



LUCAS CHAVES DE BRITO

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO MIX DE PRODUÇÃO SOBRE  
A EFICIÊNCIA DO PROCESSO PRODUTIVO EM UM  
BIOPARQUE INDUSTRIAL**

**Lavras - MG  
2023**

**LUCAS CHAVES DE BRITO**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO MIX DE PRODUÇÃO SOBRE A EFICIÊNCIA DO  
PROCESSO PRODUTIVO EM UM BIOPARQUE INDUSTRIAL**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado à Universidade Federal de  
Lavras, como parte das exigências do  
Curso de Engenharia Química, para  
obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Gilson Campani Junior  
Orientador

Eng. Danilo Aparecido da Silva  
Coorientador

**Lavras - MG  
2023**

**LUCAS CHAVES DE BRITO**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO MIX DE PRODUÇÃO SOBRE A EFICIÊNCIA DO  
PROCESSO PRODUTIVO EM UM BIOPARQUE INDUSTRIAL**

**IMPACT EVALUATION OF THE PRODUCTION MIX ON THE EFFICIENCY OF  
THE PRODUCTION PROCESS IN AN INDUSTRIAL BIOPARK**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado à Universidade Federal de  
Lavras, como parte das exigências do  
Curso de Engenharia Química, para  
obtenção do título de Bacharel.

Aprovado em 17 de julho de 2023.  
Prof. Dr. Gilson Campani Junior – UFLA  
Prof. Dr. Luciano Jacob Corrêa – UFLA  
Prof. Dr. Guilherme Vieira Pimentel – UFLA  
Eng. Danilo Aparecido da Silva – AGROPÉU

Prof. Dr. Gilson Campani Junior  
Orientador

Eng. Danilo Aparecido da Silva  
Coorientador

**Lavras - MG**  
**2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar queria agradecer a Deus por ter me concedido forças e saúde para chegar até aqui no curso, sendo que várias foram as dificuldades, mas com garra e determinação os obstáculos foram vencidos.

Em segundo queria agradecer a minha família que esteve comigo em todos os momentos me apoiando emocionalmente e nunca deixando eu desistir, sempre acreditando no meu potencial e me fornecendo motivos para encarar mais essa jornada da vida acadêmica.

Agradeço também os meus grandes amigos, que ficaram marcados durante toda a minha trajetória da graduação, sendo nas aulas ou nas entidades de extensão, que entre elas estão: o Diretório Central dos Estudantes – gestão voz ativa, que me fez entender conceitos de gestão de pessoas e a pluralidade de ideias dentro de nossa grande universidade; o Laboratório de Gestão de Resíduos Químicos no qual fui bolsista e aprofundei meus conhecimentos em técnicas laboratoriais assim como me fez entender o mundo de uma forma mais sustentável, cabe agradecimento a todos os técnicos administrativos e professores envolvidos; o Engenheiros Sem Fronteiras - núcleo Lavras, que me tornou uma pessoa mais humana e ali me fez entender o verdadeiro significado da palavra humildade e compaixão pelo próximo, sem dúvidas aqui deixo minha gratidão especial a todos que fizeram parte dessa história; a ProcEQ júnior - Consultoria e Soluções em Engenharia Química que me desenvolveu como profissional diante dos infinitos desafios dentro da gestão e diversos projetos realizados; o Núcleo de Estudos em Processos Sucoenergéticos do qual tive o prazer de ser membro fundador e me apaixonar pelo setor. Por fim, queria reforçar o meu eterno agradecimento a todos meus amigos, colegas e professores que contribuíram para minha formação acadêmica, profissional e humana dentro da UFLA e em seu entorno.

As repúblicas onde morei, Barraca Armada e T.C.C., fica minha gratidão aos meus irmãos de caminhada por terem sido pacientes e me apoiarem nos momentos caóticos, inclusive quando sofri meu acidente de moto, vocês foram essenciais para superar tudo isso.

A Agropéu S.A. - Açúcar, Etanol e Energia, que foi a base do meu trabalho de conclusão de curso, além do meu estágio. Empresa na qual estou aplicando todo o meu conhecimento adquirido durante a graduação e aprendendo cada dia mais, cabe ressaltar também todos os colaboradores que sem questionamento me cederam seu tempo para esclarecer todas as dúvidas por mim citadas.

Agradeço infinitamente ao meu orientador, por todas as sugestões de melhoria e desenvolvimento do meu trabalho, ao meu coorientador que foi uma pessoa chave na apuração de todos os dados e tudo que se foi trabalhado aqui e a toda banca examinadora que aceitou meu convite para defesa.

Finalmente, queria deixar a palavra que resumiu minha graduação: RESILIÊNCIA, que é a capacidade de se adaptar diante as adversidades que não foram poucas.

**MEU ETERNO MUITO OBRIGADO!**

## RESUMO

O panorama mundial vem se alterando com frequência na busca por energias renováveis, principalmente no que tange ao meio ambiente, para o qual o setor sucroenergético ganha ainda mais espaço, aumentando sua eficiência e indo em busca de maior produtividade. Para isso, levam-se em consideração as Políticas de “*Environmental, Social and Governance*” (ESG), que dizem respeito à geração de valor econômico aliado a preocupações com as questões ambientais, sociais e a governança corporativa. No setor sucroenergético, o etanol, o açúcar e a energia produzidos são parte dos produtos obtidos nas usinas, tendo como matéria-prima principal a cana-de-açúcar. O processo produtivo do etanol se diferencia da produção do açúcar nas etapas adicionais de fermentação e destilação, as quais impactam nos cálculos da eficiência geral industrial (EGI). Visou-se com o presente trabalho comparar o desempenho industrial de uma usina onde há separação do processo para produção de açúcar e de etanol. Para isso, foram analisados dados reais da planta, a fim de identificar os parâmetros que resultam na diferença da EGI quando se tem um mix de produção açucareiro e alcooleiro. Foi constatado que quando o mix é voltado para a produção do açúcar a EGI é maior, pois há menores perdas de eficiência. Já para o mix alcooleiro, há maiores perdas de eficiência, em especial na etapa de fermentação, processo que depende de leveduras, a qual pode ser impactada pela temperatura, microrganismos contaminantes e a própria viabilidade celular das leveduras, tornando assim o processo mais complexo de ser controlado. Vale ressaltar, que a fermentação é impactada com perdas de açúcares no mosto desde a fábrica de açúcar. O mel final sofre uma redução do Brix, o que afeta o processo fermentativo como um todo, reduzindo assim sua eficiência. Desse modo, pode-se concluir que o mix de produção é uma variável importante que afeta diretamente a EGI, sendo que o processo de fabricação de açúcar possui uma maior recuperação de fábrica, obtendo assim uma maior eficiência.

**Palavras-chave:** Sucroenergético. *Environmental, Social and Governance*. Bioparque de energia. Eficiência industrial. Açúcares redutores totais.

## LISTA DE SIGLAS

<i>ANP</i>	- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil	
<i>ATR</i>	- Açúcares Totais Recuperáveis	
<i>ART</i>	- Açúcares Redutores Totais	
<i>AVHP</i>	- Açúcar de alta polarização ( <i>Very High Polarization</i> )	
<i>EAC</i>	- Etanol Anidro Carburante	
<i>ED</i>	- Eficiência da Destilaria	(%)
<i>EHC</i>	- Etanol Hidratado Combustível	
<i>EGI</i>	- Eficiência Geral Industrial	(%)
<i>IAA</i>	- Instituto de Açúcar e Alcool	
<i>UDOP</i>	- União Nacional da Bioenergia	
<i>UNICA</i>	- União da Agroindústria Canavieira de São Paulo	
<i>RIDESA</i>	- Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do setor Sucroenergético	

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	8
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	10
2.1 Panorama da produção de açúcar e etanol no Brasil e no mundo .....	10
2.2 Cana-de-açúcar .....	12
2.3 Bagaço .....	14
2.4 Laboratório de Pagamento de Cana pelo Teor de Sacarose (PCTS) .....	15
2.5 Boletim industrial .....	16
2.6 Brix .....	16
2.7 Fibra .....	17
2.8 Coeficiente C .....	17
2.9 Pol da cana .....	18
2.10 Açúcares Redutores .....	19
2.10.1 Açúcares redutores da cana .....	19
2.10.2 Açúcares totais recuperáveis .....	20
2.11 Processo produtivo .....	21
2.11.1 Moagem .....	22
2.11.2 Tratamento do caldo .....	23
2.11.3 Produção de açúcar .....	24
2.11.4 Produção de etanol .....	26
2.11.4.1 Fermentação .....	27
2.11.5 Cogeração de energia .....	29
2.11.6 Tratamento de água .....	30
2.12 Eficiências e rendimentos .....	31
2.12.1 Eficiência da Fábrica .....	31
2.12.2 Eficiência da Fermentação .....	31
2.12.3 Eficiência da Destilação .....	32
2.13 Mix de produção .....	33
2.14 Eficiência Geral Industrial .....	33
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	34
3.1 Dados experimentais .....	34
3.2 CompuSoftware .....	35
3.3 Avaliação do mix de produção .....	36
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	37
4.1 Validação do boletim industrial .....	37
4.2 Avaliação do mix de produção sobre a eficiência industrial .....	39
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	41
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	42

## 1 INTRODUÇÃO

As comumente chamadas usinas de açúcar e etanol vêm se transformando com o passar do tempo e ganhando cada vez mais destaque no mercado nacional e internacional. Com o reaproveitamento dos resíduos do processo produtivo (palha, bagaço, cinzas, torta de filtro e vinhaça) e a implementação da economia circular, um novo nome surge para as unidades sucroenergéticas, que são chamadas agora de “Bioparques de Energia”, pois produzem muito mais além do etanol e do açúcar, trazendo mais coprodutos oriundos da cana-de-açúcar, como a energia e os biofertilizantes (NUNES, 2017).

O Brasil se mantém em posição de destaque quanto à produção de etanol, o combustível verde que é uma das principais alternativas limpas e renováveis para o uso consciente da matriz energética, e que emite cerca de 90% a menos de gás carbônico na atmosfera quando comparado a gasolina. Visto isso, o Ministério de Minas e Energia (MME) lançou um programa de incentivo à utilização do etanol em dezembro de 2016, intitulado *RenovaBio*, com o objetivo de expandir a produção do biocombustível fundamentada na sustentabilidade econômica, social e ambiental. Esse programa vem sendo bastante adotado pelas distribuidoras de etanol, através do crédito de descarbonização ou crédito de carbono (CBIO), que representa uma tonelada de CO<sub>2</sub> deixada de ser emitida pela substituição do combustível fóssil (UDOP, 2023).

Os bioparques de energia no Brasil são avaliados pelo seu desempenho industrial através do valor da Eficiência Geral Industrial (EGI) que leva em consideração para os cálculos diversos parâmetros do processo, de forma geral, encontrados nos boletins industriais de cada usina. Dentre eles há um importante indicador que representa a qualidade da cana, ou mesmo a capacidade de a cana-de-açúcar ser transformada em açúcar ou etanol, sendo denominado de Açúcar Total Recuperável (ATR), que é utilizado para pagamento de fornecedores, através do cálculo de produção (FERNANDES, 2011).

De acordo com a União Nacional da Bioenergia (UDOP, 2023) a matéria-prima mais utilizada no mundo todo para produção de etanol e açúcar é a cana-de-açúcar, sendo que alternativamente já se utiliza o milho, principalmente na América do Norte. A nível nacional, é evidenciado que no Brasil, a maioria das usinas se concentram na região Centro-Sul.

O Brasil possui um potencial enorme de produção de etanol, pois existe uma extensa área de terra cultivável e produtiva, sendo o avanço das técnicas agrícolas o principal responsável pelo aumento de produção dos canaviais. O índice que define essa eficiência



produtiva é comumente denominado de tonelada de cana por hectare (TCH), e quanto maior for o índice, mais rentável é o canavial.

No processo industrial dos bioparques se define o mix de produção como sendo o produto para o qual uma safra vai ser voltada, sendo determinado antes mesmo da safra se iniciar. Pode acontecer de se alterar o mix de produção durante a safra por fatores econômicos, o que contribui muito para diminuição ou para o aumento da eficiência industrial, resultando na alteração do planejamento industrial e dos custos da safra vigente.

Sabe-se ainda que o mix de produção impacta diretamente na eficiência industrial, sendo o processo fermentativo um dos principais responsáveis pela queda da eficiência, devido à instabilidade fisiológica das leveduras (fungos que metabolizam os açúcares presentes no mosto e os transformam em álcool e gás carbônico) e também pela alta complexibilidade de se controlar o processo.

Visou-se com o presente trabalho analisar os parâmetros de produção contidos no boletim industrial a fim de avaliar as diferenças na EGI de acordo com o mix de produção voltado para a produção do açúcar ou para a produção de etanol das safras 22/23 e 23/24 da empresa Agropéu S.A. - Açúcar, Etanol e Energia.

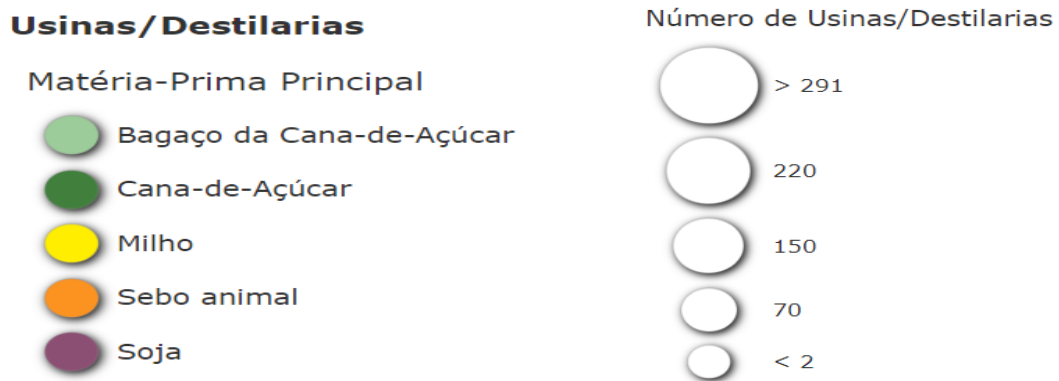
## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Panorama da produção de açúcar e etanol no Brasil e no mundo

A safra 22/23 foi marcada por um ligeiro aumento na moagem de cana principalmente na região centro-sul do Brasil, que acumulou 531,93 milhões de toneladas de cana-de-açúcar processada, e em comparação à safra 21/22 registrou um aumento de 2,06%. Para a produção de açúcar totalizou no acumulado da safra 22/23 um total de 33,29 milhões de toneladas, ante 32,06 milhões de toneladas da safra anterior, registrando um aumento de 3,84% na produção do adoçante. Já para o acumulado da produção de etanol, chegou a um total de 27,15 bilhões de litros, sendo 15,63 bilhões a fatia do etanol hidratado e 11,52 bilhões a fatia do anidro. Uma diminuição de 0,65% na produção do hidratado e um aumento de 7,16% na produção do anidro quando se comparado à safra anterior, fator que se deve à perda de competitividade do etanol hidratado à gasolina e aumento da produção do anidro pela utilização na mistura com a gasolina, com uma relação de 27% de etanol anidro para 73% de gasolina em volume (UNICA, 2023).

No mundo, o Brasil se figura como o segundo maior produtor de etanol, sendo responsável por 27,5% do volume global produzido em 2021, utilizando como principal matéria-prima a cana-de-açúcar, estando abaixo apenas do Estados Unidos que é responsável por 54,9% do volume de produção de etanol utilizando principalmente o açúcar do milho (RFA, 2021). Segundo a UDOP (UDOP, 2023), o panorama mundial de usinas produzindo açúcar e etanol a partir das matérias-primas citadas na legenda, está distribuído conforme a Figura 1.

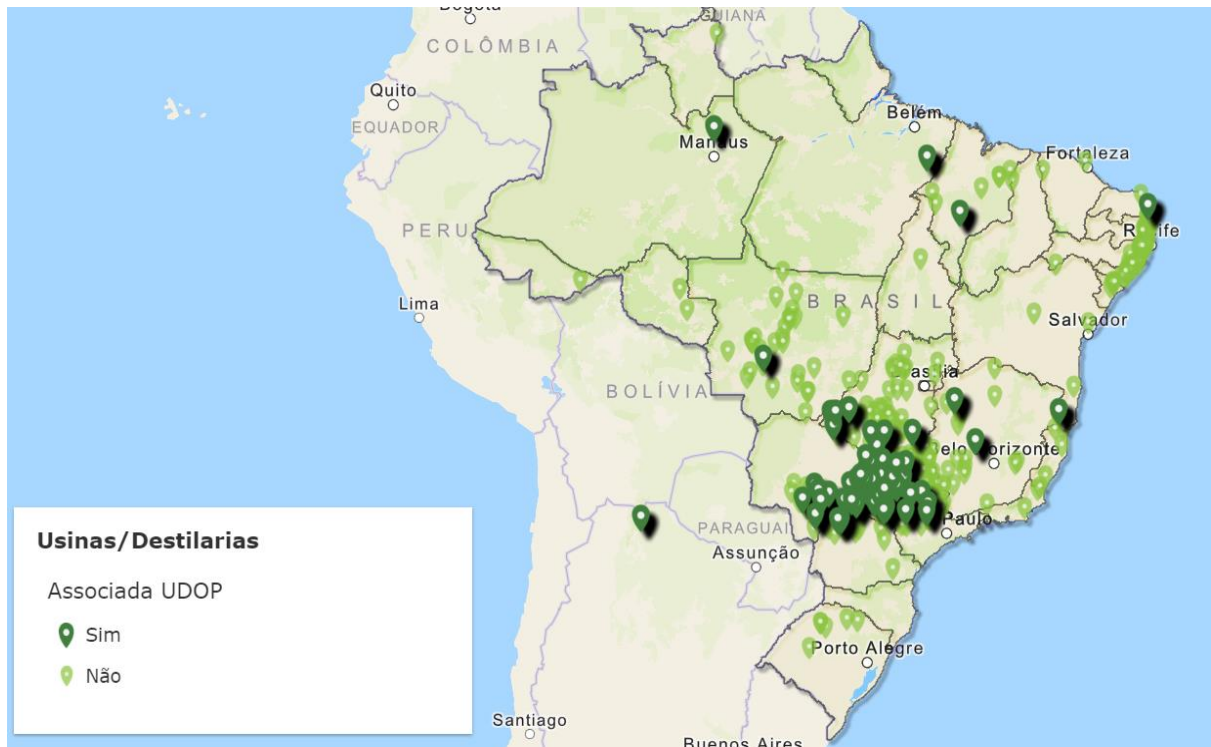
Figura 1 - Clusters do mercado mundial.



Fonte: UDOP-ARCGIS (2023).

Analisando a Figura 1 é possível perceber que a matéria-prima mais utilizada no mundo é a cana-de-açúcar que produz cerca de 70 a 85 litros de etanol por tonelada processada, sendo que já se utiliza o milho principalmente na América do Norte que rende cerca de 370 a 460 litros de etanol por tonelada processada. Já a nível nacional, surge o panorama mostrado na Figura 2, deixando claro que a maioria das usinas se concentram na região Centro-Sul do país.

Figura 2 - Usinas associadas no Brasil.



Fonte: UDOP-ARCGIS (2023).

## 2.2 Cana-de-açúcar

A matéria-prima mais utilizada para a produção de açúcar e etanol no Brasil é a cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), que possui características específicas, como um colmo rico em sacarose e com boa adaptabilidade ao clima tropical e subtropical devido a sua origem na Oceania, mais precisamente onde se encontra a ilha de Nova Guiné, ao norte da Austrália, definindo assim seu vasto potencial para obtenção dos produtos finais. O que determina sua qualidade final está no manejo de produção, no cultivo do solo e na variedade plantada.

Os colmos da cana possuem em sua composição o caldo, que é constituído de água e sólidos solúveis totais que representam os açúcares e não-açúcares, além dos sólidos insolúveis em água que são constituídos pela fibra da cana.

Os sólidos solúveis são classificados nos açúcares sacarose, glicose e frutose, e em não-açúcares orgânicos e inorgânicos (CALDAS et al., 2017). A cana-de-açúcar da variedade RB867515 é atualmente a mais cultivada na Agropéu e uma amostra plantada no campo está demonstrada na Figura 3.

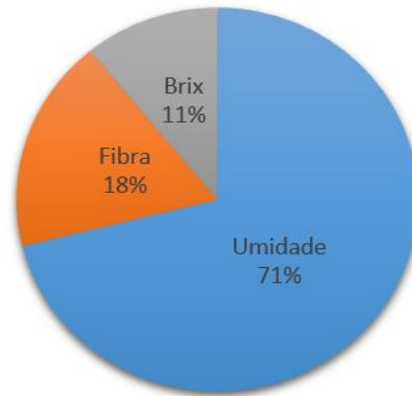
Figura 3 – Variedade RB867515 de cana-de-açúcar.



Fonte: Do autor (2023).

Essa variedade de cana-de-açúcar foi desenvolvida pela Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do setor Sucroenergético (RIDESA) e vem se mantendo como a mais cultivada no Brasil, sendo uma variedade muito tolerante à seca, condição essa comum no país. Essa variedade possui um crescimento ereto e rápido, com uma fácil despalha. Os colmos são de cor verde-arroxeadado quando cobertos pela palha e roxo intenso quando expostos à luz solar. O teor de fibra é considerado alto, com média de 13%, além de alto teor de sacarose e produtividade agrícola. Essa cana responde muito bem ao maturador aplicado, e pode ser colhida no início de safra, com excelente desenvolvimento e boa brotação na planta e socas (RIDESA, 2010). Já a sua composição tecnológica, que pode variar por diversos fatores, está demonstrada na Figura 4.

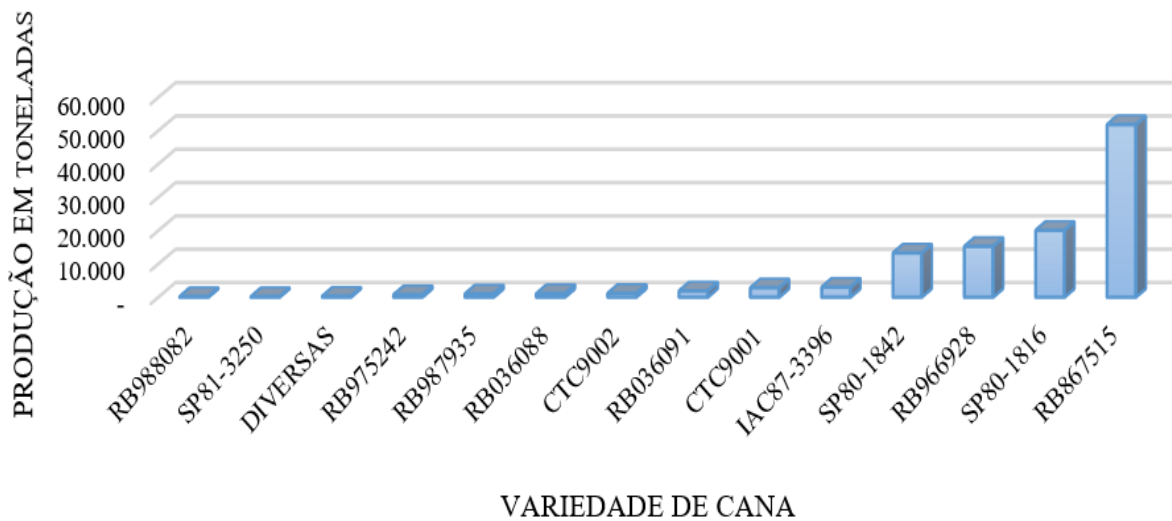
Figura 4 – Composição tecnológica da cana-de-açúcar variedade RB867515.



Fonte: Do autor (2023).

A produção da empresa no último mês de safra 2022/2023 de acordo com as variedades de cana-de-açúcar, dando destaque as 51.849,59 toneladas da variedade RB867515, está apresentada na Figura 5.

Figura 5 – Produção por variedade de cana-de-açúcar.



Fonte: Agropéu S.A. (2023).

### 2.3 Bagaço

O bagaço resultante da extração do caldo de cana-de-açúcar é um coproduto fibroso constituído basicamente por 40% de celulose, 25% de hemicelulose e 20% de lignina, sendo a lignina o componente com maior poder calorífico (MORAIS, SILVA, 2008). Utilizado para a produção de vapor na caldeira, essa fonte de biomassa tem um importante papel nas usinas para cogeração de energia.

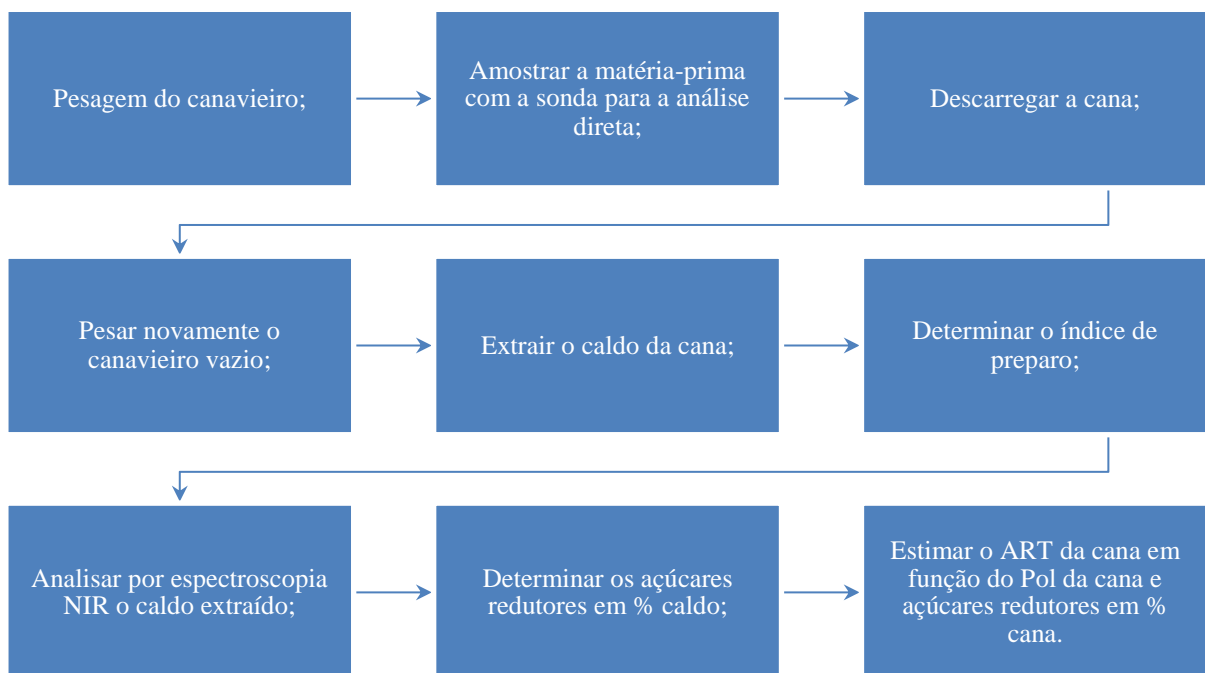


## 2.4 Laboratório de Pagamento de Cana pelo Teor de Sacarose (PCTS)

O PCTS tem como objetivo analisar o teor de sacarose e qualidade da cana advinda do campo, seja para realizar o pagamento a algum fornecedor ou para analisar a qualidade da cana de plantio próprio. As normas de análises são padronizadas pelo CONSECANA-SP e basicamente consiste em levar a amostragem de cana a uma forrageira para desfibragem, sendo feita a homogeneização da amostra através de uma betoneira.

O método utilizado para extração do caldo de cana no laboratório PCTS utilizado na Agropéu é o da prensa hidráulica. Uma prensa automática pode extrair caldo de 20 ou mais amostras por hora de trabalho, com tempo de prensagem de 1 minuto e pressão de 250 kgf/cm<sup>2</sup> para duas amostras. O método da prensa hidráulica fornece os seguintes dados: fibra em % cana (FC), Pol da cana (PC), Brix da cana (BC), pureza do caldo (QJ) e açúcares redutores totais em % cana (ART). O procedimento se baseia no seguinte fluxograma da Figura 6.

Figura 6: Fluxograma de análises realizadas no Laboratório PCTS.



Fonte: Do autor (2023).

A prensa hidráulica de modelo PL-001 adotada no PCTS da usina Agropéu é apresentada na Figura 7.

Figura 7 – Prensa hidráulica modelo PL-001.



Fonte: Do autor (2023).

## 2.5 Boletim industrial

O boletim industrial é a principal ferramenta de acompanhamento industrial na safra, pois contém todos os dados de qualidade e eficiências do processo produtivo organizadas e divididas em tópicos. Entre os principais parâmetros disponíveis estão os Açúcares Totais Recuperáveis (ATR), que é o parâmetro utilizado para pagar fornecedores de cana, todas as eficiências industriais, que são pontos a serem analisados e melhorados constantemente, além da geração e distribuição de vapor, utilizado principalmente na cogeração de energia a partir do bagaço de cana. A validação do boletim industrial se faz necessária para acompanhamento dos dados obtidos pelo laboratório PCTS, onde se inicia toda a análise de cana, afetando desde o setor de pagamento e processamento da matéria-prima até o produto final. Como referência, se utiliza o padrão CONSECANA, que regulamenta todos os cálculos apresentados a seguir (CONSECANA, 2015).

## 2.6 Brix

O Brix é um dos parâmetros mais utilizados nas usinas. O mesmo é expresso em porcentagem peso/peso dos sólidos solúveis contidos em uma solução pura de sacarose. Em outras palavras, o Brix reflete principalmente o teor de sacarose na solução, sendo que a



quantidade de sólidos solúveis é o total de todos os sólidos dissolvidos em água, começando com sal, açúcar, proteínas, ácidos, entre outros e os valores de leitura medido é a soma de todos eles. (FERNANDES, 2011). O método de aferição do Brix na Agropéu é o refratométrico, sendo obtido por um refratômetro que mede o índice de refração de uma solução de açúcar, a qual é correlacionada com a sua concentração.

As médias diárias do Brix do caldo ( $B_d$ ) devem ser obtidas pela ponderação dos seus respectivos valores medidos com o peso do carregamento analisado e expressas com duas casas decimais arredondadas. O valor de  $B_d$  é dado pela Equação 1.

$$B_d = \frac{B_1 * P_1 + B_2 * P_2 + \dots + B_n * P_n}{P_1 + P_2 + \dots + P_n} \quad (1)$$

Em que  $B_1, B_2, \dots, B_n$  são as leituras de  $B_d$  obtidas por carregamento analisado e  $P_1, P_2, \dots, P_n$  são os pesos dos carregamentos analisados, expressas em toneladas. O mesmo padrão se segue para o  $LP_b$  e  $PBU$ .

As médias quinzenais do Brix do caldo ( $B_q$ ) devem ser obtidas pela ponderação das suas médias diárias com os pesos de todos os carregamentos entregues e expressas com duas casas decimais arredondadas. O valor de  $B_q$  é representado pela Equação 2.

$$B_q = \frac{B_{d1} * P_{d1} + B_{d2} * P_{d2} + \dots + B_{dn} * P_{dn}}{P_{d1} + P_{d2} + \dots + P_{dn}} \quad (2)$$

Em que  $B_{d1}, B_{d2}, \dots, B_{dn}$  são as leituras médias ponderadas diárias de Brix do caldo e  $P_{d1}, P_{d2}, \dots, P_{dn}$  são os pesos de todos os carregamentos entregues diariamente na quinzena.

As mesmas equações são empregadas para o acompanhamento diário e quinzenal da leitura sacarimétrica ( $LP_b$ ) e do peso de bolo úmido ( $PBU$ ).

## 2.7 Fibra

A fibra é a matéria insolúvel em água contida na cana, que é muito importante para geração de vapor na caldeira. A sua concentração é expressa em teor de fibra % na cana ( $F$ ), sendo representada pela Equação 3.

$$F = 0,08 * PBU + 0,876 \quad (3)$$

Em que  $PBU$  é o peso do bagaço úmido na prensa, em gramas.

## 2.8 Coeficiente C

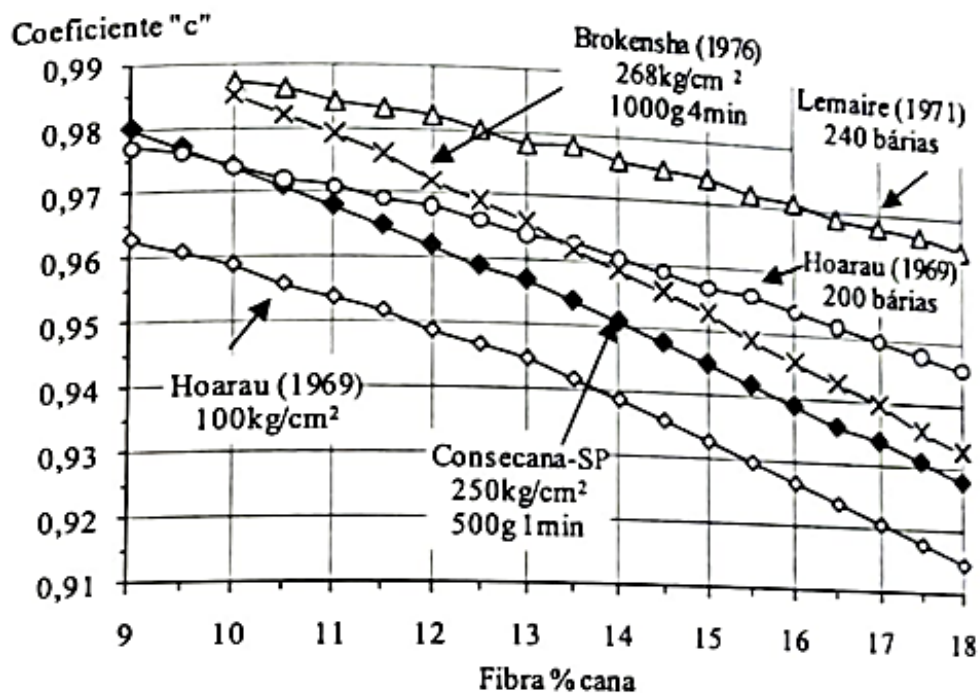
O coeficiente  $C$  é utilizado para a transformação da Pol do caldo extraído pela prensa em porcentagem ( $S$ ) em Pol do caldo absoluto, sendo calculado pela Equação 4.

$$C = 1,0313 - 0,00575 * F \quad (4)$$

Em que F é a Fibra da cana em porcentagem.

O valor do coeficiente C será sempre menor que um, trazendo como entendimento que a Pol do caldo extraído será sempre maior que a Pol no caldo absoluto. O coeficiente C se difere principalmente pela pressão utilizada na extração do caldo e pela quantidade de cana prensada e tempo de prensagem. A representação da conversão da Pol do caldo extraído em Pol do caldo absoluto feita por diversos autores está na Figura 8.

Figura 8 – Coeficiente C por diversos autores.



Fonte: Fernandes (2011).

## 2.9 Pol da cana

O Pol expressa a porcentagem aparente de sacarose contida na solução de açúcares, sendo determinada por métodos sacarimétricos, baseados na propriedade que os açúcares possuem de desviar a luz polarizada, ou seja, aquela que vibra em uma única direção.

No Laboratório PCTS, para análise do Pol é utilizado o Sugarpol da empresa Onibras, como clarificante de caldo bruto de cana-de-açúcar, passando o caldo clarificado por um sacarímetro para se obter a concentração de açúcar na solução. O objetivo principal da clarificação é remover o máximo possível de impurezas presentes no caldo da cana, obtendo

um caldo límpido mediante a coagulação máxima de coloides e a formação de precipitados que adsorvam e arrastem as impurezas coloidais (SOUZA, 1988).

A Pol da cana indica o total de sacarose aparente contida no caldo absoluto por cento de cana (massa/massa), denominada como Pol % cana (PC), sendo determinada pela Equação 5.

$$PC = S * (1 - (0,01 * F)) * C \quad (5)$$

Em que S é a Pol do caldo expressa em porcentagem (%), F é o teor de fibra cana expresso em porcentagem (%), C é o coeficiente obtido conforme a Equação 4 estabelecido pelo CONSECANA.

As médias de Pol do caldo (S), diária (Sd) e quinzenal (Sq), devem ser calculadas a partir do Ld e Bd, Lq e Bq, respectivamente, e são expressas pela Equação 6.

$$S = LPd * (0,2605 - 0,0009882 * B) \quad (6)$$

Em que LPb é a leitura sacarimétrica equivalente à leitura de subacetato de chumbo, LPbd e LPbq são as médias ponderadas, diária e quinzenal, das leituras sacarimétricas, respectivamente, B é o Brix do caldo e Bd e Bq são as médias ponderadas, diária e quinzenal, do Brix do caldo, respectivamente.

## 2.10 Açúcares Redutores

Os monossacarídeos são conhecidos como Açúcares Redutores (AR), pois em sua estrutura possuem um grupo cetona ou aldeído, que ficam livres em solução aquosa e são capazes de liberar energia quando oxidados. Portanto, esses compostos apresentam o potencial de reduzir algum agente oxidante como o oxigênio, em seres vivos, ou em ensaios controlados utilizando o bromo, por exemplo. O cálculo dos Açúcares Redutores do caldo (AR) é dado pela Equação 7.

$$AR = 3,641 - 0,0343 * Q \quad (7)$$

Em que o Q é a pureza aparente do caldo sendo obtido pela relação da Pol sobre os demais sólidos solúveis, em porcentagem.

### 2.10.1 Açúcares redutores da cana

O caldo da cana é composto por basicamente três açúcares principais: sacarose, glicose e frutose. A sacarose (C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub>) é um dissacarídeo composto por um monossacarídeo de glicose e outro de frutose, sendo o principal parâmetro de qualidade tecnológica de cana-de-açúcar.

A glicose ( $C_6H_{12}O_6$ ) está presente nos seres vivos e é produzido por plantas verdes durante a fotossíntese. As reações de respiração dentro das células envolvem a oxidação de glicose para produzir ATP, a molécula de energia utilizada para direcionar muitas reações bioquímicas celulares.

A frutose ( $C_6H_{12}O_6$ ) é semelhante à glicose, tendo como diferença um grupo característico: na frutose se tem o grupo cetona e na glicose o grupo aldeído.

Os Açúcares Redutores da Cana (ARC) são utilizados para designar os açúcares (glucose e a frutose, principalmente) que apresentam a propriedade de reduzir um agente oxidante, como o óxido de cobre, no caso do estado cúprico a cuproso. Esse parâmetro é calculado pela Equação 8.

$$ARC = AR * (1 - (0,01 * F)) * C \quad (8)$$

Em que AR é o teor de açúcares redutores do caldo, F é a fibra da cana e C é o coeficiente utilizado para a transformação da Pol do caldo extraído pela prensa em porcentagem.

### 2.10.2 Açúcares totais recuperáveis

O Açúcar Total Recuperável (ATR), expresso em kg/ton, constitui um dos parâmetros de pagamento de cana implantado no estado de São Paulo a partir da safra de 1998/99 pelo CONSECANA-SP, expresso pelas Equações 9 e 10.

$$ATR = 10 * PC * 1,05263 * 0,915 + 10 * ARC * 0,915 \quad (9)$$

ou

$$ATR = 9,6316 * PC + 9,15 * ARC \quad (10)$$

Em que  $10*PC$  é o Pol por tonelada de cana, 1,05263 é o coeficiente estequiométrico para a conversão de Pol em açúcares redutores, 0,915 é o coeficiente de recuperação para uma perda industrial de 8,5% e  $10*ARC$  são os açúcares redutores por tonelada de cana.

Os açúcares redutores totais fermentescíveis ( $ART_{cana}$ ) são os açúcares possíveis de serem transformados em etanol e são expressos pela Equação 11.

$$ART_{cana} = \frac{PC}{0,95} + ARC \quad (11)$$

O açúcar total recuperável relativo do fornecedor ( $ATR_r$ ) é calculado pela Equação 12.

$$ATR_r = ATR_{fq} + ATR_{us} - ATR_{uq} \quad (12)$$

Em que  $ATR_{fq}$  é o açúcar total recuperável do fornecedor na quinzena,  $ATR_{uq}$  é o açúcar total recuperável da usina (própria+fornecedor) na quinzena e  $ATR_{us}$  é o açúcar total recuperável da unidade industrial (própria+fornecedor) na safra.

O ATR mensal é expresso em quilogramas de ATR por tonelada de cana, pela ponderação do ATR quinzenal, expresso pela Equação 13.

$$ATR_m = \frac{ATR_{q1} * P_{q1} + ATR_{q2} * P_{q2}}{P_{q1} + P_{q2}} \quad (13)$$

Em que  $ATR_m$  é a média mensal ponderada do ATR,  $ATR_{q1}$  e  $ATR_{q2}$  são as médias ponderadas das quinzenas 1 e 2 e  $P_{q1}$  e  $P_{q2}$  são os totais do peso de cana entregue nas quinzenas 1 e 2.

Já o ATR safra é expresso em quilogramas por tonelada de cana e dado pela Equação 14.

$$ATR_s = \frac{ATR_{q1} * P_{q1} + ATR_{q2} * P_{q2} + \dots + ATR_{qn} * P_{qn}}{P_{q1} + P_{q2} + \dots + P_{qn}} \quad (14)$$

Em que  $ATR_s$  é a média ponderada do ATR da safra,  $ATR_{q1}$ ,  $ATR_{q2}$ ,  $ATR_{qn}$  são as médias ponderadas das quinzenas 1,2...n e  $P_{q1}$ ,  $P_{q2}$ ...n são os pesos totais de cana entregues nas quinzenas 1,2,...,n.

Os seguintes fatores de conversão devem ser considerados para a conversão dos produtos em Kg de ATR de acordo com a Tabela 1, bastando multiplicar o fator de conversão com a quantidade de produto para se obter o resultado em Kg de ATR.

Tabela 1 – Fator de conversão.

<b>Produto</b>	<b>Unidade</b>	<b>Fator de conversão</b>
Açúcar VHP	Kg	1,0453
Etanol anidro	L	1,7492
Etanol hidratado	L	1,6761

Fonte: Do autor (2023).

## 2.11 Processo produtivo

Inicialmente, a cana-de-açúcar cultivada no campo, que compõe o setor agrícola, chega à usina e passa por uma pesagem, para quantificar a matéria-prima presente no caminhão canavieiro. Em seguida, é retirada uma amostra por carregamento, para análise no laboratório PCTS, seguido pelo tombamento da cana nas esteiras de rolagem, que contém martelos desfibriladores que ajudam na extração do caldo na moagem.

Para facilitar a compreensão dos fluxogramas do processo apresentados a seguir, a legenda contendo as cores das linhas do processo são dispostas conforme a Figura 9.

Figura 9 – Linhas do processo produtivo.

■ Gases da fermentação	■ Água
■ Solução de fermento	■ Cana de açúcar/bagaço
■ Ácido	■ Vapor direto/escape
■ Hidróxido de sódio	■ Vapor vegetal
■ Vácuo	■ Mel Pobre
	■ Mel Rico

Fonte: Agropéu S.A. (2023).

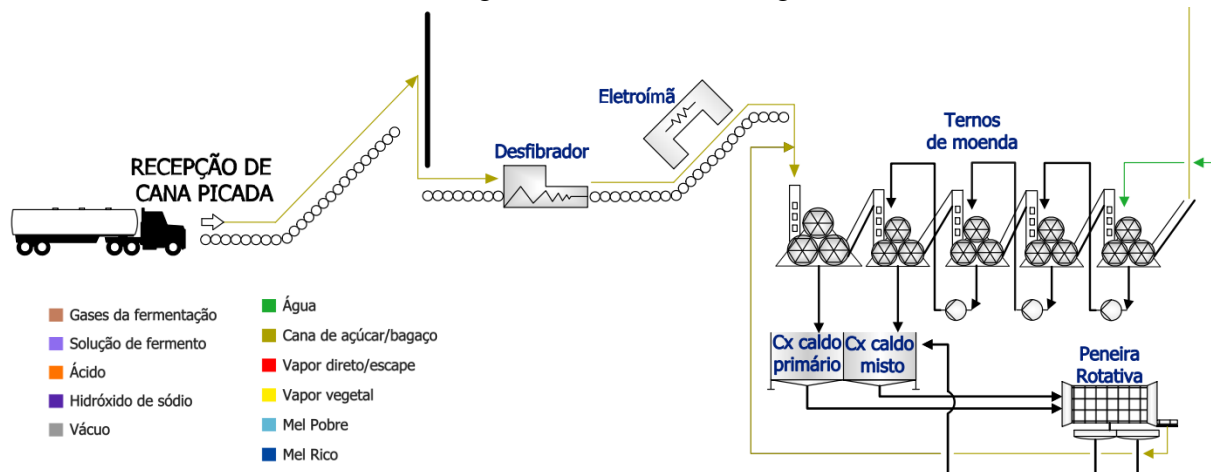
Algumas linhas pretas podem ser observadas nas figuras que são apenas correntes do processo, para onde vai algum coproduto por exemplo.

### 2.11.1 Moagem

Antes da cana-de-açúcar chegar à moagem é preciso que o corte, transbordo e transporte (CTT) seja realizado da maneira mais eficiente possível, evitando trazer as impurezas minerais e vegetais do campo para a mesa de recepção da cana. Sendo assim, o caldo é extraído com o mínimo possível de perdas de açúcares, o que resulta também na menor umidade do bagaço. Da mesa de alimentação a cana é levada para o desfibrador, que contém martelos oscilantes e uma placa desfibradora que abre as células, facilitando o processo de extração do caldo, contendo os açúcares, pelas moendas. Após isso, a cana é encaminhada ao eletroímã para retirar qualquer objeto metálico que possa estar no meio da cana desfibrada, e em seguida se passa para as moendas, onde todo o processo é conduzido por esteiras rolantes.

Atualmente, a Agropéu emprega um processo de moagem composto por 5 ternos para extração do caldo, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Setor de moagem.



Fonte: Agropéu S.A. (2023).

### 2.11.2 Tratamento do caldo

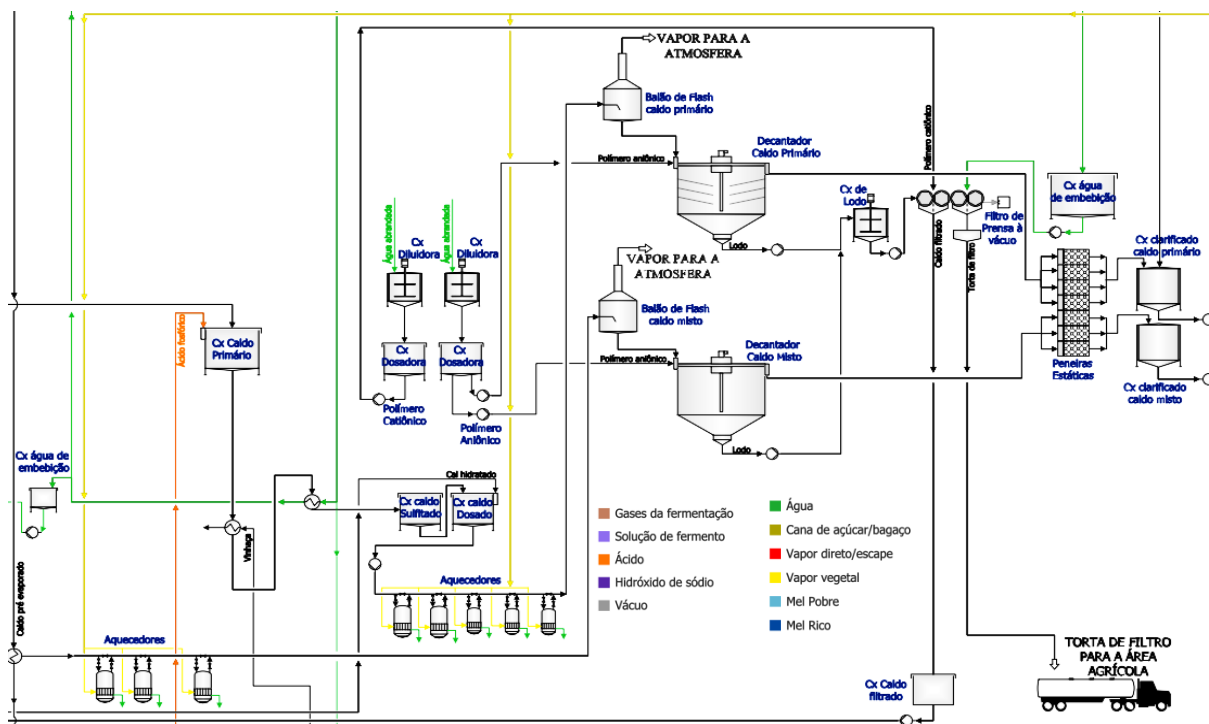
O tratamento de caldo tem por objetivo eliminar a maior parte das impurezas como terra, bagacilho e materiais corantes que interferem na qualidade do açúcar como resíduos insolúveis, cinzas entre outros. Normalmente se divide o tratamento do caldo em duas etapas, sendo a primeira o tratamento preliminar que consiste em uma série de procedimentos físicos para separação do material grosseiro composto por impurezas minerais e vegetais. E em segundo o tratamento físico-químico destinado à retirada de material coloidal e correção do pH para valores neutros, próximo de 7, evitando assim a inversão da sacarose.

Na colheita mecanizada há um incremento significativo de matéria vegetal presente na cana. Com isso, há uma maior incidência de contaminantes como compostos fenólicos, insolúveis, amido, dextrana e cinzas. Estas impurezas devem ser removidas a fim de propiciar um processo produtivo estável, de menor custo, mais eficiente e com uma melhor qualidade do produto final.

O tratamento do caldo preliminar é representado na usina pelas etapas de peneiramento para retirada do material grosseiro. Já para o tratamento físico-químico a primeira etapa é a sulfitação, que consiste em reduzir o pH para precipitação e remoção das proteínas do caldo através do contato com o gás sulfuroso ( $\text{SO}_2$ ). A segunda etapa é composta pela calagem, sendo adicionado o leite de cal, favorecendo a precipitação dos coloides presentes no caldo, além da floculação e arraste das partículas em suspensão. Indo para a terceira etapa, realiza-se o aquecimento do caldo para aproximadamente  $105\text{ }^\circ\text{C}$ , evitando uma clarificação inadequada. Já a quarta etapa, composta pelo balão flash, consiste na expansão brusca do caldo, levando a

evaporação de uma parcela da água e eliminação de gases presente no caldo. A quinta etapa é a decantação que realiza a separação entre sólido e líquido por diferença de densidade, sendo uma das etapas mais importantes para clarificação do caldo, purificando-o pela remoção dos coagulados por sedimentação. E, por último a filtração, que separa os sólidos suspensos pela passagem em um meio filtrante (CEBALLOS, SCHIAVONE, 2009). O processo é representado conforme a Figura 11.

Figura 11 – Fluxograma do processo de tratamento de caldo.



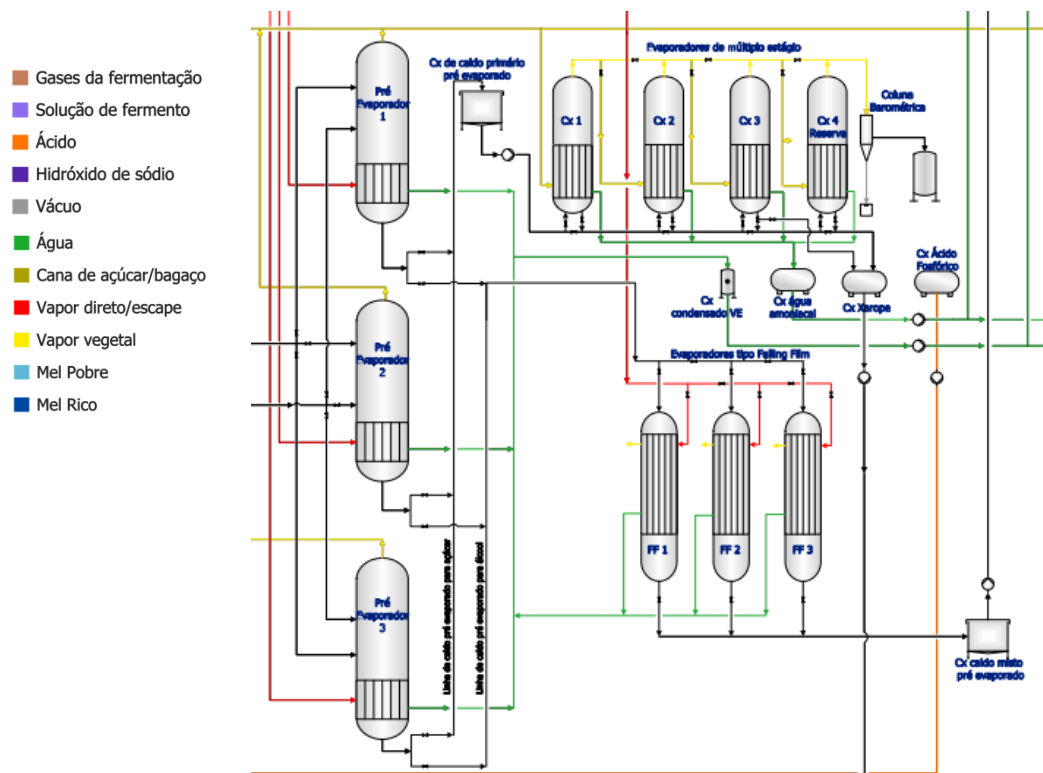
Fonte: Agropéu S.A. (2023).

### 2.11.3 Produção de açúcar

Após o tratamento do caldo, obtém-se um caldo de cana transparente, de cor levemente amarelada, que contém basicamente água, sais minerais e açúcares. Esse caldo passa pela evaporação que tem como finalidade a retirada de pelo menos 75% da água presente nesse caldo clarificado para transformá-lo em um xarope concentrado, com aproximadamente 65° Brix, que se refere à porcentagem de sólidos solúveis em solução aquosa. O processo de evaporação é mostrado na Figura 12.



Figura 12 – Fluxograma do processo de evaporação.



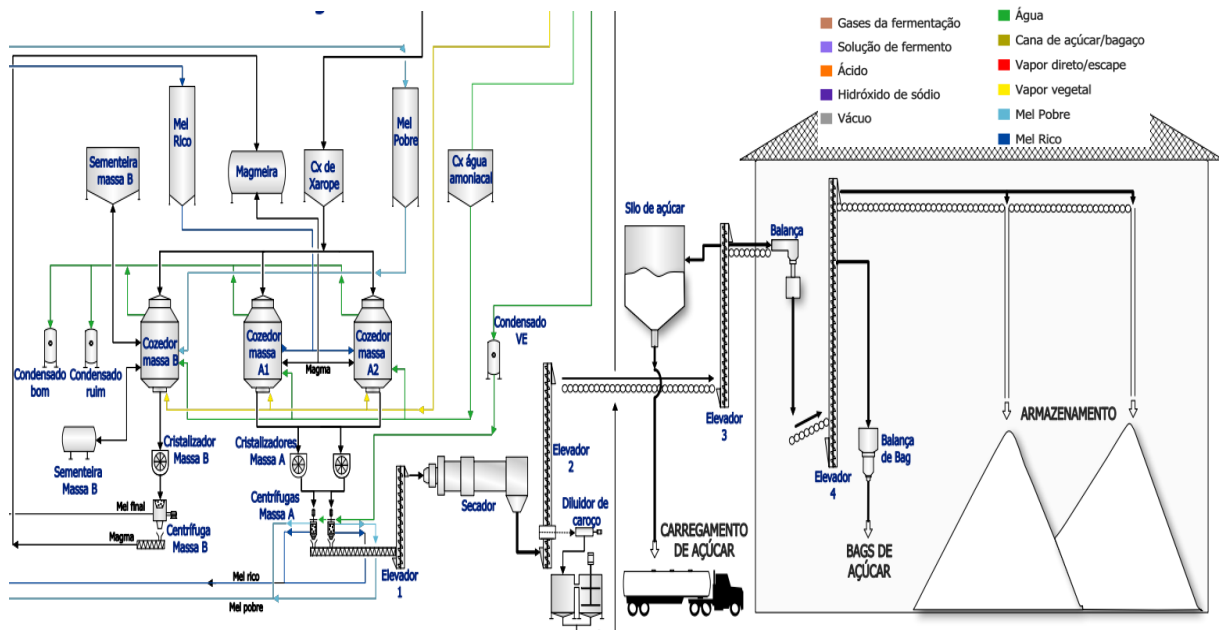
Fonte: Agropéu S.A. (2023).

O cozimento é uma etapa posterior que visa a cristalização e recuperação de 80% a 85% da sacarose presente no xarope. O sistema utilizado transforma o xarope em uma suspensão contendo cristais que posteriormente será centrifugada.

Após o cozimento, na centrifugação a suspensão passa por um processo de separação física (centrifugação). O açúcar é centrifugado e lavado com água quente e vapor, tendo como subproduto o mel que poderá ser utilizado no processo de fabricação de etanol.

Em seguida, o açúcar é encaminhado aos secadores para a secagem e, posteriormente peneirado. Em sequência, pode ser envasado em big-bags de 1500 kg ou diretamente armazenado para comercialização no galpão de açúcar como mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Setor de fabricação de açúcar.



Fonte: Agropéu S.A. (2023).

#### 2.11.4 Produção de etanol

O etanol é obtido pela fermentação dos açúcares glicose e frutose, provenientes da inversão da sacarose, que advêm do caldo da cana-de-açúcar. Logo que o mel final sai da fábrica de açúcar, ele é utilizado na formulação do mosto, juntamente com o caldo clarificado e água.

É possível realizar um processo de esterilização do caldo concentrado por um tratamento do tipo *High Temperature Short Time* (HTST), que diminui a contaminação por microrganismos que podem afetar a etapa de fermentação. O tratamento consiste em elevar a temperatura do caldo para próximo de 130 °C, por cerca de 30 minutos, e reduzir bruscamente para cerca de 32° C, temperatura considerada ideal para fermentação. Muitas usinas não adotam esse processo, mas sua utilização pode influenciar positivamente a fermentação (DIAS, 2008).

O mosto é uma solução açucarada utilizada no processo fermentativo com a concentração final entre 18° e 24° Brix (LOPES et al, 2017). Após formulado, o mosto passa por etapas de correção de pH que tem papel fundamental na fermentação, sendo mantido a escala entre 4,5 a 5, e em alguns casos pode ser necessário a suplementação de nutrientes, como a adição de antissépticos e aumento da temperatura, para obter os melhores rendimentos (EMBRAPA, 2022).

### 2.11.4.1 Fermentação

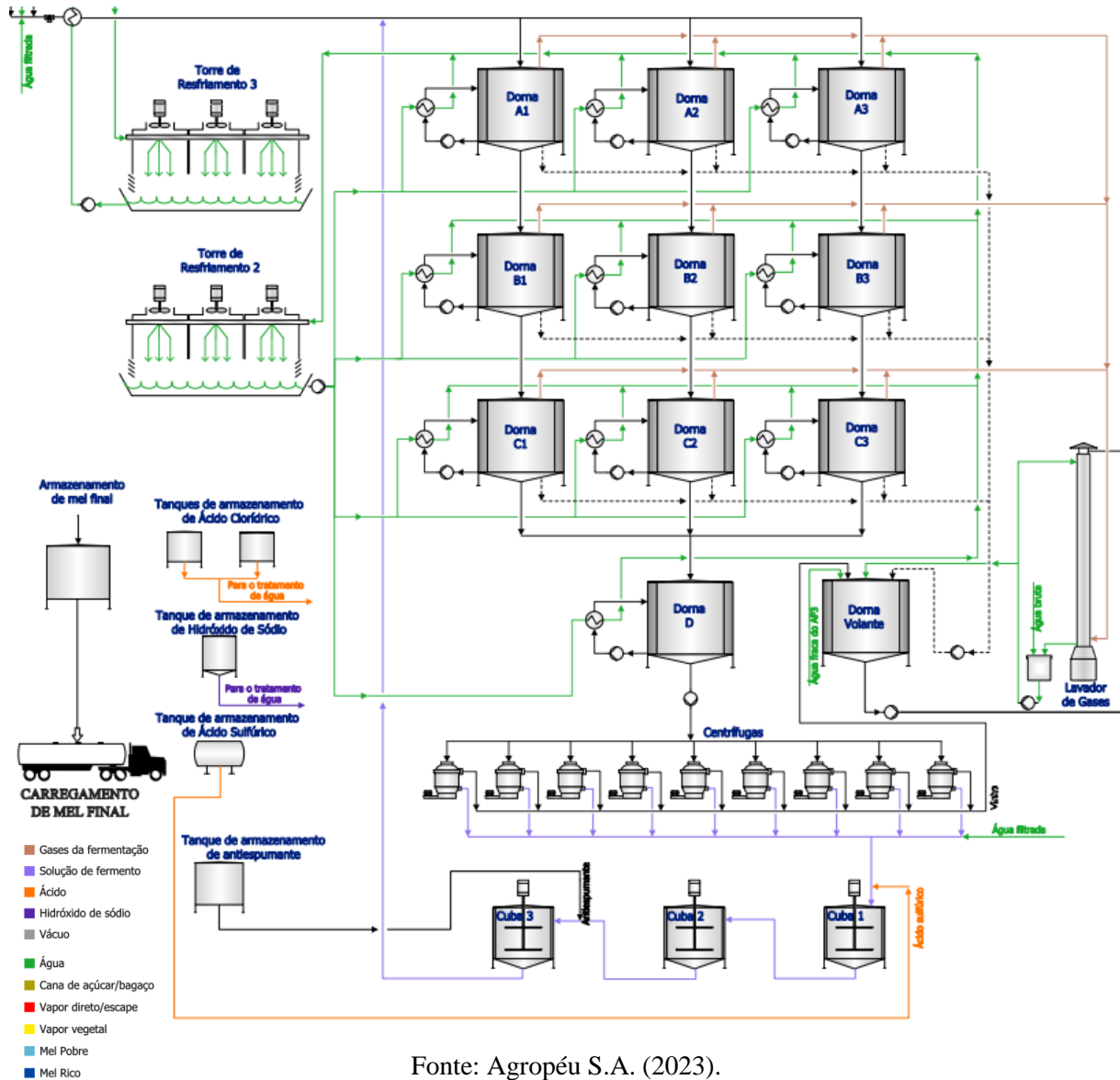
A fermentação é a etapa essencial no processo de fabricação do etanol, com duração média de oito horas, tempo necessário para as leveduras transformarem o açúcar do caldo da cana-de-açúcar em etanol, gás carbônico e alguns subprodutos. Sendo importante ressaltar que o tempo médio tem dependência direta com a concentração de açúcares e células no processo.

Com mencionado acima, na fermentação alcoólica ocorre a conversão dos açúcares em etanol e dióxido de carbono. O processo é conduzido por leveduras, que a nível celular, empregam a fermentação para produzirem energia interna, na forma de ATP, sendo empregada nas funções fisiológicas e ainda para o seu crescimento e reprodução. O etanol obtido através do processo é um coproduto para as células, que age como inibidor de micro-organismos competidores (GÓES, FAVONI et al, 2018).

O processo contínuo, com reciclo de células, denominado método Melle-Boinot é um dos mais utilizados nas destilarias para a fermentação. O mesmo consiste em misturar o mosto ao fermento conforme abastecimento da dorna, o que resulta em uma menor exposição da levedura à inativação por repressão catabólica. Ocorre também o reaproveitamento celular de leveduras provenientes de uma etapa de fermentação anterior por centrifugação, sendo todo o processo submetido à agitação (PACHECO, 2010).

Os micro-organismos da espécie *Saccharomyces cerevisiae* são os empregados nas usinas e interferem diretamente na eficiência do processo, como a velocidade de fermentação ou produtividade, que é determinada pela quantidade de açúcar convertido por uma quantidade de leveduras durante certo tempo. Os fatores que mais interferem no rendimento da fermentação alcoólica são o controle do pH, temperatura, presença de sulfito e teor alcoólico do meio, que estão diretamente relacionados com a vitalidade e a viabilidade da levedura. Se um ou mais desses fatores forem afetados, o tempo de fermentação pode ser elevado, aumentando os custos e levando à possível contaminação bacteriana. A contaminação, em níveis acima de  $10^5$  células/mL, leva à redução da produção alcoólica e aumento da acidez, diminuindo a qualidade do produto final. O processo fermentativo é mostrado apresentado conforme a Figura 14 (STEINLE, 2013).

Figura 14 – Setor de fermentação.



Fonte: Agropéu S.A. (2023).

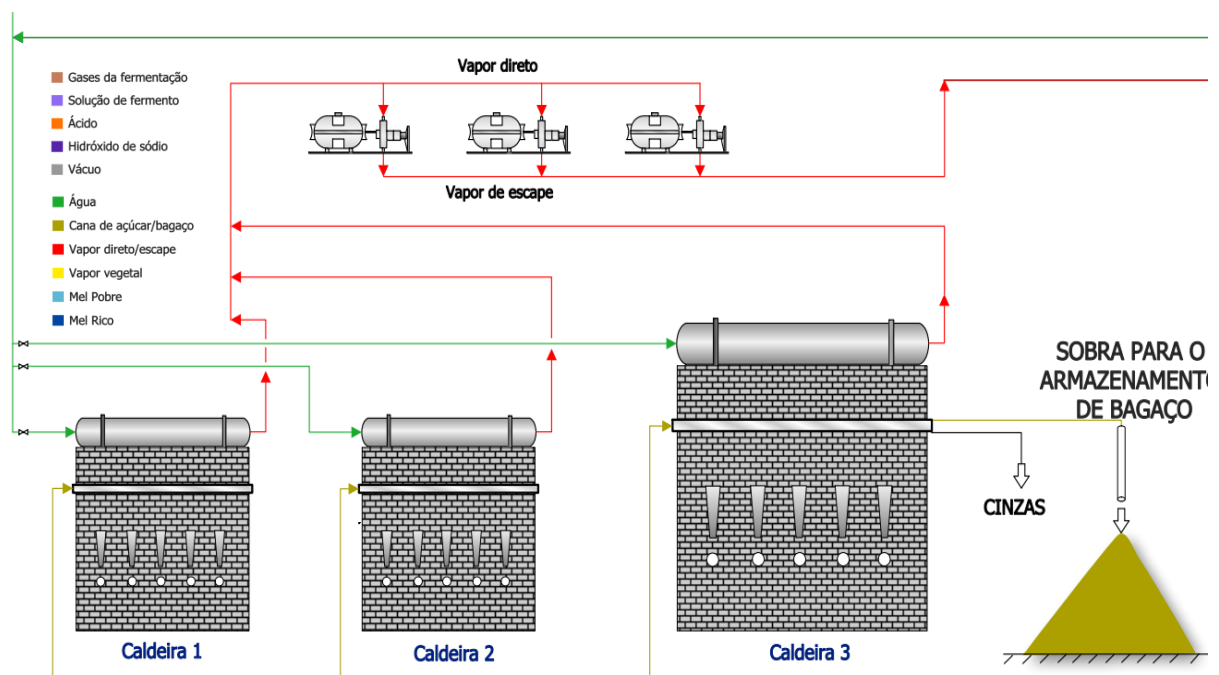
O vinho que sai da fermentação é composto majoritariamente por etanol e água. A separação do álcool é feita pelo processo de destilação, no qual as temperaturas de ebulição dos componentes se diferem, sendo feita a separação dos mesmos por diferença de volatilidade. A operação industrial é composta pela destilação, retificação e desidratação, e em todos os processos o calor para o aquecimento vem da caldeira, a partir do vapor gerado empregando a queima do bagaço.

### 2.11.5 Cogeração de energia

A cogeração é definida como a transformação de energia química, no caso a partir da biomassa advinda do bagaço, para duas ou mais formas de energia úteis industrialmente, no caso a energia térmica, para geração de vapor, e energia mecânica, para geração de energia elétrica. A principal utilização do vapor dentro de uma usina está nos processos internos como a secagem, evaporação, aquecimento, cozimento e destilação. Já a eletricidade é utilizada no próprio parque industrial, sendo o excedente vendido para concessionárias de energia.

O bagaço, com aproximadamente 50% de umidade, obtido a partir da extração do caldo da cana-de-açúcar, é queimado nas caldeiras a fim de fornecer calor para que a água seja evaporada, gerando vapor como mostrado na Figura 15. Parte desse vapor é canalizado e utilizado em turbinas acopladas a geradores para conversão da energia mecânica em elétrica. Grande parte da energia é utilizado dentro da usina e o que sobra é exportado para a concessionária local (BASQUEROTTO, 2010).

Figura 15 – Setor de caldeiras.



Fonte: Agropéu S.A. (2023).

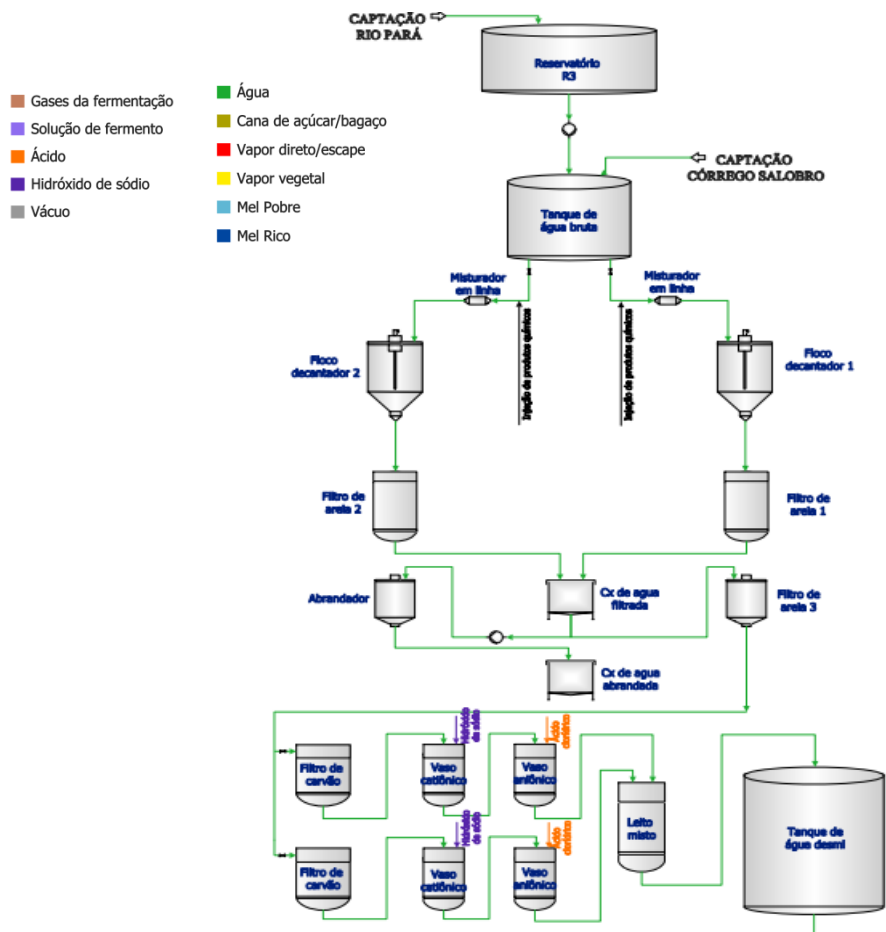
### 2.11.6 Tratamento de água

No bioparque industrial da Agropéu, utiliza-se água para o resfriamento nos trocadores de calor, no processo de hidratação do etanol, além da limpeza geral na planta industrial. Para tanto é necessário o tratamento prévio da água coletada dos mananciais.

O setor de tratamento de água é composto por um reservatório que armazena a água captada do rio Pará, que em seguida a envia para um tanque com água bruta, contendo também a água do córrego Salobro.

Para o tratamento de água são utilizados alguns produtos químicos, entre eles estão: os oxidantes como o cloro e o permanganato de potássio, que tem a função de oxidar os metais ferro e manganês e também as matérias orgânicas presentes na água bruta; os coagulantes, sendo o sulfato de alumínio e cloreto férrico, que desestabilizam as partículas de modo que elas se combinem com as impurezas e coagulem; os alcalinizantes, como o cal e o carbonato de sódio, que corrigem o pH das etapas do processo e da água final (ALMEIDA, 2009). Todo o processo de tratamento de água é demonstrado na Figura 16.

Figura 16 – Setor de tratamento de água.



Fonte: Agropéu S.A. (2023).

## 2.12 Eficiências e rendimentos

A produtividade de um bioparque industrial é a medida da quantidade de produto em kg ou L por unidade de área de colheita em hectares. Já a eficiência é um indicador percentual representado pela porcentagem de produto recuperado da quantidade disponível da matéria-prima. A eficiência é mais indicada para medir o desempenho do setor industrial.

### 2.12.1 Eficiência da Fábrica

O rendimento industrial na produção de açúcar é a quantidade desse produto em kg por tonelada de cana processada, que depende da qualidade de matéria-prima e das eficiências setoriais da fábrica de açúcar. Para se obter a massa de ART recuperado em açúcar se utiliza a Equação 15.

$$ART_{açúcar} = \frac{Massa\ de\ açúcar}{0,95} \quad (15)$$

Sendo a massa de açúcar dada em kg e 0,95 o fator de conversão em Pol do açúcar produzido/ART.

E para se obter a eficiência da fábrica de açúcar, conhecida como SJM (*sugar, juice, molasses*), se utiliza a Equação 16.

$$SJM = \frac{A * (C - M)}{C * (A - M)} * 100 \quad (16)$$

Em que A é a pureza do açúcar, C é a pureza do produto a cristalizar e M é a pureza do mel.

### 2.12.2 Eficiência da Fermentação

A eficiência da fermentação é a relação entre o rendimento obtido na fermentação em L de etanol/kg de ART com o rendimento estequiométrico de 0,6475 L etanol/kg de ART. Para se obter a massa de ART recuperado em etanol se utiliza a Equação 17.

$$ART_{álcool} = \frac{Volume\ etanol}{0,6475} \quad (17)$$

Sendo o volume de etanol dado em L e 0,6475 o fator estequiométrico de conversão do etanol.

Para o cálculo da eficiência da fermentação pelo critério de coprodutos, se utiliza a

Equação 18 juntamente com as Equações 19-22 que são complementares.

$$EF = \frac{100}{1 + (1,19 * Kl) + (0,50 * Kg) + (0,51 * Kac) + (0,51 * Karrt)} \quad (18)$$

$$Kl = \frac{LevDV * 0,33}{GrauVVC * 0,7893} \quad (19)$$

$$Kg = \frac{Glicerol}{GrauVVC * 0,7893} \quad (20)$$

$$Kac = \frac{AcVDF - AcFT * \left(\frac{LevVC}{LevFT}\right) - AcM * \left(1 - \frac{LevVC}{LevFT}\right)}{1,837 * 789,3 * \left(\frac{GrauVVC}{100}\right) - \left(\frac{LevVC}{LevFT}\right) * \left(\frac{GrauVFT}{100}\right)} \quad (21)$$

$$Karrt = \frac{ARRT}{GrauVVC * 0,7893} \quad (22)$$

Em que *Kl* são as perdas percentuais devido ao fermento produzido; *Karrt* são as perdas devidas aos açúcares redutores residuais totais; *Kg* é o teor de glicerol no vinho delevedurado; *Kac* é a acidez produzida; *LevDV* é a porcentagem de fermento na dorna volante; *GrauVVC* é o teor alcoólico do vinho delevedurado (% v/v); *Glicerol* é o teor de glicerol do vinho delevedurado (%); *AcVDF* é a acidez sulfúrica vinho dorna final (g/L); *AcFT* é a acidez sulfúrica fermento tratado (g/L); *LevVC* é a porcentagem de fermento do vinho delevedurado (%); *LevFT* é a porcentagem de fermento tratado (%); *AcM* é a acidez sulfúrica do mosto (g/L); *GrauVFT* é o teor alcoólico do fermento tratado (% v/v) e *ARRT* são os açúcares redutores residuais totais (%).

### 2.12.3 Eficiência da Destilação

O rendimento industrial da destilaria, que produz somente etanol, pode ser definido como o volume de etanol em L produzido por tonelada de cana processada.

A eficiência da destilação é a porcentagem de etanol recuperado nos equipamentos da destilação, ou seja, é definida como a porcentagem de etanol recuperado do total contido no vinho a ser destilado de acordo com a Equação 23.

$$ED = \frac{Etanolproduzido}{Etanolproduzido + Etanolperdido} * 100 \quad (23)$$



Na destilaria são produzidos normalmente o etanol hidratado e o etanol anidro, para fins carburantes. Esses tipos de formulação de álcool se diferem pela graduação alcoólica e massa específica. O álcool etílico hidratado tem seu teor alcoólico entre 92,5% a 94,6%, em outras palavras, possui em média 93,2 kg de etanol e 6,8 kg de água por 100 kg de álcool hidratado. Se utiliza o nome comercial de etanol hidratado combustível ou carburante (EHC), o qual é utilizado como combustível em automóveis com motor a ciclo Otto. Já o álcool etílico anidro, é um álcool com teor alcoólico mínimo de 99,3%, sendo 99,3 kg de etanol e 0,7 kg de água por 100 kg de álcool anidro. Comercialmente é conhecido como etanol anidro combustível ou carburante (EAC) para compor a mistura com a gasolina em motores do ciclo Otto (ANP N°907).

### 2.13 Mix de produção

O mix de produção é o que define para qual produto a safra vai ser voltada, levando em consideração desde análises laboratoriais a fatores econômicos. A fórmula para se obter o mix do álcool de acordo com os dados provenientes do laboratório é representada pela Equação 24.

$$Mix\ álcool = \frac{ART_{álcool}}{ART_{açúcar} + ART_{álcool}} \quad (24)$$

Já o mix de produção do açúcar é calculado pela Equação 25.

$$Mix\ açúcar = \frac{ART_{açúcar}}{ART_{açúcar} + ART_{álcool}} \quad (25)$$

### 2.14 Eficiência Geral Industrial

A eficiência industrial é a porcentagem dos açúcares que entram com a cana e que são recuperados nos produtos finais açúcar e etanol. Na avaliação do mix do processo produtivo, quando a safra é açucareira ou alcooleira a Eficiência Industrial Geral (EGI) é dada pela Equação 26.

$$EGI = \frac{ART_{recuperado\ total}}{ART_{recebido\ PCTS}} * 100 \quad (26)$$

### 3 METODOLOGIA

Neste trabalho, a análise feita da influência do mix de produção sobre a eficiência da planta industrial foi realizada com base nos dados levantados a partir do boletim industrial da safra 22/23 e 23/24 da empresa Agropéu localizada na cidade de Pompéu - MG. Esse documento contém todos os dados de produções, eficiências, rendimentos e perdas industriais, por meio de um sistema integrado de gestão.

A fim de validar os valores disponibilizados pelo *software*, os mesmos foram comparados com os valores obtidos pela metodologia disponibilizada no manual CONSECANA, publicado em 2015 (CONSECANA, 2015). Todo o equacionamento e rotinas de cálculos foram feitas empregando o software Excel<sup>®</sup>, utilizando para isso os dados primários do processo, como o peso do bolo úmido, o Brix da cana, o Brix do caldo e a leitura sacarimétrica.

Por fim, com base nos dados obtidos, foi realizada a avaliação da EGI de acordo com o mix de produção, voltado tanto para a produção de açúcar (safra 23/24) quanto para a produção de álcool (safra 22/23).

#### 3.1 Dados experimentais

O boletim industrial é gerado sistematicamente por um software de gestão integrada, a partir dos dados inseridos de análises que são feitas diariamente no Laboratório PCTS. Como exemplo, os dados do processo de entrada de cana/moagem e análise de cana da safra 22/23 são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Boletim industrial da safra 22/23.

Informação	Unid.	Dia	Ult. 7 dias	Mês	Safra	Safra Ant
<b>ENTRADA DE CANA / MOAGEM</b>						
Dias Trabalhados		1	7	19	137	187
Cana Moída Total	ton	174,90	24.593,06	80.556,90	728.384,15	1.066.694,
Mix para Alcool	%	100,00	100,00	89,20	52,54	44,91
Mix para Açúcar	%	0,00	0,00	10,80	47,46	55,09
Cana Moída Alcool	ton	174,90	24.593,06	70.084,91	358.018,06	458.486,63
Cana Moída Açúcar	ton	0,00	0,00	10.471,99	370.366,09	608.208,01
Embebição%cana	%	12,01	40,50	40,23	35,87	33,08
Embebição%fibra	%	74	293	294	273	250
Caldo misto%cana	%	230,37	127,47	137,38	146,76	147,65
Moagem hora efetiva	tc/h	141,85	187,21	205,57	249,34	291,58
Moagem Hora	tc/h	7,29	146,39	176,66	221,53	242,87
Moagem diária	tc/d	174,90	3.513,29	4.239,84	5.316,67	5.828,93
Horas perdidas de moagem	hh:mm	1,22	19,75	47,60	333,58	809,25
Horas efetivas de moagem	hh:mm	1,23	126,70	386,85	2.908,88	3.633,05
Tempo perdido agrícola	%	5,07	11,76	8,98	6,46	13,25
Tempo perdido indústria	%	0,00	0,00	1,46	3,69	4,79
Tempo total de aproveitamento	%	50,33	81,87	87,21	89,45	82,93
<b>ANÁLISES DE CANA (PCTS)</b>						
Fibra	%	16,28	14,20	13,84	13,16	13,27
Brix	%	18,70	18,40	18,80	17,10	16,80
Pol	%	15,38	15,61	15,92	14,04	14,33
AR	%	0,65	0,60	0,62	0,72	0,62
Pureza	%	82,09	84,93	84,49	81,98	85,08
Umidade	%	65,00	67,40	67,30	69,80	69,90
ART		16,84	17,08	17,39	15,42	15,69
ATR	kg/tc	154,11	156,22	159,13	141,09	143,41
P205	ppm	430,83	332,64	355,59	366,37	249,38
pH		5,08	5,16	5,16	5,19	5,15
Índice de preparo	%	87,03	79,96	79,87	81,65	86,43

Fonte: CompuSoftware (2023).

### 3.2 CompuSoftware

O programa *CompuSoftware* (CS), utilizado pela empresa, se resume a um conjunto de ferramentas que compila todas as informações em telas e formulários de acordo com a demanda do colaborador. Esse é um *software Enterprise Resource Planning* (ERP) bastante dinâmico, que traz as informações desde a forma específica até dados bastante resumidos e compilados, sendo hoje uma das ferramentas mais reconhecidas para as atividades econômicas do Brasil e no mundo.

O programa ERP é uma ferramenta de inteligência que centraliza e integra todos os processos e informações dos variados setores da empresa, facilitando a gestão de projetos, de pessoas e de processos. O CS foi implementado na empresa em outubro de 2019 e desde então pode se obter os dados das safras passadas e atual. A tela inicial do *software* e o caminho para extrair o boletim é exemplificado na Figura 17 (COMPUSOFTWARE, 2023).

Figura 17 – Caminho no sistema para extrair o boletim industrial.

The screenshot shows the CompuSoftware interface. On the left is a sidebar menu with categories: Agrícola, Automotiva, Comercial, Contabilidade Fiscal, Contabilidade Gerencial, Financeira, Geral, Gerencial, Industrial (with sub-items: Controle de Estoque (09,01), Laboratório (09,01), Manutenção Industrial (09,02)), Jurídico, Material, Recursos Humanos, Segurança, Segurança Patrimonial, Terceiro, and Tributária. The main window has a menu bar: ManuTencões, Processos, Relat6rios, Consultas, Ajuda. A window titled '1364 - [Relat6rios Cadastrados] - [GEF: 1.1.1] Tecla F1 para ajuda' is open, showing a 'Relat6rio' (Report) window with 'Relat6rio: 23', 'Data: 19/09/2022', and 'nº C6pias: 1'. Below this is a 'Consulta' window showing the report content. The report header includes the 'AGROPEU' logo, the title 'Boletim Geral Açúcar e Alcool', the company name 'Empresa: AGROPEU AGRO INDUSTRIAL DE POMPEU', the start date 'Início Moagem: 06/05/2022', and the current date 'Data: 19/09/2022' with the day 'Segunda-' and week '21'. The main body of the report is a table with the following data:

Informação	Unid.	Dia	Ult. 7 dias
<b>ENTRADA DE CANA / MOAGEM</b>			
Dias Trabalhados		1	7
Cana Moída Total	ton	174,90	24.593,06
Mix para Alcool	%	100,00	100,00
Mix para Açúcar	%	0,00	0,00
Cana Moída Alcool	ton	174,90	24.593,06
Cana Moída Açúcar	ton	0,00	0,00
Embebiçãocana	%	12,01	40,50
Embebiçãofibra	%	74	293
Caldo mistocana	%	230,37	127,47
Moagem hora efetiva	tc/h	141,85	187,21
Moagem Hora	tc/h	7,29	146,39
Moagem diária	tc/d	174,90	3.513,29
Horas perdidas de moagem	hh:mm	1,22	19,75

Fonte: CompuSoftware (2023).

### 3.3 Avaliação do mix de produção

O levantamento dos fatores do processo que interferem na eficiência de acordo com o mix de produção, como a confiabilidade dos dados gerados no laboratório industrial, a recuperação da fábrica de açúcar e a eficiência do processo fermentativo, foram feitos a partir de entrevistas com os técnicos e engenheiros responsáveis pelas áreas da fabricação de etanol e da fábrica de açúcar.

Foi utilizado também o manual técnico disponível para o setor sucroenergético do Conselho de Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Etanol do Estado de São Paulo (CONSECANA, 2015) para obter as equações dos cálculos utilizados no boletim e os valores de referência das eficiências dentro do processo de fabricação de açúcar e etanol. Em posse das informações obtidas e após realização dos cálculos do boletim industrial, foram feitas discussões dos dados com os responsáveis por cada setor na empresa.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Validação do boletim industrial

Primeiramente, as informações contidas no boletim industrial da safra 22/23 foram dispostas na última coluna da Tabela 4 (Boletim eletrônico), e em seguida validadas. Para isso, foram utilizados dados experimentais primários do laboratório PCTS, conforme mostrado na Tabela 3. Os cálculos dos parâmetros foram feitos utilizando o formulário do manual CONSECANA (CONSECANA, 2015), cujos valores foram em seguida comparados com os dados fornecidos pelo boletim eletrônico industrial, ambos apresentados na Tabela 4.

Tabela 3 – Dados primários.

<b>Parâmetros</b>	<b>Sigla</b>	<b>Unidade</b>	<b>Resultados analíticos</b>
Peso do bolo úmido	PBU	g	153,39
Brix da cana	-	%	17,14
Brix do caldo	-	%	19,74
Leitura sacarimétrica	LS	°Z	69,94

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 4 – Validação dos dados calculados pelo boletim eletrônico safra 22/23.

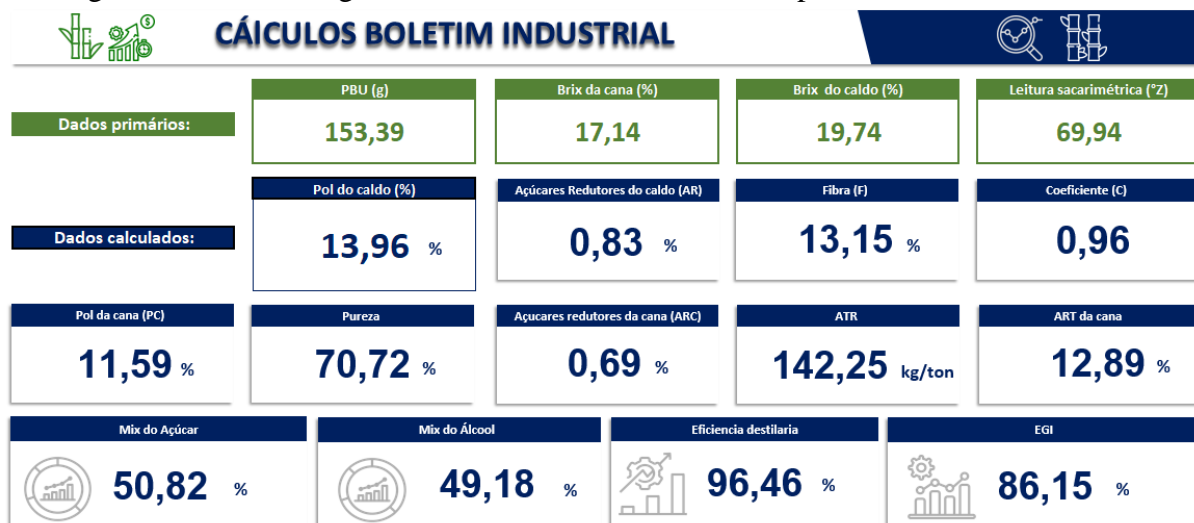
<b>Parâmetros</b>	<b>Sigla</b>	<b>Unidade</b>	<b>Cálculos realizados</b>	<b>Boletim eletrônico</b>
Pol do caldo	-	%	13,96	13,96
Açúcares redutores do caldo	AR	%	0,83	1,28
Fibra	F	%	13,15	13,13
Coefficiente de transformação	C	-	0,96	[-]
Pol da cana	PC	%	11,59	14,12
Pureza	-	%	70,72	81,98
Açúcares redutores da cana	ARC	%	0,69	0,68
Açúcares totais recuperáveis	ATR	kg/ton	142,25	142,21
Açúcares redutores totais da cana	ART	%	12,89	11,96
Mix de produção para o Álcool	-	%	49,18	52,54
Mix de produção para o Açúcar	-	%	50,82	47,46
Eficiência destilaria	ED	%	96,46	99,76
Eficiência geral industrial	EGI	%	86,15	87,83

Fonte: Do autor (2023).

Analisando os dados da Tabela 4, pode-se verificar que as maiores discrepâncias foram observadas para a pol da cana, para a pureza, para o mix de produção e para as eficiências setorial e geral, com desvios relativos de até 11,26%.

Nessa etapa de validação, foi desenvolvida uma ferramenta no Excel® a fim de realizar automaticamente os cálculos dos parâmetros avaliados de forma visualmente clara e fáceis de serem comparados através de uma interface gráfica, denominada de *dashboard*, como mostra a Figura 18.

Figura 18 – Interface gráfica da ferramenta desenvolvida para os cálculos realizados.



Fonte: Do autor (2023).

A média do mix de produção do boletim eletrônico no acumulado da safra foi feita aritmeticamente com a média de produção dos dias, contando que houve mais dias em que se produziram apenas álcool, de modo que no cálculo da média da safra o mix de produção ficou voltado para o álcool. Já para o cálculo realizado foi considerada a média ponderada. Portanto, a diferença notada é devida ao cálculo da média ponderada, levando em consideração a entrada de cana moída para cada produto, como exemplificado na Tabela 2.

Após a realização dos cálculos, algumas diferenças foram notadas no que tange a parte sistemática, fator que se deve a inserção de algumas fórmulas e constantes que não seguem o padrão CONSECANA.

As variações evidenciadas estão na base da parametrização do programa CS, que carrega consigo informações de entrada, podendo ser feitos pelos desenvolvedores do programa ou manualmente pelos colaboradores do Laboratório PCTS. Como sugestão, seria necessário avaliar todo o processo de alimentação de dados e ajustar as fórmulas e parâmetros conforme o manual CONSECANA a fim de corrigir desvios nos dados gerados.

## 4.2 Avaliação do mix de produção sobre a eficiência industrial

O mix de produção na indústria pode ser definido antes mesmo de se iniciar a safra, ou ser alterado durante a mesma, de acordo com a demanda do mercado. Quando ocorre o último caso citado, uma mudança brusca pode afetar ainda mais a eficiência de acordo com o que for decidido pela diretoria.

A Tabela 5 retrata os 16 primeiros dias de safra 23/24 (coluna Safra) em comparação com o mesmo período da safra 22/23 (coluna Safra Ant), sendo que os dados de comparação foram grifados em amarelo para melhor identificação.

Tabela 5 – Safra 23/24 vs safra 22/23.

Informação	Unid.	Dia	Ult. 7 dias	Mês	Safra	Safra Ant
<b>ENTRADA DE CANA / MOAGEM</b>						
Dias Trabalhados		1	7	16	16	16
Cana Moída Total	ton	5.460,68	42.410,94	79.889,89	79.889,89	67.656,74
Mix para Álcool	%	24,96	34,97	33,71	33,71	71,80
Mix para Açúcar	%	75,04	65,03	66,29	66,29	28,20
Cana Moída Alcool	ton	1.362,99	14.831,51	26.930,21	26.930,21	48.576,69
Cana Moída Açúcar	ton	4.097,69	27.579,43	52.959,68	52.959,68	19.080,05
Embebição%cana	%	35,22	33,04	33,04	33,04	27,00
Embebição%fibra	%	295	272	272	272	212
Caldo misto%cana	%	139,34	131,96	134,26	134,26	152,64
Moagem hora efetiva	tc/h	240,91	254,87	226,69	226,69	221,38
Moagem Hora	tc/h	227,53	252,45	208,05	208,05	176,19
Moagem diária	tc/d	5.460,68	6.058,71	4.993,12	4.993,12	4.228,55
Horas perdidas de moagem	hh:mm	1,33	1,67	26,10	26,10	54,20
Horas efetivas de moagem	hh:mm	22,67	166,33	349,75	349,75	305,80
Tempo perdido agrícola	%	0,00	0,00	0,35	0,35	3,27
Tempo perdido indústria	%	5,55	0,99	6,45	6,45	10,85
Tempo total de aproveitamento	%	94,45	99,01	92,24	92,24	84,94
<b>EFICIÊNCIAS E RENDIMENTOS</b>						
Extração Pol% Pol Cana	%	97,23	97,08	96,85	96,85	96,29
Extração Reduzida 12,5% Fibra	%	97,10	97,03	96,88	96,88	96,39
Rend. Fermentativo (sub-prod)	%	89,20	89,96	89,55	89,55	89,36
Rend. álcool 100%	lts/tc	136,09	86,73	84,29	84,29	76,48
Rend. álcool anidro 99,3°	lts/tc	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rend. álcool hidratado 93,2°	lts/tc	142,75	90,87	88,27	88,27	80,21
Efic. Tratamento do Caldo	%	99,68	99,69	99,74	99,74	99,78
Efic. Fermentação BM	%	75,72	88,13	39,82	39,82	77,60
Efic. Destilação	%	99,89	99,90	99,90	99,90	99,64
Recuperação Fábrica de Açúcar	%	77,69	77,43	77,76	77,76	74,40
SJM	%	70,00	67,42	69,90	69,90	66,94
Efic. geral da dest - EGD (%)	%	89,10	89,92	89,54	89,54	89,10
Efic. geral industrial - EGI	%	86,59	87,91	85,89	85,89	79,46
Efic. Máxima (%)	%	95,51	94,78	94,81	94,81	91,91
Efic. Relativa (%)	%	90,66	92,77	90,52	90,52	86,19
RIT COPERSUCAR (kg/t)	kg/tc	211,90	197,51	191,30	191,30	126,80
RIT STAB	KG/TON	215,23	201,98	200,53	200,53	137,66
Rend. total corrigido - RTC (%)	%	86,98	90,01	80,60	80,60	80,62

Fonte: CompuSoftware (2023).

Na avaliação do mix de produção foi notada uma EGI maior para a safra 23/24 voltada à fabricação de açúcar, de 85,89%, enquanto para a safra 22/23 voltada à produção de etanol, a EGI permaneceu abaixo, com o valor de 79,46%. De forma geral, pode-se afirmar que a maior EGI para o mix açucareiro é esperada, uma vez que o processo para a produção do açúcar é mais simples e possui menos etapas, de modo que a eficiência do processo é menos afetada pelo conjunto de operações empregadas. Em especial, verifica-se que a etapa de formação dos

cristais de açúcares apresenta elevada eficiência entre 97,5 a 98,5% (BIOCONTAL, 2013), variando de acordo com o nível de esgotamento do mel, o que contribui para a eficiência global do processo.

Por outro lado, uma menor EGI era esperada para o caso de mix alcooleiro, uma vez que esse processo requer etapas adicionais de maior complexidade e menores eficiências, como a fermentação e a destilação. Com relação à fermentação, etapa de menor eficiência, entre 87 a 90% em média (BIOCONTAL, 2013), os parâmetros do processo são difíceis de serem mantidos nos valores de referência (*setpoint*) devido à complexidade do processo bioquímico. Desse modo, devido à falta ou baixa eficácia dos sistemas de controle no processo, em especial das variáveis pH e temperatura, além da baixa exatidão dos medidores de vazões, há um decaimento da eficiência da fermentação, acarretando, com isso, em uma menor eficiência geral industrial.

Além disso, sabe-se que do caldo extraído, composto pelos sólidos solúveis sacarose, glicose e frutose, apenas 87% da sacarose é convertida para o açúcar e, do total, apenas 13% a etanol (RIBEIRO et al., 1999). A levedura consome para sua sobrevivência cerca de 10% da sacarose, que deixa de ser convertida ao etanol, um gasto relacionado à manutenção celular (CALDAS, 2017). Além disso, o mosto utilizado para o processo fermentativo apresenta perdas de açúcares em etapas anteriores dentro da fábrica de açúcar, em especial nos cozedores e cristalizadores. Considerando todos esses fatores, verifica-se que a etapa de fermentação afeta de forma significativa nos números finais da eficiência do processo.



## 5 CONCLUSÃO

No presente trabalho foram analisados parâmetros de produção de açúcar e etanol na empresa Agropéu S.A. - Açúcar, Etanol e Energia, a fim de avaliar o seu impacto sobre a Eficiência Geral Industrial (EGI), considerando dois cenários: mix de produção voltado para açúcar (safra 23/24) e para etanol (safra 22/23).

Quando se examina a influência do mix de produção sobre a eficiência, verifica-se que, quando voltado para o açúcar, há uma maior eficiência geral industrial (EGI). No que tange à produção de açúcar, o que mais interfere na eficiência da fábrica são as impurezas vegetais e minerais advindas do campo. Já para a EGI considerando o caso de mix alcooleiro, o processo fermentativo é o que mais contribui para a queda de eficiência.

Portanto, a partir dos dados apresentados neste trabalho é possível concluir que há uma influência do mix de produção sobre a EGI, e que esse é um importante fator que deve ser igualmente considerado na escolha do mix para cada safra, juntamente com os dados de mercado.

Como sugestão para trabalhos futuros, indica-se a realização de estudos mais aprofundados relacionando os custos financeiros de acordo com a variação do mix de produção, e a viabilidade econômica para a usina de uma possível virada de produção durante a safra.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. C. **Indústria sucroalcooleira-energética e os recursos hídricos: rio Santo Antônio Grande, Alagoas**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Alagoas (UFAL), 2009.
- ANP. **Resolução ANP n° 907, de 18 de novembro de 2022**. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anp-n-907-de-18-de-novembro-de-2022-445396653>>. Acesso em: 21/12/2022.
- BASQUEROTTO, Cláudio Henrique Cequeira Costa. **Cogeração de energia elétrica com bagaço de cana-de-açúcar comprimido (briquete)**. 2010. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba, 2010.
- BIOCONTAL. **Avaliação de unidades industriais utilizando eficiência relativa; Informativo 03; 2013**. Disponível em: <<https://www.biocontal.com.br/informativos/03>>. Acesso em: 01/06/2023.
- CALDAS, C. S.; LARRAHONDO, J. E.; SILVA, JRC. **Cálculos Fundamentais para Controle Químico das Indústrias de Açúcar e de Álcool**. Central Analítica Ltda. Maceió–Alagoas–Brasil, p. 203, 2017.
- CEBALLOS-SCHIAVONE, Carla Homem de Melo. **Tratamento Térmico do Caldo da Cana-de-açúcar Visando a Redução de Contaminantes Bacterianos – Lactobacillus – na Produção de Etanol e Eficiência de Tratamento do Fermento por Etanol**. Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Ciência e Tecnologia de Alimentos. Piracicaba, SP: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2009.
- COMPUSOFTWARE © Oracle. Versão: 19.0.0.0.0. Versão principal: 266. CS, 2022. Disponível em: <<https://www.cscompusoftware.com.br/>>. Acesso em: 20/12/2022.
- CONSECANA. **Manual de Instruções do Conselho de Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Etanol do Estado de São Paulo; 2015 (6th ed.)**.
- DIAS, M. O.; **Simulação do processo de produção de etanol a partir do açúcar e do bagaço visando a integração do processo e a maximização da produção de energia e excedentes do bagaço**. Tese de Mestrado, FEQ/UNICAMP, São Paulo, 2008.
- EMBRAPA. **Fermentação; 2022**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana>>. Acesso em: 01/06/2023.
- FERNANDES, Antônio Carlos. **Cálculos na Agroindústria da Cana-de-Açúcar; STAB; 2011 (3th ed.)**.
- GÓES-FAVONI, S. P.; MONTEIRO, A. C. C.; DORTA, C.; CRIPPA, M. G.; SHIGEMATSU, E.. **Fermentação alcoólica na produção de etanol e os fatores determinantes do rendimento**. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.9, n.4, p.285-296, 2018.

LOPES, Cláudio Hartkopf; GABRIEL, Afra Vital Matos Dias; BORGES, Maria Teresa Mendes Ribeiro. **Produção de etanol a partir da cana-de-açúcar: tecnologia de produção de etanol**. 2017.

MORAIS, Anderson dos Santos; SILVA, Marcelo Bacci da. **Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação**. 2008. Enegep, Rio de Janeiro, 2008.

NUNES, Elis Fernando. **Cana-de-Açúcar: a Produção de Etanol e seus Benefícios**. 2017. 29 f. Artigo (Tecnólogo) - Técnico, Barreto, 2017.

PACHECO, T. F.. **Fermentação alcoólica com leveduras de características floculantes em reator tipo torre com escoamento ascendente**. Dissertação (Mestrado) - Universidade federal de Uberlândia, 2010.

SOUZA, J. **Estudo da eficiência de alguns polielitrólitos utilizados na clarificação do caldo de cana**. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1988.

STEINLE, L. A.. **Fatores que interferem na fermentação alcoólica**. Monografia (Graduação em Gestão do Setor Sucroenergético) - Universidade Federal de São Carlos centro de Ciências Agrárias, Sertãozinho, 2013.

RFA. RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. **Annual ethanol production. U.S. and world ethanol production**. Disponível em: <<https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>>. Acesso em: 01/06/2023.

RIBEIRO, Carlos A. F.; BLUMER, Solange A. G.; HORII, Jorge. **Fundamentos de Tecnologia Sucroalcooleira, 1ª parte: Tecnologia do Açúcar**. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1999.

RIDESA. **Rede Interuniversitária para o desenvolvimento do setor Sucroenergético**. Catálogo Nacional de Variedades “RB” de cana-de-açúcar. Curitiba, 2010.

ÚNICA. **União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia**. Disponível em: <<https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/historico-do-setor/>>. Acesso em: 25/01/2023.

UDOP. **União Nacional da Bioenergia**. Disponível em: <<https://www.udop.com.br/>>. Acesso em: 04/03/2023.