

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENGENHARIA QUÍMICA**

GISELLE VIEIRA LARA

**SULFITAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO EM UMA USINA NO
INTERIOR DO ESTADO DE SÃO PAULO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2018

GISELLE VIEIRA LARA

**SULFITAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO EM UMA USINA NO
INTERIOR DO ESTADO DE SÃO PAULO**

Trabalho de Conclusão de Curso como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, do Departamento Acadêmico de Engenharia Química, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Priscilla dos Santos Gaschi Leite

PONTA GROSSA

2018

Folha destinada à inclusão da **Ficha Catalográfica** (elemento obrigatório somente para teses e dissertações) a ser solicitada ao Departamento de Biblioteca da UTFPR e posteriormente impressa no verso da Folha de Rosto (folha anterior).

Espaço destinado a elaboração da ficha catalográfica sob responsabilidade exclusiva do Departamento de Biblioteca da UTFPR.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa
Departamento Acadêmico de Engenharia Química



TERMO DE APROVAÇÃO

Sulfitação: um estudo de caso em uma usina no interior do Estado de São Paulo

por

Giselle Vieira Lara

Monografia apresentada no dia 23 de novembro de 2018 ao Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profa. Dra. Simone Delezuk Inglez
(UTFPR)

Profa. Dra. Erica Lovo da Rocha Watanabe
(UTFPR)

Profa. Dra. Priscilla dos Santos Gaschi Leite
(UTFPR)
Orientador

Profa. Dra. Juliana de Paula Martins
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia Química

Dedico este trabalho aos meus amados pais, Agenor e Valma; e aos meus irmãos, Rômulo e Danilo.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos ao meu Supervisor Antonio Carlos Pereira Júnior, pela amizade, paciência e por me conceder a oportunidade de trabalhar sob seu olhar crítico e profissional. É com muita admiração que me espelho em você como pessoa e futura Engenheira Química.

A minha querida professora e orientadora Priscilla dos Santos Gaschi Leite, por nunca me negar a atenção e orientação necessárias para o meu desenvolvimento. É uma das Profissionais as quais eu me inspiro, por suas aulas exemplares e dedicação impecável ao seu trabalho.

Aos meus Pais, Agenor e Valma, que sempre me incentivaram e apoiaram apesar da distância que nos era imposta. Pelo amor, carinho e compreensão.

Aos meus queridos irmãos, Rômulo e Danilo, pela amizade, carinho e cuidado. O apoio de vocês foi essencial para mim. Amo vocês.

Aos meus amigos de longa data, dos tempos de Valribeira, especialmente o Juliana e Thomás. Por mais que seguimos caminhos diferentes ainda mantemos contato. Por todos os momentos tristes e alegres que compartilhamos durante todos esses anos. Muito obrigada!

Aos meus melhores amigos da Universidade: Agnes e Bruna. Estivemos juntas desde o primeiro ano da faculdade. Obrigado pelos bons momentos e apoio incondicional.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pela formação que pode me oferecer. Bem como a própria cidade a qual pude conhecer pessoas incríveis e viver momentos tão especiais eternos em minha vida.

A todos que contribuíram de alguma forma para que eu pudesse estar concluindo mais esta etapa da minha vida. O meu muito obrigada!

Seja sua maior expectativa.
(Autor desconhecido)

RESUMO

LARA, Giselle V. **Sulfitação**: um estudo de caso em uma usina no interior do Estado de São Paulo. 2018. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

O Brasil é um dos maiores produtores de açúcar do mundo, o que se deve ao clima tropical em que está inserido. A matéria-prima deste produto é a cana-de-açúcar. Sua qualidade está diretamente ligada às condições de cultivo e maturação a que é submetida, pois por conta da ação do clima, tipo de colheita e dos microrganismos a sacarose contida na cana pode ser perdida. A sacarose é o açúcar da cana que é possível se cristalizar e para que isso seja possível, o caldo da cana passa por diversas operações unitárias para a clarificação do caldo e posterior cristalização do açúcar. Dentre as operações destaca-se a sulfitação, que é a etapa determinante para a obtenção do açúcar cristal branco. O branqueamento ocorre através da absorção do gás sulfuroso (SO_2) pelo caldo, onde diversas reações ocorrem para a eliminação das impurezas presentes em solução. Este trabalho teve como objeto de estudo a operação de sulfitação em uma usina no interior do estado de São Paulo, e além de levantar pontos de melhoria da operação, buscou-se acompanhar os parâmetros e entender a influência dos mesmos na eficiência do processo. Primeiramente, em campo, levantou-se os possíveis problemas que impactavam na formação e absorção do sulfito no caldo. Em seguida, em laboratório, aplicou-se uma metodologia de determinação do sulfito no caldo, bem como foi feito o acompanhamento de outros parâmetros como temperatura e pH em amostras coletadas durante o processo. A partir dos resultados obtidos foi possível entender a influência da temperatura na formação do gás sulfuroso e com o acompanhamento da dosagem do enxofre, concluiu-se que, em um comparativo entre a safra anterior e a safra deste ano, houve um melhor controle da operação e maior enquadramento da cor do açúcar.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar. Açúcar. Sulfitação.

ABSTRACT

LARA, Giselle V. **Sulfitation**: a case study at a sugar cane and alcohol plant in the countryside of the State of Sao Paulo. 2018. 62 f. Course Completion Work (Bachelor of Chemical Engineering) - Federal Technological University of Paraná. Ponta Grossa, 2018.

Brazil is one of the biggest sugar producers in the world, which is due to the tropical climate that the country experiences. The raw material for this product is sugarcane. Its quality is directly connected to conditions of cultivation and maturation to which it is submitted, because due to climate, type of harvest and microorganisms, sucrose in sugarcane can be lost. Sucrose is sugar from sugarcane that can be crystallized, and in order to make it possible, sugarcane juice goes through several unit operations to be clarified and subsequent crystallization of sugar. Among the operations, sulphitation stands out, which is the determining stage of obtaining white crystal sugar. Bleaching happens through the absorption of sulfur dioxide (SO₂) by sugarcane juice, where several reactions occur to eliminate the impurities present in the solution. The aim of this work was to study the sulphitation operation in a sugar cane and alcohol plant in the countryside of the state of São Paulo, and besides improving the operation, it was sought to observe the parameters and understand their influence on the efficiency of the process. First, in the field, the possible problems that impacted on the formation and absorption of sulphite in the sugarcane juice were analyzed. Then, in the laboratory, a methodology of determination of sulphite in the sugarcane juice was applied, as well as observation of other parameters, such as temperature and pH in samples collected during the process. From the results obtained it was possible to understand the influence of the temperature on the formation of the sulfur gas, and by monitoring of the sulfur dosage, it was concluded that, in a comparison between the previous and the current harvest, there was a better control of the operation and greater color classification.

Keywords: Sugar cane. Sugar. Sulfitation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Jogos de facas posicionadas sobre a esteira de cana	21
Figura 2 –	Conjunto de martelos rotativos que friccionam a cana	22
Figura 3 –	Tandem de moagem	23
Figura 4 –	Decantador rápido	28
Figura 5 –	Decantador convencional	29
Figura 6 –	Filtro rotativo contínuo à vácuo	30
Figura 7 –	Filtro prensa	31
Figura 8 –	Exemplo esquemático de evaporação de múltiplo efeito	32
Figura 9 –	Processo de sulfitação de caldo por coluna	36
Figura 10 –	Esquema de sulfitação por multijato	37
Figura 11 –	Calha vibratória	38
Figura 12 –	Calço sob motor da calha vibratória	38
Figura 13 –	Regulagem da entrada de ar secundário quebrada	39
Figura 14 –	Regulagem da entrada de ar secundário quebrada substituída por isolamento	39
Figura 15 –	Pontos de vazamento no meio das colunas de gás	40
Figura 16 –	Gás retornando na entrada do forno rotativo	40
Figura 17 –	Redução fixa no lugar do disco da válvula borboleta	41
Figura 18 –	Vista interna da tubulação corroída	41
Figura 19 –	Vista lateral da tubulação corroída	42
Figura 20 –	Bico ejetor obstruído	42
Figura 21 –	Modificação na entrada de ar secundário dos fornos rotativos	50
Figura 22 –	Manutenção nas colunas de gás para sanar vazamentos	51
Figura 23 –	Exemplo de uma válvula apropriada para a regulagem da vazão de água de resfriamento	51
Figura 24 –	Local de substituição das válvulas	52
Figura 25 –	Substituição de tubulações novas	53
Figura 26 –	Bico limpo	53
Gráfico 1 –	Composição tecnológica de uma cana-de-açúcar típica	16
Gráfico 2 –	Relação entre a temperatura e a quantidade de sulfito presente no caldo	46

Gráfico 3 –	Comparativo de cor do açúcar <i>versus</i> sulfito no caldo na safra do ano de 2017	47
Gráfico 4 –	Comparativo de cor do açúcar <i>versus</i> sulfito no caldo na safra do ano de 2018	48
Gráfico 5 –	Demonstrativo de relação entre as variáveis cor do açúcar e sulfito na safra do ano de 2017	49
Gráfico 6 –	Demonstrativo de relação entre as variáveis cor do açúcar e sulfito na safra do ano de 2018	49
Quadro 1 –	Produtos da degradação do açúcar por atividade microbiana após tempo de espera entre corte ou queima da cana-de-açúcar e a moagem	18

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ICUMSA	International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis Ltd
BRIX	Porcentagem em massa de sólidos solúveis contidos em uma solução de sacarose quimicamente pura.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo Geral	14
1.1.2 Objetivos Específicos	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 A CANA-DE-AÇÚCAR COMO MATÉRIA-PRIMA	15
2.2 COMPOSIÇÃO TECNOLÓGICA DA CANA-DE-AÇÚCAR	15
2.3 PRINCIPAIS FATORES DE QUALIDADE	16
Variedade	16
Microrganismos na cana-de-açúcar	17
Condições ambientais de maturação da cana-de-açúcar	19
3 PROCESSAMENTO DA CANA E FABRICAÇÃO DO AÇÚCAR CRISTAL	20
3.1 RECEPÇÃO: LIMPEZA E PREPARO	20
Limpeza	20
Preparo	21
3.2 EXTRAÇÃO	22
3.3 CLARIFICAÇÃO DO CALDO DE CANA	24
Regeneração	24
Sulfitação	25
Caleagem	26
Aquecimento	27
Flasheamento	27
Decantação	27
Filtração	29
Peneiramento	31
3.4 FABRICAÇÃO DO AÇÚCAR	31
Evaporação	31
Flotação	32
Cozimento e Cristalização	33
Centrifugação	34
Secagem e Armazenamento	34
4 A SULFITAÇÃO	35
4.1 FUNCIONAMENTO	35
4.2 CONTROLE DA OPERAÇÃO	35
5 ESTUDO DE CASO	38
Calha Vibratória	38
Entrada de Ar Secundário	39
Vazamento nas Colunas de Gás	39

Válvulas Reguladoras de Água de Resfriamento	40
Tubulação de Distribuição de Gás da Coluna de Sulfitação	41
Bicos Ejetores.....	42
6 METODOLOGIA	43
6.1 LEVANTAMENTO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DA PLANTA	43
6.2 METODOLOGIA UTILIZADA PARA obtenção de AMOSTRAS DE CALDO	43
6.3 PREPARO DE AMOSTRAS.....	44
6.4 DETERMINAÇÃO DE SULFITO EM CALDO CLARIFICADO.....	44
Prova em Branco	44
Amostra	44
Cálculo.....	45
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
7.1 ANÁLISE DE TEMPERATURA <i>VERSUS</i> SULFITO	46
7.2 Análise de COR <i>VERSUS</i> sulfito.....	47
7.3 MELHORIAS DO PROCESSO.....	49
Entrada de Ar Secundário	50
Pontos de Vazamento de Gás	50
Válvulas de Água de Resfriamento das Colunas de Gás	51
Tubulação Interna de Distribuição de Gás da Coluna de Sulfitação	52
Frequência de Limpeza dos Bicos Ejetores	53
8 CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS.....	55
APÊNDICE A - Formulário de acompanhamento de parâmetros	59

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores produtores de açúcar de cana no mundo é o Brasil. Isso se explica pelos fatores de clima e solo, pois a cana é uma gramínea que se cultiva em climas tropicais e subtropicais. (REIN, 2013)

A qualidade da matéria-prima para se produzir o açúcar está diretamente relacionada à variedade da planta, condições de maturação e aos microrganismos presentes, pois todos estes fatores influenciam na deterioração da sacarose contida na cana e conseqüentemente, na recuperação deste açúcar cristalizável. (ALBUQUERQUE, 2011)

Várias operações unitárias constituem o processo de fabricação do açúcar, as quais podem ser divididas em duas grandes etapas: tratamento do caldo e fabricação do açúcar. O tratamento do caldo, em especial, compõe as fases que determinam a qualidade da cor do açúcar final, visto que essas operações implicam na clarificação do caldo. A fabricação é onde o caldo será concentrado e a sacarose cristalizada. (DOHERTY; RACKEMANN, 2008)

Existem diferentes tipos de açúcar produzidos no Brasil, os principais são o cristal e o Very High Polarization (VHP). Destinado ao mercado externo, o açúcar VHP em comparação ao demerara é mais claro, porém apresenta cristais com cor amarelada. É considerado um açúcar bruto e normalmente é empregado para ser transformado em outros tipos de açúcar. Em sua produção, não é utilizada a etapa de sulfitação, diferentemente do açúcar cristal, que graças a esta etapa de branqueamento possui cristais mais claros, sendo normalmente destinado ao consumo humano direto ou ainda para refino. (BOSCARIOL, 2005; MACHADO, 2012)

A sulfitação tem ação descolorante, consiste na absorção do gás sulfuroso pelo caldo, através da queima do enxofre sólido. A ação do gás SO_2 atua na coagulação e precipitação dos agentes corantes do caldo e também tem ação bactericida e redutora de viscosidade.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Identificar os problemas que impactam de forma negativa no funcionamento da sulfitação e acompanhar os parâmetros do processo a fim de se monitorar desvios.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Entender o funcionamento da operação de sulfitação;
- Levantar em campo e aplicar as possíveis melhorias relativas à manutenção dos equipamentos;
- Quantificar o sulfito no caldo a partir de análises laboratoriais de amostras;
- Acompanhar os parâmetros da operação de sulfitação como dosagem de enxofre, pH e temperatura;
- Entender como o controle atual do processo afeta nos resultados finais de cor do açúcar;
- Obter um comparativo do controle da cor do açúcar entre a safra atual e a do ano anterior.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A CANA-DE-AÇÚCAR COMO MATÉRIA-PRIMA

Nesta seção, serão expostos breves conceitos acerca da matéria-prima que é utilizada nas usinas: a cana-de-açúcar. É importante entender a composição desta planta e os fatores que influenciam em sua qualidade, pois estas características influenciam no andamento do processo de produção do açúcar.

No Brasil, a cana é a matéria-prima utilizada como fonte fornecedora do açúcar.

Nesta atividade industrial, busca-se recuperar a sacarose, que está presente nos colmos da cana, pois é a sacarose o açúcar cristalizável. (ALBUQUERQUE, 2011)

Muitos fatores podem influenciar na quantidade disponível de sacarose na cana e essa quantidade é definida logo no campo, onde a variedade, as condições climáticas e o tipo do cultivo do solo são determinantes em sua formação e em seu crescimento. No processo produtivo, entender estas questões são fundamentais para se ter um sistema controlado dos parâmetros e para evitar as perdas por processo. Sendo assim, uma matéria-prima ruim resulta em baixo rendimento, aumento dos custos e tempo de produção. (ALBUQUERQUE, 2011)

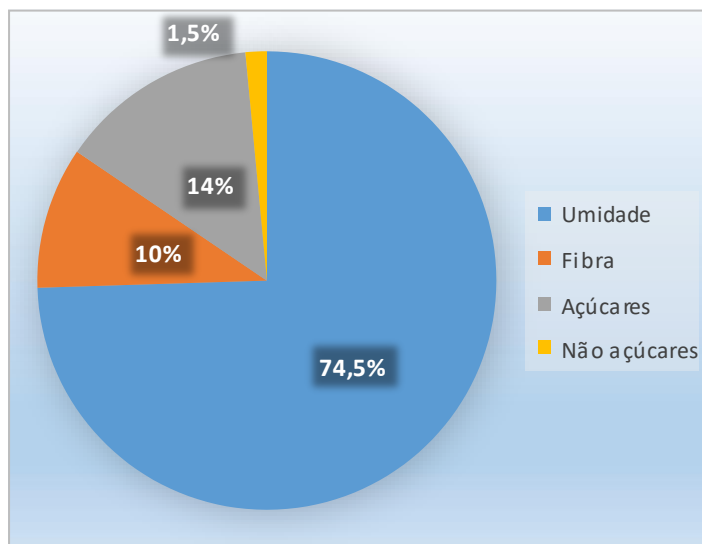
2.2 COMPOSIÇÃO TECNOLÓGICA DA CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar pode ser basicamente separada em sólidos insolúveis e caldo. Os sólidos insolúveis são as fibras, que representam cerca de 10 a 16% da composição da cana. Os 84 a 90% restante são caldo, que possui água, em sua maior parte, e sólidos solúveis. (ALBUQUERQUE, 2011; FERNANDES, 2011)

Os sólidos dissolvidos no caldo são a sacarose, glicose, frutose e os não-açúcares orgânicos e inorgânicos. (ALBUQUERQUE, 2011; FERNANDES, 2011)

O Gráfico 1 abaixo mostra a composição tecnológica de uma cana típica:

Gráfico 1 – Composição tecnológica de uma cana-de-açúcar típica.



Fonte: Castro e Andrade (2006).

Considera-se não-açúcares orgânicos os aminoácidos, gorduras, ceras, corantes, etc. E, não açúcares inorgânicos os minerais como: SiO_2 , K_2O , Cl , P_2O_5 , entre outros. (ALBUQUERQUE, 2011)

2.3 PRINCIPAIS FATORES DE QUALIDADE

Variedade

Um dos fatores de produção e desenvolvimento tecnológico de maior importância a ser considerado em uma usina sucroalcooleira é a escolha das variedades da cana-de-açúcar. (MATSUOKA, 2000)

As variedades são híbridos obtidos por um cuidadoso e criterioso trabalho de seleção e melhoramento genético entre as variedades conhecidas, possibilitando que características desejáveis para regiões e situações específicas sejam agrupadas por cruzamentos. (MARTINS, 2004)

Dentre as principais características a serem atendidas nas variedades, buscam-se as agrônômicas, especiais para produtividade, a rusticidade, a resistência às pragas e doenças, além de características industriais como alto teor de sacarose e médio teor de fibras. (STUPIELLO, 1987)

A variedade da cana é escolhida para se adequar às interações com o ambiente e ao tipo de cultivo, como por exemplo o tipo de solo, o tempo de maturação e tipo de sistema de colheita. (REIN, 2013)

Os constituintes da cana mudam de uma variedade para outra e são importantes parâmetros de qualidade no processamento. Características como a dureza e a quantidade de fibra, por exemplo, podem afetar o desempenho no processo de extração. (REIN, 2013)

Microrganismos na Cana-De-Açúcar

Os microrganismos são responsáveis por deteriorar a cana-de-açúcar. A deterioração se inicia no corte ou na queima, que expõe os tecidos básicos da cana, criando portas de entrada para estes microrganismos. (REIN, 2013)

As bactérias e outros organismos empregam o açúcar em seu metabolismo e liberam substâncias indesejadas, que aumentam a perda de sacarose e a presença de não-açúcares no caldo. A depender do microrganismo predominante, o produto de sua ação pode ser dextrana, etanol, oligossacarídeos e ácidos orgânicos. (ALBUQUERQUE, 2011; FERNANDES, 2011; REIN, 2013)

O Quadro 1 abaixo mostra o produto da atividade microbiana na cana após queima ou corte até o momento da extração.

Quadro 1 – Produtos da degradação do açúcar por atividade microbiana após tempo de espera entre corte ou queima da cana-de-açúcar e a moagem.

Produtos da deterioração	Descrição
Ácidos Orgânicos	Ácidos fórmico, acético e láctico, produtos de atividade microbiana.
Acidez	Tem relação com a queda de pH
Dextrana	Fermentação anaeróbica em condições úmidas por <i>Leuconostoc</i> . Efeito severo no processamento.
Etanol	Pode ser um bom indicador de cana queimada, pois a quantidade em cana sadia é zero. Não é útil em cana crua. É produto de fermentação por levedura.
Polissacarídeos	Inclui dextrana.
Oligossacarídeos	Ação microbiana, enzimática e química. Quantidades variáveis em diferentes variedades, portanto não é um bom indicador absoluto.
Açúcar Invertido	Inversão enzimática e química da sacarose. Aumento da glicose < sacarose, devido a glicose ser preferencialmente utilizada pelos microrganismos.
Manitol	Associado com formação de dextranas.

Fonte: Rein (2013, P. 49).

A Dextrana é um produto da atividade de bactérias, principalmente *Leuconostoc mesenteroides*, formadores de polissacarídeos (ALBUQUERQUE, 2011; FERNANDES, 2011; REIN, 2013). Segundo Alvarez e Cardenty (1988), a formação da dextrana pode ocorrer ao longo de todo o processo, desde o momento antes do corte ou queima, até o processamento da matéria-prima.

Os efeitos da dextrana na produção acarretam perda de sacarose, alta taxa de falsa polarização, levando a mudanças na formação dos cristais, elevação da viscosidade dos xaropes, ciclos de lavagem e separação mais longos nas centrífugas de açúcar e taxas de evaporação mais baixas (SOLOMON, 2009; KIM, DAY, 2004). Durante a evaporação, pode provocar aumento de incrustações nas superfícies de aquecimento e maior perda energética. (BASHARI et al, 2013)

A decomposição da cana queimada, em geral é maior do que na cana cortada, pois a superfície que a protege é removida e apresenta rachaduras. Canas picadas possuem rápida deterioração por possuir mais extremidades expostas (REIN, 2013).

A proliferação microbiana pode aumentar significativamente a depender do tempo de espera entre a queima ou corte até a extração na moagem (ALBUQUERQUE, 2011; FERNANDES, 2011).

Condições ambientais de maturação da cana-de-açúcar

Umidade e temperatura são dois fatores que influenciam substancialmente a qualidade, pois determinam o crescimento, maturação e deterioração da cana. Desta forma, quando o clima é mais seco e frio, o grau de deterioração é menor do que em climas quentes e úmidos, que favorecem a degradação (ALBUQUERQUE, 2011; FERNANDES, 2011; REIN, 2013).

A maturação influencia no teor de sacarose e pureza do caldo. Portanto, se a cana for colhida imatura, espera-se que os níveis destes parâmetros sejam mais baixos. Conforme a maturação é atingida, os teores de amido, nitrogênio e açúcares redutores são reduzidos e os compostos fenólicos aumentam (ALBUQUERQUE, 2011).

Nas áreas de plantação que são irrigadas e a disponibilidade de água é contínua, a composição da cana sofre baixa alteração entre as safras seguintes. Entretanto, em cultivos de cana não irrigados, pode haver o aumento de fibras na composição, baixa pureza do caldo e menor teor de sacarose, decorrentes das variações pluviométricas (REIN, 2013).

3 PROCESSAMENTO DA CANA E FABRICAÇÃO DO AÇÚCAR CRISTAL

Nesta seção, serão apresentadas as etapas de processamento da cana-de-açúcar, desde o recebimento da cana na usina até a fabricação do açúcar cristal branco como produto final. Estes conceitos são essenciais para o entendimento do conteúdo deste trabalho.

3.1 RECEPÇÃO: LIMPEZA E PREPARO

Limpeza

A cana que chega à usina possui grande quantidade de impurezas, tais como palha, folhas, pontas, areia, argila, entre outras. A presença destes materiais provenientes do campo pode variar por diversos fatores, mas existem dois maiores influenciadores: o tipo de corte e as condições climáticas. (ALBUQUERQUE, 2011)

O teor de impurezas ao redor da cana pode variar de 4 a 15% de dias secos para chuvosos, por exemplo. O tipo de corte também faz variar essas quantidades: as colhedadeiras carregam matéria vegetal e mineral juntamente ao corte e, no caso do despalhe por queima, gera-se altas temperaturas que exsudam mel pelo colmo, fazendo com que impurezas minerais fiquem aderidas à superfície. (LOPES, 2013)

Estas impurezas reduzem a capacidade de moagem e extração, além de desgastar e sobrecarregar os equipamentos, dificultando o tratamento do caldo e reduzindo a efetividade das operações. (PAIVA, RUIZ, SOBCHAK, 2015)

A limpeza da cana pode ser feita através da lavagem com água ou limpeza a seco, a depender do método que mais se adequa à realidade de cada usina. Na lavagem com água, bicos aspersores injetam água sob pressão na mesa alimentadora, retirando a sujeira em grande quantidade. Enquanto que na limpeza a seco, ventiladores insuflam ar em alta velocidade na mesa alimentadora, arrastando palha e terra. (LOPES, 2013)

É importante ressaltar que embora a lavagem com água promova uma limpeza efetiva, este método possui aspectos negativos como a perda de sacarose pelo arraste com água. Isto vai depender do sistema de lavagem empregado e se os colmos estão inteiros ou picados, porém essas perdas podem variar entre 1 a 6 kg de açúcar por tonelada de cana processada. Em contrapartida, o método de limpeza por ventilação, além de não ocasionar o arraste de sacarose, não utiliza água e não

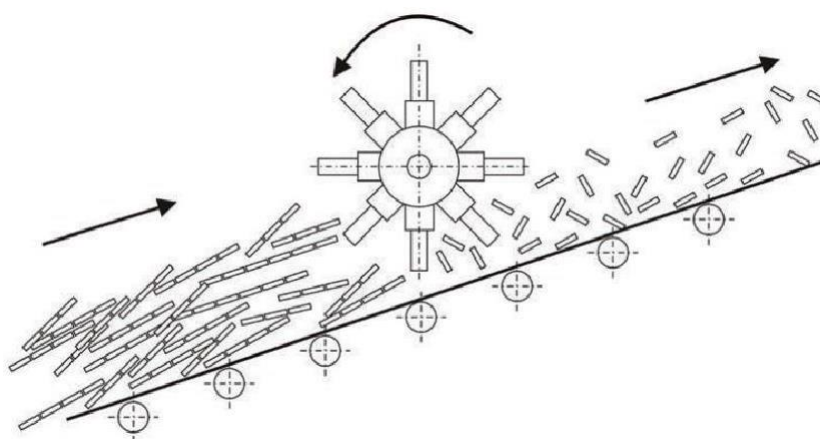
ocasiona o tratamento posterior da mesma, que demanda altos investimentos. (LOPES, 2013)

Preparo

A cana pode ser recebida na usina na forma de colmos inteiros ou picada. No entanto, esta não é a condição para uma extração eficiente. Por isso, é necessário que seja feita a limpeza e o desfibramento da matéria-prima por meio de facas e/ou martelos giratórios. Através deste preparo espera-se que haja a abertura das células da cana e a formação de uma massa mais homogênea que facilite a extração. (LOPES, 2013)

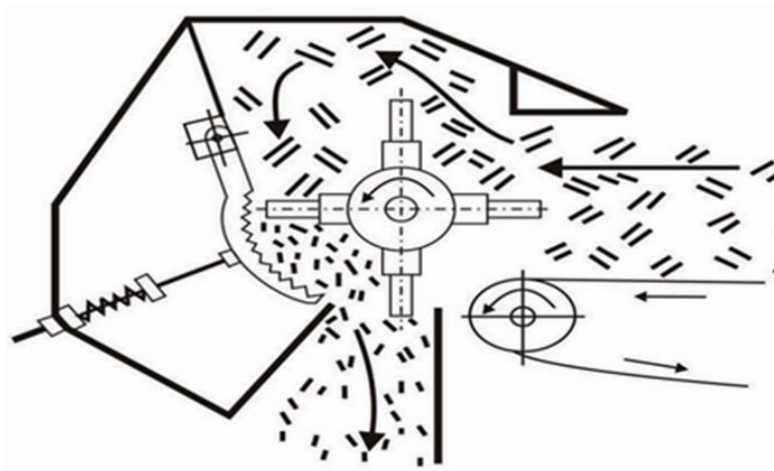
Segundo Lopes (2013), o conjunto de desfibramento é constituído por um sistema de preparo por facas posicionadas sobre uma esteira que conduz o material à extração, onde a cana é previamente picada e, logo após, desfibrada nos martelos giratórios contra uma placa metálica, desagregando as fibras por cisalhamento, conforme as Figuras 1 e 2, respectivamente:

Figura 1 – Jogos de facas posicionadas sobre a esteira de cana.



Fonte: Lopes (2013).

Figura 2 – Conjunto de martelos rotativos que friccionam a cana.



Fonte: Lopes (2013).

3.2 EXTRAÇÃO

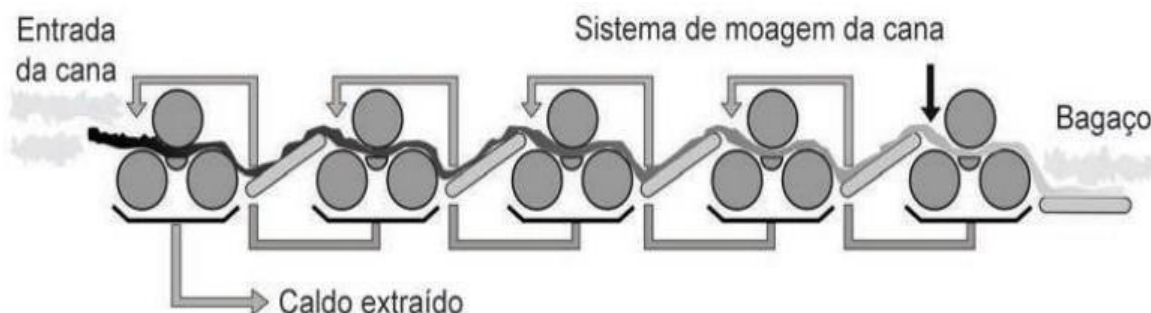
Nas usinas brasileiras, a moenda é o equipamento mais utilizado para a extração do caldo da cana-de-açúcar. Além da moenda, existe a extração feita por difusor contínuo, que já era empregado nas usinas de açúcar de beterraba em países da Europa antes mesmo da Segunda Guerra Mundial. A partir da década de 50, foi adaptado em países como Austrália e África do Sul nas usinas de cana-de-açúcar, e vem se expandindo no Brasil à medida que novas usinas vão sendo instaladas. (LOPES, 2013)

A moagem serve para basicamente separar a fibra do caldo. Esta separação ocorre em um tandem de moagem, que nada mais é do que conjunto de ternos de moagem. (FERNANDES, 2011)

Cada tandem de moagem normalmente possui de quatro a seis ternos, compostos por rolos de dimensões variadas, que através de aplicações sucessivas de pressão expõem o caldo da fibra, conforme a cana já preparada passa por entre os rolos. (PAYNE, 1989)

A Figura 3, a seguir, ilustra um tandem de moagem:

Figura 3 – Tandem de moagem.



Fonte: Lopes (2013).

A eficiência desta operação é determinada pelo número de compressões que são realizadas na passagem entre os rolos, pela pressão mecânica em si impelida no colchão de cana desfibrada, o grau de ruptura que ocorre nas células, a drenagem do caldo e as propriedades físicas intrínsecas da fibra. (PAYNE, 1989)

No intuito de se recuperar a maior quantidade possível de caldo, é necessário adicionar água entre os ternos (embebição). Pois a pressão limita-se a retirar cerca de 90% do caldo existente nas fibras. Assim, a água mistura-se ao caldo, diluindo-o e facilitando a sua retirada. Desta forma, torna-se possível uma recuperação substancial do caldo. (ALBUQUERQUE, 2011; PAYNE, 1989)

Diferentemente do processo de extração via aplicação de pressão, o difusor é um equipamento que se utiliza dos fenômenos de difusão e lixiviação. Enquanto a moenda esmaga a cana, o difusor retira o caldo com água quente (entre 70 a 80 °C), “lavando” a sacarose presente nas células previamente abertas na preparação da cana. (ERENO, 2006; LOPES, 2013)

O mecanismo parte de duas soluções de diferentes concentrações separadas por uma membrana semipermeável ou porosa (células de cana imersas na água), onde estas se misturam até que haja o equilíbrio, difundindo o caldo da cana desintegrada para um fluxo de água em contracorrente. (NAZATO et al, 2011)

Após a extração, o caldo passa por uma etapa de peneiragem em peneiras rotativas para retirar as impurezas mais grosseiras e segue para a clarificação. (RIBEIRO, BLUMER, HORRI, 1999)

3.3 CLARIFICAÇÃO DO CALDO DE CANA

O caldo misto proveniente da extração é recebido na fábrica de açúcar com um aspecto turvo, contendo impurezas indesejáveis solubilizadas e em suspensão. A clarificação é um tratamento composto por diversas etapas de transformação físicas e químicas, cujo principal objetivo é atingir o nível de pH em que as perdas por inversão de sacarose sejam mínimas durante as etapas subsequentes. (PAYNE, 1989)

Ribeiro, Blumer e Horii (1999) destacam ainda que “o objetivo da purificação é obter um líquido claro, límpido e brilhante, através da eliminação das impurezas, sem afetar a sacarose”. (RIBEIRO, BLUMER, HORRI, 1999, p. 31)

Na clarificação, o caldo passa basicamente pelas etapas de aquecimento, sulfo-defecação (sulfitação e caleagem), decantação e filtração, de modo a eliminar as impurezas para promover a limpeza e obtenção de um caldo claro, adequado para ser concentrado e cristalizado nas operações seguintes. (KULKARNI, 2009)

Regeneração

O aquecimento do caldo é realizado em trocadores de calor, geralmente casco e tubos, do tipo vertical / horizontal ou trocadores de placas. São chamados de regeneradores, os quais utilizam-se da recuperação da energia contida numa determinada corrente por pré-aquecimento da mesma, com conseqüente economia de vapor. (REIN,2013)

O caldo é aquecido a aproximadamente 70°C, com a finalidade de:

- Facilitar as reações químicas;
- Promover a desnaturação e coagulação das proteínas;
- Diminuir a densidade e viscosidade;
- Emulsificar graxas e ceras;
- Provocar a floculação;
- Eliminar e impedir o desenvolvimento de bactérias.

Ou seja, o aquecimento acelera o processo químico, aumentando a eficiência da decantação, além de possibilitar a degasagem do caldo. (REIN,2013)

Sulfitação

A sulfitação tem por finalidade reduzir a cor do caldo através da absorção do gás sulfuroso (SO_2). Este gás reage quimicamente com as principais substâncias orgânicas coloridas do caldo, além dos compostos de ferro provenientes do contato com as moendas e tubulações, transformando-os em compostos incolores. (ENGENOVO, 2018)

O efeito da sulfitação reduz o pH do caldo, levando-o a atingir o ponto isoelétrico das moléculas (coagulação), que favorece a formação de precipitado de pequenos cristais de sulfito de cálcio juntamente a caleagem. Estes cristais têm forte atividade superficial, sendo assim um poderoso absorvente das substâncias coloidais do caldo e um forte auxiliar de decantação em razão de sua alta densidade. (ALBUQUERQUE, 2011)

O gás sulfuroso é proveniente da queima do enxofre elementar. Reage com açúcares redutores formadores de agentes corantes e também inibe o escurecimento do açúcar na armazenagem, uma vez que bloqueia grupos carbonilos, fundamentais na formação de caramelos e melanoidinas. (ALBUQUERQUE, 2011; LOPES, 2013)

As reações de formação de cor dos açúcares podem ocorrer através do mecanismo da Reação de Maillard. Esta reação ocorre entre os aminoácidos ou proteínas e os carboidratos presentes no alimento quando aquecidos, onde o grupo carbonila dos carboidratos reage com grupo amina dos aminoácidos ou proteínas. Tanto a glicose quanto a frutose participam dessas reações, combinando-se com os aminoácidos, gerando pigmentos coloridos no caldo, que irão conferir cor ao açúcar. (LIMA, 2012)

Além destas características, a sulfitação possui ação bactericida, uma vez que destrói microrganismos presentes no caldo, reduz a viscosidade do xarope e facilita a cristalização da sacarose. (ALBUQUERQUE, 2011)

Segundo Engenovo (2018), quase a totalidade das usinas optam pelo método de combustão do enxofre em fornos de queima rotativo e sulfitam o caldo pelo método de sulfitação do tipo coluna ou multijatos.

O funcionamento da operação de sulfitação destaca-se também como foco deste trabalho, portanto será detalhada na seção 4.

Caleagem

O caldo sulfitado é enviado ao tanque de caleagem, onde é neutralizado a partir de uma solução de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), ou leite de cal, elevando o pH até um valor final 7. (ANDRADE, VECCHIA, 2009)

A caleagem tem como função neutralizar o pH do caldo, diminuindo assim a perda de sacarose por inversão por acidez. Por conta deste pH, os sais de fosfato e sulfato, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ e CaSO_4 , provenientes da reação com o leite de cal, que precipitam, tornam-se menos solúveis, sendo floculantes que arrastam as partículas em suspensão. Além disso, os ácidos orgânicos presentes no caldo reagem com o leite de cal, precipitando os coloides. (ANDRADE, VECCHIA, 2009)

É comum a adição de ácido fosfórico ou outros produtos fosfatados ao caldo, juntamente à caleagem. Esta prática faz com que o P_2O_5 adicionado forme precipitado de cálcio, que atua como um floculante, ajudando na sedimentação, adsorvendo os não-açúcares e tornando a clarificação mais eficiente na decantação, semelhante ao sulfato de cálcio. (RIBEIRO, BLUMER, HORII, 1999)

A preparação do leite de cal é feita a partir da hidratação da cal virgem (CaO). Este procedimento ocorre em hidratadores, que são tanques subdivididos em duas câmaras: câmara de hidratação e câmara de diluição. Nas câmaras de hidratação, onde o cal é dissolvido com 2 a 3 partes de água, a solução atinge uma concentração de aproximadamente 15 °bé. Nesta prática, é indicada a adição de água quente, para a que se obtenha uma solução com partículas finas. (LOPES, 2013; REIN, 2013)

O leite de cal é então transferido para um classificador helicoidal inclinado ou um mecanismo raspador tipo rastelo, para a separação de impurezas como areia, calcário e sujidades. Em seguida, já livre de impurezas, é então enviado para os tanques de diluição, onde será diluído em concentração aproximada de 7 e 8 °bé. Em seguida é armazenado sob agitação constante para se evitar a decantação da suspensão. (LOPES, 2013; REIN, 2013)

A dosagem do leite de cal no caldo é geralmente feita de maneira contínua, monitorado por um sistema de controle de pH. A seguir, o caldo é enviado aos aquecedores para ser novamente aquecido. (RIBEIRO, BLUMER, HORII, 1999)

Aquecimento

O objetivo aqui é aquecer o caldo a uma temperatura um pouco acima da temperatura de ebulição, permitindo o flasheamento, antes de alimentá-lo aos decantadores. (ALBUQUERQUE, 2011)

Além de proporcionar a expulsão dos gases, promove o aumento da velocidade de floculação e diminui a viscosidade do meio, aumentando desta forma a velocidade da decantação. (OGANDO, 2015)

O aquecimento ainda é feito em sua maior parte em aquecedores do tipo casco-tubo ou aquecedores tubulares, sendo ideal que a temperatura não exceda os 105 °C. (REIN, 2013)

Flasheamento

Segundo Rein (2013), o flasheamento se faz necessário para que a temperatura do caldo seja sempre constante na entrada dos decantadores e para que todo o gás dissolvido seja removido. No flasheamento, todo o ar aprisionado no bagaço ou bagacilho também é eliminado, o que favorece a sedimentação destas partículas na decantação, impedindo que sejam arrastadas com o caldo clarificado.

O flasheamento ou ebulição espontânea consiste na queda de temperatura causada pela exposição de um determinado líquido, que antes se encontrava a uma pressão maior, para outro ambiente que está a uma pressão menor e cujo ponto de ebulição é menor que a temperatura que o líquido se encontrava na condição inicial. (ALBUQUERQUE, 2011, p. 114)

Analogamente, o caldo que se encontra pressurizado pelo bombeamento e aquecido a aproximadamente 110°. À pressão atmosférica, se expande no balão de flash, sofrendo assim uma ebulição espontânea, ou em outras palavras, o caldo perde velocidade e sofre uma auto-ebulição. Desta forma, libera o ar presente no caldo na forma de vapor e atinge a temperatura de aproximadamente 103°C, que corresponde à temperatura de ebulição na pressão atmosférica. (ALBUQUERQUE, 2011; RIBEIRO, BLUMER, HORII, 1999)

Decantação

Após ter sido tratado química e termicamente, o caldo segue para os decantadores. Nesta etapa, o caldo é posto em repouso a fim de se remover as impurezas através da floculação, flotação e sedimentação. O princípio físico de funcionamento da decantação é separar as impurezas menos densas (flotadas) das

mais densas (decantadas), permitindo que o volume a ser clarificado permaneça intermediário às duas fases. (RIBEIRO, BLUMER, HORII, 1999)

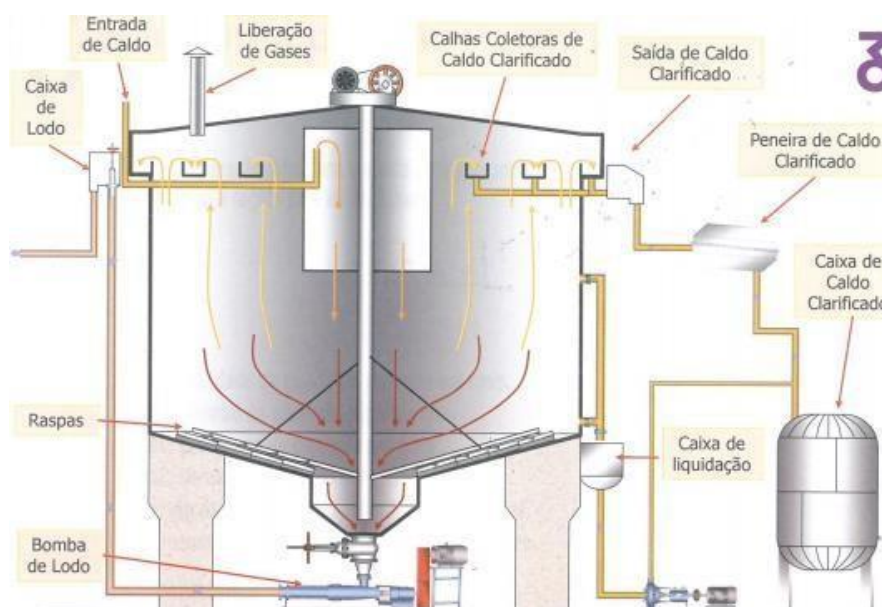
As impurezas do caldo são floculadas a partir da adição de polímero. Este polímero, de alto peso molecular e polaridade negativa, ou seja, aniônico, flocula os sais formados nas etapas anteriores de caleação e fosfatação, que são de polaridade positiva. Desta forma, os flocos já formados são agrupados, tornado-se maiores e mais pesados, acelerando a velocidade decantação dos decantadores. (STEFANI, 2000)

O fluxo de caldo é alimentado maneira contínua no interior do equipamento, o qual deve ser projetado para que a velocidade de escoamento e circulação do caldo possibilitem a sedimentação. (REBELATO, MADALENO, RODRIGUES, 2011) O tempo de residência do caldo pode variar de acordo com o modelo de clarificador, como os conhecidos “Rapi-Dorr” (Dorr-Oliver) e SRI, por exemplo, que podem ter ou não bandeijas, respectivamente. (REIN, 2013)

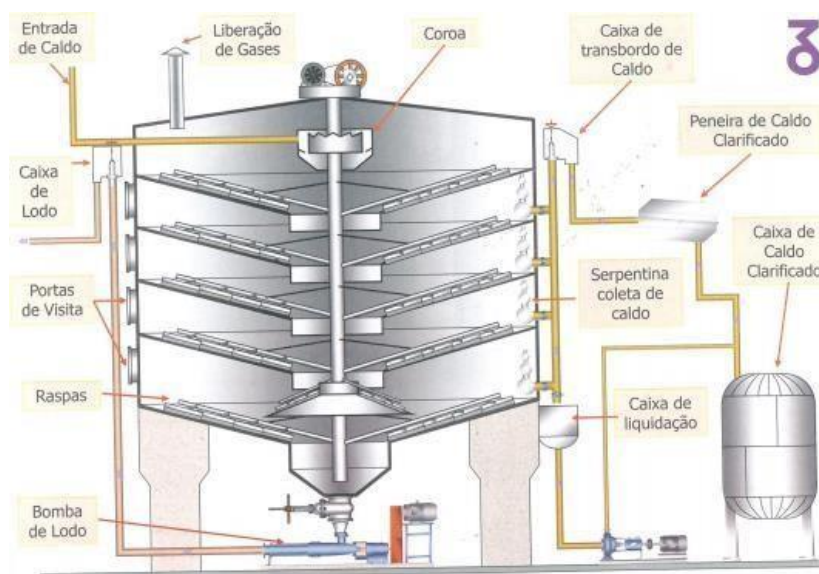
As bandeijas oferecem maior superfície de sedimentação e os sem bandeijas possibilitam uma decantação mais rápida, enquanto o primeiro pode levar cerca de 3 horas, o SRI trabalha em até 60 minutos. (REIN, 2013)

As Figuras 4 e 5 a seguir mostram dois exemplos de decantadores rápidos e convencional (bandeijas), respectivamente:

Figura 4 – Decantador rápido.



Fonte: Módulos Técnicos (Raízen, 2018).

Figura 5 – Decantador convencional

Fonte: Módulos Técnicos (Raízen, 2018).

O caldo clarificado é retirado na parte superior e o lodo na parte inferior, continuamente. O lodo passará por filtros, retirando-se caldo filtrado e torta como resíduo sólido. O caldo filtrado retorna ao processo de decantação e a torta é enviada à lavoura para ser usada como insumo orgânico. (REIN, 2013)

Filtração

Como descrito anteriormente, na seção 3.3.6, o fluxo de lodo que é retirado do fundo dos decantadores é direcionado à filtros para se retirar o caldo ainda existente. Os filtros podem ser do tipo rotativo a vácuo, mesa desaguadora e do tipo prensa LOPES. (2013)

O filtro rotativo a vácuo é constituído por um tambor horizontal, que gira em torno de um eixo, e que fica parcialmente submerso no lodo. Conforme gira, uma camada de torta vai se formando ao redor da tela do filtro, por ação do vácuo. Na parte superior do filtro, há o sistema de lavagem de torta, que são bicos que ejetam água a fim de retirar o açúcar presente no caldo do lodo, arrastando-o no caldo filtrado. (ALBUQUERQUE, 2011)

A seguir, o sistema passa por um alto vácuo que tem a finalidade de secar a torta, aspirando a umidade restante. Por fim, o vácuo é “quebrado” e a torta é retirada por raspas. (ALBUQUERQUE, 2011)

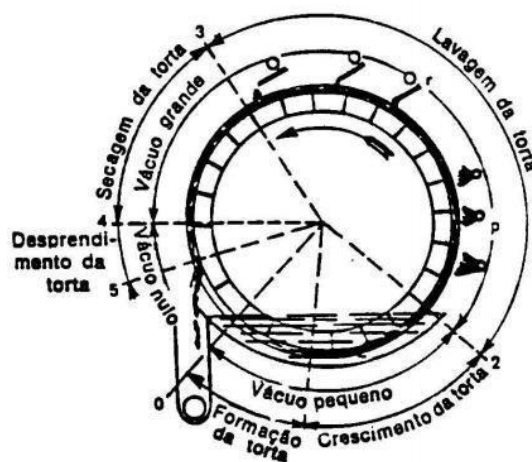
Desta forma, continuamente o lodo é aderido à superfície da tela do filtro, lavado e seco, formando a torta. Esta aderência é possível graças a mistura do

bagacilho proveniente do peneiramento do bagaço da moenda. Neste sistema, o bagacilho é dosado nas caixas de lodo, onde lodo e bagacilho são misturados. Este forma uma espécie de rede de filtração e uma camada consistente, que possibilita a deposição da torta nas telas dos filtros. Caso contrário, o lodo escorreria nas telas sem formar uma camada compacta e as impurezas seriam aspiradas juntamente ao caldo. (ALBUQUERQUE, 2011)

Uma alternativa aos filtros rotativos é a mesa desaguadora e o filtro tipo prensa. No primeiro, o lodo é alimentado sobre uma tela com injeção de água de embebição, onde é filtrado do vácuo durante todo o seu percurso. Em relação ao prensa, em um primeiro estágio o lodo é alimentado também sobre uma tela e é filtrado por ação da gravidade. Em seguida, passa pela ação do vácuo, que aumenta a velocidade de filtração e por fim, passa sendo prensado por duas telas, que se unem comprimindo a torta. O estágio final ocorre nas raspas, as quais retiram a torta da tela. Diferentemente do lodo no filtro rotativo e mesa desaguadora, o lodo no filtro prensa não é misturado ao bagacilho, neste caso, é dosado polímero com o intuito de flocular a sujeira e permitir que o lodo forme camada. (LOPES, 2013)

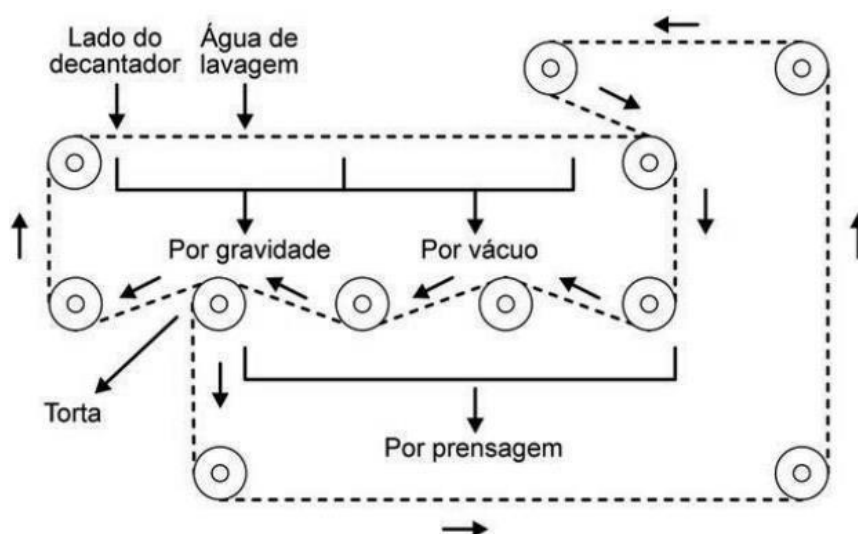
A seguir, as Figuras 6 e 7 mostram exemplos de filtro rotativo e prensa, respectivamente:

Figura 6 – Filtro rotativo contínuo à vácuo.



Fonte: Ribeiro, Blumer e Horii (1999).

Figura 7 – Filtro prensa.



Fonte: Lopes (2013).

Peneiramento

O peneiramento tem por finalidade retirar todo o bagacilho presente no caldo que não foi retirado totalmente na decantação (STEFANI, 2000). A passagem do caldo clarificado é feita através de peneiras rotativas. Este tipo de peneira, segundo Lopes (2013), é bem aceita entre as usinas por reter até 83% das impurezas e por ser de fácil assepsia.

3.4 FABRICAÇÃO DO AÇÚCAR

Evaporação

O princípio da evaporação baseia-se em retirar água através do aquecimento de uma solução a partir do vapor. Desta forma, o vapor advindo da caldeira é alimentado na calandra do evaporador, aquecendo o caldo que transborda através de dutos verticais e escoo pelo centro do equipamento. Ao concentrar a solução, o vapor da calandra perde calor e sai na forma de condensado, obtendo-se vapor vegetal no topo. Este vapor vegetal gerado a partir da água do caldo pode ser reaproveitado para o aquecimento em outros equipamentos ou utilizado em evaporações de múltiplos efeitos. (CASTRO E ANDRADE, 2006)

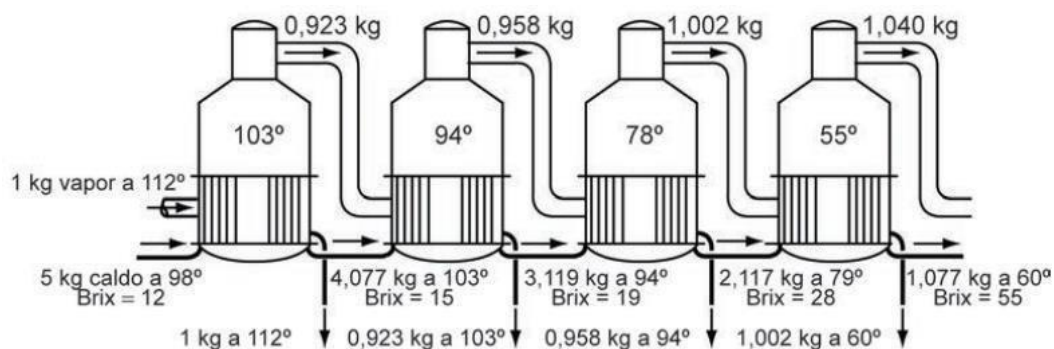
Os evaporadores de múltiplos efeitos operam segundo o princípio de Rillieux, onde se reaproveita o vapor gerado no primeiro efeito para a calefação do próximo evaporador, e assim por diante, onde aproximadamente 1 quilo de vapor é

capaz de evaporar a mesma quantidade em quilos de água igual ao número de efeitos. (CASTRO E ANDRADE, 2006)

Na fabricação de açúcar, normalmente utiliza-se evaporações até o quarto efeito, não ultrapassando o quinto efeito, por ser a quantidade que reduz a temperatura do vapor de entrada inicial (escape) em um nível ideal. É muito importante controlar esta temperatura, pois busca-se evitar a perda de sacarose por inversão e caramelização. (CASTRO E ANDRADE, 2006)

Abaixo está representado na Figura 8 esquemática de um sistema de evaporação com múltiplo efeito:

Figura 8 – Exemplo esquemático de evaporação de múltiplo efeito.



Fonte: Lopes (2013).

Na saída do último efeito obtém-se um caldo concentrado (xarope). Este caldo, que normalmente entra com 15° Brix é concentrado até aproximadamente 70° Brix. Portanto, o caldo após ser evaporado, torna-se um xarope amarelado e mais viscoso. (SANTA CÂNDIDA, 2002)

O fluxo de preparação do xarope se inicia na evaporação e é finalizada na flotação. A etapa de flotação não é obrigatória no processo de produção de açúcar. Contudo é muito comum na produção de açúcar cristal de qualidade. (REIN, 2013)

Flotação

A flotação tem como objetivo separar do xarope substâncias insolúveis que dão cor e pontos pretos ao açúcar. Estes materiais podem ser gomas, dextranas, polissacarídeos e também partículas que passam pela decantação (principalmente o bagacilho), como também fragmentos de incrustação que se desprendem dos evaporadores. (ALBUQUERQUE, 2011)

Neste processo de separação, estão envolvidas as fases sólida, líquida e gasosa, onde os materiais sólidos em suspensão são aderidos a bolhas de ar ou a outro gás, tornando-se menos densos no meio líquido. (MONTE, PERES, 2010)

A flotação de xarope envolve as etapas principais de preparo, ajuste de temperatura, aeração, microfloculação e separação de fases. (ENGENOVO, 2018)

A etapa inicial trata-se de formar flocos com as partículas presentes no meio. Desta forma, é adicionado ácido fosfórico ao xarope para que ocorra a precipitação de microflocos. O ácido fosfórico precipitará o cálcio presente no xarope proveniente da caleação, que se insolubilizaram em solução durante a evaporação e está em suspensão (ENGENOVO, 2018; SANTA CÂNDIDA, 2002). Esses precipitados ajudam a adsorver as outras partículas em suspensão. Após o preparo, pode ser necessário fazer o aquecimento deste xarope para acelerar as reações do meio e reduzir a viscosidade. O sulfito de cálcio também torna-se insolúvel conforme o aumento da temperatura, portanto o aquecimento do xarope viabiliza a retirada deste composto durante a flotação. (ALBUQUERQUE, 2011)

Em seguida, na etapa de aeração, através da adição de microbolhas de ar, que em combinação ao polímero floculante, irão aderir às partículas e torná-las propensas à flotação. Além disto, o sulfito de cálcio possui grande reatividade com o oxigênio, o que também proporciona a sua retirada. (ALBUQUERQUE, 2011)

Por fim, na forma de uma espuma densa, que se acumulará na superfície do tanque flotor, a sua retirada será feita por raspadores mecânicos. Após a remoção dessa espuma, tem-se um xarope isento de partículas e flocos em suspensão pronto para a próxima etapa: a cristalização e cozimento. (ALBUQUERQUE, 2011)

Cozimento e Cristalização

O cozimento consiste em um processo de cristalização da sacarose contida no xarope. O equipamento nada mais é do que um evaporador de simples efeito, que opera sob vácuo e em bateladas, com tubos dimensionados para circular fluidos de viscosidades mais altas. (LOPES, 2013)

No cozedor, em geral são misturados xarope e os méis recuperados do fim do processo, elevando a concentração através do cozimento até 70 e 80 °Brix. (LOPES, 2013)

No cozimento temos o que é chamado de granagem, onde é adicionada a semente (açúcar triturado com álcool), que são microcristais que vão orientar o

crescimento cristais de sacarose até o tamanho desejado, conferindo rapidez e padronização na formação dos cristais. (SANTA CÂNDIDA, 2002)

A massa cozida é então descarregada e enviada ao cristalizador, ou mexedor, onde aguarda para ser separada em cristais de açúcar e mel nas centrífugas. (LOPES, 2013)

Além do cozimento em batelada, é muito comum as usinas trabalharem com outra etapa de cozimento contínuo, ou os chamados tachos contínuos. Normalmente, as usinas trabalham com duas ou três massas, a fim de se recuperar o máximo possível de sacarose dos méis. (LOPES, 2013)

Os tachos são alimentados com semente, xarope e mel das centrífugas de massa A e produzem a massa B, que por sua vez é separada em magma e mel pobre. O magma alimenta o cozimento da massa A juntamente ao xarope e mel rico, fornecendo açúcar e mel rico que continua a alimentar o sistema. (LOPES, 2013)

Centrifugação

As centrífugas compõem uma das últimas etapas de todo o processo de fabricação do açúcar. Nestas, é descarregada a massa cozida, por ação da gravidade, e ao ser submetida à força centrífuga, a massa é então separada em mel e cristais de açúcar. O mel atravessa os furos da tela do cesto do equipamento e os cristais ficam retidos. (RIBEIRO, BLUMER, HORII, 1999)

A depender do tipo do processo, o açúcar pode ser submetido à lavagem com água ou vapor, no intuito de dissolver o mel ainda impregnado nos cristais e desta forma adquirir uma cor mais clara ao açúcar. (RIBEIRO, BLUMER, HORII, 1999)

Secagem e Armazenamento

O açúcar das centrífugas carrega uma umidade inicial de 0,5 a 1%. Isto leva a uma tendência de o açúcar empedrar e sofrer ação microbiológica durante o armazenamento. Portanto, deve ser encaminhado aos secadores para que esta umidade seja baixada a 0,1% ou menos. (LOPES, 2013)

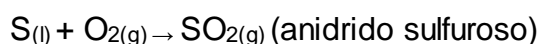
A operação de secagem consiste em um tambor cilíndrico horizontal rotativo, por onde é passado uma corrente de ar quente, que percola os cristais. Após seco, o açúcar é então armazenado a granel ou em sacos e big bags. (LOPES, 2013; RIBEIRO, BLUMER, HORII, 1999)

4 A SULFITAÇÃO

Anteriormente, foram apresentadas as fases de produção do açúcar cristal branco para o melhor entendimento das etapas onde é inserida a Sulfitação, bem como a sua importância. A partir de agora será feito um detalhamento da operação de sulfitação como foco do estudo deste trabalho.

4.1 FUNCIONAMENTO

No modelo de colunas, o enxofre é alimentado no forno através de uma calha vibratória, rosca ou válvula rotativa. Em seguida, é fundido a uma temperatura entre 320 e 350 ° C, onde ocorre a combustão do enxofre e liberação do gás sulfuroso:

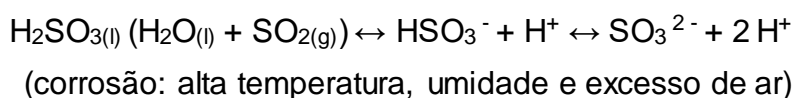
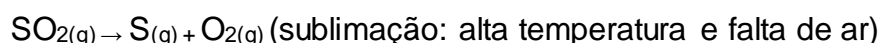


O gás da queima é aspirado através de uma pressão negativa gerada por bicos ejetores instalados na parte superior do aparelho. Em seguida, os gases adentram a câmara de combustão, onde se aumenta o tempo de residência dos gases em contato com o ar, completando as reações de combustão. Conforme o gás é succionado, este é resfriado pela água da camisa de refrigeração, atingindo uma temperatura entre 100 e 200 ° C. O caldo, que entra no topo da torre, desce por gravidade e absorve o gás que ascende em contracorrente por meio de um dispositivo de contato, que podem ser pratos perfurados, bandeijas com borbotores ou chapéu chinês. (HUGOT, 1977; LOPES,2013; PIRACICABA, 2017)

4.2 CONTROLE DA OPERAÇÃO

Na presença de água, o enxofre queima e forma o anidrido sulfúrico (SO₃), que ao reagir novamente com a água se torna ácido sulfúrico. Sendo assim, o anidrido sulfúrico é altamente corrosivo e, além disso, gerador de sulfatos que provocam incrustações nos equipamentos seguintes do processamento, como os evaporadores. Por esse motivo, frequentemente o ar de combustão é seco através da passagem em cal, que absorve a umidade do ar. (HUGOT, 1977; REIN, 2013)

Segundo Engenovo (2018), o controle das temperaturas da sulfitação é importantíssimo, pois a partir disto é possível otimizar a conversão de enxofre em gás sulfuroso, minimizar perdas e subprodutos indesejados de reação. A depender da variação da temperatura na queima do enxofre, pode ocorrer três principais reações:

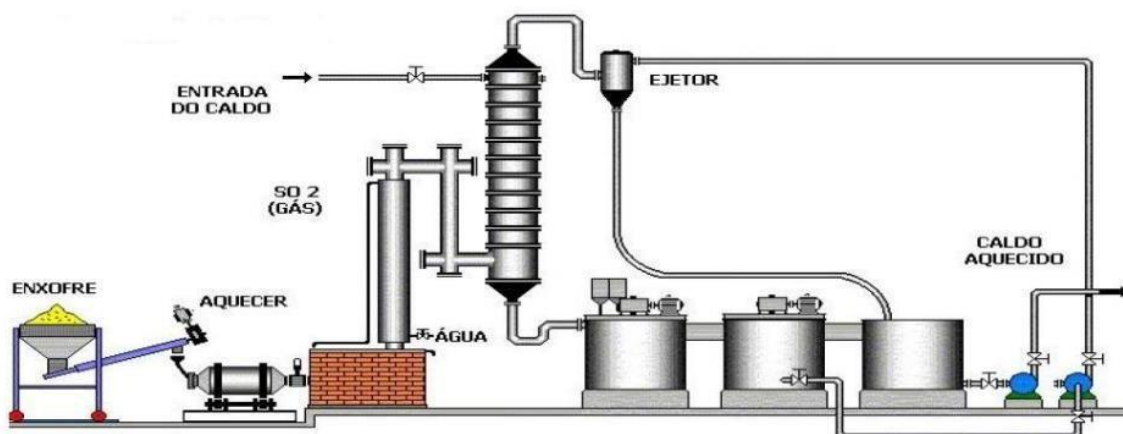


Portanto, para um controle adequado, estima-se que a temperatura do gás na camisa de resfriamento não ultrapasse 230 °C, para se evitar a formação de SO₃, e não inferior a 120 °C, para que não ocorra empedramento do enxofre no equipamento. (ENGENOVO, 2018)

O pH na sulfitação atinge entre 3,2 e 4,5 e quantidade de sulfito em aproximadamente 400 e 700 ppm no caldo. Estes valores vão depender do tipo de açúcar a ser fabricado e da qualidade da cana que é recebida. Canas em época ideal de colheita conferem ao caldo pH entre 5,2 e 5,6. (PIRACICABA, 2017)

A Figura 9 a seguir representa o sistema de sulfitação do caldo misto por coluna:

Figura 9 – Processo de sulfitação de caldo por coluna.

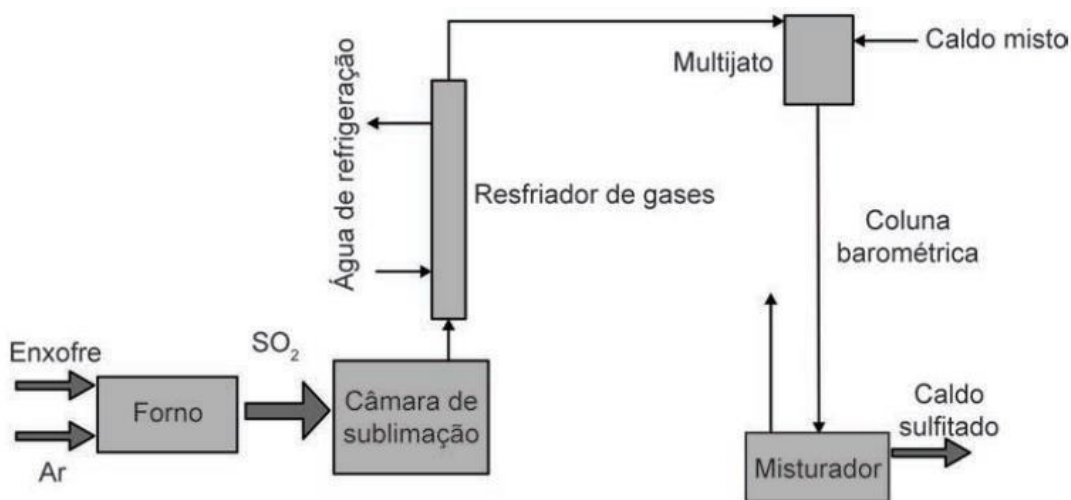


Fonte: Morilla (2015) apud. Geocities (2008).

Depois da sulfitação por coluna, um método bastante utilizado no Brasil é o multijato, onde o gás sulfuroso sai do forno e segue pelas colunas de resfriamento e é succionado pelo vácuo gerado na ejeção do caldo no interior do multijato, realizando a absorção do gás pelo caldo. (LOPES, 2013)

A Figura 10 a seguir ilustra o método de sulfitação do caldo misto por multijato:

Figura 10 – Esquema de sulfitação por multijato.



Fonte: Lopes (2013).

Embora o sistema de sulfitação por multijato seja uma opção com custos de instalação mais baixos, este equipamento é projetado para gerar forte vácuo, e diferentemente da coluna de absorção, não atende positivamente às variações de vazão de caldo das moendas e possui uma capacidade reduzida (PROCKNOR, 1997).

5 ESTUDO DE CASO

A seguir serão descritas as condições de operação da sulfitação como objeto de estudo, em uma usina no interior do Estado de São Paulo que, entre outros tipos, fabrica açúcar do tipo cristal branco. O intuito desta seção é ilustrar as condições de operação no início deste trabalho para, em seguida, ser feito um comparativo com os resultados obtidos a partir das melhorias empregadas ao processo.

Calha Vibratória

As Figuras 11 e 12 abaixo representam as calhas vibratórias, que são dispositivos que dosam a quantidade de enxofre a cair dentro do forno. Conforme o motor vibra, o enxofre que é acumulado na calha é direcionado para cair dentro do funil do forno. O problema deste dispositivo no caso estudado é que não possui fixação, o que interfere na dosagem. Por exemplo: se no painel de controle for colocado para vibrar em 30%, em uma determinada inclinação do motor e logo depois sua inclinação for alterada, a dosagem será maior ou menor do que 30%, alterando o controle da operação.

Figura 11 – Calha vibratória.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 12 – Calço sob motor da calha vibratória.

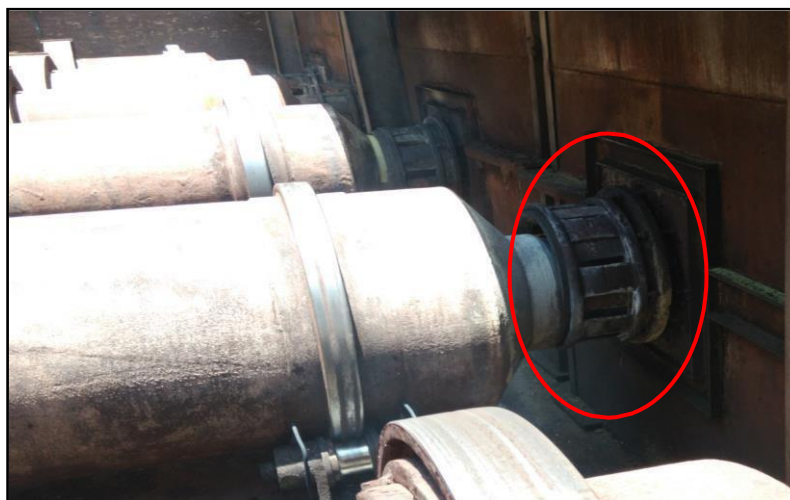


Fonte: Elaborado pela autora.

Entrada de Ar Secundário

A condição da entrada de ar secundário encontrada era ineficiente. Como é possível observar pelas Figuras 13 e 14 abaixo, as entradas estavam quebradas, impossibilitando a regulagem da entrada de ar. A quantidade de ar para a queima é um dos fatores mais importantes para se atingir a temperatura ideal dentro do forno de enxofre e evitar problemas de entupimento por ressublimação do gás, empedrando o enxofre nas diversas partes do equipamento.

Figura 13 – Regulagem da entrada de ar secundário quebrada.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 14 – Regulagem da entrada de ar secundário quebrada substituída por isolamento.



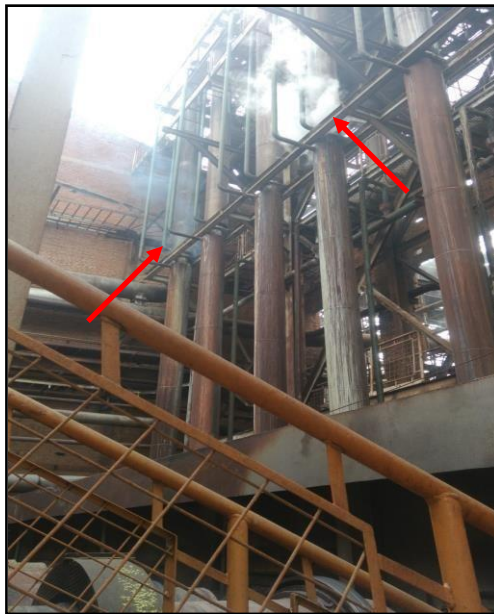
Fonte: Elaborado pela autora.

Vazamento nas Colunas de Gás

As colunas por onde o gás é succionado possuía pontos de vazamento (conforme Figuras 15 e 16), o que além de jogar o gás no ambiente, desperdiça o

enxofre que deveria ser absorvido pelo caldo. Estes pontos também interferem na pressão de sucção do gás e permite a entrada de “falso” no sistema, gerando turbulência dentro da tubulação e podendo fazer com que o gás retorne na parte inferior, através do forno.

Figura 15 – Pontos de vazamento no meio das colunas de gás.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 16 – Gás retornando na entrada do forno rotativo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Válvulas Reguladoras de Água de Resfriamento

A colunas de gás são envoltas por uma camisa de resfriamento em que circula água fria internamente para fazer o resfriamento do gás. As válvulas que fazem a regulagem da vazão dessa água estavam com uma redução no lugar do disco da válvula. Este ajuste fixo prejudicava o resfriamento do gás e a operação. A Figura 17 a seguir mostra a redução que foi retirada de uma das válvulas:

Figura 17 – Redução fixa no lugar do disco da válvula borboleta.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tubulação de Distribuição de Gás da Coluna de Sulfitação

Na coluna de sulfitação existe uma tubulação por onde gás entra e é então distribuído em seu interior. Estas tubulações, na situação em questão, estavam praticamente destruídas pela ação corrosiva do gás. A distribuição uniforme do gás se faz necessária para a sua melhor absorção pelo caldo, pois o que não consegue ser absorvido sairá pelo sistema de exaustão de gás. As Figuras 18 e 19 abaixo mostram o grau de deterioração dessas tubulações.

Figura 18 – Vista interna da tubulação corroída.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 19 – Vista lateral da tubulação corroída.



Fonte: Elaborado pela autora.

Bicos Ejetores

Os bicos são de extrema importância na sulfitação, pois são eles que permitem que através da passagem do caldo gere uma pressão negativa que succionará o gás. É ideal que estes bicos permaneçam limpos para que este processo ocorra de maneira eficaz, pois uma vez obstruídos não realizam a sua função corretamente e o gás acaba voltando pela entrada dos fornos. A Figura 20 a seguir mostra a situação encontrada nos bicos:

Figura 20 – Bico ejetor obstruído.



Fonte: Elaborado pela autora.

Todos os pontos levantados acima prejudicavam a operação de sulfitação, implicando em problemas como: má absorção do gás, diminuição da presença de sulfito no caldo, aumento da acidez do meio – o que permite a alta corrosão dos equipamentos, e aumentava os gastos com insumos.

6 METODOLOGIA

Nesta seção, serão descritas as etapas da metodologia implementada no trabalho. Será explicado de maneira breve o levantamento dos problemas na planta e, em seguida, a metodologia utilizada para a obtenção dos dados laboratoriais.

6.1 LEVANTAMENTO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DA PLANTA

Inicialmente, em campo, foram levantados os principais fatores que poderiam impactar a formação e absorção do gás sulfuroso no caldo.

No prazo de 1 mês, acompanhou-se a sulfitação com a planta em operação e foi possível identificar os problemas relativos à estrutura e às atividades operacionais conforme exposto na seção 5. Diante disto, buscou-se nos 5 meses seguintes de entressafra (período de manutenção da planta), sanar os problemas estruturais, como por exemplo a substituição de tubulações e sanar pontos de vazamento, a fim de se eliminar as variáveis que influenciavam no processo.

Já com a planta novamente em operação, iniciou-se as coletas de amostras para a avaliação do sulfito no caldo. O sulfito é uma medida indireta do gás sulfuroso, desta forma tem-se uma ideia de quanto gás sulfuroso foi absorvido pelo caldo, portanto um parâmetro que se busca controlar no processo.

6.2 METODOLOGIA UTILIZADA PARA OBTENÇÃO DE AMOSTRAS DE CALDO

De 1 em 1 hora, um operador recolhia uma amostra dos caldos sulfitados das colunas 1, 2, 3 e 4, do caldo composto (mistura dos caldos das 4 colunas) e do caldo misto.

O pH dos caldos também era medido em cada uma destas amostras, assim como a temperatura, que era aferida em 3 pontos diferentes: na saída do forno, na saída da câmara de combustão e na saída das colunas de refrigeração. O formulário utilizado para esta coleta de dados está no apêndice A.

6.3 PREPARO DE AMOSTRAS

Antes mesmo de se iniciar a determinação do sulfito em laboratório é necessária a preparação das amostras. Para isso, os caldos passam por uma filtração simples através de algodão em um funil. Desta forma, é possível retirar toda a sujeira grosseira do caldo, como terra e bagacilho.

É importante ressaltar que para preservar os componentes do caldo durante a coleta, o transporte até o laboratório, bem como o tempo de espera até a sua análise, em toda amostra de sulfito é inserido 2 mL de conservante de hidróxido de sódio $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$.

6.4 DETERMINAÇÃO DE SULFITO EM CALDO CLARIFICADO

O sulfito presente na amostra é determinado indiretamente através da sua reação em o iodo, cujo excesso é quantificado com auxílio de uma solução padrão de tiosulfato de sódio, em presença de clorofórmio, no qual é observado o final da titulação, pela mudança da coloração.

Prova em Branco

- Adicionar em frasco Erlenmeyer de 250 mL:
- 50 mL de água deionizada;
- 10 mL de solução de iodeto-iodato $0,0125 \text{ mol.L}^{-1}$;
- 5 mL de clorofórmio P.A;
- 2 mL de ácido clorídrico $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$;
- Tampar e agitar;

Titular o excesso de iodo com solução de tiosulfato de sódio $0,0125 \text{ mol.L}^{-1}$ sempre sob agitação. O ponto final da titulação é observado pela mudança de coloração do clorofórmio, de rosa para incolor, com aspecto leitoso. Anotar o volume V_1 .

Amostra

Adicionar em um frasco de 250 mL:

- 10 mL de amostra V_3 ;
- 50 mL de água deionizada;

- 10 mL de solução de iodeto-iodato 0,0125 mol.L⁻¹;
- 5 mL de clorofórmio P.A;
- 2 mL de ácido clorídrico 0,5 mL;
- Tampar e agitar;

Titular o excesso de iodo com solução de tiosulfato de sódio 0,0125 mol.L⁻¹ sempre sob agitação. O ponto final da titulação é observado pela mudança na coloração do clorofórmio de rosa para incolor, com aspecto leitoso. Anotar o volume V₂.

Cálculo

Após a titulação, utiliza-se a fórmula a seguir para a determinação da quantidade de sulfito presente na amostra de caldo analisada:

$$C = \frac{(V1 \times V2) \times f1 \times 400}{V3}$$

Onde:

branco; C = corresponde à concentração em mg.L⁻¹ de sulfito na amostra;

V1= volume, em mL, de tiosulfato de sódio, gasto na titulação da prova em

V2= volume, em mL, de amostra de caldo clarificado utilizado na titulação;

f1 = fator de correção da solução de tiosulfato de sódio.

7 RESULTADOS E DISCUSSAO

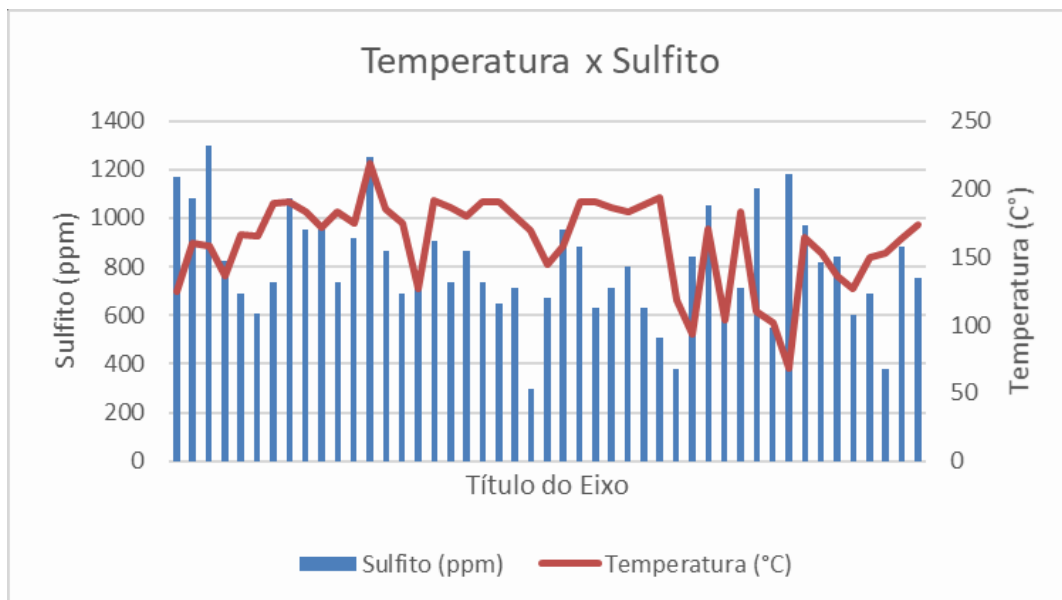
A partir da metodologia aplicada, os resultados obtidos a seguir são de um mês de coleta de dados. Os gráficos mostram resultados que relacionam a cor ICUMSA do açúcar cristal branco e a quantidade de sulfito, em uma análise feita em forma de um comparativo entre as safras 2017 e 2018.

7.1 ANÁLISE DE TEMPERATURA VERSUS SULFITO

De acordo com a avaliação dos formulários aplicados para a coleta dos parâmetros da operação, foi possível observar que a temperatura tem relação direta com a presença do sulfito no caldo nas quantidades esperadas para o processo.

Conforme pode ser observado no Gráfico 2 abaixo, os momentos em que a temperatura após o resfriamento da coluna atingiu valores acima de 150°C, o sulfito no caldo estava em quantidades acima de 600 ppm.

Gráfico 2 – Relação entre a temperatura e a quantidade de sulfito presente no caldo.



Fonte: Elaborado pela autora

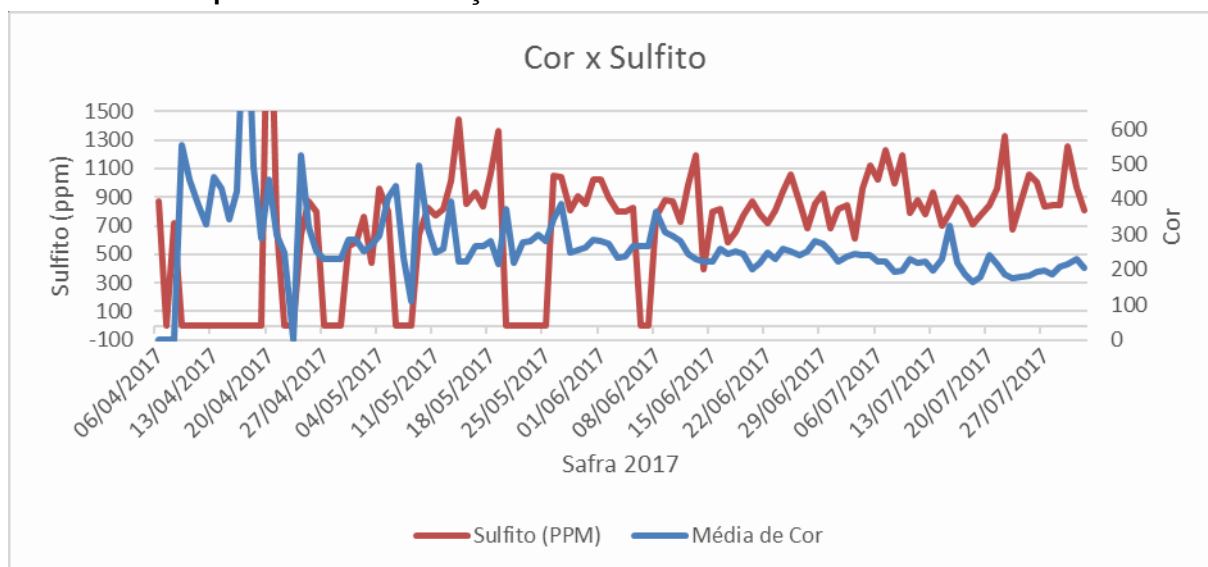
7.2 ANÁLISE DE COR *VERSUS* SULFITO

De acordo com o Gráfico 2 abaixo, é possível observar que a cor do açúcar branco atinge valores altíssimos e tem até mesmo um pico acima de 1000 ICUMSA. No início de safra, como os equipamentos estão sendo iniciados e o processo ainda não está estável, é comum este descontrole, porém, durante o ano safra 2017, a cor praticamente manteve-se acima dos 200 ICUMSA de cor.

Em relação ao sulfito, o gráfico mostra que na maior parte dos meses de safra este parâmetro ficou acima dos 700 ppm, também atingindo picos acima de 1000 ppm. É possível ainda desprender deste gráfico o entendimento de um consumo elevado e desnecessário de enxofre e uma cor desenquadrada para açúcar branco cristal.

Além disso, no gráfico é possível ver que o controle destes dois parâmetros não se mantém em uma faixa, indicando grandes oscilações, o que não é benéfico para o processo.

Gráfico 3 – Comparativo de cor do açúcar *versus* sulfito no caldo na safra do ano de 2017.



Fonte: Elaborado pela autora.

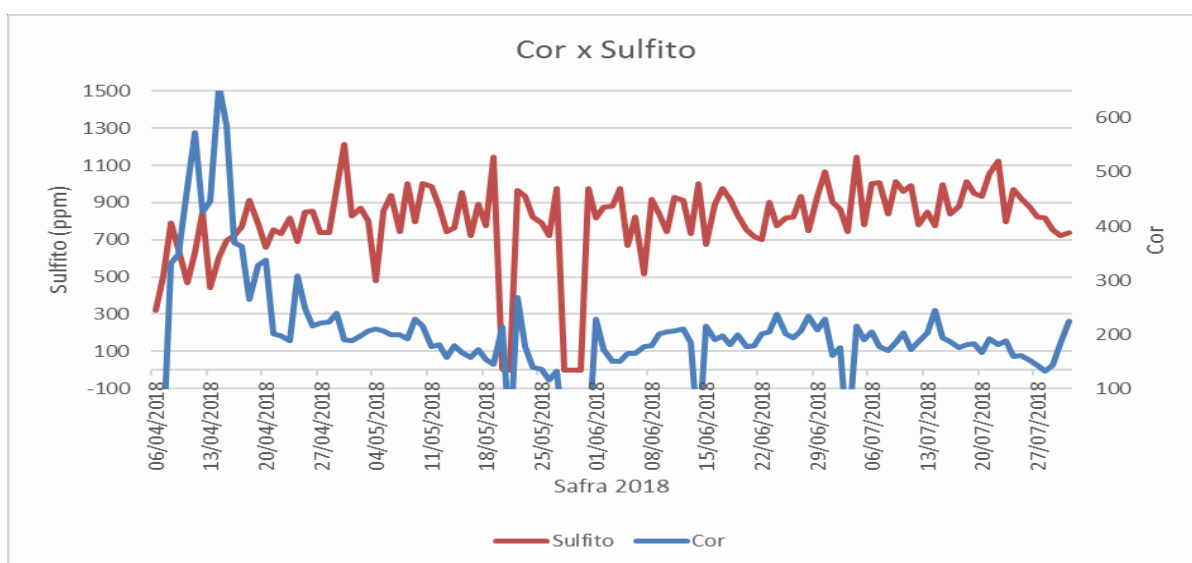
De acordo com o gráfico do ano safra 2018, é possível observar que a cor do açúcar atinge picos acima de 660, também indicando a partida do processo, e na maior parte da safra 2018 segue dentro da faixa de 150 a 250. Em relação ao sulfito, o gráfico mostra que na maior parte dos meses desta safra este parâmetro ficou na

faixa entre 700 e 950 ppm. É possível ainda ver a relação de um sulfito controlado e uma cor de açúcar reduzida.

Houve uma melhora em relação ao controle da cor e do sulfito dentro das faixas mais próximas das aceitáveis para estes parâmetros de processo.

Abaixo está representado o Gráfico 3 do ano safra 2018, que leva em conta as alterações feitas no processo durante o estudo:

Gráfico 4 – Comparativo de cor do açúcar versus sulfito no caldo na safra do ano de 2018.

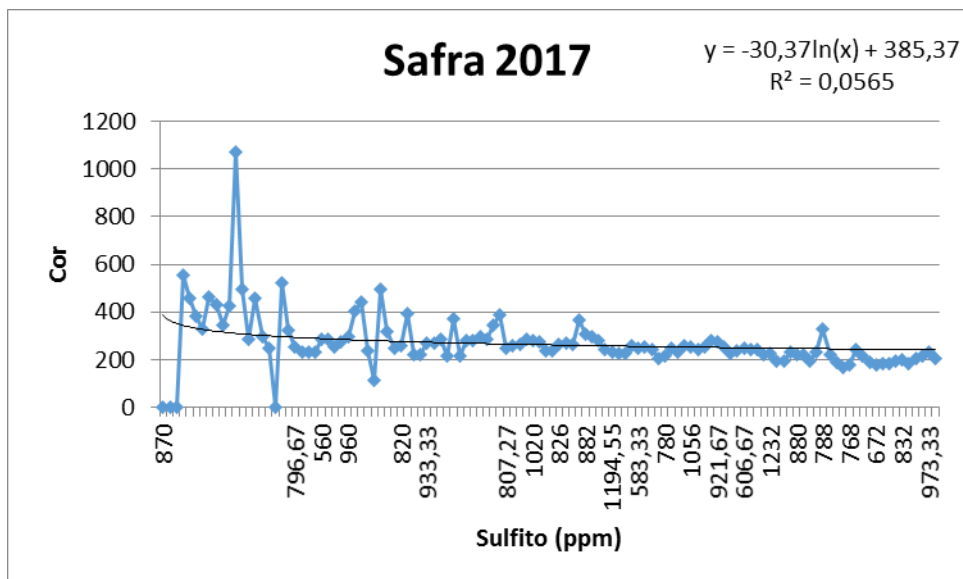


Fonte: Elaborado pela autora.

Os gráficos 4 e 5 a seguir mostram a relação entre a dosagem de sulfito no processo e o reflexo na cor do açúcar final:

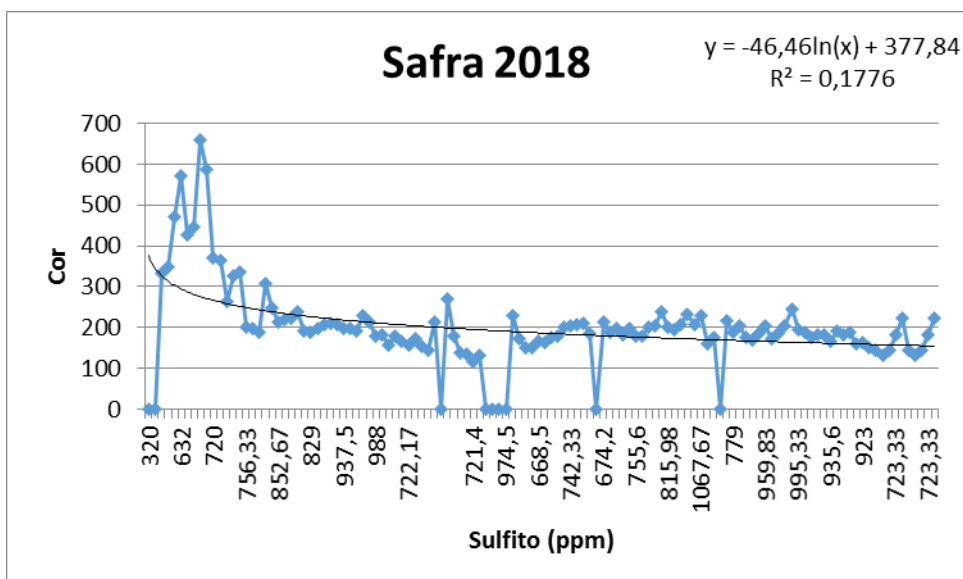
Fazendo um comparativo entre os dois gráficos abaixo, percebe-se o sulfito atuante na cor do açúcar e uma melhora no coeficiente de determinação, R^2 , no ano de 2018 com o acompanhamento aplicado ao processo.

Gráfico 5 – Demonstrativo de relação entre as variáveis cor do açúcar e sulfito na safra do ano de 2017.



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 6 – Demonstrativo de relação entre as variáveis cor do açúcar e sulfito na safra do ano de 2018.



Fonte: Elaborado pela autora.

7.3 MELHORIAS DO PROCESSO

Conforme elucidado na revisão bibliográfica, uma sulfitação eficiente depende de vários fatores como a temperatura, a dosagem, a condição dos equipamentos e o controle utilizados.

Diante disto, além do acompanhamento do processo em campo para a obtenção dos dados em laboratório, algumas modificações foram realizadas nos equipamentos conforme foram sendo levantadas as dificuldades operacionais.

A seguir estão descritas as condições de operação no ano de 2017 e as mudanças realizadas durante a entressafra 17/18.

Entrada de Ar Secundário:

A entrada de ar secundário é de extrema importância, pois é a partir dela que a queima do enxofre é controlada, e, conseqüentemente, a temperatura ideal é atingida. Diante da necessidade de se melhorar a regulagem de ar, foram modificadas as entradas dos fornos por caixas quadradas com uma abertura, conforme a Figura 21 abaixo, de forma que a regulagem possa ser feita de maneira mais fácil e eficaz pelo operador.

Figura 21 – Modificação na entrada de ar secundário dos fornos rotativos.



Fonte: Elaborado pela autora.

Pontos de Vazamento de Gás

Havia pontos nas colunas de gás que estavam danificados e apresentando vazamentos. Estes vazamentos aumentavam a perdas na quantidade de gás a ser absorvido, bem como influenciavam na pressão de sucção interna na coluna, pois desta forma permitiam a entrada de ar falso e geravam turbulência, podendo causar o retorno do gás através dos fornos. A Figura 22, a seguir, ilustra a condição das colunas após manutenção.

Figura 22 – Manutenção nas colunas de gás para sanar vazamentos.



Fonte: Elaborado pela autora.

Válvulas de Água de Resfriamento das Colunas de Gás

As válvulas que regulam a vazão de água de resfriamento das colunas de gás estavam sem regulagem. No interior da válvula existia uma redução, que mantinha fixa a vazão de água. Diante da necessidade de controlar a temperatura de resfriamento, todas as válvulas foram substituídas, garantindo assim a regulagem da vazão de água e melhor controle de temperatura do gás. Abaixo estão as Figuras 23 e 24 que ilustram as válvulas que foram substituídas nas colunas.

Figura 23 – Exemplo de uma válvula apropriada para a regulagem da vazão de água de resfriamento.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 24 – Local de substituição das válvulas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tubulação Interna de Distribuição de Gás da Coluna de Sulfitação

Devido à ação do gás sob condições não ideais de operação, a tubulação interna de distribuição de gás estava corroída e precisou ser substituída. Desta forma, o gás passou a ser absorvido de uma maneira mais uniforme, melhorando a sulfitação. A Figura 25 abaixo mostra como deve ser a tubulação de distribuição de gás.

Figura 25 – Substituição de tubulações novas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Frequência de Limpeza dos Bicos Ejetores

Conforme a Figura 26, a seguir, os bicos ejetores passaram a ser limpos a cada três dias, que é uma média de limpeza aceitável para mantê-los limpos e em condições de operação.

Figura 26 – Bico limpo.



Fonte: Elaborado pela autora.

8 CONCLUSÃO

A partir do estudo de caso realizado foi possível identificar diversos pontos de melhoria na operação de sulfitação da Usina em questão. Os problemas estruturais apontados impactavam na formação e absorção do gás sulfuroso no caldo e com as melhorias aplicadas percebeu-se a melhora na quantidade de sulfito presente nas amostras analisadas.

Foi possível observar também que a temperatura é um parâmetro de forte influência na reação, pois quando se atinge a temperatura acima dos 150 °C após o resfriamento do gás, a sulfitação se dá de maneira mais eficiente, ultrapassando os 600 ppm, que é valor mínimo trabalhado na operação.

Em relação a cor do açúcar, identificou-se que na safra do ano de 2017 não era feito um controle da dosagem do enxofre e entendeu-se que não era feito um acompanhamento do enquadramento da cor neste ano, conforme é possível observar pelo histórico do gráfico 3, que apresenta cores altíssimas para o açúcar final, ultrapassando a faixa de 600 ICUMSA. E, neste sentido, a importância deste trabalho também se revela, uma vez que na safra de 2018 houve um melhor controle do enquadramento da cor e maior conscientização dos operadores da Sulfitação em relação a dosagem do enxofre e acompanhamento da temperatura em todas as etapas da operação.

De acordo com o estudo, observou-se que a dosagem do enxofre ainda é feita de maneira manual, onde o operador determina a intensidade da calha vibratória. Uma sugestão de melhoria seria aplicar a mesma metodologia durante alguns meses e buscar elaborar uma escala de porcentagem de vibração para uma determinada dosagem, que atinja os níveis de sulfito desejados de acordo com a operação. Desta forma o controle do sulfito no caldo seria feito de maneira mais controlada e a cor do caldo se enquadraria com maior estabilidade.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Fernando M. **Processo de fabricação do açúcar**. 3. ed. Recife: Editora Universitária UFPE, 2011.

ALVAREZ, F. J.; CARDENTY. Pratical aspects of the control of dextran at Atlantic Sugar Association. **Int. Journal Sugar**, v.90, n.1078, p.182-184, 1988.

ANDRADE, Antonio Roberto P. De; VECCHIA, Tercio M. D. **Curso de especialização em gestão e tecnologia industrial no setor sucroalcooleiro: Tratamento de Caldo**. Reunion, 2009. Disponível em: <<http://www.reunion.eng.br/download/Reunion%20Engenharia%20%20Tratamento%20de%20Caldo%20-%2019%2010%2009.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

BASHARI, Mohamad et al. Impacto f Dextranase on Sugar Manufacturing and its kinetic on the Molecular Weights of Remaining Dextran. **Sugar Tech**,v.15, n1, p.84-93, jan-mar. 2013.

BOSCARIOL, Fernando. C. DRD - Dedini Refinado Direto. **Revista Opiniões**. v. 6, n. 16, 2005. Disponível em: <<https://revistaonline.revistaopinioes.com.br/revistas/suc/55/#page/30>>. Acesso em: 12/10/2018.

DOHERTY, W. O. S.; RACKEMANN, D. W. Stability of sugarcane juice – a preliminary assessment of the colorimetric method used for phosphate analysis. **Zuckerindustrie**, v. 133, n. 1, p. 24-30, 2008.

CASTRO, Sebastião B.; ANDRADE, Samara A. C. A. **Engenharia e Tecnologia Açucareira**. Universidade Federal de Pernambuco, Departamento Engenharia Química, CTG, 2006.

ENGENOVO. **Sulfitação**. Disponível em: <<http://www.engenovo.com.br/pt/artigostecnicos/sc.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2018.

ENGENOVO. **Clarificação de xarope por flotação**. Disponível em: <<http://www.engenovo.com.br/pt/artigostecnicos/fxc.pdf>>. Acesso em: 28 de abr. de 2018.

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

KIM, Du W.; DAY, Donal. F. Determination of dextran in raw sugar process streams. **Food Science and Biotechnology**, v.13, n2, p.248-252, abr. 2004.

LIMA, Roberta B. **Processo de clarificação do caldo de cana-de-açúcar aplicando elétrons acelerados**. 2012. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear- Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia Associada à Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

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

MACHADO, Simone S. **Tecnologia da fabricação do açúcar**. Universidade Federal de Santa Maria. Inhumas, 2012.

MARTINS, N.G.S. **Os fosfatos na cana-de-açúcar**. 2004. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2004.

MATSUOKA, S. Relatório anual do programa de melhoramento genético da cana-de-açúcar. Araras: UFSCar, CCA, DBV, 2000.

MONTE, Marisa M. B. de; PERES, Antônio C. E. **Tratamento de Minérios: química de superfície na flotação**. 5 ed. Rio de Janeiro, CETEM, 2010. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/743/1/CCL00320010.pdf>. Acesso em: 29 de abr. de 2018.

MORILLA, Cecília H. G. **Viabilidade econômico-financeira da substituição do dióxido de enxofre pelo peróxido de hidrogênio na cadeia produtiva do açúcar**. 2015. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2015.

NAZATO, C. et al. Moenda x Difusor: diferentes pontos de vista sobre o assunto. **Bioenergia em Revista: Diálogos**, Piracicaba, v. 1, n. 1, jan-jun.2011. Disponível em: <<http://fatecpiracicaba.edu.br/revista/index.php/bioenergiaemrevista/article/view/20/15>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

OGANDO, Felipe I. B. **Estudo da degradação térmica de sacarose e da contaminação microbiológica no processo de fabricação do açúcar.** 2015. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Microbiologia Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2015.

PAIVA, Luciana; RUIZ, Leonardo; SOBCSAK, Adair. Como as impurezas vegetais impactam na indústria sucroenergética? **Revista Canaonline**, ago. 2015. Disponível em: <<http://www.canaonline.com.br/conteudo/como-as-impurezas-vegetais-impactam-na-industria-sucroenergetica.html#.WtuD2C7wbIU>>. Acesso em 03/03/2018.

PAYNE, John H. **Operações unitárias na produção de açúcar de cana.** 2. ed. São Paulo: Nobel/STAB, 1989.

PIRACICABA ENGENHARIA SUCROALCOLEIRA. **A Sulfitação dos Caldos de Cana.** 2017. Disponível em: <<http://piracicabaengenharia.com.br/2017/a-sulfitacao-dos-caldos-de-cana/>>. Acesso em: 09 mar. 2018.

RAÍZEN. Módulos Técnicos. **Fabricação de açúcar.** Barra Bonita, 2018.

REBELATO, Marcelo G.; MADALENO, Leonardo Lucas; RODRIGUES, Andréia M. Um estudo sobre a aplicabilidade do sistema puxado de produção na fabricação de açúcar. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, v.07, n. 01: p. 228-246, 2011. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/revistagi/article/view/673>>. Acesso em: 11 jun. 2018.

REIN, Peter. **Engenharia do Açúcar de Cana.** Berlim: Verlag Dr. Albert Bartens Kg, 2013.

RIBEIRO, Carlos; BLUMER, Solange; HORII, Jorge. **Apostila: Fundamentos de Tecnologia Sucroalcooleira.** Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1999. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4053772/mod_resource/content/1/Apostila%20de%20tecnologia%20do%20a%C3%A7%C3%BAcar.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2018.

SANTA CÂNDIDA AÇÚCAR E ÁLCOOL LTDA. Treinamento industrial. **Fabricação de açúcar.** Bocaína, jan. 2002.

SOLOM, S. Post-harvest deterioration of sugarcane. **Sugar Tech**, v.11, n2, p.109-123, mai. 2009.

STEFANI, Paulo R. **Apostila de tratamento de caldo para açúcar**. Sugar Consultoria e Projetos. Março, 2000.

STUPIELLO, J.P. A cana-de-açúcar como matéria-prima. In: PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar: Cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, v. 2, 1987. p. 761-804.

APÊNDICE A - Formulário de acompanhamento de parâmetros

APLICAÇÃO DO FORMULÁRIO DE ACOMPANHAMENTO DE PARÂMETROS PARA COLETA DE DADOS

DATA: ___/___/___ HORA: ___:___ VAZÃO: SUÍFITO:	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 5%;">Nº</th> <th style="width: 20%;">Ponto de aferição de temperatura</th> <th style="width: 15%;">Temperatura °C</th> <th style="width: 20%;">Ponto de aferição de temperatura</th> <th style="width: 15%;">Temperatura °C</th> <th style="width: 20%;">Ponto de aferição de temperatura</th> <th style="width: 15%;">Temperatura °C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td>Pescoço</td> <td></td> <td>Saída da câmara de combustão</td> <td></td> <td>Saída da coluna de resfriamento</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td>Pescoço</td> <td></td> <td>Saída da câmara de combustão</td> <td></td> <td>Saída da coluna de resfriamento</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td>Pescoço</td> <td></td> <td>Saída da câmara de combustão</td> <td></td> <td>Saída da coluna de resfriamento</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">4</td> <td>Pescoço</td> <td></td> <td>Saída da câmara de combustão</td> <td></td> <td>Saída da coluna de resfriamento</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">5</td> <td>Pescoço</td> <td></td> <td>Saída da câmara de combustão</td> <td></td> <td>Saída da coluna de resfriamento</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">6</td> <td>Pescoço</td> <td></td> <td>Saída da câmara de combustão</td> <td></td> <td>Saída da coluna de resfriamento</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Nº	Ponto de aferição de temperatura	Temperatura °C	Ponto de aferição de temperatura	Temperatura °C	Ponto de aferição de temperatura	Temperatura °C	1	Pescoço		Saída da câmara de combustão		Saída da coluna de resfriamento		2	Pescoço		Saída da câmara de combustão		Saída da coluna de resfriamento		3	Pescoço		Saída da câmara de combustão		Saída da coluna de resfriamento		4	Pescoço		Saída da câmara de combustão		Saída da coluna de resfriamento		5	Pescoço		Saída da câmara de combustão		Saída da coluna de resfriamento		6	Pescoço		Saída da câmara de combustão		Saída da coluna de resfriamento	
Nº	Ponto de aferição de temperatura	Temperatura °C	Ponto de aferição de temperatura	Temperatura °C	Ponto de aferição de temperatura	Temperatura °C																																												
1	Pescoço		Saída da câmara de combustão		Saída da coluna de resfriamento																																													
2	Pescoço		Saída da câmara de combustão		Saída da coluna de resfriamento																																													
3	Pescoço		Saída da câmara de combustão		Saída da coluna de resfriamento																																													
4	Pescoço		Saída da câmara de combustão		Saída da coluna de resfriamento																																													
5	Pescoço		Saída da câmara de combustão		Saída da coluna de resfriamento																																													
6	Pescoço		Saída da câmara de combustão		Saída da coluna de resfriamento																																													
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="4" style="text-align: center;">% abertura válvulas de caldo</th> </tr> <tr> <th style="width: 25%;">1</th> <th style="width: 25%;">2</th> <th style="width: 25%;">3</th> <th style="width: 25%;">4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="height: 20px;"></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>ph caldo misto pH caldo composto</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="4" style="text-align: center;">pH das colunas</th> </tr> <tr> <th style="width: 25%;">1</th> <th style="width: 25%;">2</th> <th style="width: 25%;">3</th> <th style="width: 25%;">4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="height: 20px;"></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	% abertura válvulas de caldo				1	2	3	4					pH das colunas				1	2	3	4					<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="6" style="text-align: center;">% de dosagem de enxofre</th> </tr> <tr> <th style="width: 16.6%;">Forno 1</th> <th style="width: 16.6%;">Forno 2</th> <th style="width: 16.6%;">Forno 3</th> <th style="width: 16.6%;">Forno 4</th> <th style="width: 16.6%;">Forno 5</th> <th style="width: 16.6%;">Forno 6</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="height: 20px;"></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	% de dosagem de enxofre						Forno 1	Forno 2	Forno 3	Forno 4	Forno 5	Forno 6													
% abertura válvulas de caldo																																																		
1	2	3	4																																															
pH das colunas																																																		
1	2	3	4																																															
% de dosagem de enxofre																																																		
Forno 1	Forno 2	Forno 3	Forno 4	Forno 5	Forno 6																																													