

FILTRAÇÃO E MICROFILTRAÇÃO NA PRODUÇÃO DE AÇÚCAR COMERCIAL SEM TRATAMENTO QUÍMICO

FILTRATION AND MICROFILTRATION IN THE PRODUCTION OF COMMERCIAL SUGAR WITHOUT CHEMICAL TREATMENT

FILTRACIÓN Y MICROFILTRACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE AZÚCAR COMERCIAL SIN TRATAMIENTO QUÍMICO

Lorena Rocha Alves¹

Carlos Eduardo Crestani²

Resumo: A produção industrial de açúcar branco, ou sacarose, inclui, no tratamento do caldo, a adição de insumos químicos como enxofre, cal e polímeros. Para uma produção sustentável, que possibilite a fabricação de açúcar orgânico, ou mesmo que não contenha níveis, ainda que mínimos, de compostos de enxofre, é importante eliminar todos os insumos químicos do processo industrial. Para isso, avaliou-se a utilização de filtração e microfiltração do caldo em substituição aos processos químicos e físico-químicos do processo tradicional. Foram realizadas análises de cor, polarização, microscopia e distribuição de tamanhos de cristais. Segundo a classificação utilizando os critérios do MAPA, o açúcar produzido, que não utilizou nenhum insumo químico em sua fabricação, pode ser classificado como açúcar demerara. Tal resultado é relevante às indústrias do setor, em um cenário em que se busca processos sustentáveis, produtos classificados como orgânicos e açúcares com cada vez menor aceitação da presença de compostos de enxofre.

Palavras-chave: Açúcar orgânico. Clarificação do caldo. Cor ICUMSA. DTC. Polarização.

Abstract: The industrial production of white sugar, or sucrose, includes, in the treatment of the broth, the addition of chemical inputs such as sulfur, lime, and polymers. For sustainable production, which makes it possible to manufacture organic sugar, or even if it does not contain levels, even if minimal, of sulfur compounds, it is important to eliminate all chemical inputs from the industrial process. To this end, the use of filtration and microfiltration of the broth in substitution to the chemical and physical-chemical processes of the traditional process was evaluated. Color, polarization, microscopy, and crystal size distribution analyzes were performed. According to the classification using the MAPA criteria, the sugar produced, which did not use any chemical input in its manufacture, can be classified as demerara sugar. This result is relevant to the industries of the sector, in a scenario in which sustainable processes are sought, products classified as organic and sugars with less and less acceptance of the presence of sulfur compounds.

Keywords: Broth clarification. ICUMSA color. Organic sugar. Polarization. PSD.

¹ Tecnóloga em Biocombustíveis. IFSP Câmpus Matão. E-mail: lorenarochaalves@gmail.com.

² Doutor em Engenharia Química. IFSP Câmpus Matão. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1942-858X>
E-mail: cecrestani@ifsp.edu.br.

Resumen: La producción industrial de azúcar blanco, o sacarosa, incluye, en el tratamiento del caldo, la adición de insumos químicos como azufre, cal y polímeros. Para una producción sostenible, que permita fabricar azúcar orgánico, o incluso si no contiene niveles, aunque sean mínimos, de compuestos de azufre, es importante eliminar todos los insumos químicos del proceso industrial. Para ello, se evaluó el uso de filtración y microfiltración del jugo en sustitución de los procesos químico y físico-químicos del proceso tradicional. Se realizaron análisis de color, polarización, microscopía y distribución del tamaño de los cristales. De acuerdo con la clasificación con criterios MAPA, el azúcar producido, que no utilizó ningún insumo químico en su fabricación, puede clasificarse como azúcar demerara. Este resultado es relevante para las industrias del sector, en un escenario en el que se buscan procesos sostenibles, productos clasificados como orgánicos y azúcares con cada vez menos aceptación de la presencia de compuestos azufrados.

Palabras-clave: Aclaración de caldo. Azúcar orgánica. Color ICUMSA. DTC. Polarización.

Envío 19/05/2020

Revisão 07/05/2021

Aceite 28/05/2021

Introdução

A indústria sucroalcooleira é uma das mais antigas e importantes do setor agroindustrial brasileiro. O ciclo econômico da cana-de açúcar, iniciado no Brasil com os antigos engenhos de açúcar, se consolidou com os investimentos no Programa Nacional do Álcool (Proálcool) na década de 1970 (“PróAlcool - Programa Brasileiro de Álcool | BiodieselBR.com”, 2021). Tais investimentos possibilitaram a implantação de destilarias de etanol, viabilizando, a partir de 1979, o surgimento de motores à explosão especialmente desenvolvidos para funcionar com etanol hidratado. Os veículos “Flex-Fuel”, produzidos a partir de 2003, aumentaram a demanda de etanol, consolidando-o mundialmente como alternativa renovável de combustível (IEA, 2019). A produção de cana-de-açúcar na safra 2018/9 foi de 620,83 milhões de toneladas de cana-de-açúcar que resultaram em 29,04 milhões de toneladas de açúcar e 33,10 bilhões de m³ de etanol (“Conab apresenta levantamento final da safra 2018/19 de cana-de-açúcar [atualizado] | novaCana.com”, 2021).

Os processos industriais de fabricação de açúcar pouco evoluíram ao longo dos anos, havendo muito espaço para melhorias nos processos industriais. No que se refere à produção de orgânicos, um nicho de mercado muito desenvolvido ao longo dos anos, a indústria açucareira pouco evoluiu. A matéria-prima, para que atenda características de um produto orgânico, deve ser produzido sem ser utilizado nenhum tipo de fertilizante químico e a colheita deve ser feita com a cana crua, ou seja, sem ser queimada (LOPES, 2011). O processo industrial tradicional ainda utiliza insumos como o hidróxido de cálcio (popularmente chamado de leite de cal) na sua produção a fim de auxiliar na remoção de íons de sais minerais e substâncias que conferem cor ao produto final (“Produção de açúcar orgânico é pequena no Brasil | Cana Online”, 2021). O caldo de cana é rico em nutrientes como sais minerais, vitaminas do complexo B e vitamina C e rico em sacarose, frutose e amido (CARVALHO et al., 2016); quanto menos aditivos químicos se utiliza no processo, maiores as possibilidades de produção de um produto rico em nutrientes, visto que os processos de clarificação do caldo removem estes insumos. As indústrias fabricam diferentes tipos de açúcares, dentre eles estão o açúcar cristal, mascavo, demerara e refinado, que diferem em sua composição, como mostra, resumidamente, a Tabela 1 e também a Figura 1.

Tabela 1: Composição nutricional de diferentes tipos de açúcares.

Composição Nutricional	Açúcar Mascavo	Açúcar Demerara	Açúcar Cristal	Açúcar Refinado
Valor energético (kcal)	396	n.a.	387	387
Carboidratos (%)	94.5	n.a.	99.6	99.5
Umidade (%)	3.3	0.1	0.1	0.1
Proteínas (%)	0.8	n.a.	0.3	0.3
Resíduo mineral fixo (%)	1.4	0.36	Tr.	Tr.
Potássio (mg)	522	n.a.	3	6
Cálcio (mg)	127	n.a.	8	4
Magnésio (mg)	80	n.a.	1	1
Ferro (mg)	8.3	n.a.	0.2	0.1

Fonte: (MESSA; NESPOLO, 2017)

Figura 1 : Tipos de açúcares produzido nas usinas.



Fonte: (MESSA; NESPOLO, 2017)

Os tipos de açúcar e sua qualidade mínima são classificados pela Instrução Normativa Nº 42, de 13 de Novembro de 2017 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2017), segundo a Tabela 2:

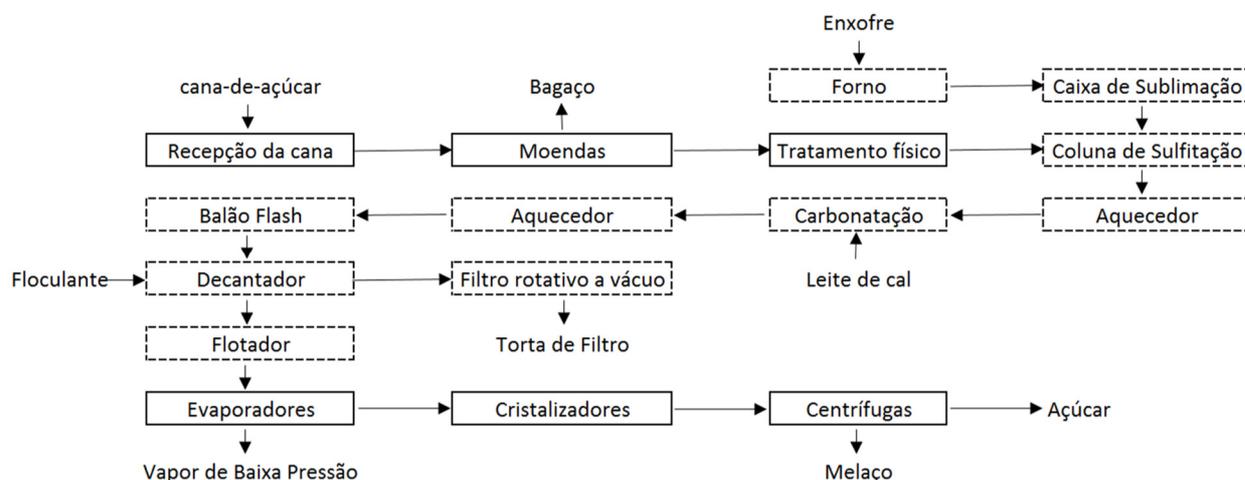
Tabela 2: Parâmetros de Qualidade do açúcar.

Classes	Tipos	Parâmetros					
		Polarização (°Z mín.)	Umidade (% máx.)	Cor ICUMSA (UI máx.)	Cinzas Condutimétricas (% máx.)	Pontos Pretos (n°/100g máx.)	Partículas Magnetizáveis (mg/kg máx)
Branco	Cristal	99,50	0,10	400	0,10	20	15
	Refinado						
	Amorfo ou Refinado	99,00	0,30	100	0,20	5	5
	Refinado Granulado	99,80	0,05	60	0,04	5	5
Bruto	Confeiteiro	99,00	0,30	150	0,20	5	5
	Demerara	96,00	1,20	5000	0,50	N/A	N/A
	VHP	99,00	0,25	2500	0,25	N/A	N/A
	VVHP	99,49	0,15	1000	0,15	N/A	N/A

Fonte: (MAPA, 2017)

Além disso, como citado anteriormente, dependendo da matéria-prima utilizada para produção do açúcar, qualquer um deles pode ser classificado como orgânico. A produção de açúcar branco requer, industrialmente, a utilização de produtos químicos para clarificação do caldo de cana antes da produção de açúcar. A Figura 2 apresenta o processo tradicional de fabricação de açúcar cristal descrito por Van der Poel e colaboradores (VAN DER POEL; SCHIWECK; SCHWARTZ, 1998):

Figura 2: Esquema de uma fábrica de açúcar cristal.



Fonte: Acervo do projeto.

As linhas pontilhadas no processo apresentado na Figura 2 correspondem às etapas de purificação química ou físico-química do caldo. Por esta figura, é possível verificar a importância que os processos de purificação possuem na indústria atualmente e, mais do que isso, é possível verificar a existência de produtos químicos e de resíduos produzidos provenientes dos processos de purificação do caldo. Neste cenário, torna-se importante o estudo da minimização do impacto das etapas de purificação no processo produtivo sem, no entanto, interferir na qualidade do produto formado. O açúcar mascavo não passa por tais processos, mas o resultado é um açúcar impuro, escuro e com alto teor de umidade. O açúcar demerara, em geral, não possui adição de enxofre, mas possui adição de hidróxido de cálcio e o açúcar refinado possui todos os tratamentos e ainda um processo adicional de refino (LOPES, 2011).

A inclusão de impurezas em um cristal que cresce a partir de uma solução impura (que não passa pelos processos em pontilhado na Figura 2) depende das condições como esta cristalização ocorre. No processo de cristalização são determinadas as características do produto final sendo, esta operação, determinante para a qualidade do produto final, como cor, pureza, forma, tamanho, etc. (BRAATZ et al., 2002). Fatores como a temperatura da solução, sua supersaturação, o tamanho do cristal, a hidrodinâmica do processo, o tipo de impureza em solução, sua viscosidade entre diversos outros fatores influenciam a ocorrência de cor e impurezas nos cristais (MARTINS et al., 2009; SGUALDINO et al., 1996). Processos físicos como filtração, microfiltração e nanofiltração do caldo podem ser opções para substituir as etapas químicas dos processos de purificação (BUBNIK; KADLEC; HINKOVA, 2003); a nanofiltração pode ser utilizada, inclusive, para concentrar o caldo. Açúcar branco de beterraba foi produzido utilizando cristalização por resfriamento, tendo obtido melhores resultados para os caldos que passaram por microfiltração (BUBNIK; KADLEC; HINKOVA, 2003). Membranas de micro e ultrafiltração foram utilizadas (NOGUEIRA; VENTURINI FILHO, 1996) para clarificação do caldo de cana, avaliando a remoção de cor e turbidez do caldo, mas não tendo produzido açúcar.

Neste contexto, o presente trabalho visou estudar a influência que o tratamento físico realizado no caldo pode ter na qualidade do produto final, em um processo de produção que não utilize insumos químicos, produzindo um açúcar de qualidade, com caracterização de Distribuição de Tamanho dos Cristais (DTC), cor, forma e polarização em processo de

cristalização bem controlada.

Materiais e métodos

Materiais: Água MiliQ produzida no laboratório do IFSP – Matão; açúcar cristal comercial (União); caldo de cana industrial bruto; evaporador rotativo a vácuo (condensador diagonal) BIOTHEC BT 351 com controlador de temperatura ($\pm 0,1^{\circ}\text{C}$) e velocidade; balança analítica Marte digital com precisão de 0,1 mg; centrífuga de cesto com filtro de Nylon, refratômetro portátil com precisão de 0,0001 unidades de índice de refração e agitador de peneiras Pavitest e conjunto de peneiras marca BERTEL com abertura de 53 μm a 2 mm; polarímetro automático RUDOLPH RESEARCH ANALYTICAL; Microscópio óptico binocular marca BIOVAL modelo LB; espectrofotômetro UV visível, evolution/201 TH-SCIEN, sistema de filtração a vácuo com kitassato, bomba de vácuo, filtro de papel comum com porosidade de 14 μm e microfiltração com funil de BUCHENER com placa porosa número 4 com porosidade máxima 10 μm .

Procedimento: A metodologia experimental é dividida em duas etapas. Primeiramente, foram realizados ensaios de cristalização por resfriamento de soluções aquosas puras de açúcar, com o objetivo de determinar as melhores condições experimentais de cristalização. A partir desta determinação foi realizada a segunda etapa que consistiu da fabricação de açúcar com soluções com diferentes tratamentos.

Ensaio de cristalização a partir de soluções puras

Os experimentos de cristalização a partir de substâncias puras foram realizados com o objetivo de se obter as melhores condições experimentais de cristalização para o desenvolvimento do trabalho. Os ensaios foram realizados em um evaporador rotativo, pois o mesmo é útil tanto para os ensaios de evaporação quanto para efetuar o resfriamento da solução, eliminando possíveis problemas ao transferir amostras evaporadas (e bastante viscosas) do evaporador para o cristizador em etapas subsequentes do trabalho.

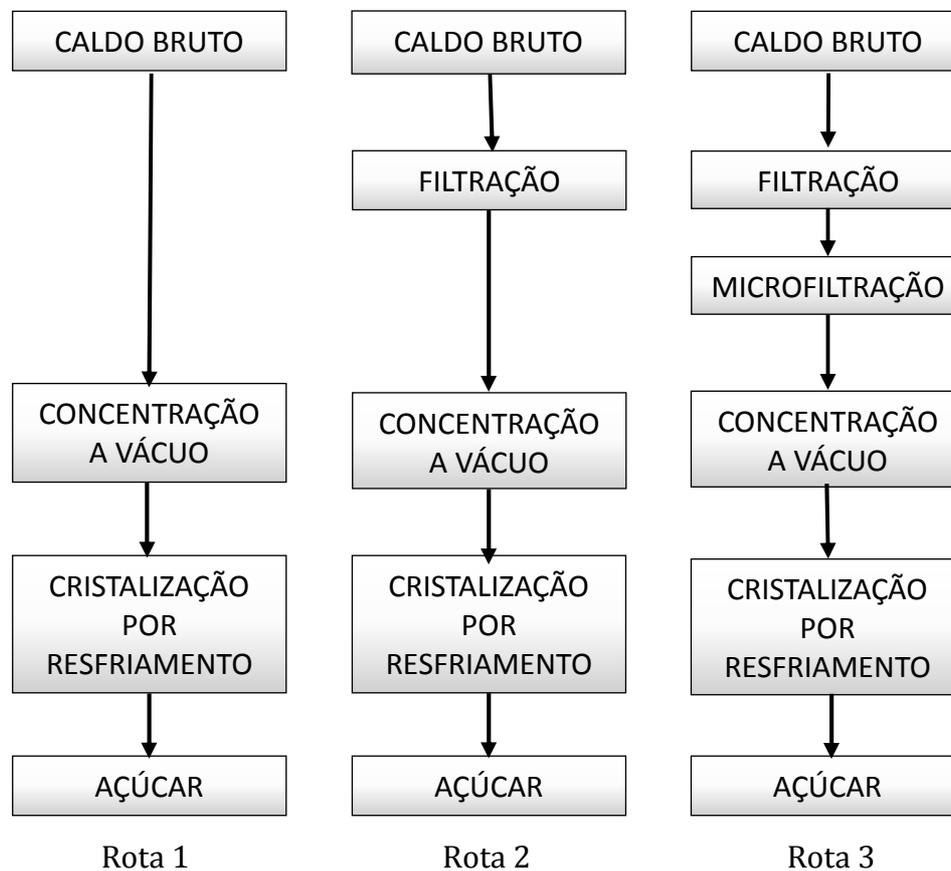
Foram preparadas soluções aquosas de açúcar comercial, com fração mássica de 0,7636 (ou 76,36°Brix), solubilidade da sacarose pura em água a 70°C (CRESTANI, 2018) e massa inicial sempre de 200 g. A solução era mantida a 90°C até dissolver todos os cristais e, então a temperatura era reduzida até 70°C e mantida por 20 minutos. A partir de então, a solução era

resfriada a taxa constante de 1°C a cada 5 minutos até a temperatura final de 35°C, temperatura mantida até o final do ensaio. Quando a solução atingia 61°C (razão de supersaturação de 1,15) eram adicionados 0,39 g de sementes (cristais de sacarose de tamanho médio 90 µm) para a formação de cristais. Após o fim do ensaio, a solução era centrifugada e os cristais de açúcar dispostos em uma bandeja de alumínio para a secagem na estufa com temperatura de 40°C por 24 h. Os cristais eram, então, peneirados para a determinação da Distribuição de Tamanhos dos Cristais (DTC) em peneiras de 75 µm a 2 mm, por 10 minutos em agitador de peneiras. Cada uma das peneiras ao final da análise era pesada e as massas em cada faixa de tamanho usadas para determinação da DTC. Nesta primeira etapa, foram realizados 6 experimentos a fim de se determinar a produtividade em cada um deles. No primeiro, a solução foi centrifugada quando se atingiu 35°C, nos seguintes a suspensão foi mantida sob agitação a esta temperatura, por 1, 2, 3, 4 e 5 horas após atingir os 35°C (chamados de E1 – E6). A produtividade em cada ensaio foi determinada como uma relação percentual entre a massa de açúcar produzido e máxima massa de açúcar possível de acordo com a solubilidade a 35°C, de 69,20°BRIX (CRESTANI et al., 2018).

Produção de açúcar a partir de caldo impuro

Com o objetivo de se avaliar a influência do tratamento físico no produto final, açúcar foi produzido de acordo com 3 rotas distintas, apresentadas na Figura 3:

Figura 3: Rotas de produção do açúcar.



Fonte: Acervo do projeto.

Tratamento físico: o tratamento físico do caldo de cana bruto industrial consistiu em passar o caldo de cana bruto pelo sistema de filtração comum em uma das rotas de produção (rota 2) e sequencialmente pela filtração e microfiltração em outra rota de produção (rota 3).

Evaporação: a evaporação foi realizada utilizando o evaporador rotativo, com medição da concentração ($^{\circ}$ Brix) inicial do caldo com o refratômetro. O final do ensaio era determinado através da massa de água evaporada, calculada a partir dos valores de concentração inicial e concentração final desejada ($76,36^{\circ}$ Brix). Este ensaio foi realizado na Rota 1 com caldo bruto, na Rota 2 com caldo filtrado e na Rota 3 com caldo filtrado e microfiltrado (vida Figura 3).

Cristalização: os ensaios de cristalização por resfriamento foram realizados segundo as condições de processo (temperatura inicial e de adição de sementes, velocidade de resfriamento e de agitação, temperatura final) e os procedimentos experimentais dos ensaios de cristalização por resfriamento apresentados para as soluções puras. Nesta etapa, foram utilizados três tipos de soluções, caldo de cana bruto e concentrado, caldo de cana filtrado em filtração a vácuo comum e concentrado e, finalmente, caldo de cana filtrado em filtração comum seguida de microfiltração com funil de BUCHENER com placa porosa número 4 com porosidade de 10 µm e concentrado. Após o fim do experimento, a suspensão era centrifugada, os cristais dispostos em uma bandeja e dispostos em uma estufa com temperatura de 40°C por 24h, conforme descrito anteriormente.

Análise do açúcar produzido: cada uma das amostras de açúcar produzidas foi analisada quanto à sua DTC (Distribuição de Tamanhos de Cristais), por peneiramento em agitador de peneiras por 10 minutos; ao seu aspecto e forma por Microscopia Óptica; pureza utilizando um sacarímetro, redissolvendo o açúcar produzido em água MiliQ e sua cor utilizando procedimento padrão da ICUMSA descrito no procedimento CTC-LA-MT1-007 do Centro de Tecnologia Canavieira com utilização de espectrofotômetro.

Resultados e discussão

A seguir são apresentados os resultados para os ensaios de cristalização a partir de soluções aquosas puras de sacarose e os ensaios de produção de açúcar a partir de caldo de cana bruto.

Ensaio de cristalização a partir de soluções puras

Os ensaios de cristalização com soluções puras foram realizados com diferentes tempos de residência da suspensão após o fim do resfriamento, a fim de se avaliar o procedimento e aparato experimental bem como a produtividade em cada um dos ensaios. A Tabela 3 apresenta os valores de produtividade em função do tempo em agitação com temperatura constante.

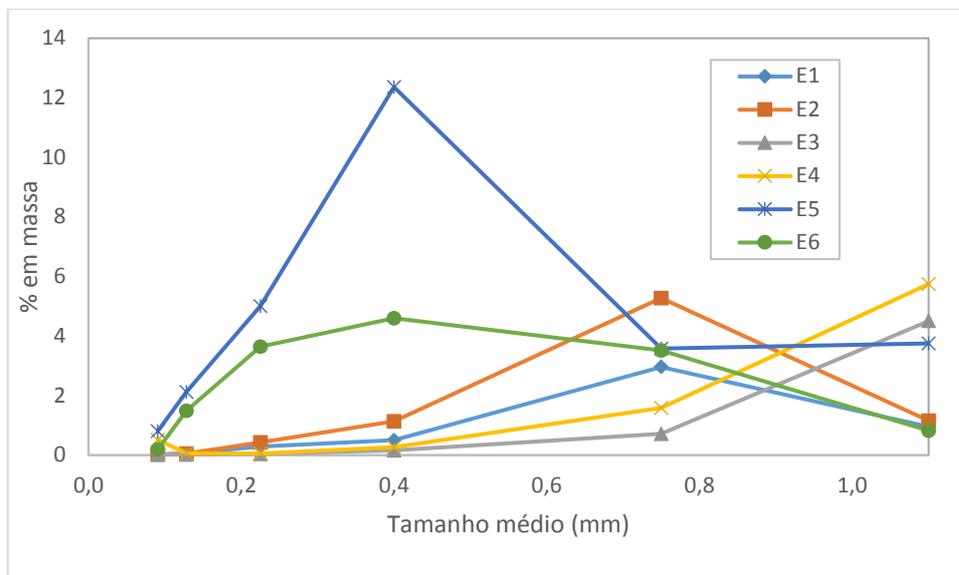
Tabela 3- Produtividade em função do tempo em agitação com temperatura de 35°C.

Experimento	Tempo de agitação (h)	Massa de açúcar (g)	Produtividade (%)
E1	0	8,76	18,02
E2	1	20,51	42,18
E3	2	26,44	54,37
E4	3	43,14	88,70
E5	4	44,92	92,38
E6	5	46,99	96,63

Fonte: Acervo do projeto.

Os valores de produtividade da Tabela 3 foram calculados como a relação entre a massa de cristais produzidos e a máxima massa possível baseada na solubilidade da sacarose em água a 35°C. Observa-se que quanto maior o tempo de residência da solução, mais a concentração da solução se aproxima da solubilidade (produtividade mais próxima de 100%). O experimento E4, por possuir uma produtividade maior que 90% foi escolhido para os ensaios de cristalização com soluções impuras. A Figura 4 apresenta os dados de Distribuição de Tamanhos de Cristais (DTC) do açúcar produzido em cada experimento.

Figura 4- DTC do açúcar produzido.



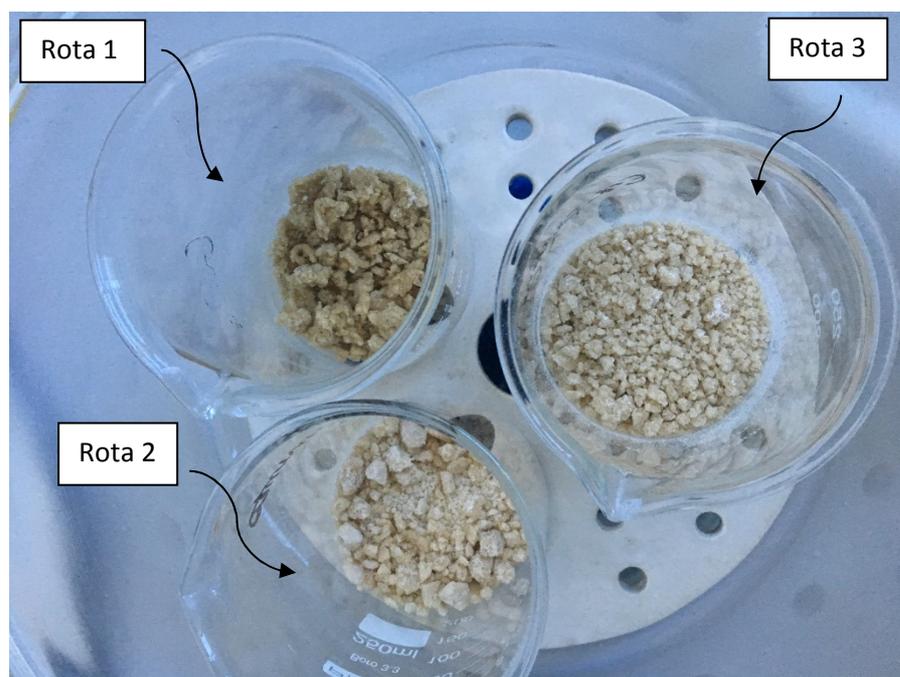
Fonte: Acervo do projeto.

As distribuições apresentadas na Figura 4, mostram picos em tamanhos próximos de 1 mm, o que pode ser sinal de aglomeração de cristais (NÝVLT; HOSTOMSKÝ; GIULIETTI, 2001). Com a DTC é possível calcular o tamanho médio dos cristais obtidos, que, para os experimentos E1, E2, E3, E4, E5 e E6 foram, respectivamente, 0,743, 0,718, 1,022, 0,935, 0,479 e 0,449mm, não mostrando uma relação entre o tamanho médio do cristal produzido, medido a partir da DTC dele seco em estufa estática, com o tempo de experimento. Além disso, a partir do ensaio 5, percebeu-se uma melhora nos procedimentos de centrifugação e secagem, gerando menos aglomeração nestas etapas. Com estes resultados, o ensaio 5, com produtividade acima de 90%, foi escolhido como a condição a ser utilizada nos ensaios de cristalização do presente trabalho.

Produção de açúcar a partir de caldo impuro

Açúcar foi produzido por três rotas distintas, com nenhum ou diferentes tratamentos físicos de um mesmo caldo de cana bruto obtido de uma usina sucroenergética. Nenhum aditivo químico foi utilizado na fabricação dos açúcares. A Figura 5 apresenta os cristais produzidos por cada uma das rotas:

Figura 5: Açúcares produzidos com diferentes tratamentos físicos



Fonte: Acervo do projeto.

A Tabela 4 apresenta a produtividade de cada um dos ensaios, calculada como a razão entre a massa de cristais produzida e a massa de cristais possível a partir dos dados de solubilidade para soluções aquosas impuras de sacarose, dos ensaios realizados a partir de cada uma das rotas da Figura 3:

Tabela 4- Produtividade de cada rota de produção.

Rotas	Produtividade (%)
Rota 1	64,16
Rota 2	90,19
Rota 3	78,52

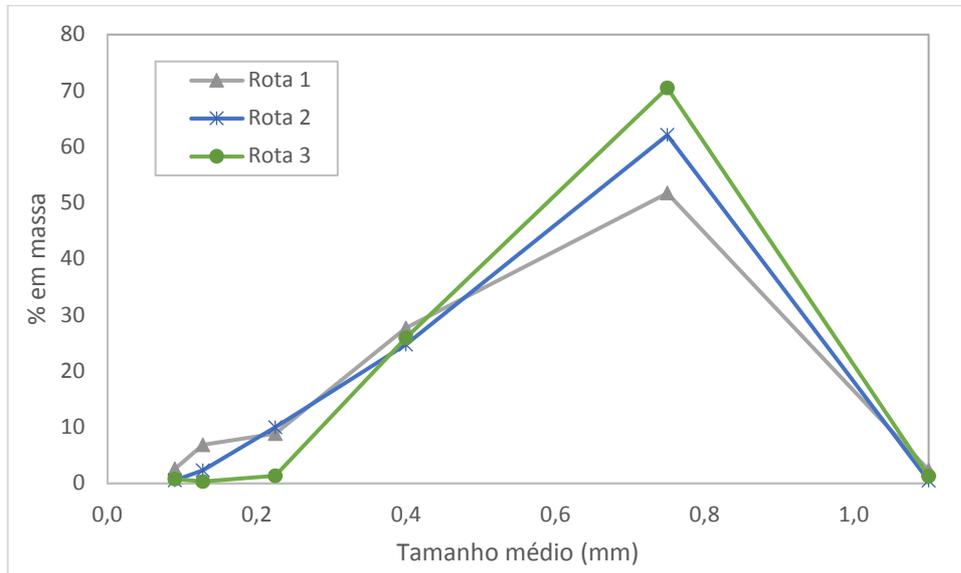
Fonte: Acervo do projeto.

É importante, neste caso, utilizar os valores de solubilidade da sacarose em soluções impuras, que é maior do que a solubilidade de sacarose em água pura. A 35°C, por exemplo, a solubilidade de sacarose em água em soluções puras é de 69,20°Brix e em soluções impuras de 73,26°Brix (CRESTANI et al., 2018). O açúcar produzido pela rota 2, apenas com filtração comum, resultou em um melhor rendimento, maior que 90%, como no ensaio com a solução pura.

Análises do açúcar produzido

A Figura 6 apresenta a DTC dos cristais produzidos em cada rota:

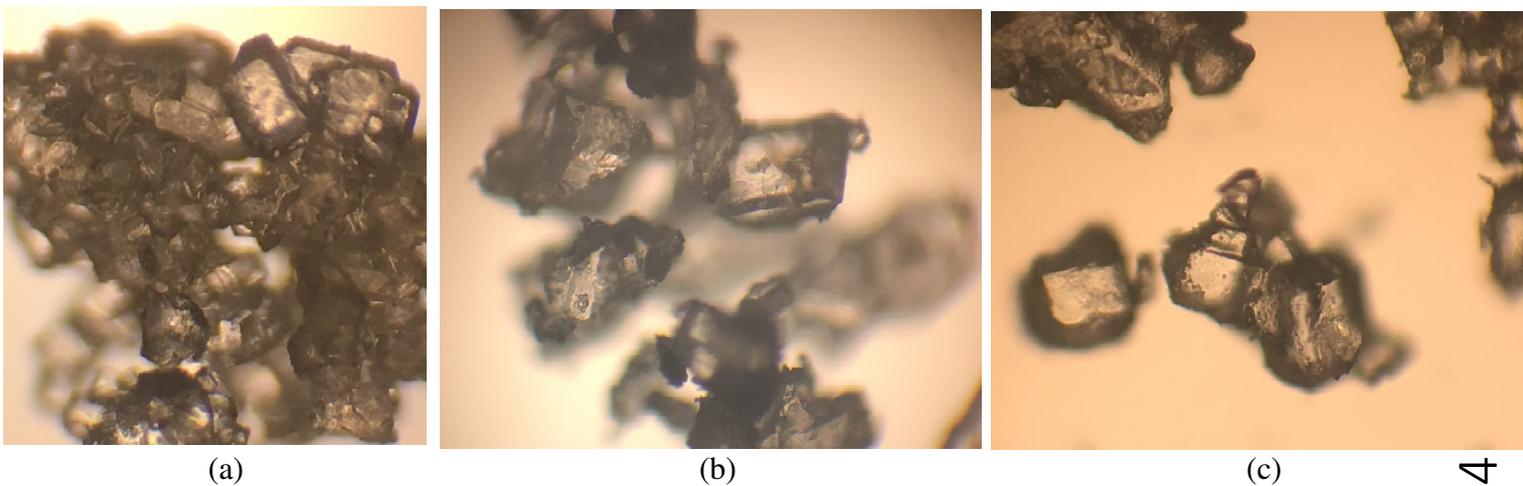
Figura 6: DTC dos cristais produzidos em cada rota.



Fonte: Acervo do projeto.

O tamanho médio dos cristais produzidos nas Rotas 1, 2 e 3 foi de 0,556, 0,595 e 0,650, respectivamente, mostrando um ligeiro aumento de tamanho, quanto mais purificada a solução. Além disso, a Figura 7 mostra, através da lente 10x no microscópio, imagens de cristais produzidos pelas rotas 1 (Figura 7a), 2 (Figura 7b) e 3 (Figura 7c):

Figura 7: Cristais de açúcar.



(a)

(b)

(c)

Fonte: Acervo do projeto.

Na Figura 7 é possível observar a forma melhor definida dos cristais de sacarose produzidos pelas rotas 2 e 3, com aparência de um trapézio, como é a forma de um cristal de sacarose (SGUALDINO et al., 1996). No açúcar produzido pela rota 1 percebe-se uma alta taxa de aglomeração. Diversos autores (MANTELATTO, 2005; MANTOVANI et al., 1986) citam as dificuldades em se cristalizar sacarose em soluções sem nenhum tratamento, portanto, o comportamento dos cristais obtidos pela rota 1 corrobora com os tais dados.

Os cristais produzidos pelas três rotas foram analisados para determinação da cor pelo padrão ICUMSA (*International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis Ltd.*), utilizando espectrofotômetro. A partir das medidas de absorvância a 520 nm de comprimento de onda das soluções produzidas pela diluição em água MiliQ de amostras de cristais de cada um dos ensaios, em triplicata, a cor ICUMSA foi calculada e é apresentada na Tabela 5, juntamente com o desvio padrão:

Tabela 5: Cor ICUMSA para as diferentes rotas.

Rotas	Cor ICUMSA (UI)	Desvio padrão (UI)
Rota 1	1614,94	± 7,97
Rota 2	824,55	± 40,91
Rota 3	796,42	± 1,74

Fonte: Acervo do projeto.

Os resultados apresentados na Tabela 5 mostram uma redução de cor nos açúcares produzidos a partir de soluções que passaram por tratamento físico em comparação ao açúcar produzido da solução sem tratamento. Segundo a INSTRUÇÃO NORMATIVA N° 42, DE 13 DE NOVEMBRO DE 2017 Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2017), com a classificação vigente a partir de 1° de julho de 2019, o açúcar produzido pela rota 1 se classificaria, pelo padrão de cor, como açúcar bruto VHP, *Very High Purity* (máximo de 2500 UI) e os obtidos pelas duas outras rotas seriam, pelo mesmo critério, classificados como açúcar bruto VVHP, *VeryVery High Purity* (máximo 1000 UI). Como comparação, para um açúcar branco o valor de cor máximo deve ser de 400 UI. Portanto, nossos resultados demonstram que nenhum dos açúcares produzidos podem ser enquadrados como açúcar branco, mas os açúcares das Rotas 2 e 3 podem ser enquadrados, por este critério, em açúcar bruto VVHP (*Very Very High Purity*).

Seguindo a metodologia de análise dos cristais produzidos, foram realizadas análises no

polarímetro, a fim de se determinar o grau de polarização, um dos aspectos de classificação de açúcares. Novamente, amostras, em triplicata, dos açúcares produzidos foram dissolvidas em água MiliQ e foi realizada de polarização de cada solução. A Tabela 6 apresenta os resultados desta análise juntamente com o desvio padrão:

Tabela 6: Polarização para as diferentes rotas.

Rotas	Polarização (°Z)	Desvio padrão (°Z)
Rota 1	93,31	± 0,85
Rota 2	97,10	± 2,24
Rota 3	96,50	± 0,07

Fonte: Acervo do projeto.

Os resultados apresentados na Tabela 6 mostram, novamente, melhores resultados para as amostras de açúcar produzidos com tratamento físico. Novamente segundo a instrução do MAPA (MAPA, 2017), os açúcares produzidos pelas rotas 2 e 3 estariam dentro da classificação de açúcar bruto tipo demerara (mínimo 96°Z) e o açúcar produzido com caldo sem tratamento, rota 1, não possui polarização adequada, pois está abaixo do valor preconizado pela legislação.

A vantagem em se produzir açúcar demerara com o processo apresentado no presente trabalho é o fato de não utilizar produtos químicos, nem mesmo hidróxido de cálcio (CaOH_2) comumente usado no processo produtivo, possibilitando uma produção limpa do mesmo. Em comparação aos açúcares produzidos com caldo que passou por filtração e por filtração mais microfiltração, em geral os resultados foram próximos, com uma aparente melhor qualidade de produto e de processo do açúcar produzido com caldo apenas filtrado. Os resultados mostram, portanto, que não se justifica incluir um processo de microfiltração e, ainda, que com uma cristalização com resfriamento lento ($0,2^\circ\text{C}/\text{min}$) é possível a produção de um açúcar que atenda os padrões do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento com um processo mais sustentável e também mais barato. Os próximos desafios são produzir um açúcar branco sem utilizar processos químicos, com possibilidades de se pensar em outros processos de separação como processos de adsorção para purificar o caldo sem a inclusão de produtos químicos.

Conclusão

O objetivo presente trabalho foi o desenvolvimento de uma metodologia de fabricação de açúcar de qualidade sem a utilização de produtos e tratamentos químicos. Foi produzido um açúcar com a classificação de um açúcar demerara, pelos parâmetros analisados a partir de soluções filtradas e microfiltradas, apenas. Os valores da polarização 97,10 e 96,50 e da cor 822,53 e 798,43 estão dentro dos limites para tal classificação pelo MAPA, os últimos dentro dos limites, também, para açúcares VVHP e VHP. Ou seja, com a remoção da cor efetuada, o aumento da polarização é possível através de um melhor controle de parâmetros da cristalização, como agitação (velocidade e tipo de impelidor), velocidade de resfriamento e sementeira.

A produção de um açúcar de qualidade sem a utilização de processos químicos de tratamento do caldo elimina etapas do processo produtivo e insumos, tornando-o mais barato e sustentável. Com este tipo de processo industrial faz sentido utilizar matérias-primas orgânicas para produzir um açúcar orgânico no que diz respeito tanto à matéria-prima quanto a um processo livre de produtos químicos, como enxofre usado em açúcares brancos e leite de cal em açúcares como o demerara. Portanto, os resultados deste trabalho sugerem a aplicabilidade deste processo industrialmente e são uma porta para mais melhorias no sentido de se produzir açúcares de qualidade de maneira mais sustentável e barata.

Referências bibliográficas

BRAATZ, R. D. et al. SIMULATION AND NEW SENSOR TECHNOLOGIES FOR INDUSTRIAL CRYSTALLIZATION: A REVIEW. **International Journal of Modern Physics B**, v. 16, n. 01n02, p. 346–353, 20 jan. 2002.

BUBNIK, Z.; KADLEC, P.; HINKOVA, A. Recent Progress at Crystallization of Sugar. **Engineering in Life Sciences**, v. 3, n. 3, p. 141–145, 5 mar. 2003.

CARVALHO, C. . et al. Análise microbiológica do caldo de cana comercializado por ambulantes na cidade de Natal-RN. **Catussaba - Revista Científica da Escola da Saúde da Universidade Portiguar**, v. 5, n. 1, p. 95–103, 2016.

Conab apresenta levantamento final da safra 2018/19 de cana-de-açúcar [atualizado] | novaCana.com. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/cana/safra/conab-levantamento-final-safra-2018-19-cana-de-acucar-230419>>. Acesso em: 20 abr. 2021.

CRESTANI, C. E. et al. Experimental data and estimation of sucrose solubility in impure solutions. **Journal of Food Engineering**, v. 218, p. 14–23, fev. 2018.

IEA. **Bioenergy - Fuels {&} Technologies - IEAFuels and technologies**, 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/fuels-and-technologies/bioenergy>>. Acesso em: 20 abr. 2021

LOPES, C. H. **Tecnologia de Produção de Açúcar de Cana**. São Carlos: EdUFSCar, 2011.

MANTELATTO, P. E. **Estudo da cinética da cristalização de soluções impuras de sacarose de cana-de-açúcar por resfriamento**. São Carlos: Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, 24 out. 2005.

MANTOVANI, G. et al. Investigation on industrial factors decreasing sugar crystal colour. **Zuckerindustrie**, v. 111, n. 7, p. 643–648, 1986.

MAPA. **Instrução normativa nº 42, de 13 de novembro de 2017**, 2017.

MARTINS, P. M. et al. Unsteady-state transfer of impurities during crystal growth of sucrose in sugarcane solutions. **Journal of Crystal Growth**, v. 311, n. 15, p. 3841–3848, 15 jul. 2009.

MESSA, S.; NESPOLO, C. Produção e composição de diferentes tipos de açúcar. v. 202, n. 9, p. 1, 2017.

NOGUEIRA, A. M. P.; VENTURINI FILHO, W. G. Clarificação de Caldo de Cana por Micro e Ultrafiltração: Comprovação de Viabilidade Técnica em Experimentos Preliminares. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 32, n. 4, p. 225–245, 1996.

NÝVLT, Y. J.; HOSTOMSKÝ, J.; GIULIETTI, M. **Cristalização**. São Carlos - SP: EdUFSCar, 2001.

PróAlcool - Programa Brasileiro de Álcool | BiodieselBR.com. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/proalcool/pro-alcool/programa-etanol>>. Acesso em: 20 abr. 2021.

Produção de açúcar orgânico é pequena no Brasil | Cana Online. Disponível em: <<http://www.canaonline.com.br/conteudo/producao-de-acucar-organico-e-pequena-no-brasil.html>>. Acesso em: 20 abr. 2021.

SGUALDINO, G. et al. Implications of crystal growth theories for mass crystallization: Application to crystallization of sucrose. **Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials**, v. 32, n. 4, p. 225–245, 1 jan. 1996.

VAN DER POEL, P. H.; SCHIWECK, H.; SCHWARTZ, T. **Sugar technology: Beet and Cane Sugar Manufacture**. Berlin: Dr. Albert Bartens, 1998.