

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

Gustavo Arnaldo Rodrigues

**ANÁLISE DA RECUPERAÇÃO DE AÇÚCARES REDUTORES TOTAIS NA ETAPA  
DE FILTRAÇÃO DE UMA USINA SUCROALCOOLEIRA**

São Carlos – SP

2022

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

Gustavo Arnaldo Rodrigues

**ANÁLISE DA RECUPERAÇÃO DE AÇÚCARES REDUTORES TOTAIS NA ETAPA  
DE FILTRAÇÃO DE UMA USINA SUCROALCOOLEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química na Universidade Federal de São Carlos.

Orientação: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Fernanda Perpétua Casciotori

São Carlos – SP

2022

## FOLHA DE ROSTO

Rodrigues, Gustavo Arnaldo

Análise da recuperação de açúcares redutores totais na etapa de filtração de uma usina sucroalcooleira / Gustavo Arnaldo Rodrigues -- 2022.

44f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Fernanda Perpétua Casciotori

Banca Examinadora: Fábio Bentes Freire, Clarissa

Hamaio Okino

Bibliografia

1. Usina Sucroalcooleira. 2. Filtração. I. Rodrigues, Gustavo Arnaldo. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

## DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Gustavo Arnaldo Rodrigues****ANÁLISE DA RECUPERAÇÃO DE AÇÚCARES REDUTORES TOTAIS NA ETAPA  
DE FILTRAÇÃO DE UMA USINA SUCROALCOOLEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química na Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 12 de Setembro de 2022.

Orientadora

---

Dr.<sup>a</sup> Fernanda Perpétua Casciotori  
UFSCar - DEQ

Examinador

---

Dr. Fábio Bentes Freire  
UFSCar - DEQ

Examinadora

---

Dr.<sup>a</sup> Clarissa Hamaio Okino  
ESALQ

## **DEDICATÓRIA**

Dedico aos meus pais, que tornaram este trabalho possível.

## **AGRADECIMENTO**

Aos meus pais, Regina e Edson, que são os pilares da minha vida, meus maiores exemplos e que permitiram e forneceram o que era necessário ao longo de minha jornada

À minha avó Leonor, que é minha grande figura de inspiração

Aos meus amigos de Araras, que me acompanham ao longo da vida e estão sempre presentes e disponíveis nos meus momentos altos e baixos

Aos meus amigos de São Carlos, que me acompanharam durante meu período na cidade e fizeram meus dias mais leves e proveitosos

Aos meus colegas de trabalho, da Raízen e da Pentagro, que me auxiliaram com seu conhecimento na área

À professora Fernanda, pelo auxílio e orientação no desenvolvimento deste trabalho

## RESUMO

RODRIGUES, Gustavo Arnaldo. **Análise da Recuperação de Açúcares Redutores Totais na Etapa de Filtração de uma Usina Sucroalcooleira**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de São Carlos, *campus* São Carlos, São Carlos, 2022.

O Brasil é o maior produtor de cana de açúcar do mundo, com mais de 654 milhões de toneladas colhidas no ano de 2021. No mesmo ano, foram produzidos 35 milhões de toneladas de açúcar e 26,8 bilhões de litros de etanol. Dado o volume da produção, perdas no processo resultam em grandes prejuízos financeiros. Dentre as macro etapas do processo está o tratamento do caldo, que busca eliminar sólidos insolúveis e contribuir com a qualidade final dos produtos. A etapa de filtração é a última do tratamento, onde o lodo advindo da etapa de decantação é filtrado para recuperação dos açúcares redutores totais (ART). É necessário um controle e dimensionamento adequado para que o efeito da perda na torta seja o menor possível. Sendo assim, o devido trabalho teve como objetivo avaliar a recuperação do ART a partir de diferentes cenários da unidade, que conta com quatro filtros rotativos à vácuo e um filtro prensa desaguadora. Nos cenários foi variado a ocupação dos filtros e, posteriormente, obteve-se a quantidade de ART perdido na torta de filtro, a perda na torta percentual e o retorno financeiro. Comparando com o cenário mais eficiente, onde ambos os filtros estavam abaixo da ocupação, o cenário no qual os filtros rotativos estavam com a capacidade excedida em 25,06% apresentou perda na torta de 0,137%, resultando em um prejuízo financeiro de R\$ 1.202.522,08 reais durante a safra. Já no cenário onde o filtro prensa estava 12,82% acima de sua capacidade, a perda na torta foi de 0,031% e o prejuízo no ano safra foi de R\$ 272.699,18. Finalmente, foi possível concluir que a maneira mais vantajosa de se conduzir a etapa de filtração é com os filtros abaixo de sua capacidade máxima, com a ressalva de que existem outras avaliações que devem ser realizadas antes de sugerir um investimento de ampliação na seção.

Palavras-chave: Cana de açúcar. Indústria sucroalcooleira. Tratamento de Caldo. Filtração. Filtro rotativo à vácuo. Filtro prensa desaguadora. Açúcares redutores totais.

## RESUMO EM LÍNGUA ESTRANGEIRA

RODRIGUES, Gustavo Arnaldo. **Recovery Analysis of Total Reducing Sugars in Filtering Stage of a Sugarcane Plant.** 2022. Undergraduate thesis –Federal University of São Carlos, São Carlos *campus*. São Carlos, 2022.

Brazil is the largest sugarcane producer of the world, with more than 654 millions tons harvested in the year of 2021. In the same year, were produced 35 millions tons of sugar and 26,8 billions liters of ethanol. Due to the production size, losses in process results in big financial damage. Among the process macro steps are the juice treatment, that seeks to eliminate insoluble solids and contribute with the product's final quality. The filtration is the last part of the treatment, which the mud that came from the clarifier is filtered aiming to recover total reducing sugars (TRS). An adequate control and sizing are necessary to minimize the effects of losses in filtered mud. Thus, this work's goal was to evaluate the recuperation of TRS from different scenarios in the unit, which has four rotary vacuum filters and one vacuum belt filter. In the scenarios, the occupancy of the filters was varied and, posteriorly, the amount of TRS, the filter loss and the financial recovery were calculated. Comparing with the most efficient scenario, where both filters was under full capacity, the scenario in which the rotary filters where 25,06% above capacity, presented mud filter loss of 0,137% resulting in a financial loss of R\$ 1.202.522,48 during the harvest. In the scenario where the belt filter was 12,82% above its capacity, the mud filter loss was 0,031% and the financial loss in the harvest was R\$272.699,18. Finally, it was possible to conclude that the advantageous way to conduct the filtering process is with the filter below its maximum capacity. It is important to emphasize that are other evaluations that must be accomplished before suggesting an investment in the sector.

Keywords: Sugarcane. Sugar and alcohol industry. Juice treatment. Filtration. Rotary vacuum filter. Vacuum belt filter. Total reducing sugars.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> - Representação das Operações Unitárias da Etapa de Sulfitação .....	13
<b>Figura 2.2</b> - Representação dos tanques de preparo do leite de cal .....	15
<b>Figura 2.3</b> - Vistas de um Aquecedor (a) Lateral; (b) Superior.....	16
<b>Figura 2.4</b> - Estrutura Química da Poliacrilamida Parcialmente Hidrolisada .....	17
<b>Figura 2.5</b> - Funil para Aplicação de Polímeros.....	18
<b>Figura 2.6</b> - Representação esquemática dos dois principais tipos de decantadores: (a) de bandeja ou Dorr-Oliver; (b) rápidos SRI.....	20
<b>Figura 2.7</b> - Filtros rotativos instalados em uma unidade industrial .....	21
<b>Figura 2.8</b> - Esquema de operação de um Filtro Rotativo .....	22
<b>Figura 2.9</b> - Filtro Prensa Desaguadora.....	23
<b>Figura 2.10</b> - Esquema de Operação de um Filtro Prensa Desaguadora .....	24
<b>Figura 3.1</b> - Fluxograma do Processo até a Decantação.....	29
<b>Figura 3.2</b> - Simulação do Cenário 1 .....	32
<b>Figura 3.3</b> - Simulação do Cenário 2.....	33
<b>Figura 3.4</b> - Simulação do Cenário 3.....	34
<b>Figura 4.1</b> - Média de Pol da Torta em função da Velocidade de Rotação dos Filtros.....	38

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 3.1</b> – Parâmetros Definidos para a Entrada de Cana.....	28
<b>Tabela 3.2</b> - Descrição das Correntes de Entrada do Processo de Filtração.....	31
<b>Tabela 3.3</b> - Parâmetros da Etapa de Filtração .....	31
<b>Tabela 4.1</b> - Resultados dos Cenários de Simulação .....	37
<b>Tabela 4.2</b> - Perda na Torta nos 3 cenários simulados .....	37
<b>Tabela 4.3</b> - Balanço de ART, Produção e Faturamento dos Cenários de Simulação.....	39
<b>Tabela 4.4</b> - Retorno Financeiro Comparativo ao Cenário 2.....	40
<b>Tabela 4.5</b> - Variação do Mix Açúcar .....	41

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO E OBJETIVO.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Tratamento de Caldo .....</b>	<b>12</b>
2.1.1	Sulfitação.....	12
2.1.2	Caleação .....	14
2.1.3	Aquecimento de Caldo.....	15
2.1.4	Adição de Polímeros .....	17
2.1.5	Flasheamento.....	18
2.1.6	Decantação .....	19
<b>2.2</b>	<b>Filtração .....</b>	<b>20</b>
2.2.1	Filtro Rotativo a Vácuo .....	21
2.2.2	Filtro Prensa Desaguadora .....	22
2.2.3	Parâmetros de Operação da Filtração.....	24
<b>2.3</b>	<b>Principais Indicadores no Processo Industrial Sucroalcooleiro .....</b>	<b>25</b>
<b>2.4</b>	<b>Simulador Pentagro .....</b>	<b>27</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>27</b>
<b>3.1</b>	<b>Contextualização da Usina .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2</b>	<b>Panorama da Etapa de Filtração .....</b>	<b>30</b>
<b>3.3</b>	<b>Cálculo de Faturamento .....</b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>36</b>
<b>4.1</b>	<b>Perda na Torta .....</b>	<b>36</b>
<b>4.2</b>	<b>Análise Econômica .....</b>	<b>38</b>
<b>4.3</b>	<b>Variação no Mix Açúcar.....</b>	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>42</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>43</b>

## 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO

A indústria sucroalcooleira é uma das principais atividades agroindustriais do Brasil e o país é o maior produtor do mundo de sua matéria-prima, a cana-de-açúcar. A produção é de 654,5 milhões de toneladas, utilizando área total agrícola de 9723,2 mil hectares, que é destinada para a fabricação de 35 milhões de toneladas de açúcar e 26,8 bilhões de litros de etanol, além da produção de energia elétrica renovável produzida a partir da queima do bagaço da cana (CONAB, 2022).

Açúcar e etanol são utilizados como matéria prima de vários segmentos industriais, como o alimentício, cosmético, de bebidas, de combustível, ocupando o quarto lugar de setor representativo de exportação do país (NACHILUK, 2021). Já a bioenergia, aliada à utilização do etanol como combustível, representa 19,1% da oferta interna de energia do Brasil, que é um dos países com a maior parcela de energia consumida renovável do mundo (EPE, 2021).

Para garantir uma grande produção de etanol e açúcar ao longo do processo, é esperado que haja o maior aproveitamento das moléculas de açúcar proveniente do caldo da cana. Porém, como todo processo industrial, ao longo de suas etapas existem vários pontos de perdas e, portanto, é de grande interesse das companhias identificar e reduzir estes pontos empregando novos métodos e equipamentos disponíveis no mercado. Dado o volume de produção da indústria, pequenas perdas podem se transformar em grandes prejuízos financeiros ou em retorno econômico significativo, quando reduzidas (FERNANDES, 2011).

No processo sucroalcooleiro, existem vários pontos de perda de açúcar no processo, seja na fábrica de açúcar, destilaria ou tratamento de caldo. Neste último, um de grande relevância é a denominada perda na torta. Ao se retirar o lodo do processo de decantação, este deve ser tratado para que, através de um processo de filtração, os açúcares contidos nele sejam retornados ao processo. Caso não seja, são descartados junto à torta, subproduto do processo que é reutilizado para adubação das terras de plantação de cana.

Existem variados métodos consolidados para a retirada do açúcar contido no lodo, sendo os mais relevantes e amplamente empregados na indústria o filtro rotativo a vácuo e o filtro prensa desaguadora. Cada um possui suas características específicas, parâmetros de operação e vantagens e desvantagens diante de um layout específico dentro de uma indústria sucroalcooleira (POLONIO; GONÇALVES; RAZUK, 2006).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a recuperação de açúcares redutores totais em diferentes cenários da etapa de filtração e o retorno financeiro obtido. Baseando-se

em uma unidade produtora existente, a Usina “X”, já equipada de quatro filtros rotativos que não são capazes de absorver toda a quantidade de lodo gerado, será inserido, por meio de um software de simulação, um novo filtro prensa no fluxograma do processo. Desta forma, espera-se avaliar os ganhos de eficiência global e financeiro da planta a partir da recuperação do açúcar na etapa de filtração do lodo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Tratamento de Caldo

Após a etapa de extração, onde é separado o caldo da cana da fibra (bagaço), vem a etapa de tratamento do caldo, imprescindível para a produção de açúcar de boa qualidade (ALBUQUERQUE, 2011). Para a produção de etanol, não é necessária a clarificação do caldo, porém o tratamento influenciará positivamente na assepsia e descontaminação através de tratamentos térmicos, assim como auxiliar na etapa de decantação e recuperação de açúcares residuais na etapa de filtração (PAYNE, 1989). Dentre os principais objetivos da etapa, estão:

- Remoção de material sólido em suspensão;
- Remoção de não-açúcares e impurezas;
- Remoção de colóides;
- Redução da turbidez do caldo;
- Redução da formação de cor do açúcar;
- Aumento da taxa de sedimentação;
- Adequação do pH para evitar o efeito de inversão da sacarose;

Nos tópicos seguintes, serão abordadas as principais etapas do tratamento de caldo, dando foco à operação de filtração.

#### 2.1.1 Sulfitação

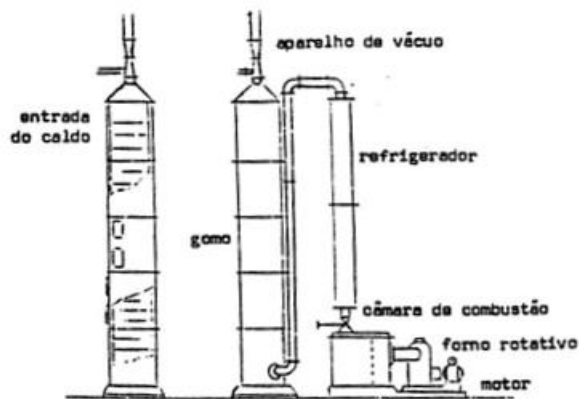
A sulfitação é a etapa de adição de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) para redução da cor do açúcar; portanto, é exclusiva deste produto (PAYNE, 1989). Também tem como efeito secundário diminuir a viscosidade do caldo, que auxilia no cozimento das massas e cristalização do açúcar, auxiliar na decantação através da formação de sais como o sulfito de cálcio (CaSO<sub>3</sub>),

molécula com grande atividade superficial, e agir como bactericida sobre microrganismos presentes no caldo da cana (ALBUQUERQUE, 2011).

A atividade do dióxido de enxofre impede reações de escurecimento do açúcar agindo sobre compostos oxidados carregados da etapa de extração, onde há o contato com moendas, tanques e tubulações (REIN, 2013). Os sais de ferro, que são escuros, são transformados em subóxidos de ferro sem cor (ALBUQUERQUE, 2011). Outra reação inibida pela sulfitação é a reação de Maillard, na qual a carbonila dos açúcares redutores, como glicose e frutose, reage com o grupo amina dos aminoácidos, sob aquecimento, resultando em pigmentos e aumento de cor do caldo (LIMA, 2012).

A formação do dióxido de enxofre se dá pela combustão do enxofre elementar em um forno rotativo (REIN, 2013). O gás passa então por um resfriamento para condensar qualquer enxofre sublimado e é alimentado na base da torre de sulfitação, onde vai atravessar contracorrente com o caldo, que é alimentado pelo topo e passa por pratos perfurados, absorvendo o conteúdo até chegar na base como caldo sulfitado. Uma representação esquemática dessa etapa é apresentada na Figura 2.1. Espera-se no final do processo um caldo com pH entre 3,8 a 4,3 (RIBEIRO; BLUMER; HORII, 1999).

**Figura 2.1** - Representação das Operações Unitárias da Etapa de Sulfitação



Fonte: RIBEIRO; BLUMER; HORII, 1999.

Durante o processo de sulfitação, ocorre a formação de sulfitos que, em contato com íons de cálcio, formam o sulfito de cálcio ( $\text{CaSO}_3$ ), um sal pouco solúvel e com grande ação superficial, que precipita e arrasta junto o material coloidal encontrado no caldo (RIBEIRO; BLUMER; HORII, 1999). Deve-se evitar o contato com água durante a queima do enxofre,

pois ocasiona na formação de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), altamente corrosivo, além de sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ), que aumenta a taxa de incrustação nos tubos e aparelhos (REIN, 2013).

A etapa de sulfitação apresenta algumas desvantagens, como aumento das incrustações nos aquecedores, maiores custos de operação, maior consumo de cal para restabelecer a acidez do caldo e geração de açúcar fora de especificação caso haja residual de enxofre (REIN, 2013).

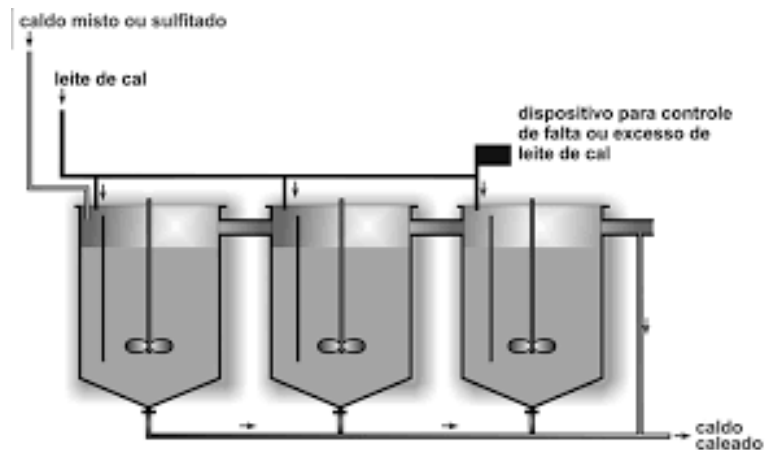
### 2.1.2 Caleação

Caleação, caleagem ou defecação são sinônimos da etapa de adição de cal ao processo. É definida por Albuquerque (2011) como “uma das etapas mais importantes no processo de fabricação de açúcar”. O principal objetivo da caleagem é elevar o pH do caldo para reduzir o fenômeno de inversão da sacarose, garantindo uma eficiência maior no processo de recuperação do açúcar (PAYNE, 1989). Outros benefícios da etapa consistem na precipitação de materiais insolúveis e floculação de sólidos suspensos no caldo, assim como realçar os efeitos de diminuição de cor e turbidez do caldo provenientes da etapa de sulfitação (REIN, 2013).

A etapa consiste na adição do hidróxido de cálcio, fruto da hidratação da cal virgem ( $\text{CaO}$ ) com caldo ou água (leite de cal) ou solução impura de açúcar de 12% a 16% de sacarose (sacarato de cálcio) (ALBUQUERQUE, 2011). A sequência de tanques de preparo do leite de cal e a representação da etapa de caleagem é exibida na Figura 2.2. No método de hidratação com água, a cal é diluída em um tanque de hidratação com 2 a 3 partes de água até atingir uma concentração de 15 °Bé (graus Baumé). Em seguida, é transferido para a câmara de diluição onde atingirá entre 7 e 8 °Bé e armazenada sob constante agitação, para evitar a decantação da suspensão (REIN, 2013). O efeito esperado é de elevar o pH do caldo até a faixa de 7,2 a 8,0.

Ao adicionar-se o leite de cal no caldo sulfitado, os íons de cálcio  $\text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{CaOH}^+$  formam sais pouco solúveis, como sulfito de cálcio ou fosfato de cálcio, que tem um forte poder coagulante com outros sais de ácidos orgânicos, proteínas desnaturadas, gorduras, ceras e gomas. Em suma, uma variedade de partículas, antes em equilíbrio com potencial negativo, é carregadas pela ação destes agentes coagulantes (HAMERSKI, 2009; ALBUQUERQUE, 2011).

**Figura 2.2** - Representação dos tanques de preparo do leite de cal



Fonte: EDISCIPLINAS USP

É comum na indústria o processo de caleação ser precedido da adição de fosfato, caso este não venha em quantidade suficiente no caldo. São expressos em pentóxido de fosfato ( $P_2O_5$ ) e variam entre 50 e 200 ppm (HAMERSKI, 2009). A formação de fosfato de cálcio apresenta desempenho superior ao sulfito de cálcio no mecanismo de coagulação de impurezas, porém o excesso pode acarretar no aumento do volume de lodo e decréscimo na velocidade de decantação (PAYNE, 1989).

O processo de caleagem tem seu rendimento beneficiado com o aumento da temperatura, portanto sua diluição é feita a temperaturas elevadas, com água sendo adicionada entre 90 e 95°C e/ou com retorno de caldo filtrado, que vem quente do processo (ALBUQUERQUE, 2011). Então, o caldo caleado ou dosado segue para o processo de aquecimento.

### 2.1.3 Aquecimento de Caldo

A etapa de aquecimento tem muitas contribuições ao tratamento, entre elas: elevação da temperatura acima do ponto de ebulição do caldo, para que possa haver a remoção dos gases na etapa de “flasheamento”; eliminação de microrganismos através da esterilização; aumento da taxa de reações químicas promovidas pelo agente alcalinizante; floculação e coagulação de substâncias insolúveis (PAYNE, 1989).

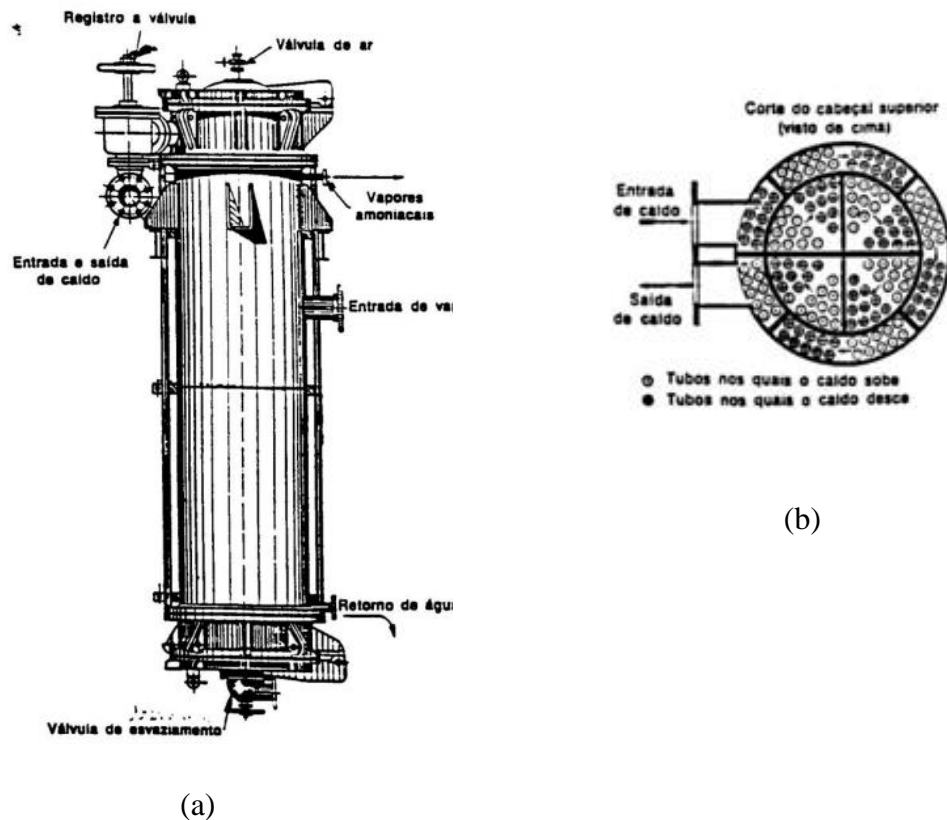
A faixa de temperatura esperada de se atingir na etapa está entre 103 e 105°C. Temperaturas abaixo tem eficiência do “flasheamento” reduzida, enquanto temperaturas



superiores podem ocasionar na queima dos açúcares, resultando em perdas. Acima de 60°C, já é possível observar efeitos de desnaturação das proteínas e gelatinização do amido, contribuindo para a floculação destas e outras substâncias insolúveis no caldo (REIN, 2013).

O processo ocorre pela passagem do caldo em trocadores de calor, em sua grande maioria casco-tubo, porém existem aplicações em trocadores de placas. O caldo percorre múltiplas passagens por dentro dos tubos, enquanto o vapor é lançado como fluido quente no lado casco (REIN, 2013). O desenho do equipamento é representado pelas Figuras 2.3a e 2.3b. Para contribuir com o balanço térmico e economia de vapor na planta, utilizam-se os vapores do segundo e terceiro efeitos da evaporação no primeiro aquecimento, enquanto o vapor do primeiro efeito é utilizado no aquecimento final (PAYNE, 1989).

**Figura 2.3** -Vistas de um Aquecedor (a) Lateral; (b) Superior.



Fonte: RIBEIRO; BLUMER; HORII, 1999.

Alguns fatores asseguram a boa operação e troca térmica na etapa de aquecimento. O primeiro deles é a velocidade, que deve ser controlada entre 1,5 a 2,0 m/s, permitindo a troca enquanto reduz os efeitos de perda de carga e incrustações (REIN, 2013). Estas são outro fator importante, já que o depósito de material, mais intenso no lado tubo devido à multiplicidade de

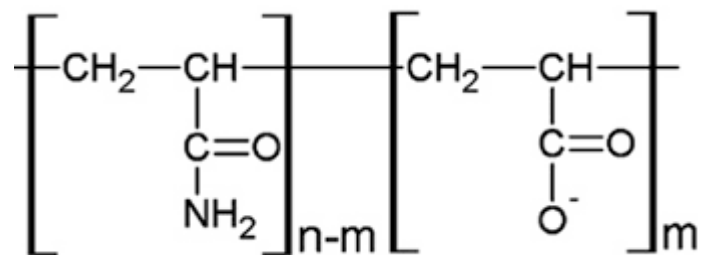
moléculas encontradas no caldo, pode prejudicar a transferência de calor. Para isso, limpezas periódicas devem ser realizadas, utilizando passagem de água ou, em casos mais sérios, soda cáustica, ambas sob aquecimento de vapor. Finalmente, a atenção no lado casco deve ser voltada à retirada eficiente dos condensados, por purgadores e sifões, e gases incondensáveis, que podem atrapalhar o efeito de condensação do vapor, dificultando a troca térmica (ALBUQUERQUE, 2011).

#### 2.1.4 Adição de Polímeros

São de uso difundido na indústria sucroalcooleira polímeros que auxiliam no processo de floculação. São substâncias que não afetam o pH do caldo, diminuem o tempo do processo de decantação, além de contribuir para um menor volume de lodo formado (PAYNE, 1998; ALBUQUERQUE, 2011).

Polímeros, ou polieletrólitos, são compostos de poliacrilamida parcialmente hidrolisados, do tipo aniônico, sendo sua estrutura química representada na Figura 2.4. Possuem cadeia longa e massa molecular muito alta. Existem também os do tipo catiônico, porém são menos utilizados devido à baixa eficácia e custo alto (REIN, 2013). São utilizados na indústria, majoritariamente, na forma em pó, porém também são comercializados como pérolas, líquido ou emulsão (LIMA, 2017).

**Figura 2.4** - Estrutura Química da Poliacrilamida Parcialmente Hidrolisada



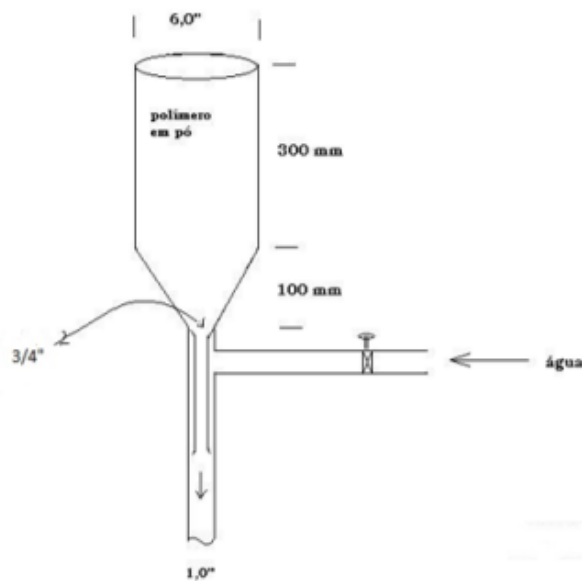
Fonte: COSTA, 2015

O mecanismo de funcionamento se dá na presença de cátions positivos bivalentes, onde parte vai se ligar às cargas negativas de proteínas, coágulos e flocos primários formados em etapas anteriores, e a outra parte aos polímeros. Desta forma, a molécula vai conectando as partículas e aglomerados ao longo de sua cadeia, aumentando o peso e resultando em uma boa formação de flocos (REIN, 2013).

A preparação do polímero ocorre em tanques de inox ou aço carbono revestido por epóxi, evitando assim a reação da substância com íons ferrosos, que interferem em sua eficácia. Deve ser alimentado no tanque com a água mais pura encontrada na usina, mole e livre de sólidos em suspensão. A alimentação deve ser feita após o tanque estar cheio acima da metade, de maneira lenta e em constante agitação, com auxílio de funil representado na Figura 2.5, evitando a formação de grumos. As pás agitadoras devem fazer um movimento suave e temperaturas altas também devem ser evitadas, podendo romper as longas cadeias do polímero. A aplicação do produto devidamente diluído é feita por uma bomba helicoidal de deslocamento positivo e geralmente é aplicado após a etapa de “flasheamento” (REIN, 2013; LIMA, 2017).

São aplicados entre 2 a 3 mg de pó a cada kg de caldo e em dosagens mais altas no tratamento de lodo no filtro. O excesso de polímero faz com que haja repulsão das moléculas, aumentando a velocidade de decantação, prejudicando a floculação e filtrabilidade do açúcar.

**Figura 2.5** - Funil para Aplicação de Polímeros



Fonte: LIMA, 2017

### 2.1.5 Flasheamento

Antes de levar o caldo para o processo de sedimentação, é necessário garantir que o líquido seja preparado para evitar turbulências e garantir a boa eficiência deste processo de separação. Desta forma, o caldo passa pelo balão de flash, onde ocorre o flasheamento do caldo (ALBUQUERQUE, 2011).

O fenômeno de flasheamento ocorre quando o líquido, que estava a uma temperatura acima do ponto de ebulição à pressão atmosférica, também com pressão maior devido ao bombeamento, é exposto em um tanque aberto. Desta forma, entrará em ebulição espontânea, removendo todos os gases aprisionados junto ao bagacilho e permitindo a sedimentação deste (ALBUQUERQUE, 2011).

Portanto, o caldo que estava em uma temperatura na faixa de 103 até 110°C entra no balão de flash e a queda de pressão permite a liberação dos gases. O efeito permite uma aplicação do caldo na etapa de decantação muito mais controlada, diminuindo o tempo de residência e permitindo uma maior decantação do material sólido (ALBUQUERQUE, 2011).

### 2.1.6 Decantação

A última etapa do tratamento do caldo é a decantação onde, por sedimentação, os flocos formados em etapas anteriores vão ser retirados no fundo do aparelho, enquanto o caldo clarificado sai pela parte central-superior, pronto para ser enviado para a fábrica de açúcar. A parte mais alta fica destinada à remoção de espumas e material flotado e ocorre unicamente em decantadores do tipo bandejas (ALBUQUERQUE, 2011; REIN 2013).

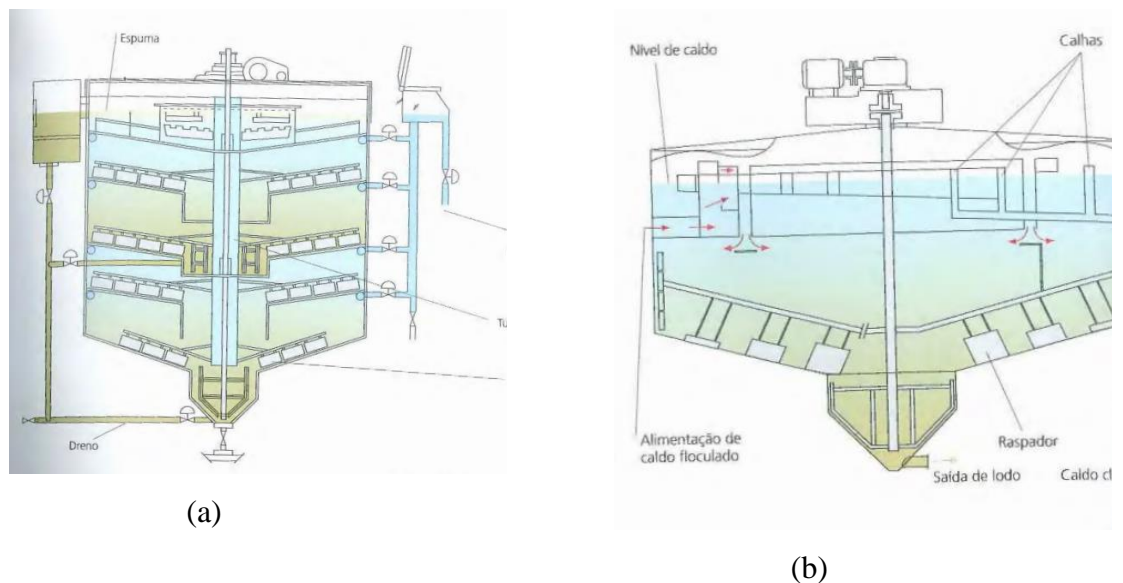
É importante notar que a qualidade do caldo clarificado depende, principalmente, das etapas de tratamento químico que precedem a decantação, sendo esta responsável pela separação física das fases líquida (caldo) e sólida (lodo) (ALBUQUERQUE, 2011; PAYNE, 1989).

Existem dois principais tipos de decantadores: rápidos e de bandeja. Os decantadores de bandeja, representados na Figura 2.6a, são mais fáceis de controlar e operam como 4 câmaras de decantação dentro de um aparelho, onde em cada bandeja há a retirada contínua de lodo. Já os decantadores rápidos, conhecidos como SRI (Sugar Research Institute, Austrália) e representados na Figura 2.6b, são mais sensíveis no controle da turbulência do caldo, porém oferecem tempos de residência muito inferiores (REIN, 2013).

São dois os parâmetros mais importantes do processo: o tempo de residência e a velocidade de entrada do caldo. O tempo de residência indica o tempo médio que o caldo ficará retido dentro do aparelho. Altos tempos de residência são extremamente prejudiciais ao processo, pois pode haver aumento de cor e turbidez do caldo, queda de pH e consequente inversão da sacarose (REIN, 2013). No quesito velocidade de entrada do caldo, esta deve ser

feita de forma lenta e contínua, para não romper os flocos já formados e aumentar a turbulência dentro do decantador, prolongando o processo de retenção do lodo (ALBUQUERQUE, 2011).

**Figura 2.6** - Representação esquemática dos dois principais tipos de decantadores: (a) de bandeja ou Dorr-Oliver; (b) rápidos SRI



Fonte: REIN, 2013.

Finalizada a decantação, o caldo clarificado é enviado diretamente aos evaporadores da fábrica de açúcar, enquanto o lodo gerado é direcionado para a etapa de **filtração**.

## 2.2 Filtração

A filtração é a etapa final do tratamento de caldo, onde os açúcares retidos no lodo serão recuperados no caldo filtrado e a torta de filtro será formada como subproduto do processo. O principal objetivo da etapa é reduzir a pol da torta até 1%, ou seja, recuperar o açúcar contido no lodo. Outra vantagem do processo, se operado corretamente, está na redução da umidade da torta, aumentando o volume de sólidos transportado e reduzindo custos com transporte (ALBUQUERQUE, 2011).

Alguns tipos de filtros já foram utilizados na indústria sucroalcooleira, como o filtro prensa a placas e o filtro mecânico, mas atualmente dois se destacam: o filtro rotativo a vácuo e o filtro prensa desaguadora. O primeiro tipo é o mais encontrado, sendo que sua primeira aparição data de 1927 (POLONIO; GONÇALVES; RAZUK, 2006). Os estudos de Polonio,

Gonçalves, Razuk (2006) explicam que, na época recente ao trabalho, o protagonismo do filtro rotativo começava a se dividir com a nova tecnologia da prensa desaguadora. O funcionamento das operações e parâmetros dos filtros serão tratados a seguir.

### 2.2.1 Filtro Rotativo a Vácuo

Os filtros rotativos a vácuo são os filtros mais comuns utilizados na indústria sucroalcooleira, em destaque do tipo Oliver-Campbell. A descrição de seu funcionamento foi retirada de HUGOT (1969). Uma foto de filtros rotativos instalados em uma unidade industrial pode ser vista na Figura 2.7.

**Figura 2.7** - Filtros rotativos instalados em uma unidade industrial



Fonte: MAUSA

O filtro consiste em um tambor girando em torno de um eixo horizontal, mergulhado em uma bacia que contém o lodo vindo da decantação, devidamente misturado com bagacilho, que ajudará a compor o meio filtrante da torta. São divididos em 24 seções independentes, que se estendem por todo o comprimento do tambor.

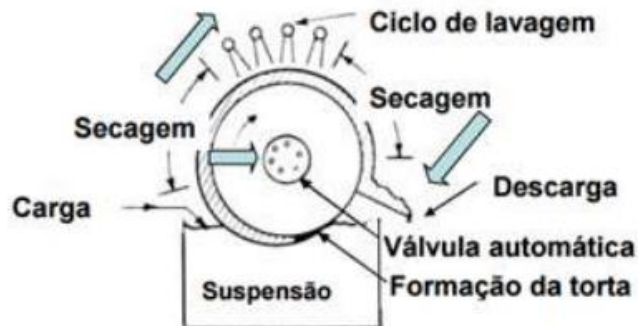
A primeira etapa ocorre à pressão atmosférica, nos raspadores que retiram a torta da parede do filtro. Seguem desta forma até chegar na bacia de lodo. É importante ressaltar que este tanque fica em constante agitação, para evitar sedimentação do material sólido. Na bacia, entra em contato com o lodo e inicia-se a filtração por meio da aplicação do baixo vácuo. Ao aplicar-se o baixo vácuo, inicia-se a segunda etapa.

Na segunda etapa, o baixo vácuo, entre 25 a 35 cmHg, é aplicado na seção de contato do filtro com o lodo. Conforme o tambor gira, o material sólido vai se prendendo à parede

enquanto o caldo atravessa o meio filtrante. Desta etapa é retirado o caldo filtrado turvo, que representa cerca de 30 a 60% do filtrado obtido. O movimento de rotação segue até chegar no terceiro quadrante da rotação, onde é aplicado o alto vácuo.

Na terceira etapa é aplicado o alto vácuo, entre 35 a 50 cmHg, exercendo mais força pois agora a torta formada também auxilia como meio filtrante, melhorando o processo de recuperação de açúcar e retendo materiais sólidos. Logo após o início do alto vácuo, água quente é aspergida ao longo de todo o comprimento da seção para aumentar a recuperação de açúcar retido na torta. Desta etapa é retirado o caldo filtrado claro. Passada a embebição, o alto vácuo continua sugando o líquido que resta e secando a torta até que, logo antes do raspador, o vácuo se quebra e a torta se desprende com o contato. O caldo é canalizado pela tubulação interna do filtro, enquanto a torta é movida por roscas helicoidais até uma moega que a descarregará em caminhões. A figura 2.8 mostra as diferentes etapas em um esquema representativo do filtro rotativo.

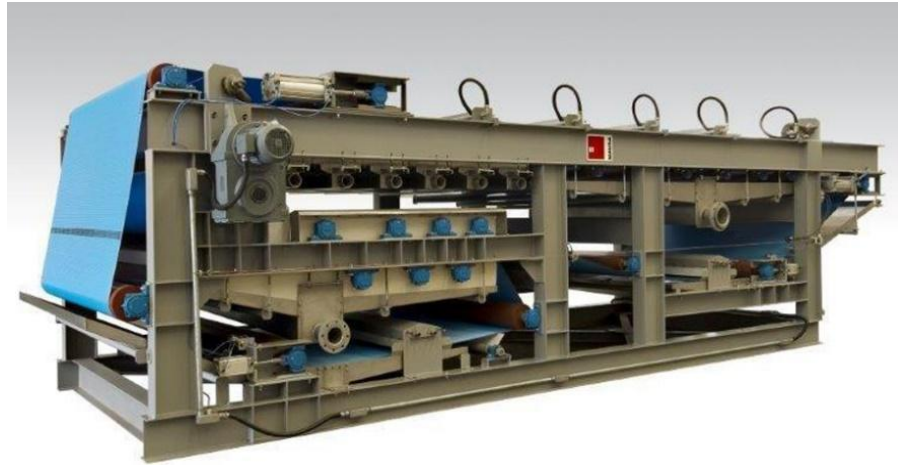
**Figura 2.8** - Esquema de operação de um Filtro Rotativo



Fonte: SOUZA et al., 2016

### 2.2.2 Filtro Prensa Desaguadora

O filtro prensa desaguadora é uma tecnologia já consolidada em outras indústrias no processo de secagem da torta, porém vem sendo aplicado na indústria sucroalcooleira, junto com os filtros rotativos, desde meados da década de 90. Não se trata do filtro prensa a placas, que foram os primeiros filtros aplicados nas indústrias de cana de açúcar, mas sim dos filtros de correia ou cinta, como também são chamados. A descrição de seu funcionamento foi retirada de Rainey, Thaval e Rackermann (2014) e uma foto do equipamento é mostrada na Figura 2.9.

**Figura 2.9 - Filtro Prensa Desaguadora**

Fonte: MAUSA

O filtro consiste em um tecido, que funciona como meio filtrante, rolando na horizontal, onde o lodo é depositado após ser misturado com polímero, auxiliando a floculação e aumentando sua eficiência como meio filtrante. A prensagem se dá após os vácuos, quando outra tela se une ao lado livre da torta e ambas prensam o material para secagem.

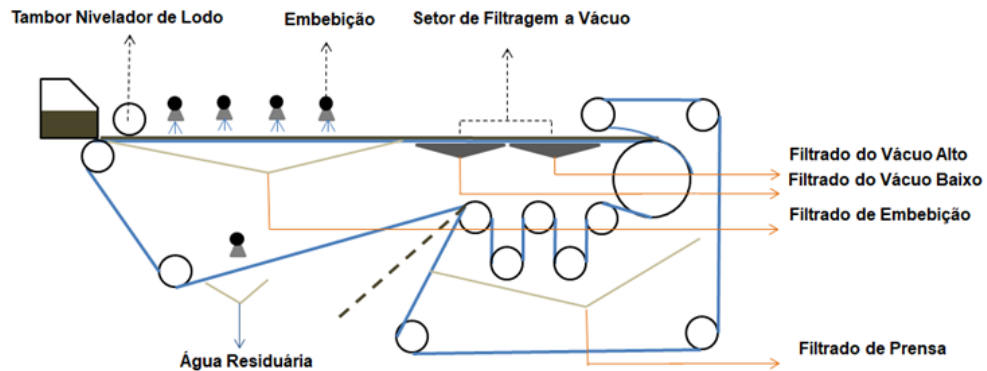
A primeira etapa é a de drenagem por gravidade. Após o lodo ser depositado em cima da tela, água quente é aspergida ao longo de toda sua largura e a gravidade faz com que essa água passe pelo lodo e pela tela, sendo recuperado em canaletas como caldo filtrado. Desta etapa recupera-se 70% do caldo.

A etapa seguinte é a drenagem a vácuo, onde vácuo progressivo é aplicado na tela para recuperar a água presa no lodo, que não foi filtrada pela gravidade. Novamente, o caldo é recuperado em uma canaleta e espera-se desta etapa uma recuperação de 15 a 25% do caldo filtrado.

Finalmente, uma segunda tela une-se à tela primária e, ao passar por diversos rolos, ocorre a prensagem da torta. Nesta etapa recupera-se o residual de caldo que havia preso na torta. Ao separar as telas, a torta cai diretamente na moega, a segunda tela volta para prensagem e a primeira tela passa pela lavagem, na qual a água de lavagem não é recuperada por ter pouco açúcar e muito material sólido. Esta água é direcionada para a área de tratamento de efluentes. O esquema de operação do filtro é mostrado na Figura 2.10.



**Figura 2.10** - Esquema de Operação de um Filtro Prensa Desaguadora



Fonte: LINKEDIN, 2018

### 2.2.3 Parâmetros de Operação da Filtração

**Temperatura da água de embebição:** é conveniente utilizar uma temperatura de 80°C, que reduz a viscosidade do caldo e, principalmente, das gomas e ceras que não devem atravessar o meio filtrante.

**Dosagem de floculante/bagacilho:** ambos são utilizados para aumentar a capacidade do meio filtrante. No rotativo, utiliza-se o bagacilho, entre 0,35% a 0,50% da quantidade de sólidos em suspensão (insolúveis). Já o floculante (polímero) adiciona-se entre 400 e 450 ppm de lodo. Valores fora de parâmetros podem gerar uma torta que não gruda no meio filtrante, espaços de quebra vácuo e caminhos preferenciais da água de embebição, prejudicando a recuperação do açúcar.

**Umidade da torta:** a umidade obtida pela torta do filtro prensa é mais baixa, entre 60 e 65%, enquanto no rotativo os valores alcançam entre 75 a 80%. Umidades maiores são refletidas no gasto com transporte da torta.

**Espessura da torta:** no filtro prensa, a torta deve ter espessura entre 8 a 12 mm, enquanto no rotativo este valor é de 6 a 7 mm. Tortas fora das espessuras ótimas podem atrapalhar o mecanismo de filtração, seja retendo o caldo ou deixando passar muito material.

**Retenção:** a retenção é o valor expresso de material sólido que ficou retido nos filtros, em % de material sólido do lodo. Nos filtros prensa, esse valor pode alcançar até 96%, enquanto nos rotativos fica entre 75 e 80%.

**Capacidade de filtração por área:** a tecnologia do filtro prensa demanda uma menor área para capacidade de filtração semelhante à do filtro rotativo. Um filtro prensa da empresa TecnoPump, encontrado no trabalho de Rainey, Thaval e Rackermann (2014), opera na faixa

de 32 a 40 kg de lodo/h/m<sup>2</sup>. Já o trabalho de Hugot (1969) fornece a capacidade para o filtro rotativo de 60 a 70 kg de torta/h/m<sup>2</sup>.

Em suma, ambos os equipamentos têm suas vantagens e desvantagens. Albuquerque (2011) pontua que o filtro rotativo utiliza menos água de lavagem para um mesmo nível de perdas na torta, porém o tipo prensa é capaz de produzir um caldo com menos turbidez. Lima (2017) traz que o consumo de energia é de 30 a 40 % menor no filtro prensa.

### 2.3 Principais Indicadores no Processo Industrial Sucroalcooleiro

Para se fazer um bom acompanhamento do processo industrial, é necessário entender o conceito de seus principais indicadores, começando pela matéria prima e decorrendo por aqueles que fornecem a visão do balanço de massa, perdas e eficiência. As definições foram retiradas de FERNANDES (2011).

**Cana de Açúcar:** a cana de açúcar é a matéria prima da indústria sucroalcooleira. A parte interessante da cana são os colmos “industrializáveis”, onde se encontra o caldo rico em açúcares. Porém, com a colheita, outros materiais entram no processo, como as **impurezas** e materiais estranhos, que também são contabilizados como matéria-prima, já que é praticamente impossível obtê-los separados.

Define-se a cana como a soma de água, sólidos solúveis e sólidos insolúveis, que podem ser traduzidos, respectivamente, em umidade, **brix** e **fibra**. Desta forma, FERNANDES (2011) define esta formação como a “primeira equação fundamental da tecnologia açucareira”.

A composição majoritária da cana-de-açúcar é água, que representa a umidade. Esta varia entre 67 e 73% ao longo da safra, sendo valores ótimos aqueles na faixa entre 68 e 72%. Conceitos de brix e fibra terão um tópico específico a seguir.

**Impurezas:** durante a colheita da cana-de-açúcar, muitas impurezas são arrastadas e levadas ao processo, sendo elas de natureza mineral ou vegetal. As impurezas minerais são terras e pedras. Impurezas vegetais são ponteiros, folhas verdes e secas, cana morta ou ressecada, raízes, rizomas e plantas daninhas.

É difícil estabelecer uma faixa de valores para ambos os tipos de impureza, já que existem muitas variáveis na colheita da cana, podendo ser manual ou mecanizada; queimada, inteira, picada e/ou tombada; relevo do terreno, chuvas, altura do corte, entre outros. O que pode ser definido é que a colheita mecanizada trouxe inúmeras vantagens para o setor, como aumento da produtividade agrícola e redução das queimadas, porém aumenta a quantidade de

impurezas, vegetais e minerais, que chegam até o processo industrial, reduzindo sua eficiência (MAGALHÃES, 2008).

**Brix:** este é, segundo FERNANDES (2011), o parâmetro mais conhecido e utilizado na indústria sucroalcooleira. Em termos técnicos, brix representa a porcentagem mássica dos sólidos solúveis em uma solução pura de sacarose, porém, no ramo, para efeitos práticos, admite-se que seja essa porcentagem em uma solução impura de sacarose com alta pureza, como é o caldo da cana. Durante a safra, esse valor varia entre 15 a 20%.

**Fibra:** é a matéria insolúvel em água contida na cana, sendo representada pelo bagaço e bagacilho. É formada principalmente pela celulose, a molécula vegetal mais abundante na natureza terrestre. O teor de fibra da cana varia entre 9 a 14%, dependendo do tipo da cana, apresentando os melhores resultados entre 10 a 12%. A determinação da fibra é um fator chave para a determinação do pagamento da matéria prima.

**Pol:** trata-se da porcentagem aparente de sacarose contida em uma solução açucarada. Leva o nome a partir da propriedade das moléculas de desviar a luz polarizada, já que é determinada utilizando métodos sacarimétricos. Assim como o brix, não se considera açúcares como a glicose e a frutose na definição prática, já que estes apresentam concentrações baixas, na faixa de 0,5%, enquanto a sacarose apresenta valores superiores a 16%. Desta forma, admite-se a pol como a porcentagem de sacarose.

**Pureza:** a pureza é apresentada como o fator de correção do brix, em porcentagem de pol, ou seja, sacarose. O parâmetro técnico do brix é aquele de pureza igual a 1, porém no caldo esse ajuste é realizado conforme a pol. Desta forma, temos que a pureza é definida a partir da razão entre a pol e o brix do objeto de análise (cana, caldo, mel, xarope, massas, etc.)

**Açúcares redutores (AR):** são utilizados para denominar os açúcares capazes de reduzir o óxido de cobre do estado cúprico a cuproso, majoritariamente as moléculas de glicose e frutose. Por esse aspecto e outras reações que podem participar ao longo do processo, são considerados precursores de cor para o açúcar industrial, o que afeta negativamente a qualidade do produto final, motivo pelo qual busca-se reduzir os efeitos de inversão da sacarose. Apesar do uso limitado na fabricação de açúcar, os açúcares redutores são aproveitados durante o processo de fabricação de etanol.

**Açúcares redutores totais (ART):** são todas as moléculas de açúcar da cana representadas na forma de açúcar redutor ou invertido. Para efeitos práticos, é calculado pela soma das moléculas de glicose, frutose e sacarose dividida por um termo que ajusta a inversão (0,95), apenas para soluções com alta pureza (>80%). Sendo o ART a quantidade de açúcar do

processo, é o balanço de massa deste que determina o **rendimento** e a **eficiência** de uma indústria sucroalcooleira.

**Rendimento:** é definido como a quantidade de produto sobre a quantidade de matéria prima utilizada para produzi-lo. É expresso normalmente em quilos ou sacas de açúcar ou litros de etanol sobre tonelada de cana ou quilos de ART.

**Eficiência:** é um indicador percentual que indica a quantidade produzida real sobre a total possível, a partir da estequiometria do produto. A mais comum em indústrias sucroalcooleiras, expressa como eficiência industrial, retorna a porcentagem de ART contido no etanol e açúcar produzidos sobre o ART da cana de entrada.

## 2.4 Simulador Pentagro

O simulador Pentagro é um software projetado para modelar, simular, monitorar e otimizar o desempenho operacional dos processos industriais das usinas sucroenergéticas. A ferramenta atua através da criação de um gêmeo digital da planta produtiva, uma versão virtual que simula os resultados de produção e permite edição para alcançar as melhores vias de operação, a partir das informações das correntes de entrada e parâmetros específicos das operações unitárias. Sua aplicação se estende por todas as áreas da usina: extração, tratamento de caldo, fábrica de açúcar, destilaria de etanol, vapor e geração de bioeletricidade.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Contextualização da Usina

A usina “X” é um complexo industrial localizado no interior do estado de São Paulo, com moagem nominal de 10.500 toneladas de cana por dia, que se processa durante a safra no período entre abril e novembro. Com base no histórico de safras, foi possível obter dados sobre a qualidade de cana e indicadores importantes do processo. Como a simulação foi feita com estimativas, este trabalho utilizou valores comuns, não necessariamente médios, para desenvolver os cenários da simulação. Desta forma, foi possível analisar os resultados com estimativas reais, porém focados na variação da capacidade de filtração.

Para definir a entrada de cana e sua qualidade, além da moagem nominal, foi necessário definir outros parâmetros como: fibra, impureza mineral (terra), pol da cana, açúcares redutores

e pureza do caldo. Todos esses parâmetros foram obtidos por meio de análises laboratoriais quando a cana foi recebida na unidade e assim foi possível determinar outros fatores importantes, como o brix, a impureza mineral do caldo e a quantidade de ART (açúcares redutores totais) que entra no processo. O balanço foi realizado por ART e com ele determinou-se as perdas do processo. A Tabela 3.1 mostra os parâmetros definidos para a entrada da cana na indústria.

**Tabela 3.1** – Parâmetros Definidos para a Entrada de Cana

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Moagem nominal	(Ton/dia)	10.500
Moagem nominal	(Ton/h)	437,5
Fibra	(% m/m cana)	15,22
Impureza mineral	(Kg/ton cana)	1,32
POL	(% m/m cana)	13,5
AR	(% m/m cana)	0,56
Pureza do caldo	(% m/m caldo)	86,5
Brix	(% m/m caldo)	18,7
Impureza mineral caldo	(% m/m caldo)	9,91
ART	(kg/h)	64621,02

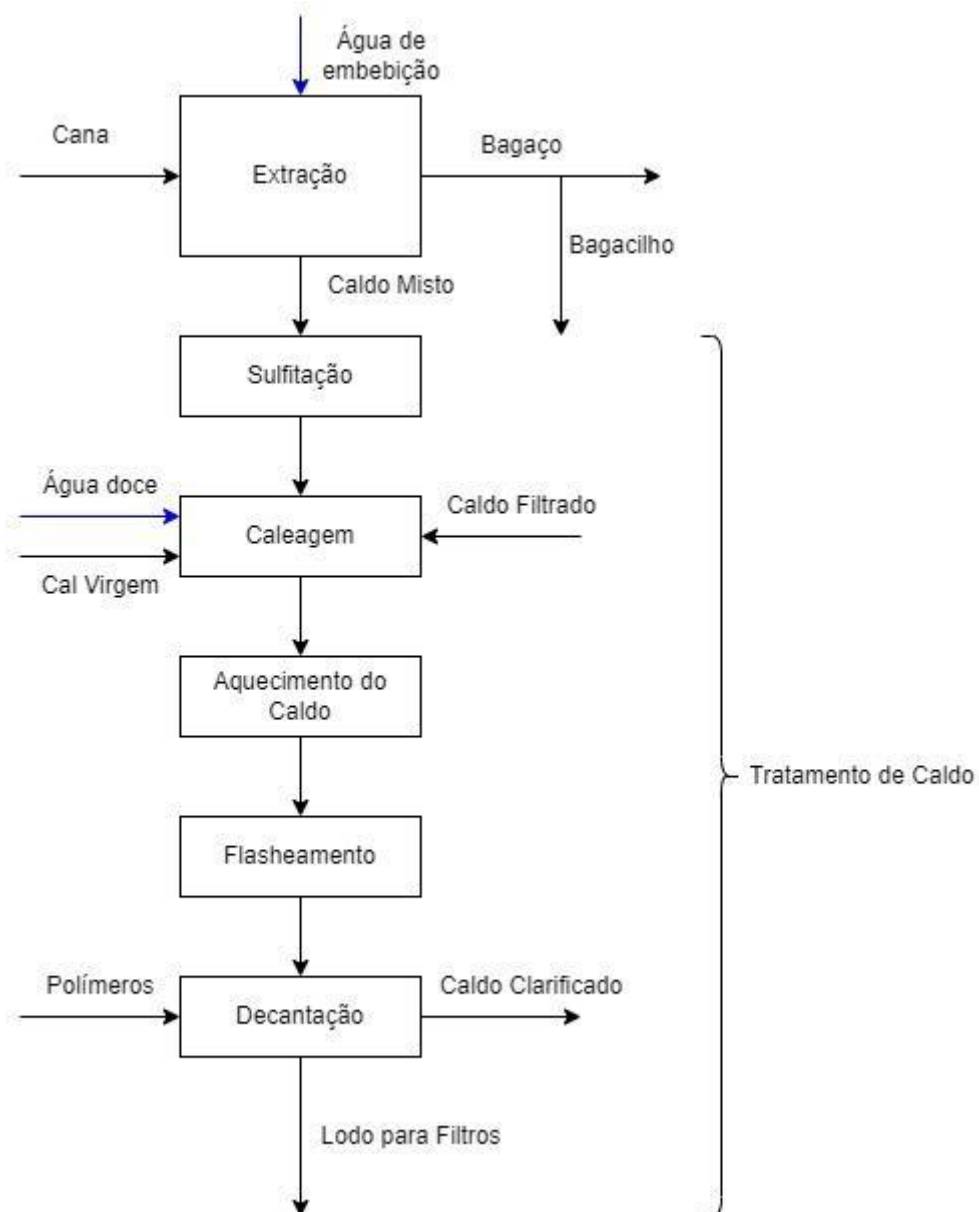
Fonte: Acervo Pessoal

Uma vez definida a entrada de cana, foi possível calcular a quantidade de caldo que chegaria na etapa de extração. Dentro da simulação, outros parâmetros e condições de processo foram estabelecidos para que a simulação fosse feita, evitando gargalos de ocupação, para que a corrente chegasse com um valor adequado e condizente com a situação real. Nesta etapa, os elementos que influenciam no balanço de massa são a entrada da água de embebição, a partir do parâmetro de embebição em porcentagem de fibra e a vazão mássica de saída de bagaço, contendo grande parte da fibra somada à sua umidade. Parte da corrente de bagaço é desviada como bagacilho, que alimenta os filtros rotativos. A corrente que segue para o processo é a de caldo misto, que é direcionado à etapa de tratamento de caldo.

Chegando na etapa de tratamento, o caldo misto segue as etapas detalhadas na revisão deste trabalho, começando pela sulfitação, onde não há perda significativa de massa. Logo após, o caldo é enviado à etapa de caleação, onde é adicionada a cal virgem somada à água de diluição para produção de leite de cal. Além disso, é nesta etapa que há o retorno do caldo filtrado,

aproveitando sua temperatura elevada e reaproveitando os açúcares que foram recuperados na etapa de filtração. O caldo dosado é enviado aos aquecedores, então ao balão de flash e finalmente para a decantação, junto com a adição de polímeros. Na decantação, ao definir o parâmetro de taxa de lodo, obtém-se a vazão mássica de caldo clarificado e de lodo que será enviado para a etapa de filtração, foco deste trabalho. A Figura 3.1 mostra o fluxograma simplificado do processo até a etapa de decantação, com as correntes de entrada e saída de cada operação supracitada.

**Figura 3.1** - Fluxograma do Processo até a Decantação



Fonte: Acervo Pessoal

### 3.2 Panorama da Etapa de Filtração

Historicamente, a usina “X” apresentava perdas de ART no processo de filtração devido à capacidade excedida dos filtros, ou seja, uma vazão de cana maior que a capacidade de processamento dos filtros instalados. A usina contava com 4 filtros rotativos a vácuo, sendo três deles com 58 m<sup>2</sup> de área e um com 29 m<sup>2</sup>. Portanto, a área total disponível para filtração era de 203 m<sup>2</sup> com capacidade para filtrar 70 m<sup>3</sup>/h de lodo.

Para aumentar a capacidade dos filtros, foi então instalado um filtro prensa desaguadora, com 70 m<sup>2</sup> de área e capacidade de filtração de 35 m<sup>3</sup>/h de lodo. Portanto, definido o layout da etapa de filtração, os cenários de simulação são descritos a seguir, permitindo a análise da recuperação de ART conforme desvio de caldo para ambos os filtros.

Cenário 1: Apenas filtro rotativo, operando acima da capacidade (ocupação maior que 100%);

Cenário 2: Filtro rotativo e filtro prensa, ambos abaixo do limite de capacidade;

Cenário 3: Filtro rotativo e filtro prensa, com o segundo operando acima da capacidade (ocupação do filtro prensa maior que 100%).

Após simulação desde o início do processo, descrito no tópico 3.1, obtiveram-se os parâmetros definidos das correntes de entrada do processo de filtração. Essas correntes são o lodo e o bagacilho. Outras correntes materiais de entrada, especificamente a água de embebição dos filtros, foram quantificadas conforme a taxa de embebição e variaram conforme o cenário simulado. A Tabela 3.2 descreve as correntes de entrada do processo de filtração.

**Tabela 3.2** - Descrição das Correntes de Entrada do Processo de Filtração

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Corrente 1</b>	<b>Corrente 2</b>
<b>Componente</b>		<b>Lodo</b>	<b>Bagacilho</b>
Vazão Mássica	(ton/h)	88,15	4,36
Vazão Volumétrica	(m <sup>3</sup> /h)	84,27	3,46
<b>Composição Mássica</b>		<b>1</b>	<b>1</b>
Caldo	(% m/m corrente)	0,9289	0,4920
CaSO <sub>3</sub>	(% m/m corrente)	0,0013	0
Terra	(% m/m corrente)	0,0698	0,0080
Fibra	(% m/m corrente)	0	0,5000
<b>Parâmetros</b>		<b>-</b>	<b>-</b>
Pol	(% m/m corrente)	12,03	1,04
AR	(% m/m corrente)	0,45	0,20
Brix	(% m/m caldo)	14,96	2,82
ART	(ton/h)	11552,027	56,478

Fonte: Acervo Pessoal

Para finalizar o ambiente de simulação, antes de executá-lo, foi necessário estipular os parâmetros de filtração. Além das áreas e capacidades, definiu-se a quantidade de água de embebição em relação à torta, a eficiência dos filtros e a fração de sólidos, exceto fibra, na torta. Os valores utilizados foram definidos na construção do gêmeo digital, de maneira que refletiu na simulação valores da realidade. A Tabela 3.3 retorna os valores utilizados.

**Tabela 3.3** - Parâmetros da Etapa de Filtração

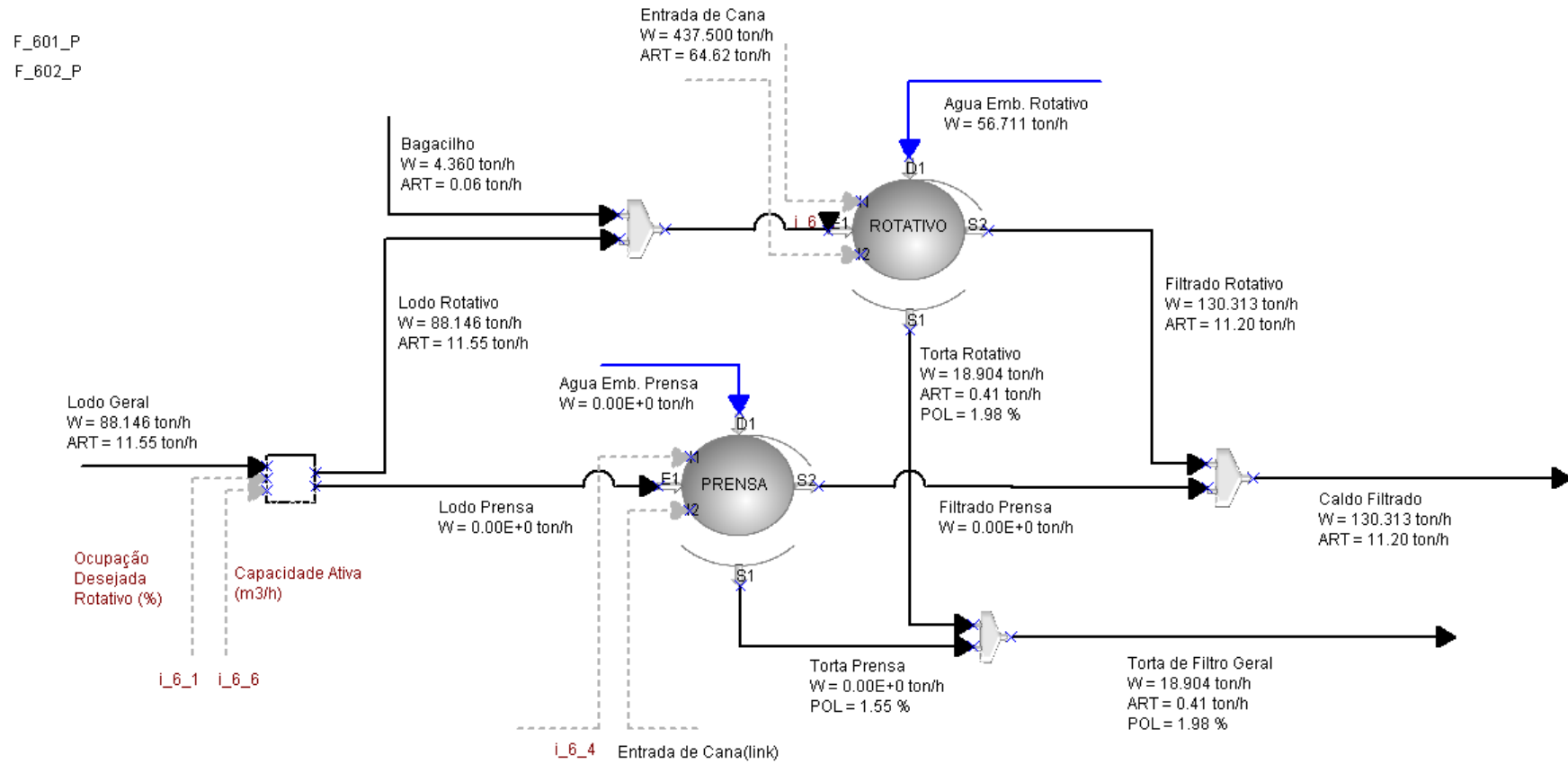
<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Rotativo</b>	<b>Prensa</b>
Taxa de água de embebição em relação à torta	% m/m torta	300	300
Eficiência dos filtros	%	75	75
Fração de sólidos (exceto fibra)	% m/m torta	25	25

Fonte: Acervo Pessoal

Definidos os parâmetros necessários para a simulação, os cenários foram executados e os resultados são demonstrados nas Figuras 3.2 a 3.4.



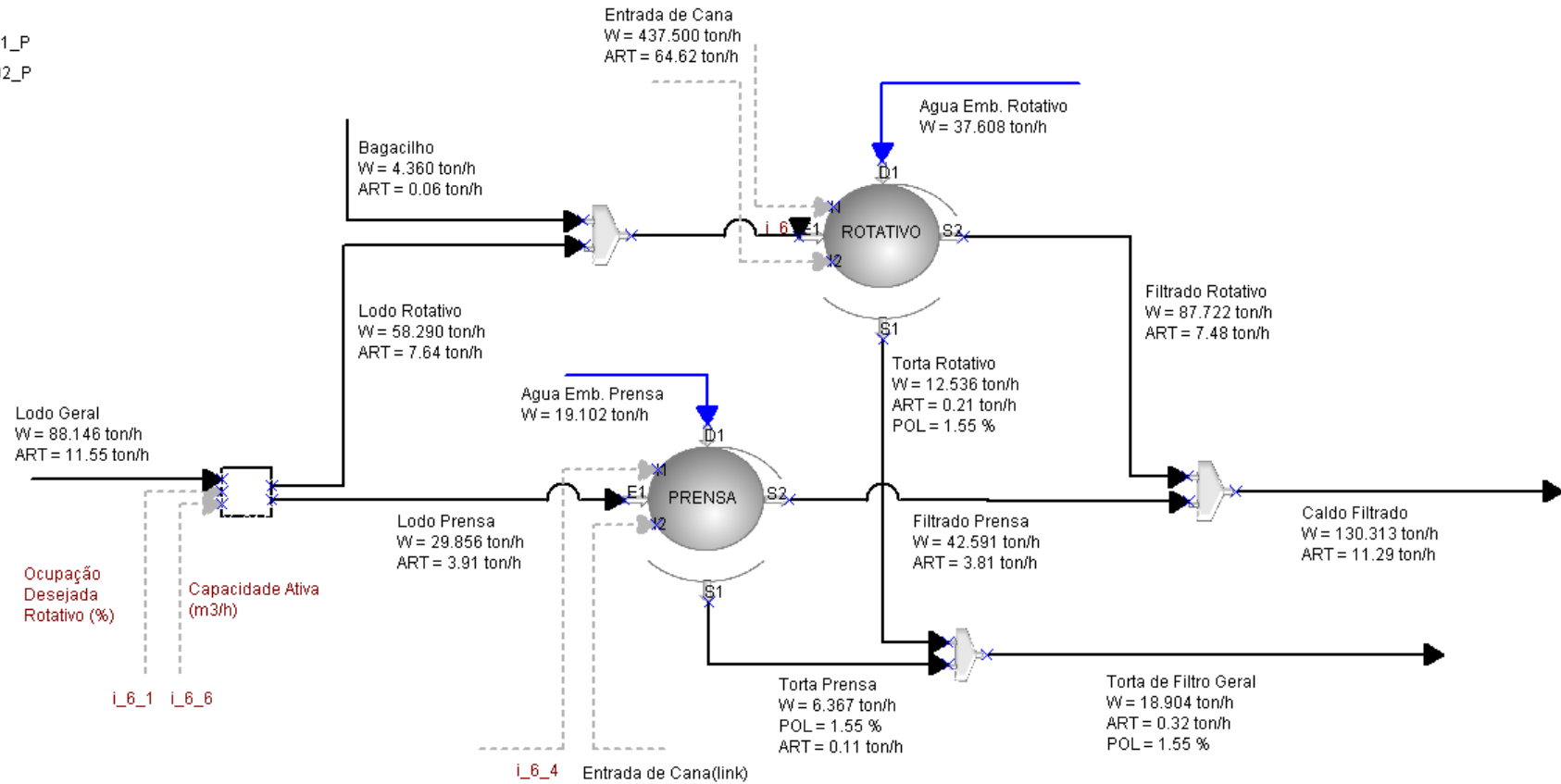
Figura 3.2 - Simulação do Cenário 1



Fonte: Acervo Pessoal

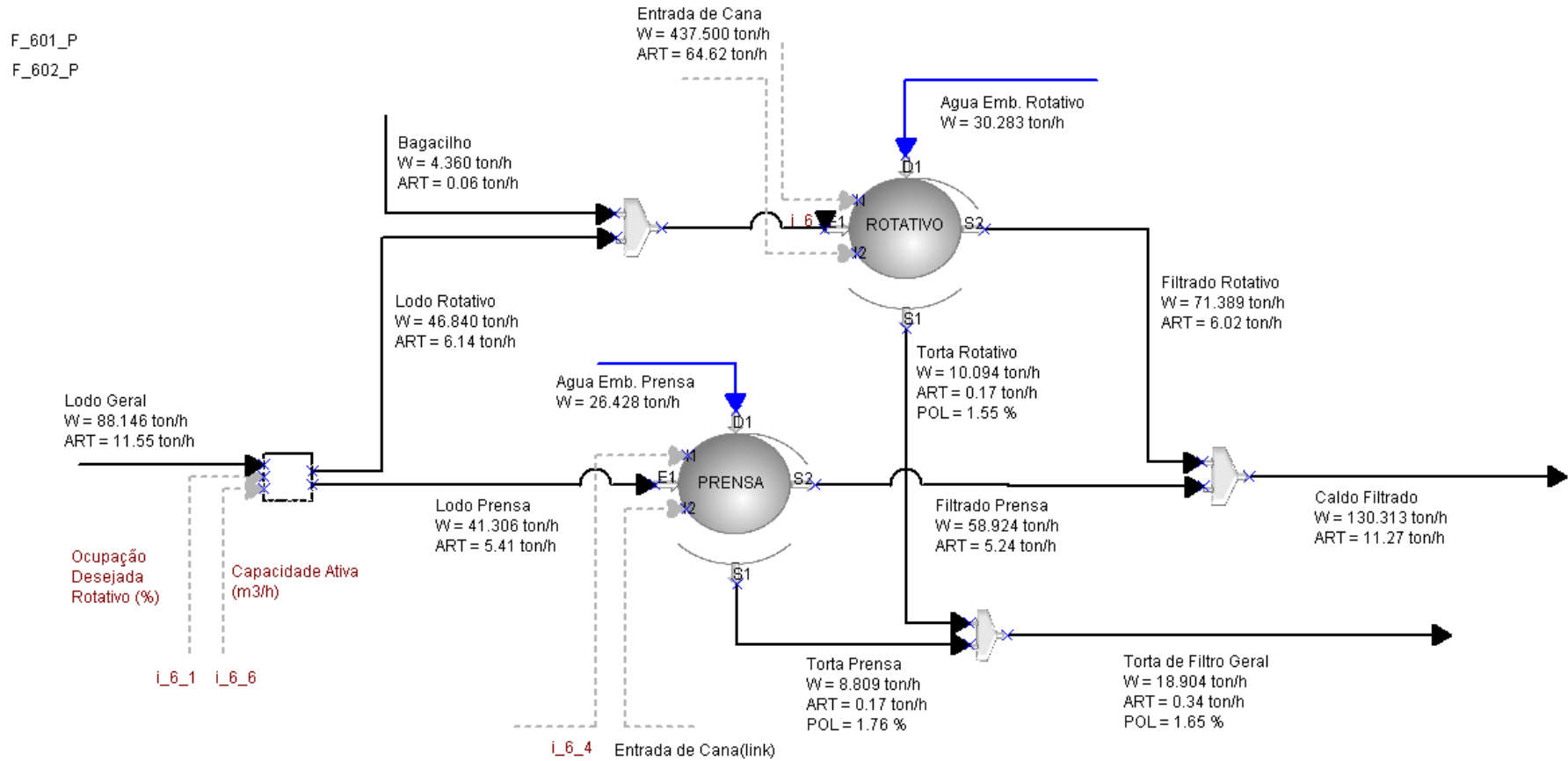
Figura 3.3 - Simulação do Cenário 2

F\_601\_P  
F\_602\_P



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 3.4 - Simulação do Cenário 3



Fonte: Acervo Pessoal

### 3.3 Cálculo de Faturamento

O cálculo de faturamento foi determinado a partir da perda na torta. Estimou-se por ela a quantidade de ART que, se fosse recuperado, seria transformado em produto, açúcar VHP ou Etanol Hidratado, que são aqueles produzidos na usina “X”.

Para a determinação da quantidade de açúcar transformado em cada tipo de produto, foi necessário utilizar o mix açúcar, indicador que define a porcentagem de ART destinada para a produção de açúcar e, conseqüentemente, o restante para a produção de etanol. O valor de mix açúcar comum da usina em questão é de 66,3%.

$$\text{Mix Açúcar} = \frac{\text{ART destinado para produção de Açúcar}}{\text{ART na entrada de cana}}$$

Como todo o caldo que é extraído da cana passa pela etapa de extração, pode-se considerar o mesmo valor de mix para o ART perdido na torta, a fim de se estimar a quantidade de produto não produzido.

Para a determinação da quantidade de produto, açúcar ou etanol, produzido a partir do ART direcionado, foi necessário multiplicá-lo pelos fatores de transformação em produto. Na transformação em açúcar VHP, leva-se em conta apenas a estequiometria da quantidade de sacarose contida em um quilo do produto. Já na transformação em etanol hidratado, outros fatores são levados em conta no cálculo, como a eficiência global da destilaria, a estequiometria da conversão de açúcares redutores em álcool e a densidade do etanol hidratado.

Os valores utilizados foram determinados pela CONSECANA-SP, o Conselho dos Produtores de Cana de Açúcar, Açúcar e Etanol do Estado de São Paulo. Os fatores de conversão foram retirados de FERNANDES (2011).

$$\text{Fator de conversão Açúcar VHP para ART} = 1,0495 \frac{\text{kg ART}}{\text{kg Açúcar VHP}}$$

$$\text{Fator de conversão Etanol Hidratado para ART} = 1,6913 \frac{\text{kg ART}}{\text{L Etanol Hidratado}}$$

Fonte: FERNANDES, 2011

Determinada a quantidade de produto que se deixou de produzir devido às perdas, basta multiplicar pelo valor acumulado da safra para se obter o balanço financeiro entre os diferentes cenários propostos. Os preços da saca de açúcar (50 quilogramas) e do litro de etanol hidratado são encontrados no site da CEPEA, o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada da ESALQ.

*Preço da saca de Açúcar VHP = R\$ 136,617*

*Preço do Litro do Etanol Hidratado = R\$ 3,148*

Fonte: CEPEA, 2022

\*Obs.: os valores utilizados foram calculados como média acumulada da safra de 2022, até o dia 23 de Agosto.

Com todas as variáveis explícitas, foi possível realizar o cálculo do déficit financeiro causado com as perdas no processo conforme a Equação 3.1.

$$S_{TOTAL} = ART_{Torta} \times M \times \frac{1}{f_{VHP}} \times \frac{S_{VHP}}{50} + ART_{Torta} \times (1 - M) \times \frac{1}{f_{EH}} \times S_{EH} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde:

ART<sub>Torta</sub>: Vazão mássica de ART perdido na Torta

M: Mix Açúcar

f<sub>VHP</sub>: fator de conversão de Açúcar VHP em ART

f<sub>EH</sub>: fator de conversão de Etanol Hidratado em ART

S<sub>VHP</sub>: valor do sacco de 50kg de Açúcar VHP

S<sub>EH</sub>: valor do litro de Etanol Hidratado

S<sub>Total</sub>: valor total de faturamento

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Perda na Torta

Através das simulações, obtiveram-se os valores da corrente de ART perdido na torta em função da ocupação dos filtros. A operação em campo acompanha o desempenho dos filtros por meio da pol da torta, indicador diretamente proporcional à perda de ART. Portanto, a Tabela 4.1 demonstra os resultados para os três cenários simulados.

**Tabela 4.1** - Resultados dos Cenários de Simulação

	<b>Cenário 1</b>		<b>Cenário 2</b>		<b>Cenário 3</b>	
	Rotativo	Prensa	Rotativo	Prensa	Rotativo	Prensa
<b>Ocupação (%)</b>	125,06	0	84,29	81,55	68,66	112,82
<b>Pol da Torta (%)</b>	1,98	0	1,55	1,55	1,55	1,76
<b>ART na Torta (kg/h)</b>	407,747	0	211,468	107,569	170,535	168,619

Fonte: Acervo Pessoal

Com todos os valores de corrente de ART na torta, assim como ART de entrada, definido no tópico 3.1, calculou-se a perda na torta, demonstrada na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2** - Perda na Torta nos 3 cenários simulados

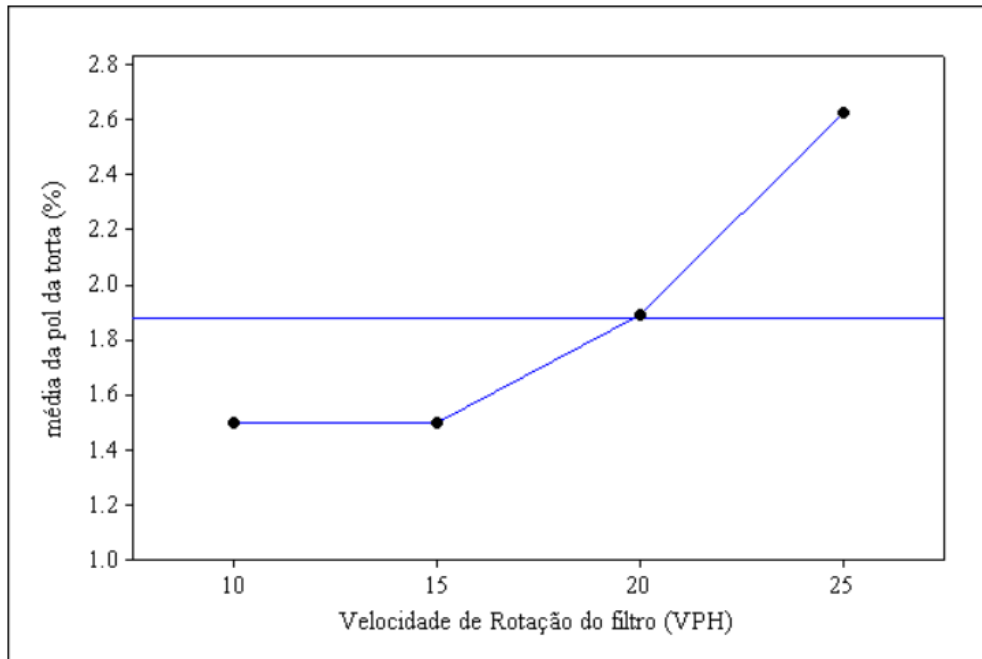
	<b>ART na Torta</b> (kg/h)	<b>ART de Entrada</b> (kg/h)	<b>Perda na Torta</b> (%)
<b>Cenário 1</b>	407,747	64621,02	0,631
<b>Cenário 2</b>	319,037		0,494
<b>Cenário 3</b>	339,154		0,525

Fonte: Acervo Pessoal

Avaliando os cenários, conclui-se que a menor perda na torta se dá no segundo cenário, onde ambas as ocupações não ultrapassam sua capacidade máxima.

No cenário antigo da usina “X”, onde só haviam os filtros rotativos, a capacidade não era suficiente para filtrar todo o material mineral e sólidos insolúveis que adentravam no processo. Desta maneira, para filtrar todo o lodo gerado, algumas medidas são necessárias na operação para garantir a produção e superar os gargalos do processo. A principal medida operativa está no aumento da velocidade do giro do tambor. Ao aumentar a velocidade, produz-se uma cama menos espessa de torta nos filtros, assim como reduz o tempo de exposição ao vácuo e à embebição, fazendo com que menos açúcar seja recuperado ao longo do ciclo do filtro. SANTOS (2009) fornece um gráfico do aumento da média de pol em função do aumento da velocidade de rotação dos filtros rotativos, o qual é reproduzido na Figura 4.1.

**Figura 4.1** - Média de Pol da Torta em função da Velocidade de Rotação dos Filtros



Fonte: SANTOS, 2009

Observa-se pela figura que, em níveis adequados de operação, entre 10 e 15 VPH, a pol da torta se mantém estável já que está dentro da capacidade de operação e ocupação dos filtros. Ultrapassando a velocidade de 15 VPH, ocorre um aumento da pol e, conseqüentemente, aumenta a perda de açúcar na torta.

Ao adicionar o filtro prensa, é possível enquadrar a operação dentro dos limites adequados, viabilizando a recuperação do ART a níveis satisfatórios. É importante notar que, no cenário industrial, muitas vezes os processos sofrem paradas devido a falhas mecânicas, necessidade de reparo ou de limpeza. Desta forma, as capacidades dos filtros oscilam, sendo necessário distribuir o lodo naqueles que estão em condições plenas de operação.

## 4.2 Análise Econômica

A análise econômica foi baseada no faturamento obtido com a redução na perda da torta. A aplicação dos filtros reduz esta perda e nenhuma outra, portanto não são contabilizadas no cálculo de faturamento final.

As perdas em ART compõem o indicador de eficiência industrial, considerado o mais importante já que sua maximização significa os melhores retornos financeiros para a usina.

Usualmente, calcula-se a eficiência a partir dos volumes de produto obtido, pois assim é possível contabilizar realmente quanto foi a conversão do ART em produto finalizado e então é calculado o mix açúcar praticado. Já na perspectiva de simulação, ao obter o valor da eficiência industrial, o valor do mix foi estimado com base em histórico para estimar as produções conforme disponibilidade de ART e o retorno financeiro, possibilitando assim prever o faturamento conforme a redução das perdas no processo. Na perspectiva da filtração, a variação obtida da eficiência industrial pode ser isolada, calculando diretamente seus ganhos.

Uma vez com os parâmetros definidos e calculados, os resultados intermediários do balanço de ART, produção e faturamento são demonstrados pela Tabela 4.3.

**Tabela 4.3 - Balanço de ART, Produção e Faturamento dos Cenários de Simulação**

<b>Balanço ART</b>		<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>
ART Entrada de Cana	(kg/h)	64621,02	64621,02	64621,02
ART Perdido na Torta	(kg/h)	407,747	319,037	339,154
Mix Açúcar	(%)	66,3	66,3	66,3
ART Perdido para Açúcar	(kg/h)	270,336	211,522	224,859
ART Perdido para Etanol	(kg/h)	137,411	107,515	114,295
<b>Produtos</b>				
Açúcar VHP perdido	(sc/h)	5,15	4,03	4,29
Etanol Hidratado perdido	(L/h)	81,25	63,57	67,58
<b>Faturamento</b>				
Renda Açúcar VHP	(R\$/h)	703,81	550,69	585,41
Renda Etanol Hidratado	(R\$/h)	255,79	200,14	212,76

Fonte: Acervo Pessoal

O cenário 2, onde houve a menor perda na torta, apresentou os menores valores acumulados de produto perdido. Portanto, utiliza-se este como cenário comparativo aos outros para calcular o retorno financeiro de situações adversas. Os resultados são mostrados na Tabela 4.4.



**Tabela 4.4 - Retorno Financeiro Comparativo ao Cenário 2**

	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 1</b>	<b>Dif. Bruta</b>
<b>R\$/h</b>	750,83	959,60	-208,77
<b>R\$/dia</b>	18.019,82	23.030,33	-5.010,51
<b>R\$/mês</b>	540.594,58	690.909,89	-150.315,31
<b>R\$/safra</b>	4.324.756,66	5.527.279,13	-1.202.522,48

	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>	<b>Dif. Bruta</b>
<b>R\$/h</b>	750,83	798,17	-47,34
<b>R\$/dia</b>	18.019,82	19.156,07	-1.136,25
<b>R\$/mês</b>	540.594,58	574.681,98	-34.087,40
<b>R\$/safra</b>	4.324.756,66	4.597.455,84	-272.699,18

Fonte: Acervo Pessoal

Nota-se que a ocupação exacerbada dos filtros é o principal aspecto que prejudica a recuperação de ART na etapa, sendo que se torna trivial pensar que a melhor maneira de operar seja aquela onde essa nunca é ultrapassada. Porém, no cenário de redução de custos sempre ativo dentro das plantas industriais, equipamentos parados por falta de necessidade geram gastos inconvenientes, seja no investimento inicial para adquirir um equipamento com potencial de ociosidade ou superdimensionado ou no trabalho de operadores da seção.

Portanto, para se obter o melhor resultado financeiro e, eventualmente, escolher pela ampliação da seção de filtração, é necessário avaliar as diversas circunstâncias nas quais o filtro é requerido ao longo da safra, a qualidade dos aparelhos e a necessidade periódica de manutenção, limpeza e troca de peças, dimensionar corretamente a quantidade de funcionários necessários à operação dos aparelhos e calcular o retorno financeiro frente às ocorrências de extrapolação de capacidade dos filtros.

### 4.3 Variação no Mix Açúcar

O mix açúcar é um importante indicador industrial que define a porcentagem do ART disponível que será destinada à produção de açúcar e, seu restante, para a produção de etanol. Apesar de ser um parâmetro prático, medido diariamente de acordo com a produção diária e consolidado ao final da safra, sua estimativa é utilizada no começo da safra para fins de planejamento estratégico de produção.

O indicador varia, portanto, com as condições do mercado. Para sua definição, são avaliados acordos comerciais, oscilação de preços do açúcar e combustíveis no mercado, capacidade produtiva, eficiência e perdas das diferentes etapas processo, qualidade do produto, entre outros. Entende-se então que sua variação provoca um efeito no resultado consolidado, gerando retornos financeiros positivos quando deslocado para o produto mais valioso do período.

Avaliando essa diferença no presente trabalho, utilizando o cenário 2 como referência e os valores acumulados dos produtos definidos no tópico 3.3, variou-se o mix entre produção máxima e mínima de açúcar, ou seja, com início em 0 e variação de 10%. Os resultados são exibidos na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5 - Variação do Mix Açúcar**

<b>Mix Açúcar (%)</b>	<b>Faturamento Total (R\$)</b>
0	593,88
10	617,55
20	641,22
30	664,90
40	688,57
50	712,24
60	735,91
70	759,58
80	783,26
90	806,93
100	830,60

Fonte: Acervo Pessoal

Portanto, conclui-se que no período analisado, o açúcar é um produto mais valioso que o etanol para cada quilograma de ART produzido. Apesar do ganho voltado à produção de açúcar, existe um empecilho na maximização do mix para açúcar uma vez que apenas a sacarose se transforma em cristais de açúcar. No caso de usinas apenas açucareiras, o mel remanescente é vendido para outra capaz de processar os açúcares redutores para transformação em etanol.

## 5 CONCLUSÃO

Conclui-se deste trabalho que a capacidade ultrapassada dos filtros de lodo resulta em maiores perdas de açúcares redutores finais e, conseqüentemente, maior perda financeira. No cenário onde os filtros rotativos estavam 25,06% além de sua capacidade, a perda na torta ficou 0,137% maior, gerando um custo adicional de R\$ 1.202.522,48 ao longo da safra, comparado com o cenário onde a ocupação dos filtros se mantém menor que 100%. Já no cenário em que o filtro prensa ultrapassou em 12,82% de sua capacidade, a perda ficou 0,031% maior, resultando no custo adicional de R\$ 272.699,18 durante a safra.

O trabalho avaliou o impacto sobre redução nas perdas, não contemplando custos com insumos, operação, manutenção e investimento sobre patrimônio. Outro tópico explicitado revela a contribuição do mix açúcar para um maior retorno financeiro. Permanece como oportunidade para trabalhos futuros a análise econômica em outros aspectos desta etapa, assim como análise de perdas em outros setores do processo.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, Fernando Medeiros de. **Processo de Fabricação do Açúcar**. 3. ed. Recife: Ed. Universitária da Ufpe, 2011. 447 p.
- CEPEA-ESALQ. **Açúcar**. 23 de ago. de 2022. Disponível em: <https://cepea.esalq.usp.br/br/indicador/acucar.aspx>. Acesso em: 29 ago. 2022.
- CEPEA-ESALQ. **Etanol**. 23 de ago. de 2022. Disponível em: <https://cepea.esalq.usp.br/br/indicador/etanol.aspx>. Acesso em: 29 ago. 2022.
- CONAB. **Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar**. 22 de abr. de 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em: 29 ago. 2022.
- COSTA, Rosimeire Filgueira. **Contribuição da Poliacrilamida Parcialmente Hidrolisada em Associação com a Bentonita em Fluidos de Perfuração Aquosos**. 2015. 57 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.
- EDISCIPLINAS USP. **Tratamento e Purificação do Caldo**. 2016. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4119363/mod\\_resource/content/1/aula6.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4119363/mod_resource/content/1/aula6.pdf). Acesso em: 29 ago. 2022.
- EPE. **Balanco Energético Nacional 2021: Ano base 2020 / Empresa de Pesquisa Energética**. – Rio de Janeiro: EPE, 2021.
- FERNANDES, Antonio Carlos. **Cálculos da Agroindústria da Cana-de-Açúcar**. 3. ed. Piracicaba: Gráfica Eme, 2011. 416 p.
- HAMERSKI, Fabiane. **Estudo de Variáveis no Processo de Carbonatação do Caldo de Cana-de-Açúcar**. 2009. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- HUGOT, E. **Manual da engenharia açucareira**. São Paulo: Editora Mestre Jou, 1969.
- LIMA, Camila Francisconi. **Utilização de Polímeros no Setor Sucroenergético**. 2017. 36 f. Monografia (Especialização) - Curso de Gestão de Tecnologia Industrial Sucroenergética, Universidade Federal de São Carlos, Sertãozinho, 2017.
- LIMA, Roberta Bergamin. **Processo de Clarificação de Caldo de Cana-de-Açúcar Aplicando Elétrons Acelerados**. 2012. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências da Área de Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2012.
- LINKEDIN. **Filtração do Lodo para a Produção de Açúcar**. 12 de jun. de 2018. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/filtra%C3%A7%C3%A3o-do-lodo-para-produ%C3%A7%C3%A3o-de-a%C3%A7%C3%ACar-bruno-francisco/>. Acesso em: 29 ago. 2022.
- MAGALHÃES, Paulo Graziano. Produção de Etanol: Qualidade de Matéria Prima. In: PROJETO PROGRAMA DE PESQUISA EM POLÍTICAS PÚBLICAS, 2008, Lorena. Universidade Estadual de Campinas, 2008. 16 p.
- MAUSA. **Filtro Desaguador série MDF**. [s.d.]. Disponível em: <https://mausa.com.br/filtro-desaguador.php>. Acesso em: 29 ago. 2022.

MAUSA. **Filtro Rotativo à Vácuo FRV**. [s.d.]. Disponível em: <https://mausa.com.br/filtro-rotativo-a-vacuio.php>. Acesso em: 29 ago. 2022.

NACHILUK, K. Alta na Produção e Exportações de Açúcar Marcam a Safra 2020/21 de Cana. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, São Paulo, v. 16, n. 6, jun. 2021, p. 1-5. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=15925>. Acesso em: 29 set. 2022.

PAYNE, John Howard. **Operações Unitárias na Produção de Açúcar de Cana**. 2. ed. São Paulo: Nobel/Stab, 1989. 245 p.

POLONIO, Walter L.; GONÇALVES, Eliete M.; RAZUK, Paulo C.. Avaliação de meios filtrantes primários em filtro contínuo de tambor rotativo a vácuo para lodo de caldo de cana. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 26, n. 1, p. 170-180, abr. 2006. FapUNIFESP (SciELO).

RAINEY, T.J., THAVAL., O.P., RACKERMANN, D.W. 2014. Developments in Mud Filtration Technology in the Sugarcane Industry. In **Sugarcane: Production, Consumption and Agricultural Management Systems**. Edited by Eleanor Webb, 263-292, New York.

REIN, Peter. **Engenharia do Açúcar de Cana**. Berlin: Bartens, 2013. 878 p.

RIBEIRO, Carlos A. F.; BLUMER, Solange A. G.; HORII, Jorge. **Fundamentos da Tecnologia Sucroalcooleira: tecnologia do açúcar**. Piracicaba: Esalq, 1999.

SANTOS, Luís Carlos. **Análise da Variabilidade do Processo de Filtração em Filtros de Tambor Rotativo a Vácuo para Lodo de Caldo de Cana de Açúcar**. 2009. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2009.

SOUZA, D. L. de; SPIRANDELI, A. B. de L.; SOUZA, A. S. e; PINTO, C. F.; PAULA, J. A. A. de; AGASSI, L. E.; OLIVEIRA, M.; CORREA, T. F. Projeto e construção de um filtro de tambor rotativo à vácuo em escala de laboratório. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação**, Uberaba - MG, v. 1, n. 3, p. 27-42, 2016. DOI: 10.18554/rbcti.v1i3.3682. Disponível em: <https://seer.uftm.edu.br/revistaelectronica/index.php/rbcti/article/view/3682>. Acesso em: 29 ago. 2022.