). Os autores mencionam a associação com a caleagem simples do caldo e a adição do polímero Flonex 9076 na dosagem de 3 ppm.

Leite e Barbosa (2021) demonstraram que dosagens de tanino entre 300 e 500 ppm, juntamente com calagem aplicada em pH 7,3 e 3 ppm de floculante aniônico (Flonex 9076), proporcionaram o melhor desempenho, resultando em 32–34% de remoção de cor e 89–93% de remoção de turbidez. Nessas condições, a remoção de amido e de dextrana aumentou para 90% e 98%, em comparação com 69% e 96%, respectivamente, obtidos com o tratamento convencional. O desempenho do tanino também reduziu a dureza de cálcio do caldo clarificado em até 18% em comparação com o tratamento convencional, o que, por sua vez, poderia prevenir incrustações nas etapas subsequentes, como nos evaporadores e cozedores.

Silva *et al.* (2019) investigaram o desempenho do extrato de tanino de acácia negra e da quitosana no tratamento do caldo, com resultados de diminuição da cor e da turbidez do caldo, comparados ao tratamento convencional (uso de polímero Flonex 9076). As dosagens empregadas no estudo foram de 0, 300, 400 e 500 ppm para o extrato de tanino e de 0, 300, 450 e 600 ppm para a quitosana. A quitosana pode ser obtida pela desacetilação da quitina com álcalis, tornando-se o segundo polímero mais abundante na natureza. Os resultados obtidos mostraram que o caldo clarificado, com o auxílio do extrato de tanino de Acácia Negra, apresentou valores de cor superiores aos obtidos com a quitosana e com os tratamentos convencionais. Nas condições estudadas, a quitosana apresentou maior percentual de remoção da turbidez do que o extrato de tanino.

Por fim, a alga vermelha (*Kappaphycus alvarezii*) vem sendo utilizada na produção de biofloculantes e poderia ser aplicada no tratamento do caldo para a produção de etanol e açúcar, devido à sua estrutura de polissacarídeos de carragenana, com elevada presença de agentes gelificantes. No entanto, necessita de mais estudos, apesar da demonstração da elevada adaptabilidade de uso no setor sucroenergético, com dosagem variando de 500 a 1000 mg L^{-1} no tratamento do caldo clarificado (Alcantara *et al.*, 2023).

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de polímeros tornou-se importante para a obtenção de açúcar conforme as especificações industriais. A aplicação de pequenas dosagens de auxiliares de sedimentação promove uma melhora significativa na qualidade do caldo. Quanto maior a remoção de não-açúcares, maior será a produção de açúcar nas etapas posteriores, como no cozimento, e melhor será o atendimento à qualidade do produto.

O tratamento do caldo, usual nas usinas, com caleagem, sulfitação e fosfatação, está consolidado; o uso de polímero, porém, não. Existem vários tipos de auxiliares de

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

sedimentação, e o mais utilizado é o polímero aniônico de acrilamida. No entanto, devido à possível permanência do composto no caldo clarificado e à sua incorporação ao cristal de açúcar produzido, a acrilamida poderia causar danos à saúde humana, por ser considerada carcinogênica em baixas concentrações. Por isso, alguns países limitaram o uso de polímeros sintéticos na indústria do açúcar.

Recentemente, o uso de polímeros naturais vem apresentando resultados satisfatórios, porém ainda requer aperfeiçoamento e estudos em escala industrial, além da produção de açúcar orgânico. A biodegrabilidade da biomolécula utilizada é muito importante, pois, até que o açúcar chegue ao consumidor final, a molécula, se presente no cristal, deve ser inativada. Outra preocupação é a área ambiental, com as tortas de filtro aplicadas nas lavouras, que contêm polímeros sintéticos em concentrações superiores às do açúcar. Possivelmente, as moléculas poderiam ser transportadas para os lençóis freáticos, o que requer estudos para avaliar a decomposição dessas moléculas no subproduto da cana-de-açúcar por meio da compostagem.

Como se pode observar, os estudos para a melhoria do tratamento do caldo requerem a adoção de produtos mais naturais como auxiliares de sedimentação nas usinas. Porém, até mesmo os polímeros naturais podem causar danos desconhecidos se não se degradarem antes do consumo do açúcar. Por isso, os experimentos devem ser aprofundados e ampliados para compreender e abranger outras moléculas potenciais. Os sintéticos ainda dominam na produção de açúcar porque se mostram mais eficientes na remoção de impurezas do caldo. Há potenciais candidatos para substituir os polímeros sintéticos, como os extratos de Moringa e de Acácia negra. Portanto, os estudos devem continuar para atender à demanda por açúcar de qualidade, em conformidade com os padrões econômicos, sociais e ambientais.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, F. M. **Processo de fabricação do açúcar**. 3. ed. Recife: Editora Universitária da Universidade Federal de Pernambuco, 2011.

ALCANTARA, G. U. *et al.* Preparation of red seaweed extract for use as a flocculant agent in sugarcane juice and comparison between two experimental designs. **Industrial Crops and Products**, v. 205, 2023. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.117530. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117530. Acesso em: 31 ago. 2026.

ALMEIDA, P.; GARCIA, R.; FONSECA, A. Advances in modeling of the integrated production logistics in sugarcane harvest. **Promet - Traffic - Traffico**, v. 34, n. 4, p. 595-608, 2022. DOI: 10.7307/ptt.v34i4.4012. Disponível em: https://doi.org/10.7307/ptt.v34i4.4012. Acesso em: 31 ago. 2026.

COSTA, C. S. C. L. **Síntese de polieletrólitos aniônicos a partir do bagaço da cana-de-açúcar para aplicação no tratamento do caldo de cana**. 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2021. Disponível em: https://hdl.handle.net/10316/98110. Acesso em: 31 ago. 2026.

COSTA, G. H. G. *et al.* Use of *Moringa oleifera* Lamarck leaf extract as sugarcane juice clarifier: effects on clarified juice and sugar. **Food Science and Technology**, v. 34, n. 1, p. 204-209, 2014. DOI: 10.1590/S0101-20612014000100029. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0101-20612014000100029. Acesso em: 31 ago. 2026.

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

COSTA, G. H. G. *et al.* Acrylamide replaced by moringa extract in sugar production. **Food Science and Technology**, v. 38, n. 4, p. 591-599, 2018. DOI: 10.1590/fst.00417. Disponível em: https://doi.org/10.1590/fst.00417. Acesso em: 31 ago. 2026.

CREES, O. L. **The flocculation of cane sugar muds in Australian raw sugar factories**. 1988. Thesis (PhD) – James Cook University, Townsville, 1988.

DELGADO, A. A.; CÉSAR, M. A. A. **Elementos de tecnologia e engenharia do açúcar de cana**. 2. ed. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1977.

DELGADO, A. A.; CÉSAR, M. A. A.; SILVA, F. C. da. **Elementos de tecnologia e engenharia da produção do açúcar, etanol e energia**. 1. ed. Piracicaba: FEALQ, 2019.

DOHERTY, W. O. S. *et al.* Flocculation and sedimentation of cane sugar juice particles with cationic homo- and copolymers. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 90, n. 1, p. 316-325, 2003. DOI: 10.1002/app.12791. Disponível em: https://doi.org/10.1002/app.12791. Acesso em: 31 ago. 2026.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. 3. ed. Piracicaba: STAB, 2011.

FREIRE, J. E. C. *et al.* Mo-CBP3, an antifungal chitin-binding protein from *Moringa oleifera* seeds, is a member of the 2S albumin family. **PLoS ONE**, v. 10, n. 3, 2015. DOI: 10.1371/journal.pone.0119871. Disponível em: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119871. Acesso em: 31 ago. 2026.

GREENWOOD, J.; RAINEY, T.; DOHERTY, W. O. S. Light scattering study on the size and structure of calcium phosphate/hydroxyapatite flocs formed in sugar solutions. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 306, n. 1, p. 66-71, 2007. DOI: 10.1016/j.jcis.2006.10.010. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.10.010. Acesso em: 31 ago. 2026.

HAMAD, S. A. A.; HASSAN, A. A. E.; AHMED, I. A. M. Application of moringa (*Moringa oleifera*) seeds for clarification and purification of sugar cane juice and raw sugar melt. **Journal of Research in Applied Sciences**, v. 3, n. 1, p. 151-156, 2016.

INTERNATIONAL COMMISSION FOR UNIFORM METHODS OF SUGAR ANALYSIS (ICUMSA). **ICUMSA Methods Book Supplement 2011**. Berlin: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2011. Disponível em: https://www.icumsa.org/icumsa-methods-book-supplement/methods-book-supplement-2011/. Acesso em: 31 ago. 2026.

LAVANHOLI, M. G. D. P. Qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de açúcar e de álcool. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (org.). **Cana-de-açúcar**. 1. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. p. 697-722.

LEÃO, S. *et al.* Anionic bio-flocculants from sugarcane for purification of sucrose: an application of circular bioeconomy. **Heliyon**, v. 9, n. 6, e17134, 2023. DOI:

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

10.1016/j.heliyon.2023.e17134. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17134. Acesso em: 31 ago. 2026.

LEITE, I. R. **Avaliação e otimização do desempenho do extrato de tanino de Acácia Negra na clarificação de caldo e xarope de cana para fabricação de açúcar**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, 2019. Disponível em: https://hdl.handle.net/11449/181270. Acesso em: 31 ago. 2026.

LEITE, I. R.; BARBOSA, R. D. Tannin extract for sugarcane juice clarification. **Sugar Tech**, v. 23, n. 3, p. 682-691, 2021. DOI: 10.1007/s12355-020-00923-x. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12355-020-00923-x. Acesso em: 31 ago. 2026.

LOPES, C. H. **Tecnologia de produção de açúcar de cana**. 1. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2013.

LOPES, C. H.; GABRIEL, A. V. M. D.; BORGES, M. T. M. R. **Produção de etanol a partir da cana-de-açúcar**. 1. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2011.

MADALENO, L. L. *et al.* Sugar quality produced from immature and mature sugarcane damaged by spittlebugs. **Sugar Tech**, v. 25, n. 6, p. 1351-1360, 2023. DOI: 10.1007/s12355-023-01284-x. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12355-023-01284-x. Acesso em: 31 ago. 2026.

MADING MAKUR, M.; DURAISAMY, R.; BIRHANU, T. Clarifying capacity of eco-friendly nano CaO and okra (*Abelmoschus esculentus*) extract on the processing of sugarcane juice: a review. **International Research Journal of Science and Technology**, p. 21-30, 2019. DOI: 10.46378/irjst.2019.010104. Disponível em: https://doi.org/10.46378/irjst.2019.010104. Acesso em: 31 ago. 2026.

MAHADEVAIAH; DEZFULY, M. A.; DEMAPPA, T. Effective of natural flocculants on sugarcane juice clarification: a comparative study. **Asian Journal of Research in Chemistry**, v. 6, n. 8, p. 769-771, 2013. Disponível em: https://ajrconline.org/AbstractView.aspx?PID=2013-6-8-14. Acesso em: 31 ago. 2026.

MAHGOUB, M. Y. *et al.* Synthesis and characterization of promising economic biopolymer composite as a clarifying agent for sugar industry. **Sugar Tech**, v. 25, n. 4, p. 968-981, 2023. DOI: 10.1007/s12355-022-01238-9. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12355-022-01238-9. Acesso em: 31 ago. 2026.

MARTINS, M. B. *et al.* Sugarcane harvester: a bibliometric review. **Sugar Tech**, v. 25, p. 1316-1327, 2023. DOI: 10.1007/s12355-023-01286-9. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12355-023-01286-9. Acesso em: 31 ago. 2026.

MOHAMMED, H.; SOLOMON, W. K.; BULTOSA, G. Optimization of phosphate and anionic polyacrylamide flocculant (APF) level for sugar cane juice clarification using central composite design. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 40, n. 1, p. 67-75, 2016. DOI: 10.1111/jfpp.12584. Disponível em: https://doi.org/10.1111/jfpp.12584. Acesso em: 31 ago. 2026.

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

OLIVEIRA, M. P.; MADALENO, L. L. Controle do processo de cozimento na produção de açúcar. **Ciência & Tecnologia**, v. 15, n. 1, p. e1512, 2023. DOI: 10.52138/citec.v15i1.272. Disponível em: https://doi.org/10.52138/citec.v15i1.272. Acesso em: 31 ago. 2026.
PAYNE, J. H. **Operações unitárias na produção de açúcar de cana**. São Paulo: Nobel; STAB, 1989.

PRATI, P.; MORETTI, R. H. Study of clarification process of sugar cane juice for consumption. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 30, n. 3, p. 776-783, 2010. DOI: 10.1590/S0101-20612010000300033. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0101-20612010000300033. Acesso em: 31 ago. 2026.

RABIEE, A. Acrylamide-based anionic polyelectrolytes and their applications: a survey. **Journal of Vinyl and Additive Technology**, v. 16, n. 2, p. 111-119, 2010. DOI: 10.1002/vnl.20229. Disponível em: https://doi.org/10.1002/vnl.20229. Acesso em: 31 ago. 2026.

REBELATO, M. G.; MADALENO, L. L.; RODRIGUES, A. M. Um estudo sobre a aplicabilidade do sistema puxado de produção na fabricação de açúcar. **Revista Gestão Industrial**, v. 7, n. 1, p. 228-246, 2011. DOI: 10.3895/s1808-04482011000100012. Disponível em: https://doi.org/10.3895/s1808-04482011000100012. Acesso em: 31 ago. 2026.

REIN, P. **Cane Sugar Engineering**. 2. ed. Berlin: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2017.
SHATAT, R. S.; NIAZI, S. K.; BATATI, F. S. Synthetic polyelectrolytes based on polyacrylamide: non-ionic, anionic and cationic polyacrylamides and their applications in water and wastewater treatment: literature review. **Chemical Science International Journal**, v. 25, n. 4, p. 1-8, 2019. DOI: 10.9734/csji/2018/46483. Disponível em: https://doi.org/10.9734/csji/2018/46483. Acesso em: 31 ago. 2026.

SILVA, R. B. *et al.* Comparação entre o desempenho do extrato de tanino de acácia negra e o da quitosana como auxiliar de clarificação de caldo de cana. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 11, p. 24373-24380, 2019. DOI: 10.34117/bjdv5n11-124. Disponível em: https://doi.org/10.34117/bjdv5n11-124. Acesso em: 31 ago. 2026.

STUPIELLO, J. P. *et al.* Qualidade de matéria-prima para o processamento industrial. In: STUPIELLO, J. P.; MUTTON, M. J. R. (org.). **Cana-de-açúcar: tecnologia de produção**. 1. ed. Piracicaba: STAB, 2025. v. 1, p. 767-975.

SOUZA, J. de. **Estudo da eficiência de alguns polieletrólitos utilizados na clarificação do caldo de cana**. 1988. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11141/tde-20191218-141003/. Acesso em: 31 ago. 2026.

SOUZA DIAS, M. O. de *et al.* Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil. **Environmental Development**, v. 15, p. 35-51, 2015. DOI: 10.1016/j.envdev.2015.03.004. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.03.004. Acesso em: 31 ago. 2026.

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

SUYENAGA, E. S. *et al.* Acácia-negra: potenciais usos de reaproveitamento. **Revista Conhecimento Online**, v. 1, n. 7, p. 2-7, 2015. DOI: 10.25112/rco.v1i0.82. Disponível em: https://doi.org/10.25112/rco.v1i0.82. Acesso em: 31 ago. 2026.

SWAMINATHAN, S. *et al.* Synthesis and assessment of novel cationic graft copolymer as flocculant for sugarcane juice. **Polymer Bulletin**, v. 81, n. 13, p. 11931-11953, 2024. DOI: 10.1007/s00289-024-05267-0. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00289-024-05267-0. Acesso em: 31 ago. 2026.

TESTA, P. J. V. *et al.* Continuous and impact cutting in mechanized sugarcane harvest: quality, losses, and impurities. **Agriculture**, v. 13, n. 7, 1329, 2023. DOI: 10.3390/agriculture13071329. Disponível em: https://doi.org/10.3390/agriculture13071329. Acesso em: 31 ago. 2026.

THAI, C. C. D.; DOHERTY, W. O. S. Effect of trash on the coagulation and flocculation of sugarcane juice. In: BRUCE, R. (ed.). **Proceedings of the 35th Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists**. Townsville: Australian Society of Sugar Cane Technologists, 2013. p. 1-8. Disponível em: https://eprints.qut.edu.au/70637/. Acesso em: 31 ago. 2026.

THAI, C. C. D.; MOGHADDAM, L.; DOHERTY, W. O. S. Calcium phosphate flocs and the clarification of sugar cane juice from whole of crop harvesting. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 63, n. 5, p. 1573-1581, 2015. DOI: 10.1021/jf502229f. Disponível em: https://doi.org/10.1021/jf502229f. Acesso em: 31 ago. 2026.

THAI, C. C. D.; MOGHADDAM, L.; DOHERTY, W. O. S. The influence of impurities on calcium phosphate floc structure and size in sugar solutions. **Journal of Food Engineering**, v. 181, p. 20-27, 2016. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2016.02.019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.02.019. Acesso em: 31 ago. 2026.

TEIXEIRA, V. *et al.* Moringa seed extract with a potential similar flocculant activity to a synthetic polymer during sugarcane clarification. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 6, p. 5197-5203, 2023. DOI: 10.1007/s13399-021-01694-5. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13399-021-01694-5. Acesso em: 31 ago. 2026.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOENERGIA. Safra 24/25 é a segunda maior da história no Centro-Sul. **UNICA**, São Paulo, 14 abr. 2025. Disponível em: https://unica.com.br/noticias/safra-24-25-e-a-segunda-maior-da-historia-no-cs/. Acesso em: 31 ago. 2026.

VANDENBERGHE, L. P. S. *et al.* Beyond sugar and ethanol: the future of sugarcane biorefineries in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 167, 112721, 2022. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112721. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112721. Acesso em: 31 ago. 2026.

WANG, X. *et al.* Study on optimization of compound flocculant's purification process of sugarcane juice. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 651, 032022, 2021. DOI: 10.1088/1755-1315/651/3/032022. Disponível em: https://doi.org/10.1088/1755-1315/651/3/032022. Acesso em: 31 ago. 2026.