Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

CONTROLE DO PROCESSO DE COZIMENTO NA PRODUÇÃO DE AÇÚCAR

CONTROL OF THE BOILING PROCESS IN SUGAR PRODUCTION

Milene Pereira de Oliveira[I]
Leonardo Lucas Madaleno[II]

RESUMO

O cozimento é etapa limitante da produção de açúcar. Nesta fase são formados os cristais de sacarose e os erros de condução pode levar a redução da produção e diminuir o esgotamento do mel. O objetivo da presente revisão foi verificar os controles atuais do processo de cozimento em batelada e contínuo. O cozimento pode ser realizado com produção de duas ou três massas e os controles são para determinar a correta nucleação e garantir o crescimento dos cristais, na zona metaestável de supersaturação. Ao término do cozimento, os cristais devem ter tamanho adequado e com menor variação possível e com baixa cor. Se destacam vários métodos para controle desse processo como componentes principais, sensores mais sensíveis, redes neurais, análise de imagem (fractais), uso do instrumento SeedMaster, construção de modelos com mínimo quadrados, EMSO e através da internet. As pesquisas continuam para que a operação se torne cada vez mais automatizada e com menor ocorrência de erros, incrementando assim a produção de açúcar.

Palavras-chave: Inovação. Sacarose. Tecnologia. Massa Cozida.

ABSTRACT

The boil crystallization is the limiting step in sugar production. At this stage, the sucrose crystals are formed, and the driving errors could reduce this production and decrease the molasses depletion. This review aims to verify the current boiling controls in the batch and continuous boil way. Boiling could be made by two or three massecuite production, and the rules are used to set the correct seeding and guarantee the crystals' growth at the metastable zone of supersaturation. At the boiling stage end, the crystals must have the right size, minor variation, and low color. For control, various methods are found as principal components, more sensitive sensors, neural networks, image analysis (fractals), SeedMaster instrument, build of the most miniature square model, EMSO, and by date from internet. The search for control of this operation continues to become increasingly automated and, with minor error occurrences, increasing sugar production.

Keywords: Innovation. Sucrose. Technology. Massecuite

Data de submissão: 22/02/2023
Data de aprovação: 12/05/2023
DOI: 10.52138/citec.v15i1.272

I Tecnóloga em Biocombustíveis formada pela Faculdade de Tecnologia de Jaboticabal Nilo De Stéfani (Fatec-JB) – São Paulo – Brasil. E-mail: mi2pereira2oliveira@gmail.com
II Prod. Dr. em Agronomia. Docente da Faculdade de Tecnologia de Jaboticabal Nilo De Stéfani (Fatec-JB) – São Paulo - Brasil. E-mail: leonardo.madaleno01@fatec.sp.gov.br

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

1 INTRODUÇÃO

As empresas sucroenergéticas aplicam a nova realidade do mercado, que exige menores custos, diferenciação de produtos, confiabilidade e redução dos prazos de entrega, melhoria no controle de qualidade e da flexibilidade para a diversificação produtiva. Isto têm propiciado a implementação de mudanças provenientes da necessidade da inovação tecnológica e organizacional (SANTOS E SILVA; BOMTEMPO; ALVES, 2019).

Segundo Machado (2012), dentro do processo de fabricação do açúcar as duas etapas que reconhecidamente apresentam maiores dificuldades de operação são as de evaporação e cozimento. Quanto à última, a maior importância é quanto à operação dos cozedores, que interferem na qualidade dos cristais e na economia do processo produtivo *(SOUZA DIAS et al.*, 2015).

De acordo com Vecchia (2018), o cozimento consiste na concentração do xarope até a supersaturação da solução; neste ponto é introduzida a semente (cristais microscópicos de sacarose). Os pequenos cristais começam a crescer devido a deposição da sacarose e podem atingir até o tamanho comercial, através de cortes ou execução do cozimento em várias etapas sendo de duas ou três massas (DELGADO; CESAR; SILVA, 2019).

O cozimento pode ser realizado de modo contínuo ou em batelada (ALBUQUERQUE, 2011). O cozedor de batelada é o mais comum dentro das unidades sucroenergéticas e cada unidade tem o modelo de processo que é empregado, de acordo com as necessidades de qualidade do cristal produzido JOHANSEN (2018). No entanto, as unidades industriais têm investido em estudos de implantação de cozedores contínuos ao longo dos anos, por tornar o processo mais automatizado (VANDENBERGHE *et al*., 2022).

A automação do sistema contínuo tem custo elevado, o que dificulta a instalação dos instrumentos de monitoramento que auxiliam na condução do cozimento nas etapas iniciais (PIASSA, 2018). O cozimento contínuo é utilizado em massas mais pobres, como B e C, por não exigirem alta qualidade final dos cristais, que serão reprocessadas. No cozimento de massa B e C há formação do pé-de-cozimento no cozedor batelada, conduzido por um operador e a etapa de crescimento de cristais é realizada no cozedor contínuo. A vantagem desse sistema é que o processo contínuo não necessita de monitoramento constante como o de batelada total para as duas massas. Ainda, o final do crescimento dos cozedores contínuos cristais pode ser complementado pela etapa seguinte de cristalização (FRENZEL, 2020).

Compreendendo a importância da produção de açúcar para o Brasil e visando contribuir com o conhecimento adquirido na operação dos cozedores contínuos e batelada em cenários típicos das usinas brasileiras, o presente trabalho teve como objetivo verificar, por meio da revisão de literatura, os sistemas e controles utilizados pelas empresas para obtenção de açúcar padronizado e de qualidade. Assim, foi identificado quais os pontos de melhoria na qualidade dos cristais e controle do processo de cozimento. Por fim, se identificou os métodos mais práticos, econômicos e, atualmente, utilizados pelas indústrias açucareiras.

2 METODOLOGIA DA PESQUISA

Foi realizada revisão de literatura sobre os controles utilizados no processo de cozimento na produção de açúcar, através de consulta na internet de artigos científicos, livros, teses, dissertações, trabalho de graduação sobre o assunto. Ademais, foi realizada uma entrevista com cinco operadores da fábrica de açúcar de uma usina de açúcar e álcool da região de Jaboticabal, em que foram retiradas informações de dentro do processo em tempo real, enquanto as atividades eram executadas. Após a coleta de informações, foi descrito as

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

principais ferramentas de controle convencionais do cozimento e de inovação desse setor importante da produção de açúcar. As perguntas foram objetivas sobre a tecnologia empregada e como a operação era realizada nesta usina.

3 MERCADO DE AÇÚCAR

O Brasil é o maior produtor de açúcar do mundo, com 23% da produção mundial, sendo que 70% do produto é exportado como açúcar cru (VHP e VVHP) para ser transformado em açúcar refinado (UNICA, 2023). Em 2020, a crise financeira global e a pandemia do COVID-19 causaram aumento substancial na volatilidade do mercado de ações na bolsa para venda de açúcar. Além disso, o novo coronavírus atingiu tanto a oferta quanto a demanda do mercado de açúcar, resultando em mudanças nos estoques de açúcar (KOTYZA *et al.*, 2021). Na Índia, toda a cadeia de valor da indústria açucareira, a saber, cana-de-açúcar, açúcar, melaço, etanol e sua posterior comercialização e exportação, foram afetadas adversamente pelos impactos de excesso de produto (SOLOMON; RAO; SWAPNA, 2020) no período da pandemia. No Brasil, os baixos preços da gasolina afetaram negativamente a dinâmica do mercado brasileiro da indústria sucroenergética, e o consumo de açúcar caiu 6% em relação às expectativas originais devido à desaceleração do produto interno bruto (PIB) geral (KOTYZA *et al.*, 2021).

O atual ambiente mercadológico global caracterizado por crescentes expectativas dos compradores, rápidas mudanças tecnológicas, mudanças nos padrões demográficos e de consumo e aumento da competição têm pressionado as empresas manufatureiras a buscar a redução de custos de fabricação, o incremento da qualidade, da flexibilidade na fabricação, da produtividade no chão de-fábrica, e a implantar uma ampla variedade de ferramentas, técnicas e filosofias gerencias inovadoras (REBELATO; MADALENO; RODRIGUES, 2011).

3.1 Tipos de açúcar produzidos pelas indústrias brasileiras

Dentro desse processo de fabricação, podemos classificar uma usina de açúcar como uma indústria de extração, uma vez que a sacarose é produzida pela planta no campo através da fotossíntese. Na indústria o caldo, que contém a sacarose é extraído, clarificado, concentrado, com o aparecimento dos cristais no cozimento, seguida de separação do mel do açúcar nas centrífugas e operações finais da produção (ALBUQUERQUE, 2011). As usinas brasileiras produzem os tipos:

- Cristal: Açúcar em forma cristalina produzido sem refino. É muito utilizado na indústria alimentícia para confecção de bebidas, biscoitos e confeitos, dentre outros. Também é comercializado direto aos consumidores em supermercados, conveniências e outros. A cor do cristal, aferida pelo método ICUMSA (International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis) é no máximo 400 U.I. (unidades internacionais (OLIVEIRA; ESQUIAVETO; SILVA JÚNIOR, 2007).
- VHP: O açúcar VHP (Very High Polarization) ou VVHP (very very high polarization) é o tipo mais produzido e exportado pelo Brasil para mais de 180 países. É mais claro que o demerara e apresenta cristais levemente amarelados. A cor dos cristais varia de 450 a mais de 1200 U.I., dependendo do comprador (OLIVEIRA; ESQUIAVETO; SILVA, 2007), (CABRAL *et al.*, 2022).
- Açúcar Demerara: Produto de cor escura, que não passou pelo refino. Os cristais contêm melaço e mel residual da própria cana-de-açúcar. Com textura firme, não se dissolve facilmente. Antigamente era o açúcar bruto de exportação brasileiro, que foi

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

substituído pelo VHP e VVHP. Atualmente, o açúcar demerara é produzido pelas usinas de açúcar orgânico, pois a caleagem, utilizada no processo é permitida para esse tipo de classificação de açúcar. A cor varia de 1200 UI até mais de 2000 U.I., pois depende da qualidade da cana-de-açúcar e do processo de tratamento do caldo.

- Açúcar orgânico: Orgânico é um conceito que envolve desde o cultivo da cana-de-açúcar no campo até a obtenção do produto. Práticas que não utilizam inseticidas, herbicidas e adubação convencional, preocupação com o meio ambiente e o social nas cidades que possuem a indústrias dessa modalidade são associadas à produção de cristais. Na usina o processo é adaptado, pois alguns itens utilizados no tratamento do caldo não são permitidos, como a sulfitação (FRANCO PETRÔNIO *et al.*, 2022). Existem três tipos: açúcar orgânico, demerara orgânico e orgânico cristal. A cor é medida pelo método ICUMSA com valores que variam de acordo com a qualidade da matéria-prima utilizada na produção do açúcar, semelhante a cor do produto convencional(BETTANI *et al.*, 2014). A auditoria no campo e na indústria é um requisito que faz com que os impactos no processo sejam avaliados anualmente. E, para garantir a qualidade, o açúcar orgânico apresentam vários selos nacionais e internacionais que atestam a qualidade. É o produto orgânico, dentre todos, mais produzido no Brasil (OLIVEIRA; CASTRO, 2022).
- Açúcar mascavo: Úmido e de cor amarronzada a amarela, não passa pelo processo de tratamento do caldo, cristalização por cozedores e cristalizadores de indústrias e refino. Tem sabor mais forte e os nutrientes do caldo presente (NATALINO *et al.*, 2021). É utilizado para a produção de pães, bolos e biscoitos integrais e granolas. A cor ICUMSA não é mensurada neste açúcar.
- Açúcar refinado: É o mais utilizado no consumo doméstico, de granulometria fina e dissolução rápida, sendo usado na confecção de bolos e confeitos, caldas transparentes e incolores e misturas sólidas de dissolução instantânea. É obtido a partir do processamento do açúcar VHP e VVHP pelas refinarias e apresenta cor de até 50 U.I.(RÓZSA *et al.*, 2018).
- Açúcar de confeiteiro: Tem grânulos bem finos, mais do que o refinado, e cristalinos. É destinado à indústria alimentícia, sendo muito utilizado no preparo de bolos, glacês, coberturas, suspiros etc. Na composição é acrescentado amido que facilita a utilização pelas confeitarias nas receitas em que é aplicado (FERREIRA; HORTA; MAIA, 2018).
- Açúcar líquido e líquido invertido: são tipos de açúcares especiais para as indústrias alimentícias (REBELATO; MADALENO; RODRIGUES, 2011). Após a obtenção do açúcar cristal, o produto é diluído em água e passa por etapas de tratamento da calda e concentração. A diferença dos processos é que no açúcar líquido invertido, há a etapa de quebra da sacarose em glicose e frutose, e o poder adoçante e cor aumenta, sendo o invertido de coloração amarela (GRATÃO; BERTO; SILVEIRA JÚNIOR, 2004). No entanto, a cor pode alterar a qualidade dos alimentos e, por isso, existe o açúcar líquido sem a etapa de hidrólise da sacarose. É muito utilizado nas indústrias de refrigerante, sorvetes e outros (PODADERA, 2007).

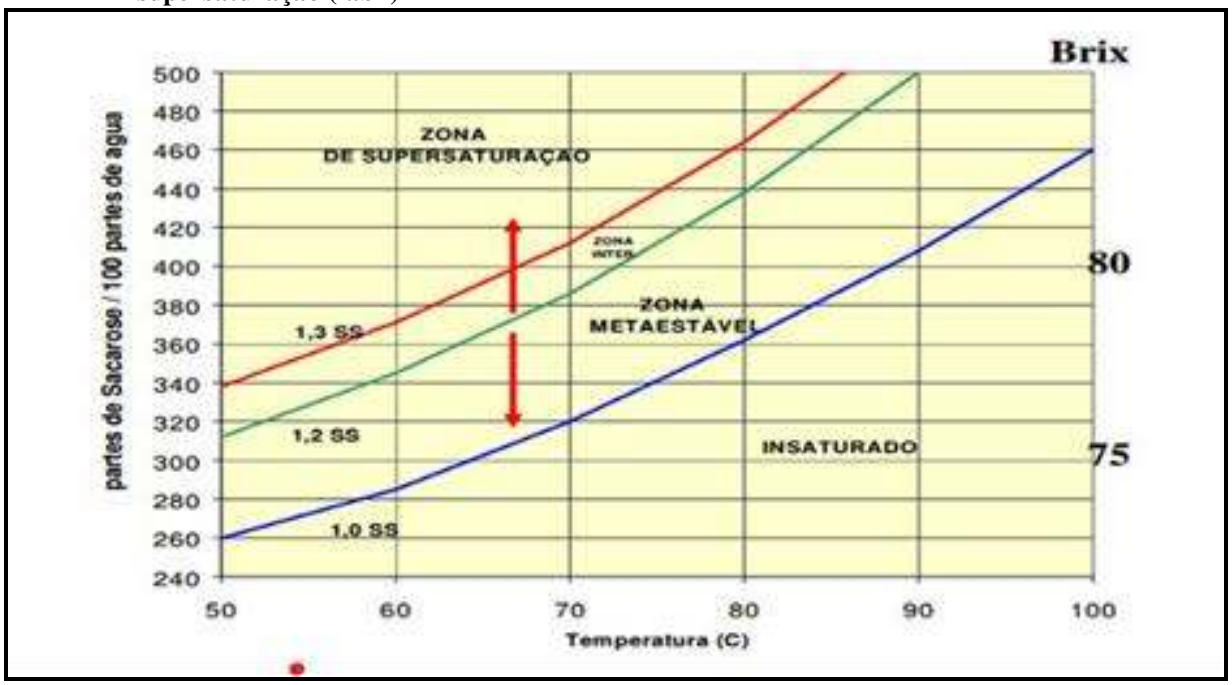
Como o mercado é exigente em qualidade, e apesar de ser uma *commodity* (produto padronizado e com preço variável de acordo com o mercado), novos tipos de açúcar surgem para atender as especificidades requisitadas pela indústria alimentícia ou refinaria que exigem padrões específicos, pois o produto é um dos principais ingredientes das receitas e tem impacto na cor, sabor e textura dos produtos que contém sacarose. Por exemplo, o açúcar cristal apresenta graduações de cor para atender a cada tipo de indústria (OLIVEIRA; ESQUIAVETO; SILVA JÚNIOR, 2007). Os tipos são: tipo 1, tipo 2, tipo 3, tipo 4, tipo 2A, tipo 2B, standard e outros. A nomenclatura depende da usina e da indústria alimentícia que adquire a sacarose para os seus processos.

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

3.2 Zonas de supersaturação - Como é formado o cristal

Uma solução saturada contém a maior quantia de sacarose possível de ser obtida por dissolução. Porém, pode ocorrer de uma solução possuir concentração acima do ponto de saturação sem que ocorra a cristalização (deposição ou nucleação). Essas soluções são denominadas supersaturadas ou sobressaturada, sendo este um estado físico-químico não estável em que o sistema, por cristalização, pode perder sacarose e retornar à situação de solução saturada. Uma solução sobressaturada pode ser obtida por dois processos: por resfriamento e por evaporação (REIN, 2017) (Figura 1).

Figura 1 - Gráfico de supersaturação, com apresentação da zona insaturada, metaestável e zona de supersaturação (lábil)



Fonte: MENEZES (2016)

Segundo Albulquerque, (2011) a região supersaturada pode ser subdividida em três sub-regiões, que são descritas como:

- Zona metaestável: trata-se de um nível de supersaturação, em que os cristais existentes na solução crescem a partir do açúcar em solução, mas não ocorre a formação espontânea de cristais de sacarose. A sacarose se deposita em um núcleo previamente existente e se o cozimento for mantido nesta zona de saturação o cristal de açúcar cresce.
- Zona intermediária: nesta região os cristais existentes crescem e podem surgir novos cristais (nucleação espontânea), caso a solução contenha cristais de sacarose que induzem a formação de novos núcleos. No cozimento prático a zona intermediária é de difícil visualização e no processo é desconsiderada por não se conseguir mensurar o momento que ocorre.
- Zona lábil: nesta zona de supersaturação, os cristais surgem espontaneamente, mesmo que na solução não exista nenhum cristal presente. No cozimento, essa zona é descrita como a zona de formação de falso grão ou pó-de-açúcar.

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

A supersaturação (SS) de uma solução de sacarose pode ser definida como sendo a relação entre a concentração da solução numa dada temperatura e a concentração de saturação na mesma temperatura e saturada (LOPES, 2013).

$$SS = \frac{\text{Concentração da solução}}{\text{Concentração da solução saturada}} \quad (1)$$

Exemplo: Em 100g de água a 20ºC, a saturação é atingida com 200g de sacarose. Se aumentar a temperatura para 60ºC, a saturação será atingida com 290g de sacarose. Essa seria a concentração da solução saturada na fórmula.

Quando se mede a concentração da solução (por exemplo com uma amostra qualquer de água pura e sacarose) na temperatura de 60ºC e se a concentração de açúcar encontrada na amostra for de 255g, a saturação medida será de 0,879. Ou seja, a solução está na zona insaturada. Por outro lado, se a concentração medida na amostra, em outro momento e na mesma temperatura, for de 320g de sacarose, a saturação será de 1,10 se estará na zona metaestável.

Esse raciocínio é realizado para solução pura de água e sacarose. Se outro componente químico estiver juntamente com a sacarose, a saturação será alterada. Por exemplo, soluções com sacarose e com elevada quantidade de açúcares redutores (glicose e frutose) o ponto de saturação será menor do que 1, enquanto em outra solução com concentração de cinzas (nutrientes) relevante, a saturação será maior do que 1. Como, nas indústrias se trabalha com caldo de cana, o ponto exato de saturação é difícil de ser medido, porque a quantidade de açucares redutores e cinzas podem variar conforme a cultivar de cana-de-açúcar utilizada, o período de colheita, impurezas, tempo para processamento da matéria-prima e outros fatores.

Os valores de supersaturação, para uma solução de sacarose com somente água, o seja, baixa concentração de açúcares redutores e cinzas. Na prática do cozimento, de acordo com Lopes (2013) podem ser classificados como:

SS < 1	Solução insaturada
SS = 1	Solução saturada
SS > 1	Solução supersaturada ou sobressaturada
1 < SS < 1,20	Zona metaestável
SS > 1,20	Zona lábil

A determinação da supersaturação de uma solução de sacarose é realizada nas indústrias somente de forma indireta (RÓZSA *et al.*, 2018), ou seja, associando uma propriedade física da solução com a concentração. Os principais métodos são (LOPES, 2013):

- Pela determinação do Brix refratométrico;
- Pela medida da elevação do ponto de ebulição (EPE);
- Pela determinação da condutividade elétrica da solução;
- Pela determinação da consistência (viscosidade) da solução;
- Micro-ondas;
- Método do fio;

O método do fio, que consiste na retirada da amostra do cozedor e avaliação pelo operador que coloca a amostra entre os dedos polegar e indicador fechados e abre devagar os

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

dedos, para verificar a consistência da massa cozida. Costuma ser o mais utilizado, juntamente com o refratômetro.

3.3 Etapas do Cozimento

Para o cozimento o xarope, obtido após a evaporação de múltiplo efeito do caldo clarificado, tem uma concentração variável de 55-65º Brix. O xarope é bombeado do último vaso de evaporação para uma caixa metálica, situada próximo dos evaporadores e cozedores para armazenamento (REIN, 2017).

No cozimento, a concentração do xarope e obtenção dos cristais são feitas em 2 fases, sendo a fase inicial: formação dos cristais de sacarose, que é conhecida por nucleação, pé-de-cozimento ou granagem. E, a fase final em que se dá o crescimento dos cristais em de tamanho pela deposição de sacarose nos núcleos inicialmente formados até chegarem ao tamanho desejado (ALBUQUERQUE, 2011).

Os cozimentos podem ser realizados de modo contínuo ou descontínuo, conforme a disponibilidade na indústria de equipamentos e qualidade final desejada dos cristais (FRENZEL, 2020).

3.4 Cozimento em batelada, condução do cozimento e quantidade de massas cozidas a serem processadas

O processo de cozimento batelada ocorre por evaporação do líquido açucarado. Os equipamentos são similares aos evaporadores de múltiplo efeito com calandras, operados a vácuo com alimentação contínua de material rico em sacarose (xarope ou mel) a ser cristalizado. Os cozedores bateladas são geralmente utilizados para preparo de pé-de-cozimento e para massas de primeira ou A.

Na Figura 2 é demonstrado a parte interna e externa, deixando visível onde é realizado o recebimento de mel e xarope no aparelho. Devido à simplicidade do equipamento, estes aparelhos conservam a vantagem de serem robustos e necessitarem, para operação, de baixo nível de automação. Isto explica a ampla utilização, vista que nos primórdios da indústria açucareira, todo o processo de cozimento do açúcar era manual, sendo desenvolvido a partir da amostragem da massa e experiência do operador para a tomada de decisão. Para o processo batelada seriam suficientes as medições de pressão e temperatura para controle da cristalização e experiência do operador (ROQUE, 2021).

Na condução do cozimento ocorre a deposição de sacarose sobre os cristais preexistentes que crescem tornando o meio mais pobre em sacarose. Esse empobrecimento é quantificado pelo abaixamento da pureza (que é definida como sendo a porcentagem de sacarose sobre o Brix da solução). Um xarope com, por exemplo, 85% de pureza, após o crescimento dos cristais terá essa pureza reduzida em 15 pontos percentuais, ficando com 70%, passando a ser denominado mel. Esse mel com pureza reduzida pode ser sucessivamente cristalizado até que sua pureza final apresente valores na faixa de 30 a 35%, que seria o limite das possibilidades técnicas e econômicas do processo. No final do processo se obtém um mel do qual foi retirada toda a sacarose desejável, ou economicamente possível, e o mel resultante passa a ser denominado mel esgotado ou melaço (LOPES, 2013).

No cozimento batelada são encontradas duas fases de condução: a nucleação, popularmente conhecida como formação de pé de cozimento e a alimentação com xarope, mel ou água. Na nucleação, o líquido é admitido no cozedor e tem a supersaturação elevada até a zona metaestável. Neste momento são adicionados os núcleos (sementes). Após a verificação

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

do sucesso da nucleação o processo segue em frente na fase de alimentação (ALBUQUERQUE, 2011). Em seguida, ocorre o momento de crescimento dos cristais. As etapas de um cozimento convencional podem ser divididas em 11 etapas dentro das duas fases, a saber:

Momento 1: Formação do pé-de-cozimento:

1)Funcionamento do multijato para formação do vácuo no equipamento;

2)Admissão de xarope ou mel;

3)Aquecimento por vapor nas calandras e evaporação do líquido interno;

4)Verificação indireta da zona metaestável;

5)Adição de núcleos (semente);

6)Verificação da presença de núcleos e correções necessárias com nova semeadura se necessário; com núcleos obtidos, o pé-de-cozimento está pronto.

Momento 2: Crescimento dos cristais:

7)Alimentação ou Adição de xarope ou mel de modo cuidadoso no cozedor no pé-de-cozimento. O cuidado é para não sair da zona metaestável. Quanto mais tempo permanecer dentro da zona metaestável, mais os cristais terão tamanhos dentro do esperado e uniformes . Porém, essa condução é difícil, pois não há equipamento que mede de forma direta a saída das zonas de supersaturação e muitas vezes admissão de líquido (xarope ou mel) é realizada conforme a experiência do operador. Então, 2 erros comuns podem ser cometidos nessa fase:

Erro 1: Elevada adição pode resultar em saída da zona metaestável para a zona insaturada e provocar o chamado “derretimento dos cristais”;

Erro 2: Adição reduzida pode significar em saída da região metaestável para a zona lábil. Nesta zona de supersaturação ocorre o aparecimento de cristais, os denominados “falsos grãos”, que podem crescer, diminuir o tamanho desejado dos cristais e a homogeneidade ao término do processo.

A fase de alimentação é a mais crítica para a qualidade do cristal, levando de 1h30 até 2h30. O final ocorre quando a massa cozida ultrapassa o volume do aparelho da última luneta. Nesta fase também é importante controlar a temperatura, vácuo (multijato), pois qualquer alteração pode levar a massa cozida para zonas de não interesse de supersaturação. A capacidade de agitação do líquido/sólido tem que ser otimizada para que não ocorram zonas de supersaturação diferentes dentro do mesmo cozedor (REIN, 2017).

8)Amostragem de tempo em tempo para verificação do tamanho dos cristais;

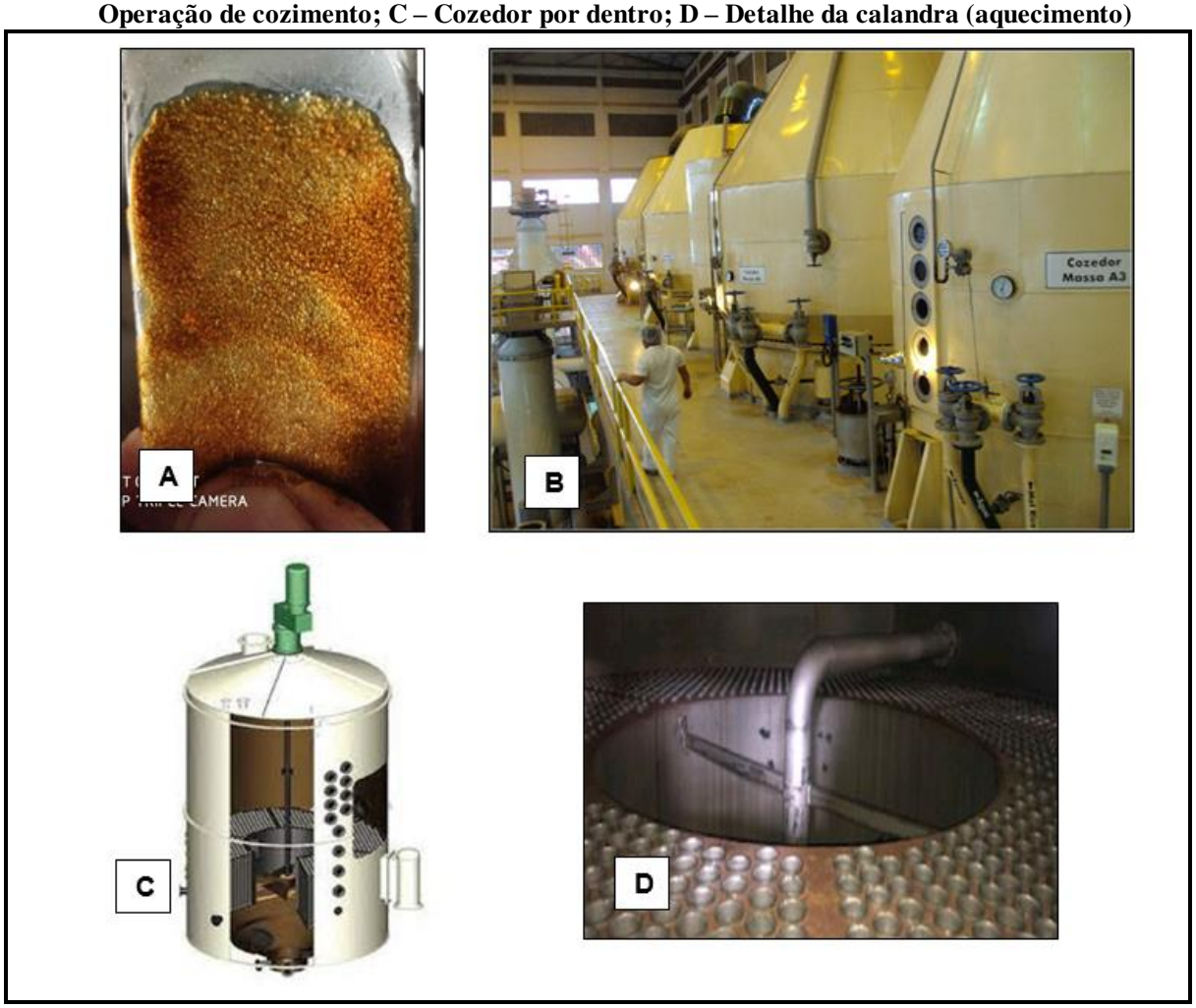
9)Aperto – interrupção da alimentação e espera de até 15 min. para que a sacarose possa ser depositada nos cristais de sacarose e reduzir a perda do açúcar no mel (LOPES, 2013).

10)Descarregamento da massa cozida para os cristalizadores

11)Limpeza do equipamento (interno, com vapor ou água quente) para realizar novo cozimento. O objetivo é reduzir o número de cristais maiores que podem atrapalhar a homogeneidade do próximo cozimento.

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

Figura 2 – Detalhe do cozedor e dos cristais obtidos no processo. A – Lâmina com amostra do cozedor; B – Operação de cozimento; C – Cozedor por dentro; D – Detalhe da calandra (aquecimento)



Fonte: Arquivo próprio A, B e D; e Alpina Orion (2022) – Figura C

O tempo de cozimento de cada massa pode ser controlado através do número de cortes. Assim, ao preencher o volume do cozedor na batelada alimentada, parte do material é alimentada a outro equipamento vazio e se segue o processo de alimentação e evaporação da solução. A este processo de transferência da Massa para aumento do tempo de residência e maior desenvolvimento dos cristais, é denominado “corte”(ALBUQUERQUE, 2011).

Os cozedores do tipo batelada também garantem maior flexibilidade da fábrica, pela possibilidade de serem usados em múltiplos propósitos (granagem, cristalização de Massa A, B ou C) e adicionam a possibilidade de higienização constante dos equipamentos (REIN, 2017).

No entanto, embora a operação em batelada apresente vantagens, também acarreta problemas de produção e qualidade conforme Roque, (2021): necessidade de realização de manobras e tomadas de decisão do operador, requerendo maior empenho operacional, maior variabilidade das características granulométricas entre bateladas, dificuldade em gerenciar os tempos de cristalização dos diversos cozedores, acarretando ociosidade de equipamentos ou descarga simultânea de mais cozedores do que a capacidade de centrifugação permitiria, dificuldade de ganho de escala do equipamento devido às características de transferência de massa e energia.

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

Com apenas um cozimento não é possível esgotar o mel, ou seja, fazer com que maior quantidade de sacarose seja incorporada no núcleo (semente). Portanto, o reprocesso é necessário para que a produção de açúcar seja incrementada. Então, o cozedor, juntamente com o cristalizador e a centrífuga podem ser separadas em fases que são denominadas de Massa de primeira ou A, segunda ou B e terceira ou C. O cozimento de massa D não é economicamente viável por causa do aumento da viscosidade do mel, conforme vai tendo a quantidade de sacarose diminuída nos processos anteriores (FRENZEL, 2020).

O sistema de cozimento de duas massas se inicia com o "pé" de Magma. O Magma possui cristais de 0,3 milímetros, que ao crescerem, diminuem o teor de sacarose do licor mãe. Ao final do cozimento, o açúcar A ou de primeira deve ter um tamanho de 0,8 a 1 milímetro dependendo se é do tipo cristal ou VHP (RIBEIRO, 1999).

Depois de puxado para o cozedor de massa de primeira o Magma deve ser lavado por alguns minutos com água quente para dissolver pequenas pontas de cristais que se quebram nas centrífugas contínuas. Isso deve ser realizado, reduzindo-se a concentração do magma por um período de aproximadamente 5 minutos abaixo da linha de saturação, com acompanhamento visual através da sonda (REIN, 2017).

Encerrado o processo de lavagem, começa-se a alimentação com xarope, concentrando a massa cozida lentamente para evitar a formação espontânea de cristais (zona lábio), até atingir consistência firme. O cozimento deve ser conduzido até a concentração 91 a 93ºBrix, de modo que o mel que envolve os cristais esteja sempre supersaturado para forçar a deposição da sacarose dissolvida nos cristais. Isso garantirá melhor esgotamento do mel A, obtendo-se mel pobre com pureza mais baixa e menor volume. O mel rico deve ser utilizado sempre no final do cozimento da massa A porque os cristais estão completamente formados, o que impedirá uma elevação na cor do açúcar.

A massa cozida de primeira é direcionada aos cristalizadores, que a armazena para serem submetidas às centrifugas automáticas, que tem a função de separar o mel que envolve os cristais de açúcar (FRENZEL, 2020). O mel A obtido na centrifugação, são denominados mel rico e mel pobre, a parte sólida separada, açúcar de primeira. O mel pobre é obtido antes da adição de água e vapor na centrífuga. O mel rico é durante estas adições e contém alta concentração de açúcar passível de ser cristalizado e qualidade suficiente para não alterar a cor do açúcar de primeira (LOPES, 2013). Por essa razão pode retornar para o cozimento junto com o xarope, e o mel pobre deve ser utilizado no cozimento de segunda massa, denominada massa B que, ao final resultará no Magma, que é utilizado como pé de cozimento para a massa A (RIBEIRO ,1999).

O cozimento de massa B consiste em se esgotar a sacarose do mel pobre extraído da massa cozida A, que contém pureza média de 60%. Este cozimento tem início com a concentração do mel pobre até a zona metaestável, em que será introduzido a semente (cristais preparados em laboratório com tamanho médio de 0,1 milímetro) que ao crescerem esgotam a sacarose do licor mãe (mel pobre) (REBELATO; MADALENO; RODRIGUES, 2016).

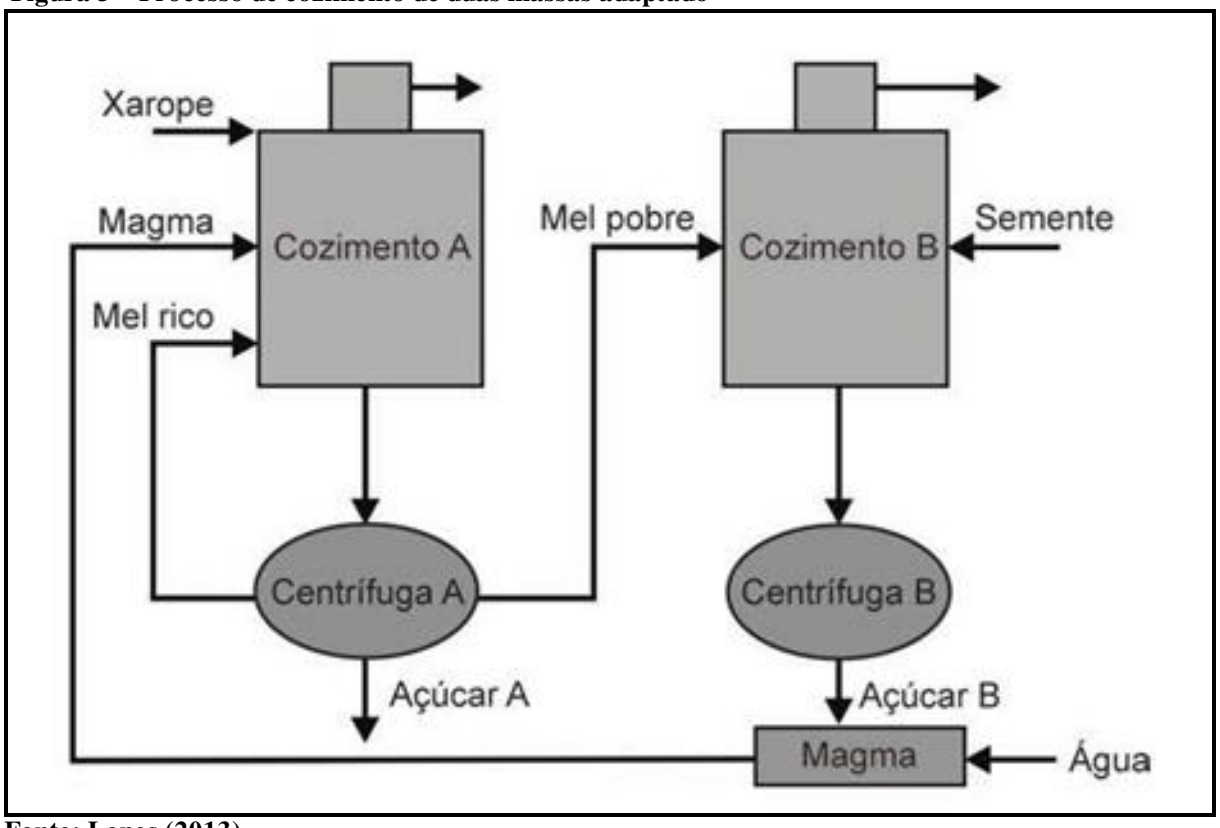
Após a preparação da massa cozida B no cozedor, esta é encaminhada para o cristalizador para terminar o crescimento dos cristais e aumentar o esgotamento do mel. A massa em seguida segue para a centrifugação, que é feito em equipamento contínuo que quebra os cristais produzidos (REIN, 2017). Ao final do cozimento o açúcar de segunda (Magma), separado do mel B deve ter tamanho médio de 0,3 a 0,5mm. O mel B ou mel final deve estar com pureza entre 30 a 40% do original que tinha 60%. O licor mãe obtido da centrifugação da massa B é denominado mel final se não houver mais uma tentativa de cozimento, com a massa cozida C. O mel final ou melaço pode ser armazenado e enviado para produção de etanol e o açúcar de segunda denominado magma retorna ao processo como pé-

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

de-cozimento para a massa A (RIBEIRO,1999). Na Figura 3 é demonstrado o processo de cozimento de duas massas adaptado, que leva a produção de cerca de 100kg/t de cana. A Figura 4, demonstra a produção de açúcar com três massas cozidas, como produção próxima a 120kg/t de cana.

O processo de três massas leva ao aumento de produção de açúcar para cerca de 120kg/t de cana. E consiste em utilizar o mel B ou de segunda para mais uma tentativa de recuperação da sacarose do mel. Porém, como no mel B a viscosidade é maior, a cristalização se torna mais lenta (ALBUQUERQUE, 2011). Então é utilizado um cozedor de massa de terceira, alimentado com mel. Em seguida, se adiciona a semente e se espera crescimento dos cristais até 0,1 a 0,2mm. O término do crescimento dos cristais ocorrerá nos cristalizadores (REIN, 2017). Quanto mais tempo a massa cozida C passar pelos cristalizadores maiores vai ser o esgotamento do mel. Após o cristalizador, a massa cozida é direcionada à centrífuga contínua e é realizado a separação do açúcar, que se quebra no processo, do mel. O açúcar quebrado, misturado com água, xarope ou caldo clarificado é denominado Magma C. O mel poderia ser enviado a um novo cozimento, porém não mais economicamente viável, e, portanto, se torna o mel final, que é levado a produção de etanol, em usina com destilaria anexa (FERNANDES, 2011).

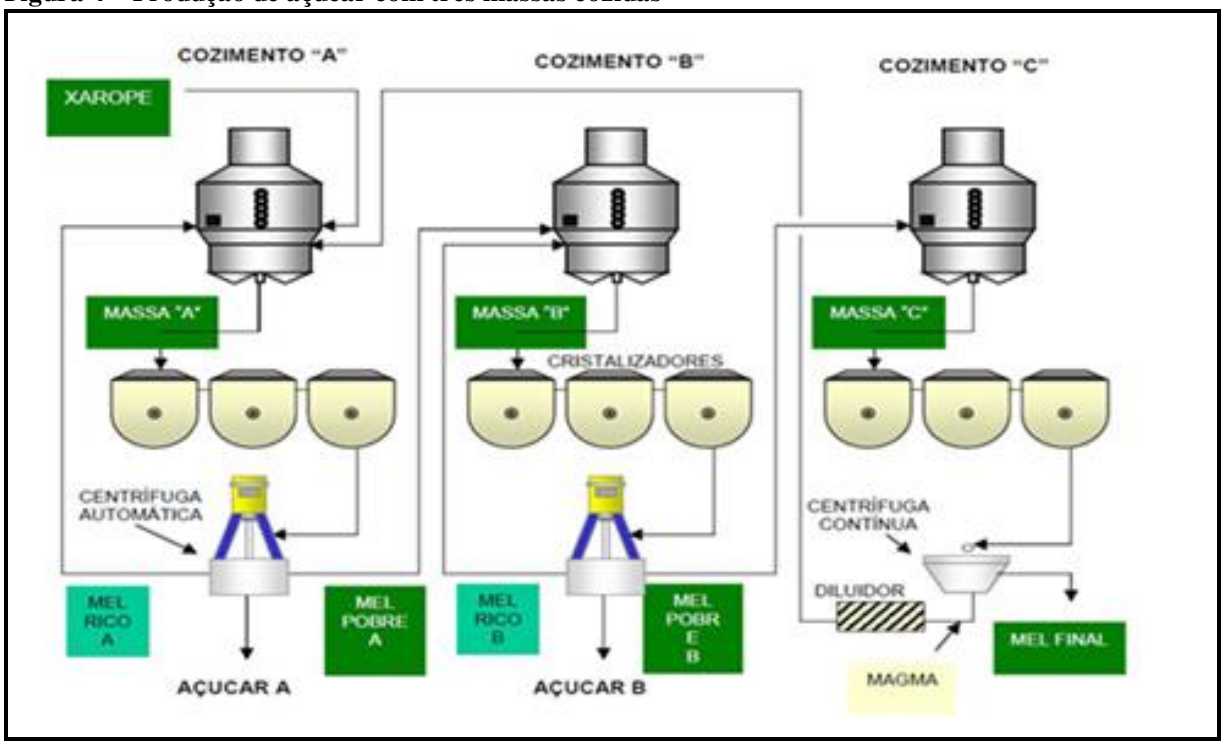
Figura 3 – Processo de cozimento de duas massas adaptado



Fonte: Lopes (2013)

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

Figura 4 – Produção de açúcar com três massas cozidas



Fonte: Menezes (2016)

O magma C as vezes é muito diluído, com os cristais dissolvidos totalmente. Este magma pode ser utilizado no cozimento de primeira, na alimentação ou no cozimento de segunda na fase de nucleação, com adição de sementes (ALBUQUERQUE, 2011).

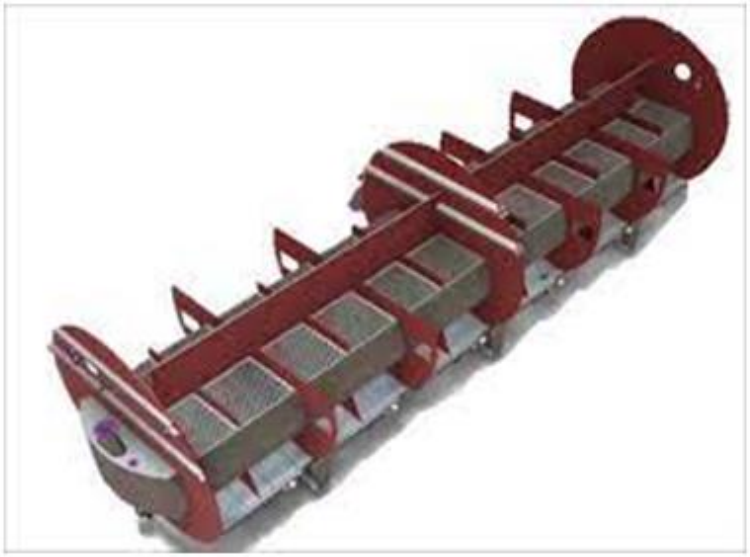
3.5 Cozimento contínuo

O cozimento contínuo ocorre em equipamentos que são alimentados por uma massa cozida com núcleos, previamente preparados em cozedor em batelada, que passa de um compartimento para outro (Figura 5). São equipamentos robustos que substituem uma série de cozedores de batelada, aumentando a produção de açúcar da usina em menor espaço ocupado (REIN, 2017). Os cristais entram na fase de crescimento no cozimento contínuo, com aumento a cada estágio do tamanho. Como no cozimento em batelada, utiliza-se xarope ou um mel como líquido de alimentação. A massa cozida com os cristais no tamanho desejado é encaminhada ao cristalizador, sendo o processo seguinte semelhante ao relatado em batelada (LOPES, 2013). Geralmente os cozedores contínuos são utilizados para massas de menor qualidade como a massa B e C. A correção e adequação do tamanho dos cristais ocorre nos cristalizadores. O tempo de residência é maior nesses aparelhos, corrigindo alguma falha advinda do processo contínuo.

Os cozedores contínuos atualmente comercializados prometem maior padronização do processo, redução de consumo de utilidades (água e vapor), facilidade de operação, bem como melhor transferência de calor e de massa (BMA, 2005, BOSCH, 2016, PROCKNOR, 2019). Devido a estas vantagens, estes equipamentos vêm ganhando o mercado brasileiro, sendo que de acordo com a empresa de projetos revendedora da fabricante Fives, há mais de cinquenta cozedores contínuos instalados no país (PROCKNOR, 2019).

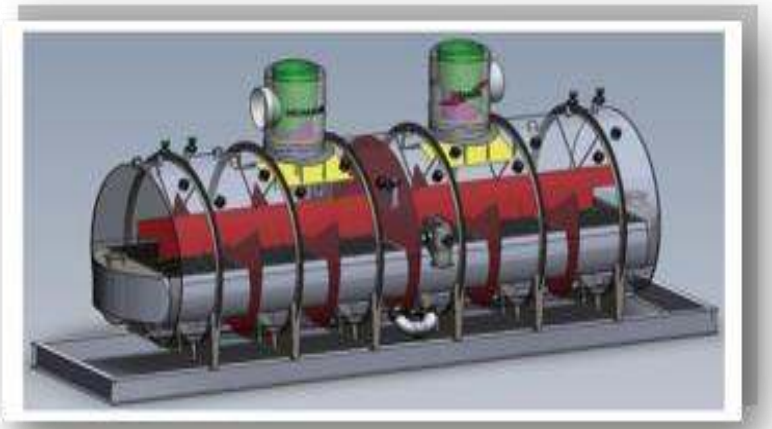
Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

Figura 5 – Compartimentos do cozedor contínuo



Fonte: (PONGSWATD *et al.*, 2018)

Figura 6 – Cozedor Contínuo observado lateralmente



Fonte: (PONGSWATD *et al.*, 2018)

3.6 Diferenças de desempenho entre cozedor contínuo e o de batelada

As condições gerais favorecendo o sistema de batelada ou contínuo são resumidas por em Rein, (2017): "O reator de batelada tem a vantagem do custo de instrumentação menor e flexibilidade de operação (pode ser parado fácil e rapidamente). O cozedor de batelada tem a desvantagem do custo da mão-de-obra e de manejo, há maior tempo de parada consideráveis para esvaziar, limpar e reabastecer. Por isso, podemos generalizar afirmando que o reator de batelada é bem adequado para produzir pequenas quantidades de material, porém, com qualidade, para produzir muitos produtos diferentes com um único equipamento. Por outro lado, para o tratamento químico de materiais em quantidades grandes, o processo contínuo é quase sempre considerado o mais econômico".

Ainda, segundo Rein, (2017), quanto a economia de vapor, os cozedores contínuos apresentam menor gasto do recurso. Com relação aos volumes utilizados, o sistema contínuo

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

apresenta vantagens, com tempo de inatividade menor. Para o controle do processo ambos podem ser automatizados com sucesso. Para instalação, os cozedores contínuos podem ser mais caros, no entanto, não quando se leva em consideração a eficiência volumétrica. Com relação à mão-de-obra, os cozedores contínuos necessitam de menor supervisão. Na flexibilidade da área de cozimento o realizado em batelada apresenta vantagem em relação ao contínuo. Quando uma expansão marginal é necessária, tem sido comum instalar um cozedor contínuo C e converter os cozedores em bateladas C em B ou A.

3.7 Controles tradicionais e inovadores na condução do cozimento

A cristalização é um processo físico-químico complexo e está relacionado com muitos parâmetros. A pureza do licor mãe e supersaturação não podem ser medidos de forma direta pelos sensores, dificultando a automação do processo (MENG *et al.*, 2019). A experiência prática do operador do cristalizador desempenha papel vital na supervisão do crescimento do cristal de açúcar (ROMERO-BUSTAMANTE *et al.*, 2022). Para monitoramento da cristalização tem sido proposto o controle supervisório e aquisição de dados no tempo, através da verificação de indicadores de desempenho (PONGSWATD *et al.*, 2018).

No cozimento a busca do tamanho correto dos cristais e a uniformidade é um dos objetivos principais do processo. O tamanho dos cristais se visualiza pela análise pós-produção, através da passagem de 100g do produto por peneiras de diferentes tamanhos. A amostra é coletada após a etapa de secagem. Quanto mais próximo do tamanho e quanto menos o açúcar ficar espalhado entre as peneiras, melhor a qualidade (OLIVEIRA; ESQUIAVETO; SILVA, 2007). Cada tipo de açúcar tem seu tamanho e coeficientes de variações adequados. Por exemplo, o açúcar VHP possui cristais de tamanho próximo a 1 mm e quanto menor o coeficiente de variação melhor a qualidade do processo (ALBUQUERQUE, 2011). É uma análise obtida apenas quando o cozimento foi finalizado e não há como se fazer correções, somente evitar novos erros de condução.

Outro parâmetro extremamente importante é a cor ICUMSA que classifica os tipos e quando a usina possui mais de um armazém, se separa por esse parâmetro o açúcar de melhor qualidade do inferior. A cor pode ser incrementada por 4 principais motivos: compostos oriundos da qualidade da matéria-prima, como compostos fenólicos no caldo da cana-de-açúcar (CABRAL *et al.*, 2022). Outros compostos podem ser formados durante o aquecimento por tempo prolongado dos líquidos açucarados: escurecimento por reação de Maillard (reação de açúcares redutores e aminoácidos) e caramelização. O último fator é o pH elevado que pode modificar a coloração do produto (AGUIAR *et al.*, 2015). A temperatura e pH são ajustados para que não ocorra excessos. Por exemplo, a condução do cozimento é realizada em temperatura entre 62 a 82ºC com evaporação com uso de vácuo, por justamente evitar o incremento da cor (RÓZSA *et al.*, 2018). Uma evaporação normal sem a utilização do vácuo ocorreria próxima aos 100ºC.

Outros fatores como cinzas, pontos pretos são gerados em processos anteriores ou posteriores ao cozimento. As cinzas prejudicam o esgotamento do mel, por tornar o líquido açucarado mais solúvel à sacarose (LOPES, 2013).

Diante das fases do cozimento e dos desafios impostos pela qualidade da cana e do processo, existem várias tentativas de controle do cozimento, por ser a etapa mais impactante na qualidade do produto. A experiência do operador é um fator importantíssimo. As usinas possuem operadores com bastante tempo de prestação de serviço. A paciência também tem o destaque, por ser processo demorado e detalhado.

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

Na formação do pé o controle deve ser realizado no vácuo gerado no multijato, temperatura do vapor (vapor vegetal do pré-evaporador ou do primeiro evaporador do múltiplo efeito) e observação da evaporação. Esse controle é realizado do início ao final da formação da massa cozida. Até a fase da semeadura pode ser utilizado condutivímetros, micro-ondas, refratometria e outros equipamentos para identificar a zona metaestável para se fazer a inserção das sementes. Após a nucleação esses aparelhos têm prejuízo na exatidão da zona de supersaturação, pelo líquido possuir partes sólidas (cristais) que atrapalham o funcionamento (RÓZSA *et al.*, 2018).

Com o refratômetro, as usinas utilizam a região de sólidos solúveis igual a 81 ou 82º Brix para identificar o momento da semeadura. Porém, devido a presença de impurezas no caldo (cinzas e açúcares redutores) esse ponto pode se modificar (EGGLESTON; CÔTÉ; SANTEE, 2011). Principalmente, no início e no final da safra, por causa das chuvas e redução de qualidade da cana, o uso do refratômetro se torna não precisa. Além disso, a pureza do material utilizado (xarope ou mel), podem alterar esse ponto.

Os operadores utilizam a experiência, com o método do fio, que consiste na colocação de amostra do cozedor entre os dedos polegar e indicador e, em seguida, estica-se o dedo até a massa se romper. Dependendo da distância do rompimento, o operador sabe se o cozimento está na zona metaestável. Ainda é o método mais utilizado entre os operadores. (ALBUQUERQUE, 2011).

Em seguida, após a nucleação, a fase mais crítica é manter a supersaturação do líquido na região da zona metaestável (AGUIAR *et al.*, 2021). Praticamente é impossível ter o controle preciso durante o tempo de 1h30 até 2h de crescimento em cozedor em batelada operado manualmente. Os erros de alimentação levam a redução do tamanho (zona insaturada) ou produção de "falso-grãos" (zona lábil) que são o pó fino formado após a secagem do material (ALBUQUERQUE, 2011). O pó de açúcar aumenta o coeficiente de variação do produto e reduz o valor do açúcar. Para controlar a alimentação, novamente a experiência do operador conta muito no cozedor de batelada. No cozedor contínuo esse processo é automático e se trabalha com pé-de-cozimento formado previamente em cozedor de batelada (MENG *et al.*, 2021). Eventuais problemas no cozimento contínuo, por não chegar no tamanho desejado dos cristais, de massas cozidas mais pobres, pode ser corrigido pelo processo seguinte de cristalização que possui tempos maiores de residência comparados aos cristalizadores de massa de primeira.

A finalização do processo se dá por visualização de quando o volume da massa cozida, ultrapassa a última luneta de observação no aparelho. O operador retira novamente uma amostra com a sonda e verifica o tamanho dos cristais (Figura 2A). Pode realizar o corte, passar parte do líquido de um cozedor para o outro, quando não atinge o tamanho desejado, ou iniciar em um cozedor e depois terminar o cozimento em outros dois cozedores(DE CASTRO *et al.*, 2019).

Para aumentar o esgotamento do mel, a alimentação é interrompida e se continua a evaporação. A tendência é que o líquido chegue próximo a zona lábil e formação de falso núcleo(LOPES, 2013). Porém, perto da zona lábil é que a deposição de sacarose é mais intensa(DE CASTRO *et al.*, 2019). O tempo do aperto varia entre as usinas e depende da qualidade do material que está no cozedor.

Existem estudos que mostram a possibilidade de monitoramento do cozimento, que incluem análise de componentes principais, sensores sensíveis, redes neurais, e análise de imagem (fractais). A análise multi-escala das imagens capturadas durante o processo de cristalização pode fornecer informações relacionadas ao crescimento do cristal (ROMERO-BUSTAMANTE *et al.*, 2022).

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

Em função da importância da cristalização em determinar a qualidade do açúcar produzido, e pelo baixo nível de automação encontrado nas indústrias de cana-de-açúcar, esforços têm sido realizados me busca de um modelo satisfatório e desenvolver estrutura de controle. Há muitos estudos de cinética de cozimentos, usando diferentes abordagens (DE CASTRO *et al.*, 2019).

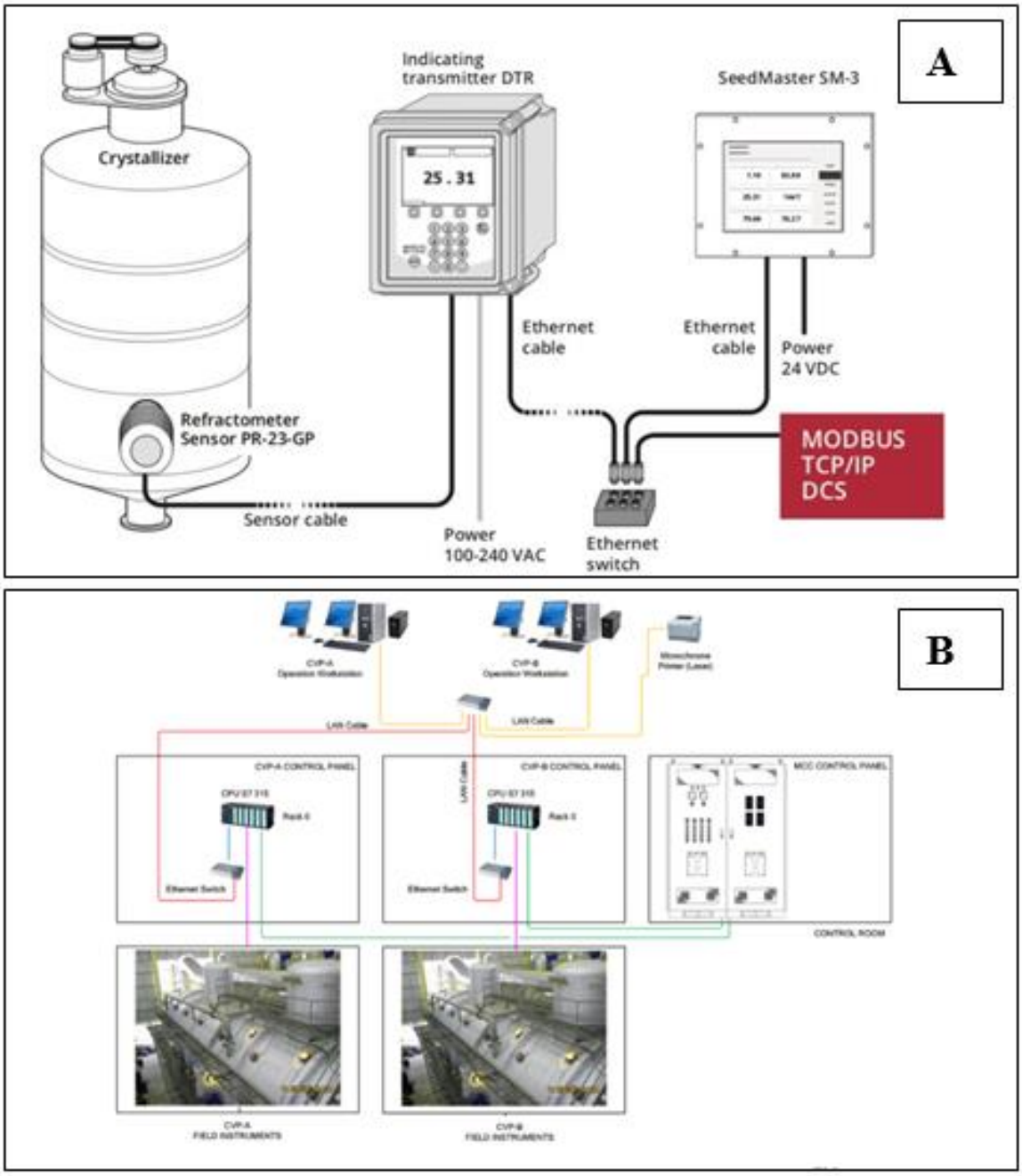
O cálculo online com o uso do instrumento "*SeedMaster Instruments online calculation of supersaturation*" (Figura 7) vem sendo utilizado. São utilizados os parâmetros: temperatura (ºC ou ºF), concentração do licor mãe (%), Supersaturação, pureza do licor mãe, conteúdo de cristais (%v), tamanho do cristal (mm), densidade da massa cozida ($kg.m^3$), com alguns medidos online e outros através análise de laboratório. Os parâmetros são adicionados e uma complexa equação é utilizada para simulação do processo. A aplicação tem mostrado resultados próximos de cozimentos bem conduzidos nas indústrias (RÓZSA *et al.*, 2018).

Em busca do complexo controle da "distribuição do tamanho do cristal" (DTC), Meng *et al.*, (2021) construíram um modelo baseado em dados de mínimo quadrados que suportam regressão vetorial e otimização de enxame de partículas (incluindo parâmetro de função kernel e regularização). O modelo se utiliza de dados facilmente mensurados durante o processo, como os sólidos solúveis, nível, temperatura da massa cozida, pressão de vapor, volume de alimentação, e nível do vácuo. Como dados de saída, o modelo oferece os valores de tamanho médio do cristal e coeficiente de variação).

Pongswatd *et al.*, (2018) estudaram o monitoramento de cozedores contínuos do tipo DECHAROEN®, através da internet. De forma remota, indicadores de performance chaves (pressão absoluta, vácuo, temperatura e condutividade) são obtidos utilizando um controle supervisório e um software de aquisição (SCADA), o qual provê interface homem-máquina habilitada para Web.

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

Figura 7 - Tipos de controles do processo de cozimento disponíveis. A - *SeedMaster Instruments online calculation of supersaturation* e B – Monitoramento de cozedores contínuos pela internet



Fonte: A - Rotza 2018 e B - (PONGSWATD *et al*., 2018).

No Brasil, De Castro *et al.*, (2019) utilizando o software EMSO (Environment for Modeling, Simulation, and Optimization), consideraram para o estudo de simulação de cozimento o balanço de massa, energia e população, junto com mecanismos de nucleação e taxa de dispersão do crescimento dos cristais. O modelo proposto representou bem para cozimento de duas massas. A comparação entre a simulação e os dados reais de uma usina de São Paulo foi limitado a obtenção de dados durante o tempo total de cozimento. O uso de modificações de pureza do xarope revela que essa variável exerce forte influência no tamanho

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

e distribuição do cristal e, consequentemente, na perda de cristais finos na fase de centrifugação.

Foi realizada entrevista com cinco operadores de uma usina na região de Jaboticabal para levantamento da utilização de novas tecnologias para controle do cozimento, a fim de se observar as novas técnicas empregadas no processo e os termos utilizados para controle dessa etapa. Segundo os operadores na entrevista, para obter cristais de características específicas, é fundamental definir as condições de operação do processo como temperatura, pH, pressão, velocidade de agitação, semeadura, tipo de solvente, entre outras; da mesma forma, é necessária a implementação de estratégias de diagnóstico e monitoramento que permitam o controle do processo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inicialmente a matéria-prima que chega nas usinas, por diversos fatores, possui muitas variações de qualidade, que interferem nos controles do processo. O clima, o tratamento do solo, a qualidade da matéria-prima, a origem da cana, o tipo de corte e transporte da cana influenciam na qualidade, aspecto e características do caldo que é enviado para o processo. Esses fatores alteram a qualidade do produto, sendo o açúcar e/ou etanol, fazendo com que o processo para a produção deva ser modificado para atender a qualidade de matéria-prima recebida.

A indústria sucroenergética se utiliza de muitos cozedores em batelada, pois eles mantém uma ótima qualidade no cozimento e preferência. Com a chegada de novas tecnologias, atualmente, os cozedores contínuos vêm ganhando espaço no mercado por ser de grande importância no volume de produção, visto que tem padronização do processo. O que reduz o consumo de utilidades (água e vapor), e facilitando a operação com melhor transferência de calor e de massa.

A produção de açúcar não se tornou um processo totalmente automático e/ou tornado de modo contínuo, porque o cozimento envolve práticas que ainda requerem maior atenção do operador, pois o açúcar é um produto artesanal em que as características básicas como: brilho, formato, consistência entre outras precisam ser controladas visualmente. Uma vez que os sensores não conseguem padronizar a condução do processo, como exemplo a identificação das zonas de supersaturação.

Após a junção de dados de livros, artigos e pesquisas de campo conclui-se que, o segredo para uma boa qualidade do açúcar está nas formas de controle e operação visto que, desde o recebimento do xarope, o ponto de cristalização, controle dos vácuos, e funcionamento das centrifugas precisam estar em perfeita sincronização e harmonia para um melhor funcionamento da fábrica de açúcar e com isso dar origem a um produto de grande qualidade e valor agregado.

Com as entrevistas se percebeu que nas usinas existe a grande dificuldade de nomenclatura das atividades operacionais. Ainda há confusão nos termos utilizados entre a academia e operadores no processo industrial. Um dos exemplos é a palavra vácuo, que academicamente se refere ao efeito físico, em que como consequência abaixa o ponto de ebulição para que a evaporação do xarope ou mel ocorra em torno de 70ºC. Outro termo confuso é o mel rico e o mel pobre. Os operadores trocam continuamente um e outro termo. Sendo que o correto é: mel pobre, o resultante da centrifugação sem adição da lavagem dos cristais, e o mel rico o obtido após a lavagem dos cristais. Isto é um indício que o cozimento ainda hoje é realizado de modo empírico e necessita de estudos mais aprofundados pelos

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

operadores para se tornar mais técnico e menos susceptível a erros de condução deste processo.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Claudio Lima de *et al.* Factors Affecting Color Formation During Storage of White Crystal Sugar. **Focusing on Modern Food Industry**, [*s. l.*], v. 4, n. 0, p. 1, 2015.

AGUIAR, Claudio Lima de *et al.* Influence of phenolic compounds on color formation at different stages of the VHP sugar manufacturing process. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [*s. l.*], v. 9, n. 1, p. 1–10, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129058.

ALBUQUERQUE, F. M. **Processo de Fabricação do açúcar**. Thirded. Recife: Editora Universitária da Universidade Federal de Pernambuco, 2011.

ALPINA ORION. **Cozedores alpina orion.** Em: http://www.alpinaorion.com.br/cozedor. Acesso em 22/11/2022.

BETTANI, S.R. *et al.* Avaliação físico-química e sensorial de açúcares orgânicos e convencionais. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, [*s. l.*], v. 16, n. 2, p. 155–162, 2014.

CABRAL, Mirelle Márcio Santos *et al.* Influence of phenolic compounds on color formation at different stages of the VHP sugar manufacturing process. **Scientific Reports**, [*s. l.*], v. 12, n. 1, p. 1–10, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41598-022-24455-4.

CASTRO, B. J. C de. *et al.* Sucrose crystallization: Modeling and evaluation of production responses to typical process fluctuations. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, [*s. l.*], v. 36, n. 3, p. 1237–1253, 2019.

DELGADO, Afrânio A.; CESAR, Marco A. A.; DA SILVA, Fábio C. **Elementos de Tecnologia e Engenharia da Produção do Açúcar, Etanol e Energia**. Firsted. Piracicaba: Fundação dos Estudos Agrários Luiz de Queiroz - FEALQ, 2019.

EGGLESTON, Gillian; CÔTÉ, Gregory; SANTEE, Christopher. New insights on the hard-to-boil massecuite phenomenon in raw sugar manufacture. **Food Chemistry**, [*s. l.*], v. 126, n. 1, p. 21–30, 2011. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.10.038.

FRANCO PETRÔNIO, Luana Carolina de *et al.* The organic sugar business in Brazil: main producing regions and international market insertion. **Iheringia - Serie Botanica**, [*s. l.*], v. 77, n. Ix, 2022.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na Agroindústria da Cana-de-açúcar**. Thirded. Piracicaba: Sociedade dos Técnicos Açúcareiros e Alcooleiros do Brasil - STAB, 2011.

FERREIRA, MARCELA BENEVENUTO; HORTA, Patrícia Maia do Vale; MAIA, Haline

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

Aparecida de Oliveira. Açúcar Em Quatro Atos. **CES Revista**, [*s. l.*], v. 32, n. 2, p. 1–19, 2018.

FRENZEL, Stefan. Crystallization Schemes in the Sugar Industry. **ChemBioEng Reviews**, [*s. l.*], v. 7, n. 5, p. 159–166, 2020.

GRATÃO, A. C. A.; BERTO, M. I.; SILVEIRA JÚNIOR, V. EOLOGIA DO AÇÚCAR LÍQUIDO INVERTIDO: INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA VISCOSIDADE. [*s. l.*], v. 24, n. 4, p. 652–656, 2004.

KOTYZA, Pavel *et al.* Sugar prices vs. Financial market uncertainty in the time of crisis: Does covid-19 induce structural changes in the relationship?. **Agriculture (Switzerland)**, [*s. l.*], v. 11, n. 2, p. 1–16, 2021.

LOPES, Cláudio Hartkopf. **Tecnologia de Produção de Açúcar de Cana**. 1. ed. São Carlos: UAB-UFSCar, Coleção, 2013.

MACHADO. S.S. **Tecnologia da Fabricação do Açúcar.** Inhumas IFG, Asnta Maria: Universidade Federal de Santa Maria, p. 56, 2012.

MENEZES, J. F. S. **Balanços de massa na indústria sucroalcooleira.** 58 f. Trabalho de conclusão de curso de Tecnologia de Produção Sucroalcooleira, Universidade Federal da Paraíba, 58p., 2016.

MENG, Yanmei *et al.* Data-driven modeling for crystal size distribution parameters in cane sugar crystallization process. **Journal of Food Process Engineering**, [*s. l.*], v. 44, n. 4, p. 1–15, 2021.

MENG, Yanmei *et al.* Data-driven soft sensor modeling based on twin support vector regression for cane sugar crystallization. **Journal of Food Engineering**, [*s. l.*], v. 241, p. 159–165, 2019.

NATALINO, Ricardo *et al.* Caracterização de açúcar mascavo baseado nos teores de sacarose, Cu, Ca, Na, Fe e Mg. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, [*s. l.*], v. 7, n. 3, p. 1–9, 2021.

OLIVEIRA, Danilo Tostes; ESQUIAVETO, Maria Madalena Mangue; SILVA, José Felix. Sugar specification parameters and their impact on the food industry. **Ciencia e Tecnologia de Alimentos**, [*s. l.*], v. 27, n. SUPPL.1, p. 99–102, 2007.

OLIVEIRA, Danilo Tostes; ESQUIAVETO, Maria Madalena Mangue; SILVA JÚNIOR, José Felix. Impacto dos itens da especificação do açúcar na indústria alimentícia. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, [*s. l.*], v. 27, p. 99–102, 2007.

OLIVEIRA, T. M de.; CASTRO, M. A. S. de Certificação orgânica em usinas de açúcar. **Revista de Gestão Estratégica**, [*s. l.*], v. 1, n. 4, p. 99–106, 2022.

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

PODADERA, Priscilla. **Estud o das propriedades do açúcar líquido invertido processado com radiação gama e feixe de elétrons**. 2007. 105 f. [*s. l.*], 2007.

PONGSWATD, S. *et al.* DESIGN AND IMPLEMENTATION OF INTERNET-BASED REMOTE MONITORING FOR CONTINUOUS VACUUM PANS IN SUGAR FACTORY. **ICIC Express Letters Part B: Applications**, [*s. l.*], v. 9, n. 5, p. 429–436, 2018.

REBELATO, M.G.; MADALENO, L.L.; RODRIGUES, A.M. Analysis of the environmental performance of the sugar energy plants located in the hydrographic Basin of the river Mogi Guaçu. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [*s. l.*], v. 21, n. 3, 2016.

REBELATO, Marcelo Giroto; MADALENO, Leonardo Lucas; RODRIGUES, Andréia Marize. Um Estudo Sobre a Aplicabilidade Do Sistema Puxado De Produção Na Fabricação De Açucar. **Revista Gestão Industrial**, [*s. l.*], v. 7, n. 1, p. 228–246, 2011.

REIN, Peter. **Cane sugar engineering**. Seconded. [*S. l.*]: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2017.

ROMERO-BUSTAMANTE, Jorge A. *et al.* Monitoring of cane sugar crystallization process by multiscale time-series analysis. **Chaos, Solitons & Fractals**, [*s. l.*], v. 156, p. 111848, 2022.

RÓZSA, Lajos *et al.* Selection of the Operating Parameters in Sugar Crystallization Control. **Sugar Industry Technologists**, [*s. l.*], n. May, p. 1–18, 2018.

SANTOS E SILVA, Daniella Fartes de; BOMTEMPO, José Vitor; ALVES, Flávia Chaves. Innovation opportunities in the Brazilian sugar-energy sector. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], v. 218, p. 871–879, 2019.

SOLOMON, S.; RAO, Govind Pratap; SWAPNA, M. Impact of COVID-19 on Indian Sugar Industry. **Sugar Tech**, [*s. l.*], v. 22, n. 4, p. 547–551, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12355-020-00846-7.

SOUZA DIAS, Marina Oliveira de *et al.* Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil. **Environmental Development**, [*s. l.*], v. 15, p. 35–51, 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.envdev.2015.03.004.

VANDENBERGHE, L. P.S. *et al.* Beyond sugar and ethanol: The future of sugarcane biorefineries in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [*s. l.*], v. 167, n. June, p. 112721, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112721.

UNICA, Brasil: O maior produtor mundial de açúcar. Em: https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/acucar/. Acesso em 01 fev. 2023.