



UNIVERSIDADE DE RIBEIRÃO PRETO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, NATURAIS E TECNOLOGIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL

MATHEUS CESAR ZACCHI

ANÁLISE DE VIABILIDADE DO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS
PARA REUSO EM UMA USINA DE PROCESSAMENTO DE CANA-DE-
AÇÚCAR

RIBEIRÃO PRETO
2022
MATHEUS CESAR ZACCHI

ANÁLISE DE VIABILIDADE DO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS
PARA REUSO EM UMA USINA DE PROCESSAMENTO DE CANA-DE-
AÇÚCAR

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre pelo programa de Mestrado Profissionalizante em Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias da Universidade de Ribeirão Preto.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Cleto Pires

RIBEIRÃO PRETO
2022

Ficha catalográfica preparada pelo Centro de Processamento Técnico da Biblioteca Central da
UNAERP

- Universidade de Ribeirão Preto -

Z13a Zacchi, Matheus Cesar, 1993-
Análise de viabilidade do tratamento de águas residuais para o
reuso em uma usina de processamento de cana-de-açúcar / Matheus
Cesar Zacchi. – Ribeirão Preto, 2022.
84 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Cleto Pires.

Dissertação (mestrado) - Universidade de Ribeirão Preto,
UNAERP, Tecnologia Ambiental. Ribeirão Preto, 2022.

1. Setor sucroalcooleiro. 2. Açúcar. 3. Etanol. 4. Água residual.
5. Água – Reuso. I. Título.

CDD 628

MATHEUS CESAR ZACCHI

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre pelo programa de Mestrado Profissionalizante em Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias da Universidade de Ribeirão Preto.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo C. Pires

Aprovação: 23/02/2022



Prof. Dr. Eduardo Cleto
Universidade de Ribeirão Preto
Orientador



Prof. Dr. Marcelo Montaña
USP



Assinado de forma digital por
Wellington Cyro de Almeida Leite
Dados: 2022.02.24 10:52:12 -03'00'

Prof. Dra. Luciana Rezende Alves de Oliveira
Universidade de Ribeirão Preto



Assinado de forma digital por
Luciana Rezende Alves de Oliveira
Dados: 2022.03.15 16:30:38 -03'00'

Prof. Dr. Wellington Cyro de Almeida Leite
Universidade de Ribeirão Preto

RIBEIRÃO PRETO
2022

AGRADECIMENTOS

A essência de um agradecimento está no modo como construímos nossa jornada, agradecer, portanto, é reconhecer no outro características que nos ajudaram a crescer e nos tornarmos seres humanos melhores, assim, venho primeiramente agradecer à Deus, que me proporciona saúde e disposição todos os dias para lutar por aquilo que acredito e sonho.

À minha mãe Isabel Zacchi, mulher ímpar e de coração gigante, que nunca mediu esforços para ver seus dois filhos serem felizes.

A meu irmão Vinicius Zacchi, jovem sonhador e empreendedor, que provou a todos que é possível ser felizes das mais diversas formas e maneiras.

A meu pai Julio Zacchi, homem trabalhador e guerreiro, que batalha desde sempre para que seus dois filhos possam ter tudo que para ele era um sonho, e conseguiu.

À namorada Bettina Pedroso por toda a paciência e ajuda durante mais esta etapa em minha vida.

Aos amigos e profissionais Renan Silvestrin e Abel Costa, que nunca hesitaram em me ajudar e apoiar tecnicamente nesta desafiante dissertação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Cleto Pires por todo apoio e suporte para criação e execução deste estudo, seu apoio foi fundamental.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental da UNAERP, por todo suporte e acolhimento durante minha jornada de estudos, em especial à professora Dra. Luciana R. A. Oliveira por todo suporte e atenção dada à esta dissertação.

Aos colaboradores da UNAERP que indiretamente contribuíram para que toda esta jornada de estudos acadêmicos fosse possível.

*O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem
perder entusiasmo.*

(Winston Churchill)

RESUMO

Nos últimos 40 anos, o reuso das águas ganhou grande destaque, principalmente pelo fator potencial de ser um grande agente de combate contra a escassez de água enfrentada em todo o mundo. Dentro do setor sucroalcooleira, o reuso pode ocorrer em diversas etapas do processo e por diversos motivos, como: resfriamento de componentes de equipamentos, lavagem de setores e utilização em sistemas de vácuo. A partir deste cenário, este trabalho traz uma completa avaliação do reuso de águas residuais no processo de uma usina sucroalcooleira no Estado de São Paulo. Como forma de avaliação das vazões residuais da usina, foi feita a medição diária na safra de 2019 e 2020, posteriormente, foram realizadas as análises de caracterizações completas das amostras. Conseguiu-se observar o valor médio de 10.278,78 kg/dia de carga orgânica e, também a presença significativa de óleos e graxas nas águas residuais, com isto, em alinhamento com as vazões obtidas, foi possível chegar a uma solução de tratamento residual através de um processo físico-químico de coagulação, floculação, decantação e separação. A implementação do tratamento físico-químico das águas residuais possui a necessidade de investimento inicial do valor de R\$1.837.000,00 e um custo operacional anual de R\$693.901,72. Em contrapartida, a usina estudada utiliza hoje em seus processos uma água de captação e um tratamento primário de águas para utilização desta água, que lhe custa anualmente R\$290.639,46. Frente a este comparativo entende-se o custo de tratamento das águas residuais como um valor mais oneroso do que o valor de captação e tratamento para uso das águas diretas de mananciais, no entanto, pondera-se todos os benefícios de possibilidades de captação de recursos financeiros através de certificações (exemplo: Renovabio) sustentáveis, que garantem uma boa visibilidade da imagem da empresa, como também a possibilidade de retorno financeiro através deste olhar sustentável dos processos.

Palavras-chave: Setor sucroalcooleiro. Açúcar e etanol. Água residual. Reuso de água.

ABSTRACT

In the last 40 years, the reuse of water has gained great prominence, mainly due to the potential factor of being a great agent to combat the scarcity of water faced all over the world. Within the sugar-alcohol sector, reuse can occur at different stages of the process and for different reasons, such as: cooling of equipment components, washing sectors and use in vacuum systems. From this scenario, this work brings a complete evaluation of the reuse of wastewater in the process of a sugar and alcohol plant in the State of São Paulo. As a way of evaluating the plant's residual flows, daily measurement was carried out in the 2019 and 2020 harvest, later, the analysis of complete characterization of the samples was carried out. It was possible to observe the average value of 10,278.78 kg/day of organic load and also the significant presence of oils and greases in the wastewater, with this, in alignment with the flows obtained, it was possible to arrive at a residual treatment solution through a physicochemical process (obtained from coagulation, flocculation, decanting and separation). The implementation of the physical-chemical treatment of wastewater requires an initial investment of R\$1,837,00.00 and an annual operating cost of R\$693,901.72. On the other hand, the studied plant currently uses in its processes capture water and a primary water treatment to use this water, which costs it R\$290,639.46 annually. In view of this comparison, the cost of wastewater treatment is understood as a more onerous value than the value of capture and treatment for the use of direct water from springs, however, in this financial comparison, the cost of waste waster treatment is understood as more costly value than the value of capture and treatment for the use of direct water from water sources, however, all the benefits of financial fundraising possibilities are considered through sustainable certifications (e.g.: RenovaBio), which ensure good visibility of the company's image, as well as the possibility of financial return through this sustainable look at the processes.

Keywords: Sugar and alcohol sector. Sugar and ethanol. Wastewater. Water reuse.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01 - Demandas de uso da água no Brasil, por setor (%) e total sem considerar a evaporação dos reservatórios.	21
FIGURA 02 - Sistema aberto de utilização de água em uma usina sucroalcooleira.	23
FIGURA 03 - Fases e tópicos de estudos do trabalho.	29
FIGURA 04 - Macrofluxo de processos.	31
FIGURA 05 - Medidor de vazão eletromagnético.	32
FIGURA 06 - Caminhão despejando matéria-prima.	36
FIGURA 07 - Ternos sequenciados de Moenda.	38
FIGURA 08 - Processo de extração de caldo.	39
FIGURA 09 - Caldeira de geração de energia.	40
FIGURA 10 - Processo de geração de energia.	40
FIGURA 11 - Fluxograma do Tratamento de Caldo.	42
FIGURA 12 - Hidratação de Cal.	43
FIGURA 13 - Balão de Flasheamento.	45
FIGURA 14 - Decantador.	46
FIGURA 15 - Esquema de trabalho do Filtro Rotativo.	47
FIGURA 16 - Filtro Rotativo.	47
FIGURA 17 - Peneiras Estáticas.	48
FIGURA 18 - Processo de evaporação com 4 efeitos.	49
FIGURA 19 - Evaporador.	49
FIGURA 20 - Conjunto de Evaporadores.	50
FIGURA 21 - Fluxograma da Produção de Açúcar.	51
FIGURA 22 - Fluxo esquemático da fabricação de açúcar.	52
FIGURA 23 - Cozedor.	52
FIGURA 24 - Conjunto de Centrífugas.	53
FIGURA 25 - Interior de um Armazém de Açúcar.	54
FIGURA 26 - Fluxo esquemático de Fermentação e Destilaria.	56
FIGURA 27 - Fluxo esquemático de Fermentação e Destilaria.	56
FIGURA 28 - Dorna de 1.000.000L.	57
FIGURA 29 - Centrífuga.	58
FIGURA 30 - Cuba de Levedura.	58
FIGURA 31 - Coluna de Destilação.	59
FIGURA 32 - Tanque de Armazenagem de Etanol.	60
FIGURA 33 - Etapas do Tratamento Físico-Químico.	68
FIGURA 34 – Desenho Esquemático do Tratamento de Água.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de horários.	33
Tabela 2 - Tabela de amostras.	34
Tabela 3 - Uso de água na Geração de Energia.	41
Tabela 4 - Uso de água na Extração.	42
Tabela 5 - Uso de água Tratamento de Caldo.	51
Tabela 6 - Uso e descarte de água Fábrica de açúcar.	55
Tabela 7 - Uso e descarte de água na Fermentação e Destilaria.	61
Tabela 8 - Outros usos de água.	61
Tabela 9 - Média de vazões (m ³ /hora) de geração de águas residuárias.	62
Tabela 10 - Análise de DQO (mg/L).	63
Tabela 11 - Quantidade em quilogramas de carga orgânica por dia.	63
Tabela 12 - Mínimo, Máximo e Média de Carga Orgânica medida em DQO.	64
Tabela 13 - Análise completa das águas residuais.	65
Tabela 14 - Vazões residuais totais.	66
Tabela 15 - Valores de água residual, desconsiderando a vinhaça para a safra de 2019.	67
Tabela 16 - Tabela de vazões para cálculo do tratamento residual.	69
Tabela 17 - Dimensionamento do tanque de decantação.	70
Tabela 18 - Uso diário de insumos.	71
Tabela 19 - Precificação do uso dos produtos químicos.	71
Tabela 20 - Vazões de vinhaça.	72
Tabela 21 - Custo diário do tratamento para água captada.	73
Tabela 22 - Tabela de comparativo de preços.	74
Tabela 23 - Custo Anual da utilização da água.	74
Tabela 24 - Comparativo do Custo Anual da utilização da água.	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área
ANA	Agência Nacional de Águas
Ca(OH)	Hidróxido de Cálcio
CaHPO ₄	Fosfato Ácido de Cálcio
CaSO ₃	Sulfito de Cálcio
CDPA	Comissão de Defesa da Produção Açucareira
CM	Centímetro
CO ₂	Gás Carbônico
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IAA	Instituto do Açúcar e Alcool
IEA	International Energy Agency
M ²	Metro Quadrado
M ³	Metro Cúbico
ONU	Organização das Nações Unidas
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
SINDAÇUCAR	Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool
SMWW	Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater
UDOP	União Nacional de Bioenergia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1 A MATRIZ ENERGÉTICA E O USO DA ÁGUA	16
3.2 O USO DA ÁGUA NO SETOR SUCROALCOOLEIRO	23
3.3 O ETANOL E AÇÚCAR POR OUTRAS CULTURAS	25
3.4 EFLUENTES NO SETOR SUCROALCOOLEIRO	27
4 MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1 MAPEAMENTO DA UTILIZAÇÃO E DESCARTE DA ÁGUA	31
4.1.1 Descrição dos Processos Industriais	32
4.1.2 Descrição Do Descarte De Água Residual	32
4.2 SOLUÇÕES PARA O TRATAMENTO E REUSO	33
4.2.1 Coleta De Dados	33
4.2.3 Proposta Do Tratamento De Água Residual	35
4.3 VIABILIDADE DE REUSO	36
4.3.1 Quantificação Da Operacionalidade	36
4.3.2 Cálculo De Viabilidade	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1 DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS PRODUTIVOS	37
5.1.1 Extração Do Caldo	38
5.1.1.1 Queima do bagaço	40
5.1.1.2 Uso e descarte de águas na geração de energia	42
5.1.1.3 Uso e descarte de águas na extração do caldo	42
5.1.2 Tratamento Do Caldo Extraído	43
5.1.2.1 Caleação	44
5.1.2.2 Aquecimento do caldo	45
5.1.2.2.1 Vapor de escape das turbinas	45
5.1.2.3 Flasheamento do caldo	45
5.1.2.4 Clarificação do caldo	46

5.1.2.5 Filtração do caldo	47
5.1.2.6 Peneiramento do caldo	49
5.1.2.7 Evaporação	49
5.1.2.8 Uso e descarte de águas no tratamento do caldo	51
5.1.3 Fábrica De Açúcar	52
5.1.3.1 Cozimento da Massa B	53
5.1.3.2 Centrifugação da Massa B	54
5.1.3.3 Cozimento da Massa A	55
5.1.3.4 Centrifugação da Massa A	55
5.1.3.5 Lavagem e armazenagem	55
5.1.3.6 Uso e descarte de águas na fábrica de açúcar	56
5.1.4 Fermentação e Destilaria	56
5.1.4.1 Fermentação	56
5.1.4.2 Centrifugação	58
5.1.4.3 Armazenagem de etanol	61
5.1.4.4 Descarte de águas residuais na fermentação e destilaria	61
5.1.4.4.1 Mapa Residual	62
5.1.5 Soluções para o Tratamento o Reuso	63
5.1.5.1 Coleta e análise de dados	62
5.1.5.2 Vazão e caracterização de águas residuais	63
5.1.5.2 Proposta de tratamento	67
5.1.6 Viabilidade Do Reuso	70
5.1.6.1 Quantificação da operacionalidade	70
5.1.6.2 Cálculo de Viabilidade e Possibilidades	72
6 CONCLUSÕES	76
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
7.1 AVALIAÇÃO DE SETORIZAÇÃO DO TRATAMENTO RESIDUAL	77
7.2 AVALIAÇÃO DA PROPOSTA PARA EMPRESAS DE OUTRAS REGIÕES	77
REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

Desde o início do desenvolvimento econômico mundial, houve um aumento da emissão de gases poluentes, responsáveis por intensificar o aquecimento global e por prejudicar a camada de ozônio. Para a International Energy Agency (IEA, 2018), a dependência do mundo por combustíveis fósseis leva a uma intensificação dessa problemática. De acordo com a IEA (2018), somente a área de transporte representou 14% do total de emissões de dióxido de carbono em todo o mundo através do uso de energia de fontes fósseis. Esse percentual comprova a dependência da matriz energética mundial desses combustíveis com alto índice de emissão de dióxido de carbono.

Essa é a grande desvantagem do uso de combustíveis fósseis: a poluição ambiental. Em decorrência da queima dos combustíveis, emite-se, na atmosfera, toneladas de dióxido de carbono. Além das queimas de combustíveis derivados do petróleo, destaca-se, também, a produção de cimento e o mal uso da terra na conversão de florestas no uso agropecuário. Para Braga (2003), a poluição, para além dos anos permanentes no meio ambiente, pode gerar, também, problemas respiratórios, que variam desde leves asma até doenças obstrutivas crônicas e casos graves de câncer.

No Brasil, uma das fontes viáveis é fornecida pela cana-de-açúcar através da indústria sucroalcooleira, já bem estabelecida no país por meio da iniciativa privada. De acordo com a EPE (2021), em 2018, o uso de biomassa beirava os 2,5%; em 2020, esse valor salta para quase 10% (especificamente, 9,1%), representando um aumento de 36%. É preciso destacar que o etanol, enquanto combustível, demorou muito tempo para ser pensado como estratégia para a diminuição da emissão de dióxido de carbono. Somente na década de 1970, com a crise do petróleo, é que o uso do etanol de cana-de-açúcar passa a ser visto como um meio do país diminuir sua dependência do petróleo estrangeiro e, por consequência, melhorar a emissão de dióxido de carbono.

Na década de 1970, o mundo passou pela primeira crise do petróleo, onde o preço do barril do combustível natural subiu significativamente, gerando um efeito arrasador na economia mundial, com impactos que deixaram graves consequências. Devido à esta crise mundial do petróleo e na tentativa de impulsionar o setor sucroalcooleiro, e de intensificar a produção de álcool combustível (etanol) para substituir a gasolina, o governo brasileiro criou o Proálcool (Programa Nacional do Álcool) (MATIAS, 2015).

Essa cultura de cana-de-açúcar possui, segundo Braibante (2013), uma longa história no país e uma forte ligação com trabalho escravo. O principal e mais importante fator para a perpetuação e para a propagação da cultura de cana-de-açúcar no país não foi apenas pelo

interesse na exportação no açúcar, muito consumido e demandado na época, mas, também, o viés de abertura de novos territórios para colonização do país recém-descoberto. A partir da necessidade de explorar o território e de firmar fronteiras, fez-se necessário incentivar novas culturas, que não colocassem em risco domínios do café, por exemplo.

Entretanto, como assinala a UDOP (2013), a cana-de-açúcar não é um cultivo originalmente português. A teoria mais aceita é a de que a cana-de-açúcar teve início na Nova Guiné e boa parte de sua expansão ao redor do mundo foi por intermédio dos árabes. Na América, essa cultura foi propagada, devido ao fator climático, bem como a seu manejo relativamente simples, se comparado a outras cultura e que propicia uma produção média que pode se prolongar por quatro a seis anos sem necessidade de replantio.

No início da exploração da cana-de-açúcar no Brasil, a forma produtiva nas terras coloniais era muito distinta da forma atual de processamento de cana-de-açúcar. Tendo como início os engenhos de açúcar, como eram conhecidos, movidos por força de tração animal e/ou força das águas dos rios. Todas as instalações eram interligadas para que as etapas do processo seguissem uma lógica de fabricação (SCHWARTZ, 1988).

Segundo Silva (2010), esse processo arcaico iniciava-se no plantio da cana-de-açúcar. Em seguida, com a maturação, procedia-se ao corte e a matéria-prima era transportada por carros de boi até as moendas, que realizavam a prensagem da cana através de engrenagens grandes. Depois do processo de moagem, o caldo era cozido em fornalhas. Nas fornalhas, as impurezas do caldo eram retiradas através de um longo processo de cozimento realizado em tachos de cobre, para, então, produzir-se o melaço.

Posteriormente, o melaço era levado para o local de purgar e ficava lá durante, aproximadamente, duas semanas em formas de argila, com pequenos orifícios para serem utilizados como drenos. Nessas formas, colocava-se argila e água junto ao melaço para que ele pudesse ser refinado e, finalmente, embalado para ser enviado à Europa por meio de navios. Lá, era comercializado pelos portugueses.

Segundo Szmrecsányi e Moreira (1991), como o açúcar possuía valor comercial muito significativo, a produção brasileira ficou voltada para esse produto durante 400 anos. Somente depois desse período o Brasil iniciou a produção de etanol, mais especificamente após 1973 com a crise internacional do petróleo, que forçou o país a ter uma produção independente de combustíveis e não ficasse à mercê das cotações internacionais de petróleo.

Desde então, o Brasil tem se expandido e crescido a cada ano que passa no setor sucroalcooleiro. Segundo Elia Neto e Shintaku (2009), as usinas de cana-de-açúcar que possuem o processamento do mix açúcar e etanol possuem uma necessidade aproximada de

captação de 20m³ de água para cada tonelada de cana-de-açúcar que é processada. Esse número pode aumentar caso seja produzido apenas etanol, conforme assinala Leite (2005).

Dessa forma e em alinhamento com a elevada necessidade de captação de água para o processamento e produção de açúcar e etanol, somado ao importante papel da cana de açúcar na economia do país, ressaltamos que o alto volume de captação vai em desencontro com a crise e com a necessidade hídrica do mundo contemporâneo. Isso, pois, dentro do sistema do processo industrial de açúcar e álcool são consumidos cerca de 3,6 bilhões de litros anuais de água, sendo essa a atividade econômica que apresenta o maior consumo desse recurso natural.

Visto esta perspectiva, entende-se que, durante a história, o setor sucroalcooleiro é um setor que utiliza-se de recursos hídricos de forma abundante. Isso reflete na contradição do caminho sustentável que a humanidade tem seguido. Portanto, um trabalho que apresente a viabilidade de reuso de águas residuais neste setor, se torna de alta relevância e importância.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi a realização de um mapeamento completo das águas residuais no processo produtivo de etanol, açúcar e bioenergia de uma usina Sucroalcooleira com moagem média diária de 10 mil toneladas. Assim, visando propor uma solução de tratamento para as águas residuais desta usina, demonstrando a viabilidade de reuso destas águas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mapear a utilização e descarte da água nos processos de produção de uma usina Sucroalcooleira;
- Propor soluções para o tratamento e reuso de águas residuais desta usina;
- Realizar a viabilidade de reuso da água.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, apresentamos uma caracterização geral da utilização das águas e também das variações necessárias de fontes energéticas, especificamente no contexto brasileiro e mundial. Para tanto, consideramos aspectos legais determinados pela Lei n. 9.433/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, criando o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Além disso a referida legislação regulamenta o inciso XIX, do artigo 21 da Constituição Federal (que previa a instituição do referido Sistema e, também, a definição dos critérios para outorga do direito de uso dos recursos hídricos). Além disso, a Lei de 1997 altera a Lei n. 8.001/1990, que modificou a Lei n. 7.990/1989, que institui para os Estados, o Distrito Federal e os Municípios a compensação financeira pelo resultado da exploração de recursos hídricos, para fins de geração de energia elétrica, de recursos minerais em seus respectivos territórios, de plataformas continental, mar territorial ou zona econômica exclusiva; cujos percentuais foram definidos em 1990.

3.1 A MATRIZ ENERGÉTICA E O USO DA ÁGUA

De acordo com o EPE (2021), é por meio da diversificação da matriz energética com fontes renováveis, que se pretende diminuir a emissão de dióxido de carbono. Princípio esse que se vê representado no artigo 170 da Constituição Federal do Brasil.

Art. 170. A ordem econômica, fundada na valorização do trabalho humano e na livre iniciativa, tem por fim assegurar a todos existência digna, conforme os ditames da justiça social, observados os seguintes princípios: (EC no 6/95 e EC no 42/2003)

I–soberania nacional;

II–propriedade privada;

III–função social da propriedade;

IV–livre concorrência;

V–defesa do consumidor;

VI–defesa do meio ambiente, inclusive mediante tratamento diferenciado conforme o impacto ambiental dos produtos e serviços e de seus processos de elaboração e prestação;

VII–redução das desigualdades regionais e sociais;

VIII–busca do pleno emprego;

IX–tratamento favorecido para as empresas de pequeno porte constituídas sob as leis brasileiras e que tenham sua sede e administração no País.

Parágrafo único. É assegurado a todos o livre exercício de qualquer atividade econômica, independentemente de autorização de órgãos públicos, salvo nos casos previstos em lei. (BRASIL, 2016 [1988], grifos nossos).

O próprio dispositivo constitucional brasileiro aponta para o fato de que o desenvolvimento econômico e o consumo de combustíveis fósseis sejam pensados sob a ótica do desenvolvimento e da preservação ambiental. É importante assinalar que, na perspectiva política, há uma preocupação com o uso de energias renováveis, a fim de diminuir as tarifas, conforme aponta a Agência Câmara de Notícias (2021). É interessante notar que, apesar de o Brasil ter alto índices de emissão de dióxido de carbono, a utilização de fontes renováveis é maior do que a média mundial.

De acordo com o EPE (2021), em 2018, 86% da energia utilizada no mundo era proveniente de fontes não renováveis, enquanto, apenas, 14%, de fontes renováveis. Nesse mesmo ano, no Brasil, 45% da energia utilizada provinha de fontes renováveis (um valor 31% maior do que a média mundial). Nesse cenário, a título de exemplo, a matriz energética hidráulica correspondia a 16,2% das energia renováveis, já no Brasil esse número chegava a 50%, atingindo 65,2% em 2020.

Assim, sugere-se a utilização de uma outra fonte energética no país, o que dá a origem a fontes energéticas oriundas da cana-de-açúcar. Desde o início de sua propagação em todo o território brasileiro, a cana-de-açúcar mostrou-se uma cultura muito promissora e financeiramente muito viável (GOULART; MISOCZKY, 2010). Essa propagação promissora deve-se ao fato de que o clima tropical do país favoreceu com que a cana-de-açúcar pudesse ganhar forma e produtividade em todas as regiões onde era cultivada. De acordo com dados da CONAB (2012), o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, colhendo 595,13 milhões de toneladas por safra, em uma área de 8.520,5 mil hectares. Desse total, a região Centro-sul produz 86,1% e a região Norte-nordeste, 14,9%. Vários fatores têm interferência na produção da cana-de-açúcar, com destaque para as interações edafoclimáticas, manejo da cultura e variedade utilizada. No estado de Alagoas, o setor de maior impacto econômico é a agroindústria canavieira que, na safra 2008/2009, gerou 91 mil empregos diretos, sendo 70 mil rurais e 21 mil urbanos (SINDAÇUCAR, 2011). A produção da cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros Alagoanos destaca-se pelo alto nível tecnológico, no campo e na indústria. A área plantada é da ordem de 445,00 mil hectares e a produção na safra 2011/2012 foi de 23.622,6 milhões de toneladas de cana moída (CONAB, 2012). A produtividade agrícola estimada no estado é de 53,90 t ha⁻¹, considerada baixa quando comparada com a média de outras regiões produtoras como São Paulo, com 74,70 t ha⁻¹, e Minas Gerais, com 72,43 t ha⁻¹.

Segundo Silva *et al.* (2008), a variação climática anual na região Nordeste do Brasil tem sido uma das principais causas de redução da produtividade agrícola. A disponibilidade de água é essencial para o crescimento e para a produtividade da cana-de-açúcar, porque sua falta ou excesso pode influir diretamente na produção da cultura. Os níveis de produtividade agrícola na região canavieira do Nordeste ainda são baixos, o que pode estar associado ao déficit hídrico sofrido pela cultura no período de setembro a fevereiro, aliado ao uso de variedades não adaptadas às condições do ambiente.

A deficiência hídrica é um dos mais importantes fatores que limitam a produção da cana-de-açúcar, e uma forma de contornar esse problema é cultivar variedades resistentes ou tolerantes à seca (SILVA *et al.*, 2008) ou, ainda, aquelas classificadas como responsivas à melhoria do ambiente e que terão alta produtividade sob disponibilidade hídrica. Ainda, de acordo com Silva (2008), uma variedade ideal é aquela que possua alta média de produção e baixo grau de flutuação em seu desempenho quando cultivada sob diversas condições ambientais. Portanto, a recomendação de uma variedade depende da comprovação de sua constância como material genético em grande amplitude de condições ambientais.

Para cada tonelada de álcool hidratado produzido, estima-se que sejam consumidas 125 toneladas de água. O insumo é utilizado na lavagem de cana, na moagem, na fermentação, na destilação, na produção de vapor e na lavagem de equipamentos, sem contar a fase de cultivo da cana. A demanda de água na agroindústria sucroalcooleira tem uma variável de grande relevância, referente quanto à tipologia do processo produtivo da usina e o produto. O uso específico de água é maior na produção do açúcar, caso de uma usina que só produza açúcar, o que atualmente é muito raro.

Ramos (2016) divide a história da agroindústria sucroalcooleira brasileira em três períodos, quais sejam: (i) de 1889 a 1930; (ii) de 1930 a 1990; e (iii) pós-década de 1990. No início do primeiro período, de 1889 a 1930, o Brasil perdeu uma enorme participação no comércio mundial devido ao fracasso da constituição dos engenhos centrais, os quais tinham o objetivo separar a atividade agrícola da industrial, e ao surgimento de concorrentes pioneiros na construção de fábricas modernas para o processamento de cana-de-açúcar e de beterraba açucareira. Nesse mesmo período, o país focou nas indústrias de fabricação de açúcar, esse esforço de modernização teve como objetivo recuperar a sua participação no comércio mundial.

No início da década de 1930, o país começa seu segundo período da história da agroindústria sucroalcooleira, que culminará na criação do Instituto do Açúcar e Álcool (IAA), em 1993, sucedendo à Comissão de Estudos sobre Álcool Motor (criada em agosto de 1931) e a Comissão de Defesa da Produção Açucareira (CDPA) criada no mesmo ano. A regulação do mercado de açúcar ficou sobre a responsabilidade do Governo Federal, que passou a estabelecer a quantidade de produção e o preço do açúcar e da cana, visando, assim, diminuir a oferta da cana-de-açúcar foi estimulada a produção do álcool e a determinação de mistura do anidro à gasolina importada.

Acrescenta-se que durante a segunda grande Guerra Mundial houve o maior percentual de mistura chegando a 42%; na década seguinte foram adicionados 15%; entre 1956 e 1960 adicionou-se 18%; entre 1961 e 1965 esse percentual caiu para 13,8%, de 1966 a 1970 ficou abaixo de 2%; em 2,2%, entre 1971 e 1975; 1,2%, em 1976; e 4,8%, em 1977 [...] (FREITAS; FREITAS; SILVA, 2019, p. 40).

Moraes (2007) destaca que o setor agroindustrial sucroalcooleiro é o mais controlado pelo estado brasileiro. Desde o ano de 1930, o governo determina a quantidade de produção de açúcar e de álcool em cada unidade industrial, além de se encarregar da comercialização dos produtos e de estabelecer os valores da tonelada de cana, açúcar e combustíveis, além de se responsabilizar por toda a exportação do açúcar e álcool. Depois da criação do Proálcool, cujo

objetivo era reduzir a dependência do país em relação ao petróleo importado, o país teve a oportunidade de controlar a tecnologia da produção de álcool, além da fabricação de veículos a álcool e, por último, carros *flex* (MORAES, 2007).

O terceiro e último período iniciou-se em 1989 com o fim do domínio do IAA no comércio externo de açúcar, atingindo seu ponto máximo na extinção do órgão, no final do primeiro trimestre de 1990. Entretanto, os preços de três dos principais produtos setoriais, a cana, o açúcar e o álcool hidratado só foram liberados em fevereiro de 1999, devido a fatores políticos e eleitorais (RAMOS, 2016). Com a redução da intervenção estatal, toda a relação dos agentes da cadeia produtiva foi afetada, como os produtores de cana-de-açúcar, as usinas e destilaria, as distribuidoras de combustíveis, e, por fim, os consumidores de açúcar e álcool.

Frente a essa conjuntura, a questão hídrica começa a ser levantada, colocando-se em voga a discussão sobre a ponderação entre o volume necessário para captação de água para o processamento da cana-de-açúcar e a crise hídrica do mundo contemporâneo, surge a opção de tratar as águas residuais geradas durante o processo industrial de fabricação de açúcar e etanol.

Águas residuais são águas com impurezas (físicas, químicas), provenientes de descargas de diferentes origens, principalmente domésticas e industriais. No âmbito doméstico, o tratamento de água tem contribuído para a diminuição da contaminação decorrente dessas impurezas. Entretanto, no âmbito industrial, a questão não é tão pacífica. As águas residuais na agroindústria canavieira são aquelas descartadas após o uso no processo industrial, em quaisquer níveis.

Quando são lançadas diretamente nos rios e lagos, devido as suas características físicas, químicas e biológicas, podem contaminar os recursos hídricos. Portanto, necessitam de tratamento ou de reuso em outras atividades para que não tornem inutilizáveis os corpos receptores (ALMEIDA, 2009, p. 47).

Almeida (2009) explica que a questão é de extrema importância dada o caráter de médio potencial poluidor do efluente oriundo da lavagem da cana, que, em termos de matéria orgânica, possui de 180 a 500mg/L de DBO5 e alta concentração de sólidos.

Caracteriza-se por ter teores consideráveis de sacarose, principalmente no caso da cana queimada, e matéria mineral e vegetal (terra e pedregulhos aderidos). Apresenta a relação disforme, com a temperatura média de 39,5°C; pH na faixa de 6,0; turbidez de 185UTN; concentração de oxigênio dissolvido de 2,5 O₂ (mg l⁻¹); demanda bioquímica de oxigênio 388; considera ausência de nitrogênio; 11(mg l⁻¹) de Potássio; e 2,2 (mg l⁻¹) de fósforo (ALMEIDA, 2009, p. 48).

Sendo uma das mais antigas culturas da humanidade, a cana-de-açúcar está presente na economia brasileira desde o começo da colonização do Brasil. Atualmente, passados praticamente cinco séculos, pode-se constatar sua relevância para o crescimento econômico brasileiro, de onde se aproveita absolutamente tudo.

Tendo em vista esta visão da história da mudança da matriz energética e também do uso da água dentro desta cultura, aponta-se em Neto (2006), que a água é o recurso natural fundamental para a vida, tanto em aspectos biológicos, como em aspectos sociais e econômicos. Basta lembrar os primeiros passos da sedentarização do homem, nas margens dos rios da Mesopotâmia. O autor destaca ainda que, enquanto recurso natural fundamental, a água possui infinitos usos e que, apesar de ser um bem público, vem se tornando pouco a pouco um recurso escasso que precisa ser cuidado com muito discernimento.

Assim, a água tem um significado essencial para a existência da vida humana no Planeta Terra, desde sua origem. É ela que garante a vida dos seres humano. Trata-se do principal recurso deste Planeta. Entretanto, por ser um recurso de extrema importância, há também grandes preocupações e alertas na atualidade com relação a sua escassez.

Segundo Rocha *et al.* (1998), todo o consumo de água pelos seres humanos tem ligação com os fatores que envolvem a vida em si de cada região específica, variando este consumo de acordo com hábitos, regiões e até mesmo padrão econômico, assim, aumenta-se o consumo, em linearidade com o crescimento populacional. Assim, com o crescimento populacional, a escassez de água vem sendo crescente em todo Planeta Terra desde que os seres humanos, pelos mais diversos motivos, passaram a utilizar a água para inúmeros usos além do consumo próprio para sobrevivência.

Para Rebouças (2002), a quantidade e a qualidade das águas doces, no planeta, sempre foram essenciais para manter os ciclos de vida (que, de acordo com Tundisi (2003), está relacionada ao ciclo hidrológico, o principal indicador referente à água no planeta), a biodiversidade dos organismos e a sobrevivência da espécie humana. Tundisi (2003) afirma que, devido ao crescimento constante da população mundial, tem havido um aumento da demanda por alimentos e por outros produtos, levando, conseqüentemente, a um aumento no uso de recursos hídricos.

De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), estima-se que o consumo entre 1990 e 2025, tenha-se passado de 580km³ de água por ano para um valor de 5200km³ de água por ano, um aumento de quase 8 vezes o valor total, assim, com este crescimento constante, cada vez mais os países procuram alternativas e meios para que haja proteção e uso consciente destes recursos.

No Brasil, a água possui diversas fontes e características de utilização, indicando que o país contém uma ramificação de diversas atividades que fazem a captação desta água para uso. Grosso modo, o Brasil é um país privilegiado no que diz respeito à quantidade de água. Augusto *et al.* (2012) afirmam que a maior reserva de água doce da Terra, que equivale a 12% do total mundial, está presente no Brasil. Entretanto, sua distribuição não é uniforme em todo o território nacional.

A Amazônia, por exemplo, é uma região que detém a maior bacia fluvial do mundo. O volume de água do rio Amazonas é o maior de todos os rios do globo, sendo considerado um rio essencial para o planeta. As maiores concentrações populacionais do país encontram-se nas capitais, distantes dos grandes rios brasileiros, como o Amazonas, o São Francisco e o Paraná. O maior problema de escassez ainda é no Nordeste, onde a falta d'água por longos períodos contribui para o abandono das terras e a migração aos centros urbanos como São Paulo e Rio de Janeiro, agravando ainda mais o problema da escassez de água nestas cidades. Além disso, os rios e lagos brasileiros vêm sendo comprometidos pela queda de qualidade da água disponível para captação e tratamento. Na região amazônica e no Pantanal, por exemplo, rios como o Madeira, o Cuiabá e o Paraguai já apresentam contaminação pelo mercúrio, metal utilizado no garimpo clandestino, e pelo uso de agrotóxicos nos campos de lavoura. Nas grandes cidades, esse comprometimento da qualidade é causado por despejos de esgotos domésticos e industriais, além do uso dos rios como convenientes transportadores de lixo (CESAR; ABDALA; KRESKI, 2019, p. 40).

Na Figura 1, é possível constatar que a irrigação é o ramo brasileiro que mais se utiliza da retirada de água, com cerca de 52% da retirada total, sendo seguida pelo abastecimento urbano (23,8%) e o ramo industrial (9,1%).

FIGURA 01 - Demandas de uso da água no Brasil, por setor (%) e total sem considerar a evaporação dos reservatórios.



Fonte: ANA (2017).

De acordo com Freitas *et al.* (2008), desde 1934, o Brasil passa a ser regido pelo Código das Águas. Trata-se de uma legislação criada pelo Decreto Federal n 24.643, de 10 de julho de 1934, que ainda segue em vigor. Sumariamente, o Código das Águas determina ser, expressamente, proibido realizar construções capazes de poluir ou de inutilizar, para o uso ordinário, a água do poço ou da nascente alheia a elas preexistentes, devendo ser demolidas as obras irregulares. Nota-se que a referida legislação trata do direito da água na esfera privativa, observando, apenas, a legislação sobre o ponto de vista dos proprietários por direito de uso das águas localizadas em propriedades privadas.

Milaré (2007) destaca que os primeiros passos para uma regência constitucional de regulamentação das águas no país foram dados em 8 de janeiro de 1997, com a Lei n. 9.433. A Lei ficou conhecida como a Lei das Águas e foi criada para que houvesse uma proteção geral dos recursos hídricos, não somente baseada nos direitos da esfera privada. A referida legislação institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e destaca a água como um bem de domínio público, de interesse comum, cuja conservação é essencial. Por isso, sempre que a água de um rio, poço, lagoa ou represa tiver de ser captada para uso na lavoura ou para receber efluentes, o produtor rural tem de obter a outorga.

Vieira (2006) afirma que os mais importantes princípios da Lei n. 9.433 são assegurar para atual e para futura geração a disponibilidade hídrica do país, levando em consideração seus padrões de qualidade, fazendo com que esses recursos sejam utilizados de forma adequada.

A Lei n. 9.433/1997 traz também alguns pilares para o uso das águas, entre eles, a caracterização da água como um bem de domínio público e que sua gestão deve ser realizada

de forma descentralizada, com o apoio do Poder Público, usuários e comunidade. A Lei menciona, também, que a água é um recurso natural limitado e dotado de valor econômico.

Assim, em alinhamento com o pressuposto de que a água é um recurso natural e dotada de valor econômico, toda a captação de recursos hídricos para qualquer tipo de abastecimento, é realizada através de uma concessão e sob monitoramento de uso para pagamento devido. Nesse sentido, cada Estado é responsável por tal monitoramento e cobrança deste uso.

Baseado em todas as conotações levantadas pela Lei n. 9.433/1997, este trabalho trouxe uma abordagem da ramificação do uso industrial da água no país, específico no setor sucroalcooleiro.

3.2 O USO DA ÁGUA NO SETOR SUCROALCOOLEIRO

A cana-de-açúcar é um dos recursos com grande potencial de crescimento para se gerar energia elétrica através da biomassa, uma vez que o Brasil é o maior produtor do mundo. Para Araújo e Santos (2012), o cultivo da cana-de-açúcar não é recente, tendo iniciado no século XVI, com foco na produção do açúcar. Hoje, o setor sucroalcooleiro destaca-se entre os setores industriais que possui mais a utilização de recursos hídricos para desenvolvimento de suas atividades, estando essa condição inerente na base do processo produtivo desta característica de indústria (MACEDO, 2005).

Almeida e Santos (2003) destacam que o setor sucro-alcooleiro-energético é um usuário intensivo de recursos hídricos. Há consumo de água para a irrigação e durante o processo de fabricação de seus produtos. Para Elia Neto (2009), a água é utilizada no processo industrial de uma indústria sucroalcooleira, proveniente de duas diferentes origens: a primeira é com a própria matéria-prima utilizada no processamento industrial, a cana-de-açúcar, que provém cerca de 70% a 75% de sua composição total formada por água; outro, que é a água que é feita através da captação de mananciais e utilizadas nos processos produtivos.

Vale ressaltar, ainda, que não somente a utilização da água captada é destinada aos processos produtivos. Segundo Mاتيoli (2001), há, também, a utilização por algumas usinas do processo de irrigação para os canaviais. No entanto, esse valor, ainda hoje, é mínimo no país, já que boa parte de toda cana produzida, hoje, não provém da utilização de irrigação.

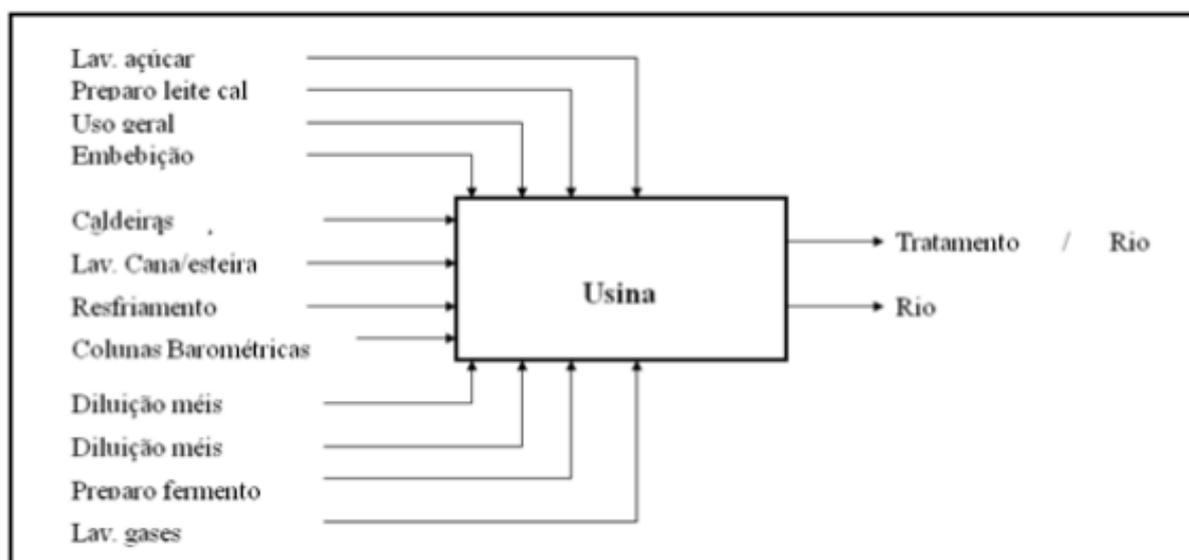
Com base apenas no uso da água nos processos produtivos, destaca-se as mais diversas utilizações. Para Wilkie (2000), toda a água utilizada dentro de uma cadeia produtiva da usina sucroalcooleira pode conter diversos destinos, como águas utilizadas para resfriamento de

sistemas fechados, águas utilizadas para embebição de processos e, também águas utilizadas para limpeza geral de equipamentos e setores.

Elia Neto e Shintaku (2009), baseado no levantamento hídrico de necessidade de água para uma usina com circuitos completamente abertos, quantificam a captação necessária em 21m³ de água para cada tonelada de cana processada. Já, segundo a ÚNICA (2013), esse valor fica próximo de 22m³ para cada tonelada de cana processada.

Também segundo Leite (2005), a água média utilizada para o processamento de uma tonelada de cana é de 19m³, conforme demonstrado na Figura 2 por um balanço hídrico.

FIGURA 02 - Sistema aberto de utilização de água em uma usina sucroalcooleira.



Fonte: LEITE (2005).

A partir da avaliação de uma produção compartilhada de matéria-prima distribuída 50% etanol e 50% açúcar, podemos ressaltar que os valores de 19, 21 e 22 metros cúbicos de utilização de água por uma usina sucroalcooleira baseada na literatura sofrem variação devido ao mix de produção de açúcar e de etanol, mas são mantidos sempre esses valores bases como premissas pelas literaturas e pelos cálculos hídricos de processos sucroalcooleiros.

Todo o valor volumétrico de utilização de água para processamento de cana-de-açúcar é gigante se comparado ao valor total de moagem de uma safra completa no Brasil. E, se levado em consideração a crise hídrica mundial da atualidade e em contexto e embasamento também da Lei n. 9.433/1997 de proteção das águas, vê-se o dever e responsabilidade de todos sobre a utilização dos recursos hídricos, portanto, é dever das usinas de cana-de-açúcar reduzir cada vez mais o uso destes recursos através da melhoria de processos e reuso desta água.

Segundo Boldrin *et al.* (2004), as empresas praticantes de cuidados e deveres ambientais ligados à sua marca, possuem maior respeito e atenção dos consumidores e clientes finais. Assim, vê-se que, o cuidado às águas e ao meio ambiente, está não somente ligado a um valor econômico possível de retorno sobre a não captação de água, mas também com um viés de cuidado ao meio ambiente ligado à marca e a empresa.

Com todo o viés de cuidado ambiental e, também à reutilização de águas dentro do setor sucroalcooleiro, a indústria sucroalcooleira veio ao longo dos anos investindo em meios e processos que fazem com que os processos de circuitos abertos (captação e descarte imediato de água) se tornassem circuitos fechados e aumentasse o reuso destas águas dentro da usina. Este investimento veio forte a partir do Plano Estadual de Recursos Hídricos (1990), no Estado de São Paulo, quando se iniciou a discussão sobre a cobrança do uso da água.

Com o Plano Estadual de Recursos Hídricos, vê-se na atualidade das indústrias sucroalcooleiras uma redução significativa do uso da água por tonelada de cana processada, segundo o SMA (2017) houve nos últimos anos uma redução de 67% da captação de água pela indústria sucroalcooleira no período de 2010 a 2017.

Muitos fatores contribuíram para que houvesse esta redução significativa da utilização da água no setor sucroalcooleiro, e, com certeza estes fatores estão ligados aos métodos de redução, reuso e tratamento desta água que foram fatores de suma importância para esta redução.

3.3 O ETANOL E AÇÚCAR POR OUTRAS CULTURAS

Em um primeiro momento, o consumo de 22m³ para o processamento de 1 tonelada de cana-de-açúcar parece ser um valor alto. De fato, o consumo para este processamento é alto; no entanto, para que isso seja, efetivamente, analisado, devemos saber também que não somente da cana-de-açúcar pode-se obter o etanol e o açúcar. Esses produtos podem ser originados de outras culturas, como, por exemplo, o milho e a beterraba.

De acordo com Tomasini (1983), a beterraba, necessária para a produção de açúcares, especialmente do açúcar branco (produzido da beterraba branca), tem um processo similar ao da cana-de-açúcar, para obtenção do açúcar. Oliveira e Serra (2012) atestam que toda produção de etanol e de açúcar, oriunda da beterraba, segue o mesmo processo que uma produção de uma usina sucroalcooleira, visto que ambos são produzidos através da sacarose. Diferente do milho, que necessita de processos um pouco mais complexos para a obtenção do etanol.

No entanto, ressalta-se um destaque muito importante, que, tanto a beterraba quanto ao milho, possuem (igualmente à cana-de-açúcar) o uso da água em seu processo industrial, mas, no balanço hídrico final de utilização de água, não são equiparáveis, conforme Hernandez (2009). Sendo assim, possuem usos diferentes de consumo de água para obtenção dos produtos finais.

Segundo Oliveira e Serra (2012) os processos são muito semelhantes entre a fabricação do etanol e de açúcar através da cana de açúcar e da beterraba. Por essa razão, suas perdas de águas residuais são, também, equiparadas. Apesar de o milho ser um pouco diferente, suas perdas residuais industriais não se elevam tanto quanto aos de cana-de-açúcar e beterraba. Entretanto, Hernandez (2009) destaca que a grande diferença entre essas culturas é a utilização de água necessária para a irrigação. Nos Estados Unidos, por exemplo, para cada litro de etanol produzido, há o consumo entre 263 e 784 litros de água.

Com base nesse consumo, para produção do etanol de milho por exemplo, identifica-se, aproximadamente, três vezes o consumo de água, em medidas não lineares, para a obtenção do etanol e/ou açúcar, valor este muito distinto do que é utilizado para obtenção dos mesmos produtos oriundos através da cana-de-açúcar ou beterraba. Para Monteiro (2011), a cana-de-açúcar não somente possui uma vantagem na utilização de águas para processamento (desde irrigação até o processamento industrial), mas, frente a outras culturas, outra grande vantagem é a não necessidade de ser replantada anualmente, podendo a cana-de-açúcar chegar a ser replantada a cada 6 anos.

Isso mostra que, apesar de o consumo das indústrias sucroalcooleiras serem as grandes utilizadoras e descartadoras de águas residuais (devido ao alto consumo de seus processos), se comparada com outras culturas, a cana-de-açúcar ainda possui vantagem hídrica e econômica do ponto de vista ambiental e produtivo. Sendo assim, em suma, verifica-se também que, um outro grande benefício da cana-de-açúcar, é a não necessidade de ser replantada anualmente, diferentemente da beterraba e milho.

Mas, observa-se também como ponto muito importante, são as grandes oportunidades em economias do uso dos recursos hídricos na cultura de cana-de-açúcar, visto que, muito pela cultura deste segmento de mercado, houve durante décadas, muitos superávits financeiros, o que gerou comodismo para não haver uma corrida tecnologia por busca de maior competitividade e custos operacionais.

3.4 EFLUENTES NO SETOR SUCROALCOOLEIRO

Segundo Jordão e Pessôa (2011), há dois tipos de esgotos: os industriais e os sanitários. Os nomes são transparentes: os esgotos sanitários são provenientes do descarte sanitário e de utilização pessoal e esgoto doméstico; ao passo que o esgoto industrial, proveniente do líquido industrial, é compreendido como um efluente do processo industrial. Acredita-se que o esgoto industrial é o responsável pela poluição das águas.

Dezotti (2008) afirma que toda indústria possui processos distintos uma das outras. Desse modo, as caracterizações física, biológica e química de suas águas residuais são diferentes umas das outras, devido ao método de processamento de cada uma dessas indústrias, incluindo matérias-primas, tipos de equipamentos etc.

Assim, toda a determinação de como caracterizar uma água, se ela é realmente uma água residual ou uma água de abastecimento, é realizado através das características físicas, biológicas e químicas de cada uma destas águas, variando assim os valores de pH, odor, turbidez etc. (VON SPERLING, 2005).

De acordo com Piacente (2005), as águas residuais do setor sucroalcooleiro são oriundas da junção dos efluentes industriais, gerados a partir da expurgação de águas de circuitos de resfriamento, limpeza de diversos equipamentos, vapores condensados que são descartados etc.

Destaca-se, também, que outro grande efluente descartado pelas indústrias sucroalcooleiras é a vinhaça. Segundo Pinto (1999), toda a vinhaça produzida em uma indústria sucroalcooleira é originada através do processo de destilação, sua composição química, no entanto, varia de acordo com o tipo de matéria-prima e do tipo de processo empregado para destilação. Neste estudo, descarta-se a utilização de vinhaça como parte do tratamento proposto, retornando este efluente à lavoura.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Como já sinalizado, neste trabalho, realizou-se o mapeamento completo das águas residuais no processo produtivo de etanol, de açúcar e de bioenergia de uma usina sucroalcooleira com moagem média diária de 10 mil toneladas. A partir da análise dos indicadores, avaliamos que o tratamento das águas residuais, mesmo que ambientalmente necessários, não são rentáveis, em uma análise de custos.

O *locus* de pesquisa foi uma usina sucroalcooleira, localizada no interior do estado de São Paulo. A empresa, cujo nome será preservado por razões éticas, é uma empresa jovem no ramo e surge a partir da fusão de negócios de bioenergia e de açúcar de dois grupos. Desde 2019, a empresa vem ganhando destaque na produção de bioenergia, atuando na transição energética e na produção de açúcar brasileiro que é exportado para o exterior. A empresa possui 11 unidades agroindustriais, em cinco estados (Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo e Tocantins).

Neste trabalho, investigaremos a produção da usina localizada em uma cidade do noroeste do estado de São Paulo. A cidade tem hidrografia baseada no Rio Grande, curso de água que banha os estados de Minas Gerais e de São Paulo, desaguando no Rio Paraná. Dessa forma, o Rio Grande faz parte da bacia do Paraná. A bacia do Rio grande é responsável por mais de 60% de toda a energia gerada no estado de Minas Gerais, por meio das usinas de Camargos, de Itutinga e de Funil. Além de sua importância energética, o Rio Grande contribui para o Turismo, por meio da alimentação de clubes náuticos.

A usina tem dois certificados atribuídos, a saber: *Etanol Mais Verde* e *RenovaBio*. O certificado de Etanol Mais Verde depende do atendimento de Diretivas Técnicas, dos prazos e das solicitações do Grupo Executivo do estado de São Paulo, configurando condição essencial para a emissão do certificado. O certificado tem validade de um ano e deve ser renovado anualmente, conforme informações do Governo de São Paulo.¹ Quanto ao *RenovaBio*, trata-se de uma Política Nacional de Biocombustíveis, instituída pela Lei n. 13.576/2017.

Art. 1º Fica instituída a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), parte integrante da política energética nacional de que trata o art. 1º da Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, com os seguintes objetivos:

¹ Informações sobre o processo de emissão do certificado podem ser encontradas diretamente no site da Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do estado de São Paulo. Disponível em <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/etanolverde/como-aderir/usinas/>.

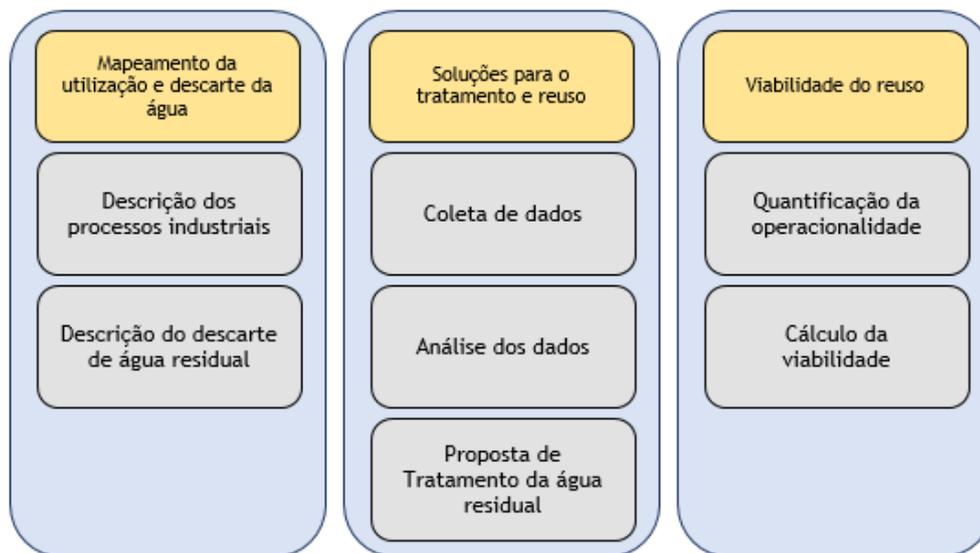
- I - contribuir para o atendimento aos compromissos do País no âmbito do Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima;
- II - contribuir com a adequada relação de eficiência energética e de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa na produção, na comercialização e no uso de biocombustíveis, inclusive com mecanismos de avaliação de ciclo de vida;
- III - promover a adequada expansão da produção e do uso de biocombustíveis na matriz energética nacional, com ênfase na regularidade do abastecimento de combustíveis; e
- IV - contribuir com previsibilidade para a participação competitiva dos diversos biocombustíveis no mercado nacional de combustíveis. (BRASIL, 2017).

O *RenovaBio* é composto por ações e por atividades, além de projetos e de programas, que viabilizem a oferta de energia cada vez mais sustentável, de forma competitiva e segura. Para tanto, prevê a participação dos biocombustíveis, com ênfase na sustentabilidade da indústria de biocombustíveis e na segurança do abastecimento, garantindo a proteção dos interesses do consumidor quanto ao preço, à qualidade e à oferta de produtos. Dessa forma, garante-se a eficácia dos biocombustíveis, na mitigação de emissões de gases causadores do efeito estufa e de poluentes locais (incluindo, aqui, o desague de dejetos). Outro aspecto considerado é o potencial de contribuição do mercado de biocombustíveis para a geração de emprego e de renda e para o desenvolvimento regional, bem como para a promoção de cadeias de valor relacionadas à bioeconomia sustentável.

A empresa possui uma moagem anual de aproximadamente 2,3 milhões de toneladas de cana, sendo, aproximadamente, 5% da produção nacional. Na indústria em análise, há 1.400 (aproximadamente, 10% do total de funcionários da empresa). Trata-se, portanto, de uma empresa de pequeno porte, o que facilita a análise numérica da produção. Claramente, não se pode, aqui, estender os resultados obtidos para todas as sedes da empresa, visto que cada uma apresenta peculiaridades próprias.

Para levarmos a cabo esta investigação, adotamos três macroetapas, a saber: Mapeamento da utilização e descarte da água, soluções para o tratamento e reuso e viabilidade do reuso. Com este sequenciamento, aponta-se também subdivisões de etapas dentro das etapas macros, demonstradas todas na Figura 3. Todo este sequenciamento, foi desenhado com o objetivo final de trazer as informações necessárias do objetivo deste trabalho.

FIGURA 03 - Fases e tópicos de estudos do trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, analisaremos a extração do caldo. Kanada *et al.* (2017) apontam que, dada a alta competitividade de mercado, a qualidade é o fator necessário e mais almejado, principalmente na extração do caldo. De acordo com Machado (2012), o processo de fabricação de açúcar objetiva, grosso, extrair o caldo contido na cana; para, então, preparar os vários tipos de açúcares.

Barbosa, Santos e Oliveira (2018) destacam que a queima do bagaço está diretamente ligada à qualidade do bagaço, a seu grau de umidade, entre outros aspectos. Isso, pois, as caldeiras, quando iniciam o processo de queima, utilizam a umidade da cana como forma de combustível para a queima. Durante o processo, o uso e o descarte de águas na geração de energia e na extração do caldo é fator de atenção, já que a cana tem muitos compostos tóxicos.

De acordo com Hugot (1977), a composição química do bagaço seco pode variar, mas como essas variações não apresentam grandes diferenças, pode-se admitir as seguintes composições: Carbono 47%, Hidrogênio 6,5%, Oxigênio 44% e Cinzas 2,5%. Tais substâncias ficam alocadas nas máquinas, que, depois de lavadas, podem contaminar a água utilizada. Essa, como destacam Pugliese, Lourencetti e Ribeiro (2017), com o descarte inadequados da água de lavagem da cana e de equipamentos, das águas residuais de condensadores e multijatos e das águas residuais domésticas.

Em um segundo momento, analisaremos o tratamento do caldo já extraído, avaliando os processos de Caleação e de Aquecimento do Caldo. O processo de caleação consiste na adição de cal para reação com o ácido fosfórico e o enxofre, adicionados subsequentemente, para produção de fosfato ácido de cálcio (CaHPO_4) e sulfito de cálcio (CaSO_3) que são pouco

solúveis, que ao precipitarem, arrastam consigo os compostos não açúcares presentes no caldo (ALBUQUERQUE, 2009).

O aquecimento do caldo consiste em elevar a temperatura do caldo entre 103° e 105°C. O aquecimento em si pouco reduz a contaminação microbiana devido ao baixo tempo de residência à elevada temperatura. Para aquecer o caldo, utilizam-se, normalmente, aquecedores verticais, horizontais, tubulares. Após o aquecimento o caldo é levado para a próxima etapa, a decantação. Para avaliarmos esse aspecto, analisaremos (i) o vapor de escape das turbinas; (ii) o flasheamento do caldo; (iii) a clarificação do caldo; (iv) a filtração do caldo; (v) o peneiramento do caldo; e (vi) a evaporação. Nesse processo, avaliaremos, também, o uso e o descarte de águas no tratamento do caldo.

Em seguida, analisamos o tratamento do caldo extraído, avaliando, em todo processo, o uso e o descarte de águas no tratamento do caldo. Durante o tratamento, retiram-se todas as impurezas solúveis e insolúveis do caldo. O processo envolve a caleação, o aquecimento do caldo, o flasheamento do caldo, a clarificação do caldo, a filtração do caldo, o peneiramento e a evaporação. Em todos esses estágios, há uma série de processos químicos que são utilizados.

Quanto à fabricação de açúcar, avaliaram-se aspectos do cozimento e da centrifugação da massa A e B, nos dois processos. Além disso, avaliou-se, também, a lavagem e a armazenagem. No processo seguinte, analisamos a fermentação, a centrifugação, a armazenagem de etanol e o descarta de águas. Assim, pudemos apresentar um mapa residual, disponível na Seção 3.1.4.4.1 deste trabalho.

A partir desses aspectos, pudemos analisar e propor soluções para o tratamento e reuso, considerando a coleta e a análise dos dados, bem como da vazão. Ao fim, apresentamos os custos e a viabilidade do reuso.

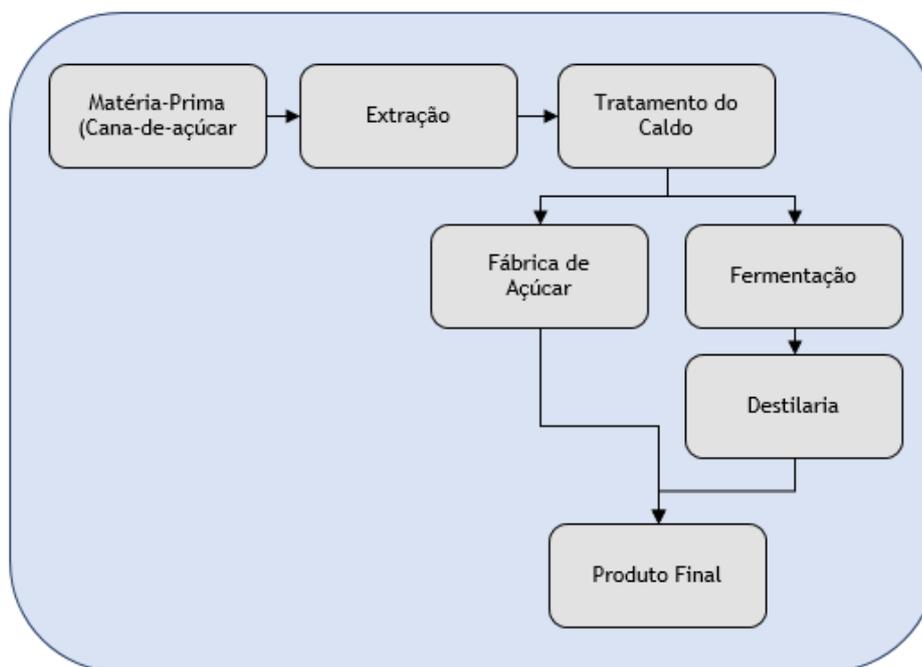
4.1 MAPEAMENTO DA UTILIZAÇÃO E DESCARTE DA ÁGUA

Todos os mapeamentos da utilização e de descarte de água residual, relatados neste trabalho, foram obtidos através da vivência profissional do autor no setor sucroalcooleiro, juntamente com profissionais do segmento. Contando, também, com o suporte da literatura do segmento para obtenção de informações adicionais e complementares. Assim, de posse de todas as informações técnicas, concluiu-se o diagnóstico completo de todas as utilizações e os descartes de águas residuais da usina.

4.1.1 Descrição dos Processos Industriais

Toda a conceituação dos processos industriais foi realizada através de uma explicação clara e detalhada que envolvem desde a recepção de matéria-prima (toletes de cana-de-açúcar), até a disponibilização do produto (açúcar, etanol e energia), separados e setorizados através de um fluxograma macro dos processos, conforme descrito na Figura 4.

FIGURA 04 - Macrofluxo de processos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ressaltamos também, que todo processo produtivo, descrito neste trabalho, pode conter variações, se comparado a diferentes empresas do segmento. Justifica-se, essa variação, pela diferença de processos, de equipamentos e de metodologia produtiva que cada empresa do segmento pode seguir e utilizar.

4.1.2 DESCRIÇÃO DO DESCARTE DE ÁGUA RESIDUAL

Com toda descrição do processo produtivo, indica-se, ainda, para cada um dos processos descritos, qual a fonte de descarte de águas residuais desse determinado processo. Dessa forma, todo o mapa de descarte águas residuais será desenhado ao final da explicação completa dos processos produtivos.

4.2 SOLUÇÕES PARA O TRATAMENTO E REUSO

Para proposta da solução de tratamento e reuso das águas residuais, coletaram-se dados referentes a águas residuais de uma usina sucroalcooleira, durante a safra sucroalcooleira de 2019 e de 2020. Durante todo esse período, todos os dados foram quantificados para que, posteriormente, pudesse ser caracterizado o perfil da água residual da usina e dada a destinação correta de tratamento.

4.2.1 COLETA DE DADOS

As coletas de informações horárias de vazões de águas residuais foram realizadas nos períodos de 11/04/2019 a 21/12/2019 (safra 2019) e nos períodos de 17/03/2020 a 14/12/2020 (safra 2020). Todas as medições foram coletadas através de um painel medidor de vazão que capta a vazão em tempo real da tubulação de descarte de água residual através de um medidor de vazão eletromagnético instalado nesta tubulação, e apontado na Figura 5.

FIGURA 05 - Medidor de vazão eletromagnético.



Fonte: Acervo do Autor.

Esse tipo de medidor eletromagnético é capaz de realizar a leitura da vazão interna de uma tubulação independente com pressões de trabalho de até 20 kgf/cm², temperatura ambiente e interna da tubulação de até 70°C e com diâmetro de até 800mm. As coletas foram captadas de hora em hora pelo painel medidor e coletadas em um banco de dados para tratativa das

informações. Dessa forma, foi possível coletar todas as informações e realizar o dimensionamento do volume real de águas residuais descartadas todos os dias durante duas safras pela usina. Destaca-se, ainda, que todas essas vazões coletadas podem sofrer variação ao longo do dia, devido a diversos e incontáveis imprevistos na rotina de operação de uma usina, como por exemplo: quebra de equipamentos, menor volume de moagem etc. Com todas as medições horárias, é possível identificar quais as vazões mínimas, máximas e médias de cada um dos meses de operação da usina.

Assim, com toda a quantificação correta das vazões, iniciou-se em conjunto com a usina um pré-acordo de coleta de amostras de águas residuais em horários estabelecidos para que a partir destas coletas, fosse possível realizar a análise de Demanda Química de Oxigênio e em conjunto com a vazão já obtida, conseguir obter o real valor de carga orgânica emitida pela usina, através do cálculo demonstrado na fórmula de carga orgânica: $Carga\ Orgânica = DQO\ (kg/L) * Vazão\ (L/dia)$. Na Tabela 1, apresentam-se os horários definidos para coleta das amostras de águas residuais.

Tabela 1 - Tabela de horários.

Horário
08:05
09:05
10:05
13:05
14:05
17:05
18:05
19:05

Fonte: Elaborado pelo Autor.

É um importante ressaltar que todos os horários de amostragem foram alinhados com a equipe de laboratório, baseados não em condições ideais e/ou momentos específicos para estas coletas, mas na disponibilidade de mão-de-obra do laboratório. As coletas foram feitas com o intuito de realizar uma caracterização analítica da água residuária, com base, também, no volume gerado no dia de produção/coleta das amostras. No total, foram coletadas amostras durante o período de 19 dias consecutivos para esta caracterização.

De todos os 19 dias de coletas nos horários pré-definidos, todas as amostras de águas residuais foram levadas a um laboratório para ser realizado a análise de Demanda Química de Oxigênio. Realizou-se, 5 amostras aleatórias, uma análise completa com informações

adicionais sobre a caracterização do perfil desta água residual. Todas as informações contidas na análise completam estão mencionadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Tabela de amostras.

Descrição da Análise	Unidade de Medida	Limite de Quantificação
Demanda Bioquímica de Oxigênio	mg/L	2,0
Demanda Química de Oxigênio	mg/L	10,0
Fósforo Total	mg/L	0,01
Nitrogênio Total	mg/L	0,05
Óleos e Graxas (Total)	mg/L	10,0
pH		2,0
Sólidos Sedimentáveis	mg/L	1,0
Sólidos Totais	mg/L	25,0
Sufactantes Aniônicos	mg/L	0,05
Temperatura da Amostra	°C	1,0
Teor de Potássio	kg/m ³	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

As análises completas das águas residuais em conjunto com toda quantificação de carga orgânica, permitiu que fosse realizado toda a caracterização dessa água e direcionou todo o modo como a água deveria ser tratada e em qual dimensão deveria ser tratada.

4.2.2 Análise De Dados

Com todos os dados obtidos (vazões e caracterizações residuais) chega-se, então, aos principais fatores informativos para a determinação geral e conceitual de como deve ser o tratamento e qual a estrutura física e operacional que este tratamento necessita.

4.2.3 Proposta Do Tratamento De Água Residual

Para a proposta do tratamento de água residual, considerou-se a vazão do ano de 2019. Para tanto, foi necessário retirar do valor residual descartado 42%, uma vez que esse é o valor médio descartado de vinhaça que retorna aos hectares de plantações.

Com a vazão determinada para análise e todas as coletas de águas residuais nos horários pré-determinados, as amostras aleatórias foram utilizadas para caracterização e para identificação de qual o tipo de água residual e quais as suas propriedades. Assim, dentre tantas opções de tratamentos de águas residuais, chegou-se a um tratamento ideal para que a usina

possa fazer o reuso da água. Esse tratamento físico-químico intenta reduzir a carga orgânica residual da usina.

4.3 VIABILIDADE DE REUSO

4.3.1 Quantificação Da Operacionalidade

Diferente da formulação da proposta do tratamento de águas residuais, que considerou somente um ano completo (2019), foram avaliadas todas as vazões de descartes de águas residuais, em 2019 e em 2020, para entender qual o volume de necessidade a ser utilizado pela usina. Subtrai-se, também, em todas as vazões obtidas o valor descartado através da produção de etanol (originando, a vinhaça).

A análise de operacionalidade foi obtida com a sinergia entre qual a vazão exigida para tratamento de águas residuais e, baseando-se no tratamento físico-químico escolhido, quais os componentes químicos e suas respectivas quantidades são necessárias para que a operação da estação de tratamento possa atender à usina por completo, contemplando também o projeto estrutural para este tratamento.

Todos os cálculos foram realizados com base na unidade comercial dos produtos químicos e em suas respectivas quantidades de aplicações necessárias baseadas nos turnos de operação de uma usina sucroalcooleira, bem como todo projeto estrutural de criação da instalação de tratamento das águas residuais foi criado em parceria com uma Consultoria do estado de São Paulo, conhecida por prestar serviços técnicos e de projetos para estações de tratamento de águas, e uma empresa multinacional fornecedora de produtos químicos para tratamento de águas.

4.3.2 Cálculo De Viabilidade

A viabilidade econômica deste trabalho foi levantada pelo comparativo entre duas opções disponíveis para a usina sucroalcooleira, a saber: o reuso da água residual, no processo, ou a captação da água bruta de rios e mananciais próximos à usina. Assim, não se considera, apenas, o valor anual de operação para a análise de implementação, mas todo custo de infraestrutura e de implementação, comparando-se, assim, as duas opções com um viés pura e exclusivamente financeiro. Não foi considerado, neste trabalho, o viés de sustentabilidade e visão positiva do negócio relacionada à meio ambiente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

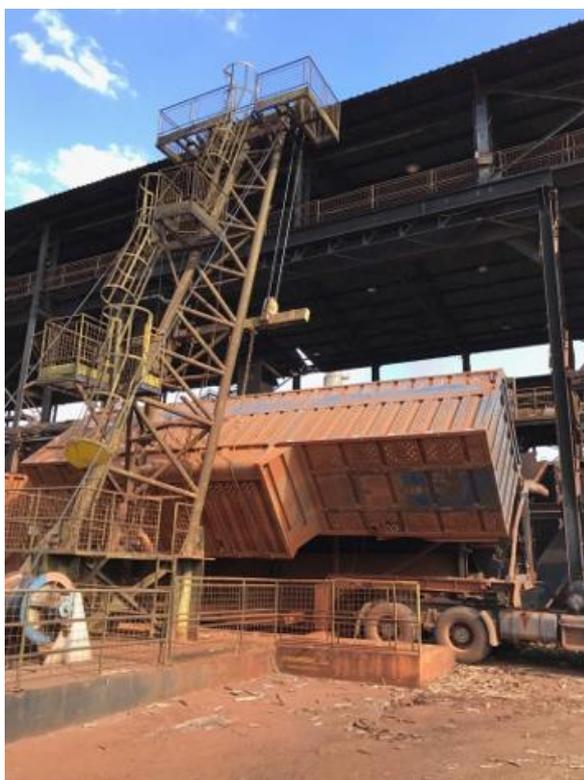
Todos os resultados que foram obtidos neste presente trabalho estão apresentados a seguir, trazendo também suas respectivas discussões.

5.1 DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS PRODUTIVOS

O método de produção de etanol e de açúcar no Brasil é praticamente igual em todas as usinas de processamento de cana-de-açúcar do país. Levando em consideração as etapas percorridas pela cana-de-açúcar para se tornar o produto, as variações são apenas nos equipamentos e nos controles de operação.

O processo produtivo de etanol e de açúcar é feito através da matéria-prima da cana-de-açúcar, colhida nos canaviais. Após ser colhida, a cana é entregue para as usinas, passando pelos seguintes macroprocessos: Extração, Tratamento de Caldo, Fermentação e Destilaria e/ou Fabricação de Açúcar. Na Figura 6, temos a demonstração macro dos processos de fabricação de açúcar e etanol.

FIGURA 06 - Caminhão despejando matéria-prima.



Fonte: Acervo do Autor (2019).

5.1.1 Extração Do Caldo

A cana é colhida no campo de forma mecanizada e, em seguida, passa para a primeira etapa do processo, a extração do caldo. A cana-de-açúcar chega em formato de toletes de cana (cana cortada em pedaços, que variam de 10 a 15cm). Esses toletes são transportados por caminhões canavieiros, que chegam a carregar até 70 toneladas de matéria-prima por vez, que, além de cana-de-açúcar, pode conter de 7 a 10% de impurezas minerais (terra etc.) e de 10 a 15% de impurezas vegetais (palha etc.). Estes caminhões são erguidos através de ganchos e despejam toda a cana em uma mesa, conhecida no setor sucroalcooleiro como “mesa alimentadora”. A mesa levará a matéria-prima até uma esteira para que o processo continue.

Durante a continuação da mesa alimentadora, faz-se a lavagem da cana-de-açúcar com água para retirada de impurezas minerais e vegetais. A água utilizada é, então, descartada, levando impurezas. Entretanto, antes do descarte, aplica-se um tratamento simples para descarte da água, por meio de um processo de decantação em grandes tanques para retirada de sólidos não solúveis.

Na sequência da lavagem da cana, a matéria-prima lavada segue pela esteira até um conjunto de facas picadoras e rotativas, que diminuirão ainda mais os toletes de cana. Em seguida, a cana passa por um desfibrador, um tipo de equipamento composto por um rotor com martelos oscilantes e uma placa desfibradora, que abrirá as células que contêm açúcares. Seguindo o processo, a matéria-prima vai para caminho das moendas para iniciar a extração. A cana desfibrada passa por um eletro ímã, para retirar qualquer tipo de metal ferroso, que prejudica e/ou danifica os equipamentos das etapas seguintes.

Após a passagem pelo eletro ímã, leva-se, também por esteiras, a cana desfibrada para a extração de seu caldo, que pode ser feita através de duas maneiras, a primeira maneira é a extração via difusão e a segunda maneira é feita através de moagem. A extração via difusão segundo a EMBRAPA é o processo de levar a cana até um aparelho chamado de difusor, onde faz com que a sacarose absorvida à da cana-de-açúcar seja removida através da lavagem ou lixiviação da cana em um processo de contracorrente. Assim, faz-se um reuso constante do caldo extraído e o reutiliza para lavagem sequenciada da cana, a fim de extrair toda a sacarose, todo este retorno da água extraída para reuso no processo pode ser utilizado de 7 à 20 vezes em um ciclo. A grande desvantagem do uso dos difusores é o enorme volume de impurezas que os bagaços gerarão para as caldeiras, exigindo um tipo de limpeza mais específica e dedicada. Assim, para este trabalho, os processos industriais foram baseados em uma extração via moagem.

A extração via moagem, feita através de equipamentos denominados moendas, consiste no esmagamento da cana desfibrada através de dois rolos, com pressão aplicada. O objetivo desta compressão da cana desfibrada é extrair o máximo possível de caldo.

Normalmente, uma moenda possui de quatro a sete ternos em série, que de forma sequencial vão realizando o máximo de compressão possível na cana desfibrada, e, ao final do último terno, temos o que se chama de bagaço, que é a cana desfibrada com aproximadamente 51% de umidade ou caldo remanescente (em comparação com a massa inicial), sendo esta desviada para a cogeração de energia.

Todo caldo que é extraído na moenda é enviado para o processo de tratamento de caldo. Em sua grande maioria das vezes, o caldo extraído no primeiro terno é utilizado para fabricação de açúcar, por se tratar de um caldo com maior pureza, e o caldo dos restantes ternos para fermentação e destilaria.

É importante ressaltar que, para que a extração seja mais eficiente, utiliza-se de um sistema de recirculação do próprio caldo extraído para que seja embebido nos ternos de extração, junto a isto, também temos a adição de água quente para que seja ainda mais efetivo o processo de embebição.

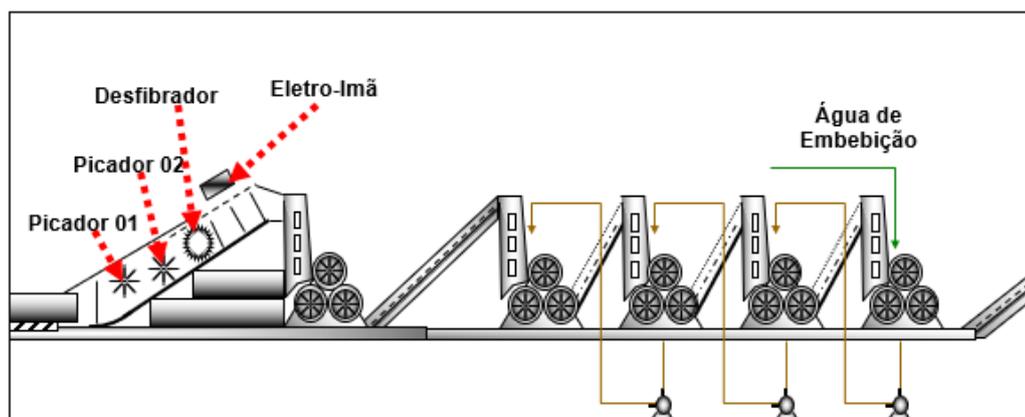
FIGURA 07 - Ternos sequenciados de Moenda.



Fonte: Acervo do Autor.

Na Figura 8, temos a demonstração esquemática de um processo de Extração.

FIGURA 08 - Processo de extração de caldo.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.1.1.1 Queima do bagaço

O bagaço é a sobra vegetal da moagem da cana e sempre foi utilizado pelas usinas para queima e, conseqüentemente, geração de energia através dele. Segundo Costa (2010), deve-se analisar e avaliar métodos para melhorar o reaproveitamento do bagaço, para reduzir custos da usina, aumentando a receita pela geração de maior quantidade de energia elétrica.

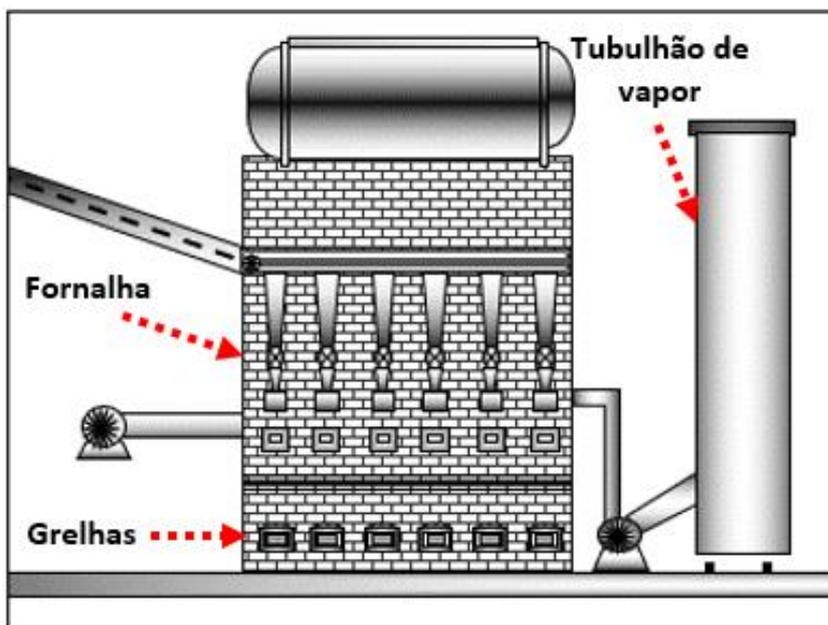
FIGURA 09 - Caldeira de geração de energia.



Fonte: Acervo do Autor.

Ao finalizar a extração do caldo, o bagaço é transportado através de esteiras para a cogeração de energia. Cada tonelada de cana produz de 240kg à 280kg de bagaço. Este bagaço é fonte de energia para as caldeiras das usinas que geram vapor em condições de alta pressão e temperatura que é utilizado para acionamento de turbinas que movimentam os principais sistemas mecânicos dentro da planta. O principal sistema mecânico é o relacionado à extração do caldo.

FIGURA 10 - Processo de geração de energia.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para geração de energia em uma usina de cana-de-açúcar, queima-se todo o bagaço. Como parte muito comum do processo de geração de energia por caldeiras, as usinas possuem sempre um controle de processos e de umidade deste bagaço, pois, quanto menor a umidade que se consiga a atingir com o bagaço, maior é o poder calorífico e geração de energia desta usina. No entanto, ainda há tratamento do bagacilho, que é uma fração do bagaço.

O bagacilho é obtido durante a alimentação de bagaço na caldeira. Em seguida, é levado por uma esteira transportadora que, em determinado ponto de seu percurso, percorre um caminho por cima de uma tela com aberturas mínimas, fazendo com que pequenas frações de bagaços (chamados de bagacilhos) se suspendam e caiam em um tanque, que é misturado junto ao lodo dos decantadores. Essa mistura será utilizada na filtração conforme explicado no tópico 5.1.2.2. deste trabalho.

Visto todo o processo de queima do bagaço para geração de energia, observa-se que a biomassa da queima do bagaço vem obtendo um destaque nos últimos anos e se tornou uma excelente fonte e solução energética, como destaca Teixeira (2010)

5.1.1.2 Uso e descarte de águas na geração de energia

Para a geração de energia através das caldeiras de vapor, utiliza-se água e, conseqüentemente, em circuitos abertos, essas águas são descartadas, dando origem às águas residuais. Entre os maiores usos de água na geração de energia destaca-se: Lavagem de gases da caldeira e uso da água nas torres de condensação. Na Tabela 3, temos o descritivo geral dos usos de águas na geração de energia.

Tabela 3 - Uso de água na Geração de Energia.

SETOR	FINALIDADE	USO ESPECÍFICO	USO MÉDIO	
			[M ³ /T CANA]	[%]
Geração de Energia	Produção de vapor direto	400 a 600 kg/t cana total	0,500	2,3
	Dessuperaquecimento	0,030 l/kg vapor	0,015	0,1
	Lavagem de gases da caldeira	2,0 m ³ /t vapor	1,000	4,5
	Limpeza dos cinzeiros	0,500 m ³ /t vapor	0,250	1,1
	Resfriamento de óleo e ar dos turbo geradores	15 l/kW	0,500	2,3
	Água torres de condensação ⁽¹³⁾	38 m ³ /t vapor	6,0 (*3)	27,1
Subtotal			2,265	10,2

Fonte: Adaptado de ÚNICA (2013).

Para a geração de energia, destaca-se como os principais pontos de descarte de águas residuais a utilizada para o resfriamento de componentes de turbinas e para lavagem dos lavadores de gases.

5.1.1.3 USO E DESCARTE DE ÁGUAS NA EXTRAÇÃO DO CALDO

Como principais pontos de descarte de águas residuais do processo de extração de caldo, destacamos dois: a lavagem da cana-de-açúcar para remoção das impurezas da matéria-prima e a água utilização para embebição de moagem. Ambas, segundo a ÚNICA (2013), representam juntas um valor aproximado de 2,45 m³ para cada tonelada de cana que é processada.

Tabela 4 - Uso de água na Extração.

SETOR	FINALIDADE	USO ESPECÍFICO	USO MÉDIO	
			[M ³ /T CANA]	[%]
Alimentação, preparo e extração (moendas e difusores)	Lavagem de cana	2,200 m ³ /t cana total	2,200	9,9
	Embebição	0,250 m ³ /t cana total	0,250	1,1
	Resfriamento de mancais	0,035 m ³ /t cana total	0,035	0,2
	Resfriamento óleo	0,130 m ³ /t cana total	0,130	0,6
Subtotal			2,615	11,8

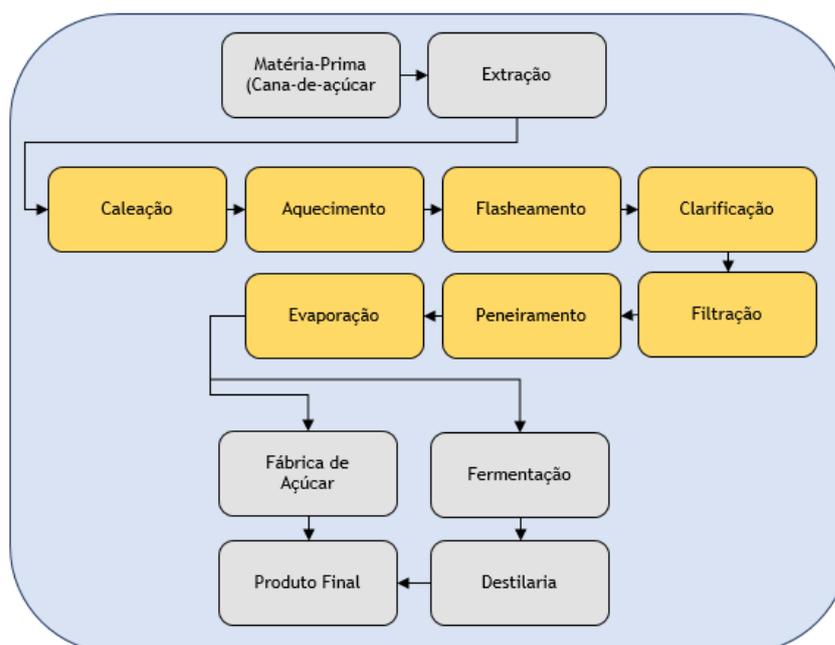
Fonte: Adaptado de ÚNICA (2013).

Os principais pontos de perdas de águas residuais são: (i) a água de uso para resfriamento de componentes de moendas (redutores e mancais); (ii) a água para resfriamento de equipamentos; e, por fim, (iii) a água para lavagem do setor.

5.1.2 TRATAMENTO DO CALDO EXTRAÍDO

Todo o caldo extraído no processo de extração é enviado, via tubulação, para o setor de tratamento de caldo, onde se faz a depuração do caldo com o intuito de eliminar impurezas, que devem ser reduzidas até os limites estabelecidos para enquadrar o açúcar ou etanol nas especificações ideais para comercialização. O setor possui várias etapas em seu processo, todas sequenciadas e destacadas em laranja no fluxograma mostrado na Figura 11.

FIGURA 11 - Fluxograma do Tratamento de Caldo.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na sequência será exemplificado do que se trata cada um dos processos do setor de tratamento de caldo.

5.1.2.1 Caleação

Uma cana fresca pode apresentar um caldo com pH que varia de 5,3 a 5,5 tornando-se necessário a neutralização com hidróxido de cálcio $[Ca(OH)]$, para que seja viabilizado a produção de açúcar e etanol. Esse processo inicia com o preparado do leite de cal, que é iniciado com a hidratação da cal. A cal é depositada em tanques com agitadores para serem misturadas com água. Esta mistura é realizada até que se atinja uma concentração de 5 a 35 Graus de Baumé². Esse leite de cal é enviado para tanques que o misturam com o caldo obtido na extração. Após a mistura, espera-se a retenção para que a reação comece a surtir efeito.

FIGURA 12 - Hidratação de Cal.



Fonte: Acervo do Autor.

² Graus de Baumé é uma escala hidrométrica que foi criada pelo francês Antoine Baumé para a medição de densidade de líquidos

Todo este processo é controlado por pHmetros que controlam para que o pH atingido nesta mistura esteja entre 7,1 e 7,3. Caso o pH seja acima desta faixa, pode haver a destruição da sacarose contida no caldo. Já, se o pH estiver em uma faixa menor que 7,1 é provável que ocorra a inversão de sacarose em frutose e glicose. A Figura 12 demonstra um tanque de hidratação de cal. Logo após o processo de caleação do caldo de cana, este caldo passa a ser chamado de caldo caleado.

5.1.2.2 Aquecimento do Caldo

No aquecimento, proporciona-se ao caldo o aumento de sua viscosidade, fazendo com que as impurezas sejam aglomeradas formando flocos. Esse processo é, totalmente, realizado por meio de equipamentos denominados aquecedores. O aumento da viscosidade do caldo no processo de aquecimento é originado da evaporação de água nesse processo, uma vez que a água evapora, o caldo fique mais espesso e mais rico em açúcares (glicose, sacarose e frutose) que posteriormente serão transformados em açúcar e etanol.

O aquecimento do caldo é de suma importância para também eliminar microrganismos e bactérias que possam estar sendo carregadas pelo caldo da cana, assim, não sendo termo resistentes, elas são eliminadas com o aquecimento do caldo a temperaturas de até 110°C.

5.1.2.2.1 Vapor de Escape das Turbinas

O vapor gerado nas caldeiras vai de forma única para os ternos de moagem, completando, assim, a transformação de energia térmica em energia mecânica na movimentação das moendas. O excedente de energia desses ternos é direcionado a outros processos e este vapor, que movimenta a outra parte da planta é denominado vapor de escape.

5.1.2.3 Flasheamento do Caldo

O caldo ao realizar a troca térmica com os aquecedores, visando todas as melhorias descritas no tópico 3.1.2.2, passa então a se tornar um caldo escaldante, um caldo com alta temperatura, agitado nas tubulações (alta pressão), gerando borbulhas. Como o próximo passo será a etapa de decantação desse caldo, essas borbulhas podem fazer com que muitas sujeiras oriundas do campo fiquem e sejam levadas adiante no processo industrial. Portanto, esse é o momento de fazer com que todas estas borbulhas desapareçam.

O Flasheamento funciona de forma bem simples e nada tecnológica, os balões de flash, são equipamentos que proporcionam ao caldo escaldante o contato direto com a pressão atmosférica, gerando assim uma expulsão das bolhas deste caldo, fazendo a sujeira contida nele se desprender.

Na Figura 13, mostra-se um balão de flasheamento, onde observa-se que a chaminé na parte superior é o local onde parte do calor é perdido e a pressão equalizado com a pressão atmosférica. Após o flasheamento, as bolhas são eliminadas e o caldo está pronta para a etapa de clarificação.

FIGURA 13 - Balão de Flasheamento.



Fonte: Acervo do Autor.

5.1.2.4 Clarificação do Caldo

O processo de clarificação no setor sucroalcooleiro ocorre após o flasheamento do caldo, onde é direcionado ao Clarificador. Previamente, prepara-se uma solução de polímeros sintéticos, diluídos em tanques de água e agitados com agitadores mecânicos por cerca de 8 horas. Essa solução de polímeros sintéticos é adicionada ao caldo do clarificador, atuando como eletrólitos. Os polímeros são de natureza aniônica e têm como característica o efeito de adsorção. Com isto, as partículas que estão no caldo se agrupam, em formato de partículas mais densas, o que facilita sua precipitação.

Assim, o processo de clarificação é acelerado. É preciso destacar que esse processo é feito por bateladas, que duram cerca de 4 horas o seu ciclo completo. Ao final do processo, todo o lodo se concentra na parte inferior do clarificador, sendo retirado através da abertura de uma

comporta. O descarregamento inferior só é possível devido a decantação das impurezas, e, na parte superior, há a retirada do caldo clarificado. Concomitantemente, ocorre o processo de filtração do lodo e, o caldo filtrado é adicionado ao clarificador que segue para peneiramento. A Figura 14 ilustra um clarificador.

FIGURA 14 - Decantador.



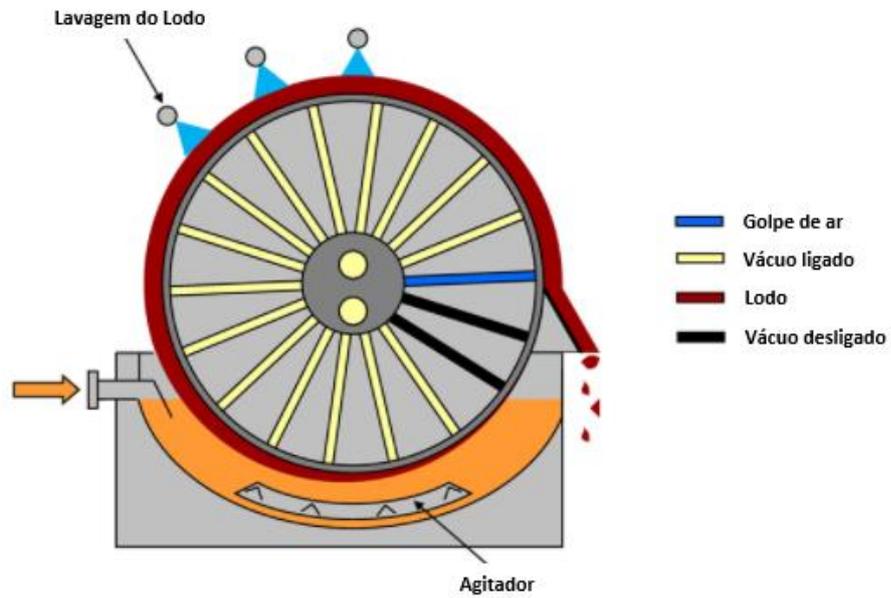
Fonte: Acervo do Autor.

5.1.2.5 Filtração do Caldo

No processo de Clarificação, após o tempo de retenção dentro dos clarificadores, é retirado o lodo na parte inferior do equipamento. Em seguida, o lodo é adicionado ao bagacilho, para que adquira maior densidade de massa, tornando mais eficaz a sucção de caldo de lodo que se dará na área de filtragem.

A filtragem tem como principal objetivo retirar deste lodo o máximo do caldo remanescente possível, pois este caldo ainda possui sacarose. O processo é feito por um equipamento denominado Filtro Rotativo, que consiste em um filtro em formato cilíndrico que realiza um mergulho parcial de sua área em um tanque com a mistura de lodo com bagacilho. Após o mergulho, o lodo é succionado para a tela do filtro por meio de uma bomba vácuo. Em seguida, com o giro do cilindro, o lodo preso a tela rotativa passa por uma segunda bomba de vácuo que continua a retirada do máximo possível de caldo deste lodo. Para ajudar na retirada do caldo, usa-se também a adição de água quente, conforme a Figura 15 ilustra.

FIGURA 15 - Esquema de trabalho do Filtro Rotativo.



Fonte: Acervo do Autor.

Ao final do giro desse círculo, um raspador retira o lodo seco (*torta*) e o caldo filtrado vai ao encontro do caldo clarificado para seguir seu processamento.

FIGURA 16 - Filtro Rotativo.



Fonte: Acervo do Autor.

5.1.2.6 Peneiramento do Caldo

O caldo filtrado e o decantado passam, em seguida, pelo processo de peneiramento, que consiste em peneiras fixas com telas, que possuem o intuito de reter o remanescente de sólidos livres com uma alimentação de caldo constante na parte superior da tela, o caldo se precipita até um tanque e toda a sujeira fica retirada nas telas. Após o processo de peneiramento, o caldo passa a ser chamado na usina de caldo peneirado. A Figura 17 apresenta uma peneira estática.

FIGURA 17 - Peneiras Estáticas.



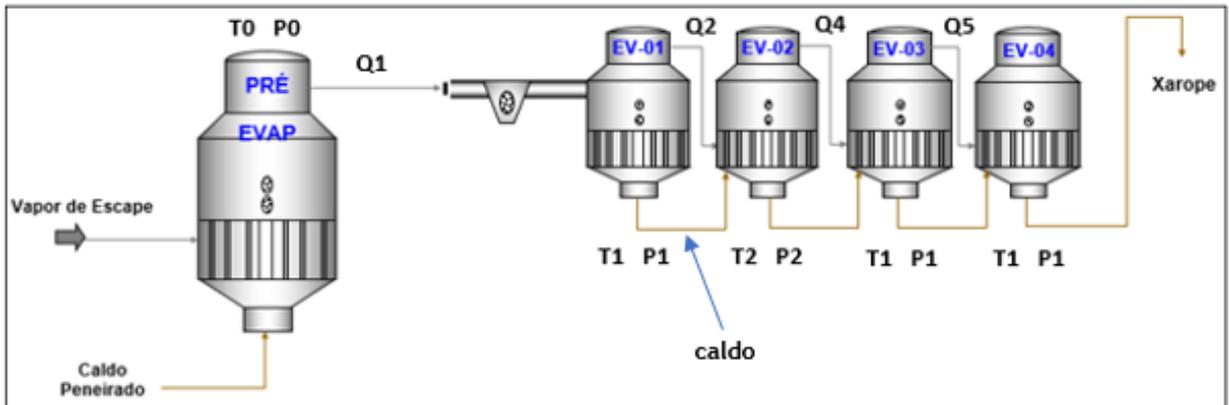
Fonte: Acervo do Autor.

5.1.2.7 Evaporação

Com o açúcar ainda diluído sobre o caldo peneirado, o processo de evaporação é a retirada de água contida no caldo peneirado para que se aumente a concentração de BRIX do caldo que posteriormente será denominado Xarope após a passagem por este processo. O objetivo da evaporação é a remoção do maior volume possível de água do caldo peneirado. Toda a evaporação será feita para que se atinja valores entre 58 e 66 de BRIX. A relação de BRIX é explicada pela equação: $BRIX = \text{peso/peso dos sólidos solúveis da solução}$

Os evaporadores trabalham são múltiplos efeitos, isto é, um evaporador é interligado com mais evaporadores para formar uma cadeia de evaporação e de remoção de água do caldo.

FIGURA 18 - Processo de evaporação com 4 efeitos.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O primeiro desses evaporadores é o denominado pré-evaporador que dá início aos demais efeitos de evaporação utilizando-se do vapor de escape. Nesse evaporador, denominado pré-evaporador, a alimentação pelo vapor de escape possui uma temperatura T_0 e uma pressão T_0 .

FIGURA 19 - Evaporador.



Fonte: Acervo do Autor.

Inicia-se, assim, a evaporação do líquido passando o vapor quente por uma calandra e, sem contato direto com o caldo, faz-se a evaporação. Toda água evaporada do caldo segue ao

próximo efeito de evaporação em formato de vapor e continua a evaporação do caldo, assim, sucessivamente, até o último efeito.

Vale ressaltar que o calor dissipado da evaporação faz o vapor perder temperatura e pressão no decorrer dos efeitos. Por isso, utiliza-se a formação de vácuo nos efeitos, assim, reduzindo-se a pressão atmosférica dos efeitos e trabalhando em pressões positivas, pode-se obter a evaporação do caldo com temperaturas menores.

FIGURA 20 - Conjunto de Evaporadores.



Fonte: Acervo do Autor.

5.1.2.8 Uso e descarte de águas no Tratamento do Caldo

Segundo a ÚNICA (2013), somente o Tratamento de Caldo, baseando-se em um cálculo de processo industrial com circuitos abertos, representa a utilização de $0,57\text{m}^3$ para cada tonelada que é processada, mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Uso de água Tratamento de Caldo.

SETOR	FINALIDADE	USO ESPECÍFICO	USO MÉDIO		
			[M ³ /T CANA]	[%]	
Tratamento de caldo	Resfriamento da coluna de sulfitação ^(*)	0,100 m ³ /t cana açúcar	0,050	0,2	
	Preparo de leite de cal	0,030 m ³ /t cana total	0,030	0,1	
	Preparo de polímero ^(**)	0,015 m ³ /t cana açúcar	0,008	0,0	
	Aquecimento do caldo	p/ açúcar ^(**)	160 kg vapor/t cana açúcar	0,080	0,4
		p/ etanol ^(*) e ^(**)	50 kg vapor/t cana etanol	0,025	0,1
	Lavagem da torta	0,030 m ³ / t cana total	0,030	0,1	
	Condensadores dos filtros	0,300 a 0,350 m ³ /t cana total	0,350	1,6	
Subtotal			0,573	2,6	

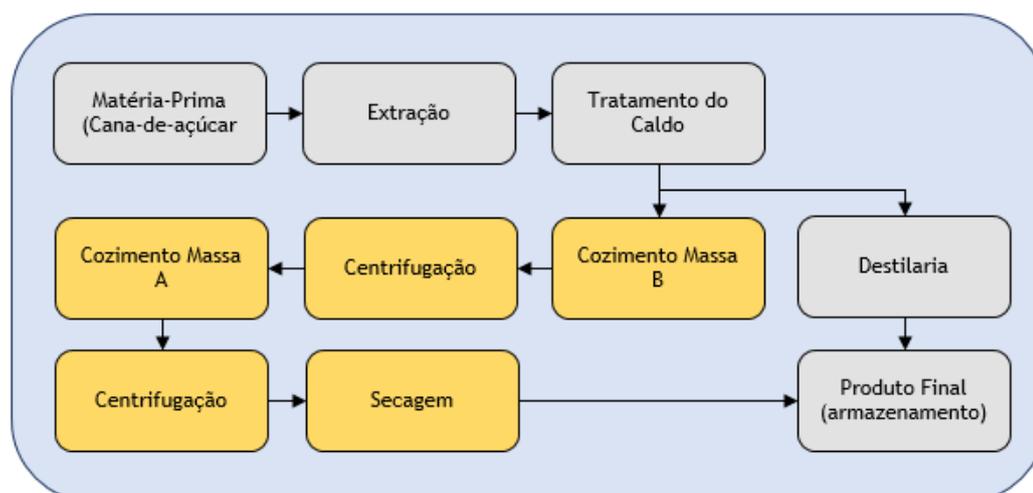
Fonte: Adaptado de ÚNICA (2013).

Durante o tratamento do caldo, os principais pontos de descarte de águas residuais são as águas utilizadas para lavagem das caixas dos Evaporadores, para limpezas do setor e para resfriar as colunas de caleação.

5.1.3 FÁBRICA DE AÇÚCAR

A fábrica de açúcar é o local onde o xarope oriundo do tratamento de caldo se transformará em açúcar. A Figura 21 apresenta, destacado em laranja, o fluxograma de etapas que ocorrem dentro da fábrica de açúcar

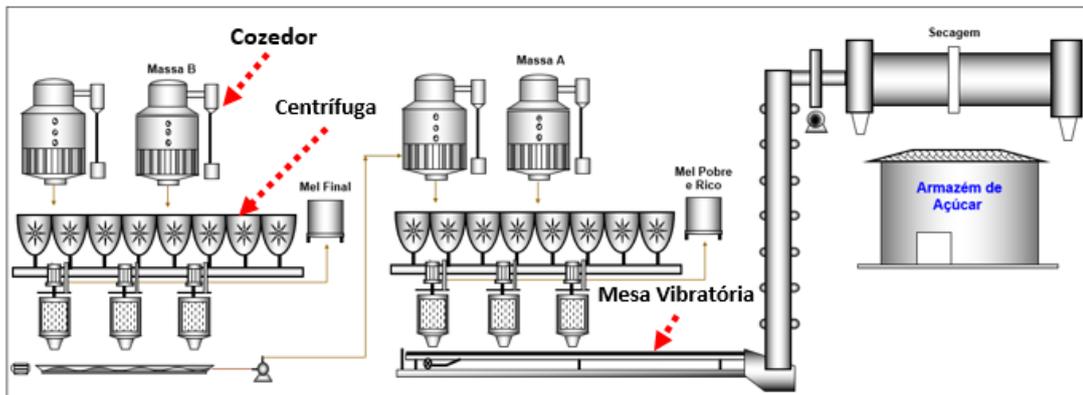
FIGURA 21 - Fluxograma da Produção de Açúcar.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 22 ilustra o desenho esquemático dos equipamentos utilizados.

FIGURA 22 - Fluxo esquemático da fabricação de açúcar.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.1.3.1 Cozimento da Massa B

Ao sair da evaporação, o caldo, agora com nome de xarope, passa pela primeira etapa de cozimento, realizado em equipamentos denominados cozedores. Nessa primeira etapa de cozimento, adiciona-se o que se chama de semente (um açúcar já cristal) nos cozedores, para estimular a cristalização de forma igual. Assim, no cozimento, ainda pode ser evaporada ainda mais água. Nesse primeiro momento, o açúcar que está sendo cozinhado recebe o nome de Massa B. A massa B, depois do cozimento, é enviada para a centrifugação.

FIGURA 23 - Cozedor.



Fonte: Acervo do Autor.

5.1.3.2 Centrifugação da Massa B

A centrifugação é a etapa na qual toda a massa B, caramelizada pelo cozimento, terá alguns rejeitos retirados de sua massa principal. Através da rotação em alta velocidade, a massa entra em contato com uma tela fina. Realiza-se uma separação física que expulsa apenas o líquido caramelizado (chamado de mel final), deixando apenas a fase sólida da Massa B. Essa fase sólida será lavada em uma operação posterior e passará a ser chamada de magma. O mel final, conhecido como melaço, é um líquido açucarado susceptível à fermentação. Por essa razão, esse mel é enviado ao setor de fermentação, para ser misturado com água e/ou com caldo para se transformar em mosto.

FIGURA 24 - Conjunto de Centrífugas.



Fonte: Acervo do Autor.

5.1.3.3 Cozimento da Massa A

O magma passa a ser cozinhado novamente na operação de cozimento da Massa A. Esse cozimento ocorre em equipamentos similares aos equipamentos de cozimento da Massa B. Nessa etapa, evapora-se ainda mais água presente no magma e cozinha-se até que se atinja uma concentração de sólidos elevada, que são pré-estabelecidas e determinadas pelas usinas de acordo com o tipo de açúcar a ser produzido.

5.1.3.4 Centrifugação

Agora, na segunda etapa de centrifugação, toda a massa A será enviada a uma centrífuga, para separação através de alta velocidade da massa A de sua fase líquida. A fase líquida resultante dessa separação é denominada mel pobre, ou mel rico, dependendo de sua concentração de açúcar. Na sequência, todo o açúcar cristal é despejado em mesas vibratórias que levarão este açúcar para o processo seguinte de secagem. Todo o mel rico (com maior concentração de açúcar) é enviado, posteriormente, para ser reutilizado no processo de cozimento e transformar-se em cristal de açúcar; já o mel pobre (com menor concentração de açúcar) é enviado à fermentação para o processo de produção de etanol.

5.1.3.5 Lavagem e Armazenagem

Após o açúcar ser despejado na mesa vibratória, é levado até um secador, para sua temperatura diminuir, evitando o empedramento. Na sequência, o açúcar é enviado ao armazém, conforme ilustrado na Figura 25.

FIGURA 25 - Interior de um Armazém de Açúcar.



Fonte: Acervo do Autor.

A armazenagem do açúcar é a última etapa antes de o açúcar ser enviado ao cliente final, encerrando sua fabricação.

5.1.3.6 Uso e descarte de águas na Fábrica de Açúcar

Como principais pontos de descarte de águas residuais durante o processo de extração do caldo, destacamos a utilização da água utilizada pelos condensadores e os multijatos dos cozedores e evaporadores (para formação de vácuo). Ambos, segundo a ÚNICA (2013), representam um valor aproximado de 8m³ para cada tonelada de cana que é processada.

Tabela 6 - Uso e descarte de água Fábrica de açúcar.

SETOR	FINALIDADE	USO ESPECÍFICO	USO MÉDIO	
			[M ³ /T CANA]	[%]
Fábrica de açúcar ^(*)	Vapor para evaporação	0,414 t/t cana açúcar	0,207	0,9
	Condensadores/multijatos evaporação	4 a 5 m ³ /t cana açúcar	2,250	10,2
	Vapor para cozimento	0,170 t/t cana açúcar	0,085	0,4
	Condensadores/multijatos cozedores	8 a 15 m ³ /t cana açúcar	5,750	26,0
	Diluição de méis e magmas	0,050 m ³ /t cana açúcar	0,030	0,1
	Retardamento do cozimento	0,020 m ³ /t cana açúcar	0,010	0,0
	Lavagem de açúcar (1/3 água e 2/3 vapor)	0,030 m ³ /t cana açúcar	0,015	0,1
	Retentor de pó de açúcar	0,040 m ³ /t cana açúcar	0,020	0,1
Subtotal			8,367	37,8

Fonte: Adaptado de ÚNICA (2013).

Os principais pontos de perdas de águas residuais são as de origem de vapor (condensado) da geração de vácuo e as utilizadas para lavagem do setor.

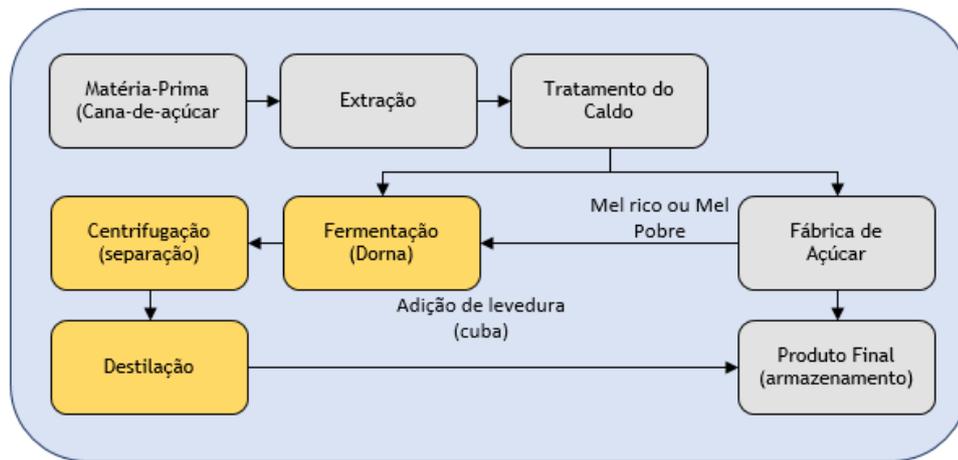
5.1.4 FERMENTAÇÃO E DESTILARIA

5.1.4.1 Fermentação

Faz-se necessário fazer algumas considerações sobre o processo de Fermentação e Destilaria. Muitas reutilizações podem ser feitas e o processo pode seguir de formas diferentes, a matéria-prima, por aqui, pode ser oriunda do xarope ou exclusivamente do caldo clarificado, ou então até mesmo do mosto. O mosto é a mistura entre o xarope ou caldo clarificado e mel final ou mel pobre.

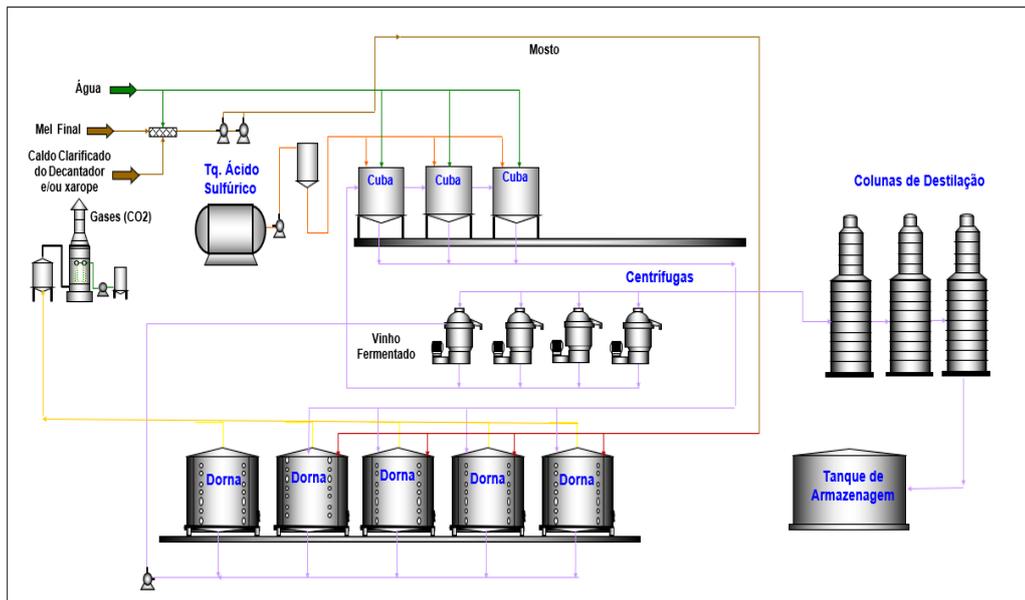
As Figura 26 e 27 representam em forma de fluxograma o processo de fermentação e destilaria destacado em laranja, assim como o desenho esquemático dos equipamentos utilizados neste processo respectivamente.

FIGURA 26 - Fluxo esquemático de Fermentação e Destilaria.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

FIGURA 27 - Fluxo esquemático de Fermentação e Destilaria.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O mosto é enviado às dornas de fermentação, Figura 28. As dornas de fermentação são tanques que variam de tamanho, podendo atingir capacidade de vários milhares de litros. Nelas, o mosto recebe adição de leveduras, microrganismos vivos que em um processo biológico de fermentação irão após um período de 4 a 12 horas, deixar o mosto com um teor alcóolico entre 7 e 10%.

FIGURA 28 - Dorna de 1.000.000L.



Fonte: Acervo do Autor.

Este processo é um processo vivo e anaeróbio, com liberação de CO_2 e dá origem ao chamado de vinho fermentado. O gás carbônico (CO_2) é liberado para a atmosfera ou pode ser tratado em uma coluna de recuperação de CO_2 . Ainda por um processo de recuperação, tenta-se ao máximo extrair algum resquício de caldo e/ou levedura que possa ter sido eliminado do processo junto ao fluxo gasoso.

5.1.4.2 Centrifugação

O vinho fermentado passa por um processo de centrifugação para a retirada da levedura. O processo é semelhante à centrifugação de massas da fábrica de açúcar, através de uma rotação em alta velocidade. O levedo é expurgado do vinho fermentado através de uma tela fina, que retém a levedura e outros sólidos; então, esse levedo passará a ser chamado de vinho de levedurado, um vinho sem leveduras.

Após a centrifugação, o levedo retorna para os tanques chamados de cubas de leveduras, descrito a seguir. O vinho de levedurado é enviado para destilaria, onde se produzirá o etanol. Na Figura 29, mostra-se uma centrífuga que é utilizada na separação da levedura.

FIGURA 29 - Centrífuga.



Fonte: Acervo do Autor.

As cubas são tanques onde são armazenados os levedos, os quais recebem água e ácido sulfúrico. O levedo, então, recupera-se biologicamente e pode ser novamente reaproveitado para o processo anaeróbio de fermentação. A Figura 30 mostra uma cuba recebendo levedos.

FIGURA 30 - Cuba de Levedura.



Fonte: Acervo do Autor.

Aqui, o vinho delevedurado passará por outro processo, chamado de destilação. O processo consiste na separação por destilação do álcool contido no vinho delevedurado, retirando a água do vinho delevedurado, chega-se a uma concentração alcóolica ideal.

Há diversas concentrações de álcool, entre elas o etanol hidratado, cuja concentração varia de 95,1% a 96%, utilizado em veículos movidos a etanol. Já uma concentração de 99,95% denomina-se etanol anidro e/ou etanol puro, utilizado para mistura de 27,5% na gasolina. Outro tipo bastante comum é o etanol neutro, comercializado para consumo humano, sendo transformado muitas vezes em bebidas alcólicas. Nesse processo de destilação, utiliza-se nas colunas de destilação a energia oriunda da queima do bagaço e cogeração pelas caldeiras, ilustrado na Figura 31.

FIGURA 31 - Coluna de Destilação.



Fonte: Acervo do Autor.

O processo de destilação, de acordo com Boza e Horri (1998), consiste na separação, na seleção e na concentração dessas substâncias. Na etapa de destilação, o álcool, a água (89-93%) e os demais componentes (glicerina, outros álcoois, furfural, aldeído acético, ácidos succínico e acético, bagacilho, leveduras, bactérias, açúcares mais complexos, sais minerais, albuminoides, CO₂ e SO₂) são separados de acordo com seus respectivos pontos de ebulição, em três etapas sequenciais.

5.1.4.3 Armazenagem de Etanol

Finalizado o processo de destilação, o etanol, seja ele de qualquer modalidade, é enviado para os tanques de armazenagem, onde ficarão até que sejam entregues ao cliente final, podendo este cliente ser postos de combustíveis, fabricantes de bebidas e/ou até mesmo refinarias de petróleo para produção de gasolina. A Figura 32 ilustra um tanque de armazenagem de etanol.

FIGURA 32 - Tanque de Armazenagem de Etanol.



Fonte: Acervo do Autor.

5.1.4.4 Descarte de Águas Residuais na Fermentação e Destilaria

Segundo a ÚNICA (2013), somente na Fermentação e Destilaria, baseando-se em um cálculo de processo industrial com circuitos abertos, representa a utilização de 3,8m³ para cada tonelada que é processada, tendo como seus principais pontos de descarte de águas residuais: preparação da cuba com adição de água, resfriamento de dornas, aquecimento e resfriamento de condensadores. Como todos os processos, a fermentação e destilaria possuem, também, descartes de águas residuais, são eles: a água da lavagem completa das dornas de fermentação e das cubas de fermentação, além a água utilizada na lavagem do setor.

Tabela 7 - Uso e descarte de água na Fermentação e Destilaria.

SETOR	FINALIDADE	USO ESPECÍFICO	USO MÉDIO	
			[M ³ /T CANA]	[%]
Fermentação ^(*)	Preparo do mosto	0 a 10 m ³ /m ³ etanol residual	0,100	0,5
	Resfriamento do caldo	30 m ³ /m ³ etanol	1,250	5,6
	Preparo do pé-de-cuba	0,010 m ³ /m ³ etanol	0,001	0,0
	Lavagem gases CO2 fermentação	1,5 a 3,6 m ³ /m ³ etanol	0,015	0,1
	Resfriamento de dornas	60 a 80 m ³ /m ³ etanol	3,000	13,6
Subtotal			4,366	19,7
Destilaria ^(*)	Aquecimento (vapor)	3,5 a 5 kg/m ³ etanol	0,360	1,6
	Resfriamento dos condensadores	80 a 120 m ³ /m ³ etanol	3,500	15,8
Subtotal			3,860	17,4

Fonte: Adaptado de ÚNICA (2013).

5.1.4.4.1 Mapa Residual

Tabela 8 - Outros usos de água.

SETOR	FINALIDADE	USO ESPECÍFICO	USO MÉDIO	
			[M ³ /T CANA]	[%]
Outros	Limpeza de pisos e equipamentos	0,050 m ³ /t cana total	0,050	0,2
	Uso potável	70 l/funcionário dia	0,030	0,1
Subtotal			0,080	0,4

Fonte: Adaptado de ÚNICA (2013).

5.1.5 Soluções para o Tratamento e Reuso

5.1.5.1 Coleta e Análise de Dados

Assim, somente com as coletas específicas das amostras e os valores de vazão é que se fez possível a avaliação, a análise e os demais cálculos para uma proposta de tratamento de águas residuais de acordo com a utilização desejada para a água tratada.

5.1.5.2 Vazão e Caracterização de Águas Residuais

A maneira eficaz de garantir as corretas leituras das vazões de águas residuais, para estudo deste trabalho, foi através do medidor de vazão eletromagnético. Obteve-se, assim, valores de forma instantânea e com acuracidade alta. Assim, toda a vazão residual foi considerada para posterior tratativa dos dados, e, inicialmente dividindo-a em: Vazão média mensal, vazão mínima mensal e vazão máxima mensal.

- Média mensal: valor resultante da média de todas as vazões horárias de um mês completo de operação da usina;
- Mínima mensal: menor vazão horária obtida dentro do mês;
- Máxima mensal: maior vazão horário obtida dentro do mês.

Uma observação e ressalva importante é que no ano de 2019, a usina estudada não iniciou sua safra no mês de março devido a atrasos de manutenção, por isto, não consta as respectivas medidas de vazões para este mês na Tabela 8.

Tabela 9 - Média de vazões (m³/hora) de geração de águas residuárias.

Mês	Safra 2019			Safra 2020		
	Média Mensal (m ³)	Mínimo mensal (m ³)	Máximo mensal (m ³)	Média Mensal (m ³)	Mínimo mensal (m ³)	Máximo mensal (m ³)
Março	-	-	-	143,85	87,50	220,63
Abril	130,24	88,33	181,42	132,04	33,46	200,25
Mai	149,46	43,08	200,67	112,27	73,92	155,42
Junho	135,47	83,33	212,50	95,14	66,88	135,92
Julho	126,39	85,71	170,83	117,33	56,42	153,00
Agosto	133,17	77,96	182,46	111,65	54,88	163,00
Setembro	89,09	68,71	132,29	121,04	54,13	203,83
Outubro	113,94	86,21	178,29	122,54	75,00	160,13
Novembro	134,89	54,75	195,04	103,30	18,21	142,46
Dezembro	152,46	66,13	243,46	120,92	75,00	142,88
Média Geral	129,46	72,69	188,55	118,01	59,54	167,75

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Assim, com as coletas de águas residuais nos horários pré-definidos e com todas estas águas residuais sendo examinadas pelo laboratório terceiro, chega-se ao valor de DQO de cada uma das análises coletadas, todas exibidas na Tabela 10. O laboratório responsável pelas análises de DQO utiliza-se do método SMWW 2018, que é caracterizado como método

standard de valorização da DQO. Com a quantificação da DQO baseado em todas as coletas realizadas, fez-se então o cálculo das cargas orgânicas nos respectivos dias de coletas realizadas, baseando-se nos volumes médios mensais de vazão de águas residuais mostradas na Tabela 9 deste trabalho e nas respectivas análises de DQO mostradas na Tabela 10.

Tabela 10 - Análise de DQO (mg/L).

	DQO (mg/L)								
	08:05	09:05	10:05	13:05	14:05	17:05	18:05	19:05	Média
20/06/2019	3.221,24	2.445,45	2.887,65	5.224,63	2.334,45	2.356,87	4.297,57	4.219,08	3.373,37
21/06/2019	2.346,88	5.887,54	4.768,98	4.534,63	3.455,67	4.563,81	4.118,90	5.634,77	4.413,90
22/06/2019	2.990,81	2.114,23	2.341,12	2.811,95	4.887,63	4.532,98	6.112,43	4.896,47	3.835,95
23/06/2019	2.987,55	2.887,46	2.587,90	3.497,21	5.622,64	2.881,97	3.276,31	3.422,38	3.395,43
24/06/2019	5.221,33	2.987,10	3.241,37	2.901,37	2.344,66	2.550,08	2.408,52	2.551,28	3.025,71
25/06/2019	2.684,33	2.564,01	3.122,48	5.113,49	3.560,11	4.133,27	2.755,02	2.569,21	3.312,74
26/06/2019	2.388,79	2.441,22	2.677,31	2.314,30	2.148,88	2.480,92	2.236,54	3.112,36	2.475,04
27/06/2019	2.654,30	2.566,77	4.122,90	5.874,33	4.788,90	3.908,77	4.122,33	3.766,55	3.975,61
28/06/2019	2.557,45	2.187,39	2.456,97	2.550,09	2.388,10	2.607,33	2.107,22	2.459,46	2.414,25
29/06/2019	2.601,01	2.853,86	2.424,64	2.560,07	2.801,22	2.771,07	3.088,34	2.949,36	2.756,20
30/06/2019	2.550,46	2.334,98	3.122,64	2.809,33	2.782,29	2.880,11	2.655,20	2.213,76	2.668,60
01/07/2019	3.118,09	3.455,30	3.380,41	6.231,77	4.716,77	3.780,99	3.977,19	3.802,36	4.057,86
02/07/2019	2.890,08	2.541,11	2.790,23	3.011,49	3.180,72	2.905,55	2.986,12	2.310,22	2.826,94
03/07/2019	2.568,23	2.881,93	2.088,21	2.311,28	4.238,77	3.544,38	3.764,27	3.321,82	3.089,86
04/07/2019	2.876,57	2.677,83	2.180,80	2.800,91	2.555,03	2.514,87	2.631,97	2.587,13	2.603,14
05/07/2019	3.897,61	3.568,00	2.988,61	3.348,11	5.132,77	4.655,32	3.997,34	4.188,04	3.971,98
06/07/2019	4.113,29	3.873,38	3.455,42	2.874,38	2.751,65	5.122,83	4.877,61	6.388,72	4.182,16
07/07/2019	2.456,73	2.298,33	3.007,33	2.775,44	2.008,38	3.122,56	3.104,55	2.885,58	2.707,36
08/07/2019	2.655,82	2.891,08	2.437,86	2.455,64	3.008,31	3.177,61	2.903,88	2.357,81	2.736,00

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 11 - Quantidade em quilogramas de carga orgânica por dia.

	DQO Média (mg/L)	Vazão Média Mês (m ³ /h)	Vazão Média Mês (L/dia)	Carga Orgânica (kg/dia)
20/06/2019	3.373,37	135,47	3.251.280,00	10.967,76
21/06/2019	4.413,90	135,47	3.251.280,00	14.350,82
22/06/2019	3.835,95	135,47	3.251.280,00	12.471,76
23/06/2019	3.395,43	135,47	3.251.280,00	11.039,49
24/06/2019	3.025,71	135,47	3.251.280,00	9.837,44
25/06/2019	3.312,74	135,47	3.251.280,00	10.770,65
26/06/2019	2.475,04	135,47	3.251.280,00	8.047,05
27/06/2019	3.975,61	135,47	3.251.280,00	12.925,81
28/06/2019	2.414,25	135,47	3.251.280,00	7.849,41
29/06/2019	2.756,20	135,47	3.251.280,00	8.961,17
30/06/2019	2.668,60	135,47	3.251.280,00	8.676,35
01/07/2019	4.057,86	126,39	3.033.360,00	12.308,95
02/07/2019	2.826,94	126,39	3.033.360,00	8.575,13
03/07/2019	3.089,86	126,39	3.033.360,00	9.372,66
04/07/2019	2.603,14	126,39	3.033.360,00	7.896,26
05/07/2019	3.971,98	126,39	3.033.360,00	12.048,43
06/07/2019	4.182,16	126,39	3.033.360,00	12.686,00
07/07/2019	2.707,36	126,39	3.033.360,00	8.212,41
08/07/2019	2.736,00	126,39	3.033.360,00	8.299,28
			Média	10.278,78

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nos dados demonstrados na Tabela 11, pode-se observar grandes variações de carga orgânica em comparação com cada uma das coletas realizadas. Isso demonstra que as águas residuais de uma usina de cana-de-açúcar podem ser, altamente, influenciáveis por diversos fatores externos conforme já mencionados neste trabalho. Na Tabela 12, pode-se avaliar a variação entre mínimo e máximo de carga orgânica.

Tabela 12 - Mínimo, Máximo e Média de Carga Orgânica medida em DQO.

Descrição	Carga Orgânica (kg/dia)
Mínimo	7.849,41
Máximo	14.350,82
Média	10.278,78

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Entre as cargas orgânicas e seus respectivos valores médios, observa-se de forma parcial toda a caracterização da água residual. Assim, completando-a, a Tabela 13 traz as análises

completas dos dias 25/06/2019, 26/06/2019, 01/07/2019, 05/07/2019 e 07/07/2021 para a caracterização dos demais componentes compostos nesta água.

Baseando-se nas análises das Tabelas 11 e 12, de carga orgânica e especificações das águas residuais respectivamente, pode-se claramente observar que as águas residuais da usina possuem um elevado índice de matéria orgânica, havendo pontos de máxima de 14350,82kg de DQO por dia de carga orgânica. Também se observa pelas análises da Tabela 7, que há também um excesso de óleos, graxas e óleos minerais nas amostras residuais, podendo estas serem oriundas de limpezas de equipamentos industriais que contenham estas substâncias ou até mesmo de vazamentos de óleos e graxas destes equipamentos.

Tabela 13 - Análise completa das águas residuais.

Parâmetro	Unidade	LQ	25/06/2019	26/06/2019	01/07/2019	05/07/2019	07/07/2019
			18:05	17:05	17:05	14:05	09:05
			Valor	Valor	Valor	Valor	Valor
pH	-	2,0 - 13,0	5,50	5,22	5,86	5,63	5,38
Temperatura da Amostra	°C	0,10	38,50	42,80	34,20	40,30	39,00
DBO	mg/L	2,00	1490,06	1316,67	2263,47	2729,78	998,66
DQO Total	mg/L	10,00	2755,02	2480,92	3780,99	5132,77	2298,33
Sólidos Totais	mg/L	25,00	51,00	134,00	76,00	75,00	54,00
Sólidos Sedimentáveis (materiais, resíduos)	mg/L	1,00	1,00	< 1,0	2,00	1,00	< 1,0
Nitrato	mg/L	0,50	6,86	< 0,5	55,50	58,22	56,17
Nitrito	mg/L	0,50	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	94,17
Nitrogênio Total	mg/L	0,05	2,80	50,40	39,20	33,80	5,60
Nitrogênio Kjeldahl	mg/L	0,05	2,80	50,40	39,20	33,80	5,60
Fósforo Total	mg/L	0,05	7,07	18,39	< 0,05	10,03	9,71
Potássio	mg/L	0,20	125,05	178,70	210,00	233,40	106,93
Surfactantes	mg/L	0,05	0,08	1,09	< 0,05	0,09	0,78
Óleos e Graxas (Substância Solúveis em n-Hexano)	mg/L	10,00	30,00	16,40	24,40	22,80	20,20
Óleos Minerais	mg/L	10,00	30,00	10,80	17,40	19,20	20,60
Óleos Vegetais e gorduras animais	mg/L	10,00	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0
Teor de K ₂ O	Kg K ₂ O/m ³	0,00	0,15	0,22	0,25	0,30	0,13

Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.1.5.2 Proposta de Tratamento

Em um ano completo de operações (ou uma safra de operação), a usina estudada utiliza-se de 220 a 240 dias de processamento direto e possui uma moagem aproximada de 10 mil toneladas de cana-de-açúcar diária, que, segundo Elia Neto e Shintaku (2009), representa em valores um total de 52,8 milhões de metros cúbicos captados baseando-se em uma operação ininterrupta de 240 dias de safra.

Assim, conforme descrito no capítulo anterior, se considerado uma captação hipotética e teórico de uma usina com todos os circuitos de circulação de água abertos e total ineficientes, Elia Neto e Shintaku (2009) descreveram a necessidade de 52,8 milhões de metros cúbicos necessários, anualmente, para uma moagem média de 10 mil toneladas por dia. No entanto, como alguns dos processos foram otimizados ao longo dos vários anos e alguns circuitos também foram aprimorados, observou-se na medição realizada em 2019 o descarte efetivo de águas residuais no valor de 681 mil metros cúbicos.

Vale ressaltar casos de usinas em a vazão de água descartada pode ultrapassar o volume de água captada, visto que essa discrepância está na água contida na própria matéria-prima, uma vez que a formação genética da cana-de-açúcar é baseada de 70 a 75% de água. Esses valores de descarte de águas residuais estão mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 – Vazões residuais totais.

Vazões Residuais			
Mês	Média Mensal (m ³ /h)	Dias	Vazão Mensal (m ³)
Março	-	-	-
Abril	130,24	5	15.629
Maio	149,46	31	111.198
Junho	135,47	30	97.538
Julho	126,39	31	94.034
Agosto	133,17	31	99.078
Setembro	89,09	30	64.145
Outubro	113,94	31	84.771
Novembro	134,89	30	97.121
Dezembro	152,46	5	18.295
Média Geral	129,46	-	75.757
TOTAL anual			681.810

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como a usina estudada não dispõe de tratamento de nenhuma natureza para tratar as águas residuais, visto que são direcionadas de volta à plantação sem nenhum tratamento ou abatimento da carga orgânica ou, até mesmo, enviando as vias normais de tratamento. Atualmente, há em vigor o monitoramento mensal pelos órgãos ambientais regulamentadores dos volumes aplicados.

Assim, observando o valor obtido de descarte residual, deve-se descartar todo o valor relacionado à obtenção da vinhaça por meio da destilação, que, dado ao processamento diário de 10 mil toneladas de cana-de-açúcar diária, chega a uma retirada de quase 42% dessas águas residuais em forma de vinhaça e retornando-as para os solos de plantação. Portanto, o tratamento total deve ser proposto a um volume de água menor que o total mostrado na Tabela 14, havendo a necessidade de ser tratado somente os valores da Tabela 15 para retorno e reuso no processo.

Tabela 15 - Valores de água residual, desconsiderando a vinhaça para a safra de 2019.

Mês	Vazão Mensal Total (m ³)	Vazão Mensal sem vinhaça (m ³)
Março	-	-
Abril	15.629	9.065
Maio	111.198	64.495
Junho	97.538	56.572
Julho	94.034	54.540
Agosto	99.078	57.466
Setembro	64.145	37.204
Outubro	84.771	49.167
Novembro	97.121	56.330
Dezembro	18.295	10.611
Média Geral	75.757	43.939
	TOTAL anual	395.450

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Observando os valores obtidos de carga orgânica na Tabela 5, as análises completas mostradas na Tabela 7 e o volume médio de descarte de água considerado o ano de 2019, que descrevem a água residual da usina como uma água com alto índice de carga orgânica com também óleos e graxas, bem como com uma vazão anual de aproximadamente 395 mil metros cúbicos de águas residuais (desconsiderando a vinhaça) têm-se por intermédio de uma consultoria, utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, e a uma multinacional do setor de

tratamento de águas, a conclusão de que a melhor proposta de tratamento residual é o tratamento físico-químico.

O tratamento físico-químico pode ser utilizado de forma única em um tratamento de água residual e/ou pode ser utilizado de forma conjugada, utilizando-se dele junto a um tratamento biológico posterior ou anterior. Todos estes tratamentos têm único intuito e princípio de diminuir a carga orgânica da água residual tratada.

FIGURA 33 - Etapas do Tratamento Físico-Químico.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

As etapas consistem em

i. Coagulação: é o processo inicial do processo de tratamento, se dá logo após a captação direta da água residual, o objetivo principal é realizar a aglomeração das impurezas desta água através da adição de um polímero para que haja aglomeração das impurezas que se encontrem em suspensões e, até mesmo dissolvidas dentro das águas residuais em partículas maiores para que possam ser removidas através do processo de decantação ou filtração.

ii. Floculação: a segunda etapa do processo de tratamento residual é a etapa de floculação, onde, mantém-se a agitação das partículas da coagulação, mas em um processo mais lento e por maior tempo, para que isto seja possível, é necessário que haja floculadores, dispositivos que provocam agitação da água de modo que faça com que os flocos cresçam, mas não se sedimentem antes que seja necessário.

iii. Decantação: a terceira etapa do tratamento de águas residuais trata-se da separação de partículas sólidas que estão com impurezas e presentes nas águas residuais por meio de uma ação gravitacional. Para que este processo seja possível, é necessário que a água residual tenha sua velocidade de deslocamento reduzida para que toda sedimentação seja feita e, também é necessário um dispositivo para remoção da água pela superfície, local este onde a água estará limpa.

iv. Separação: a separação é a etapa final do tratamento de água residual, onde haverá a separação entre todo o lodo gerado pela decantação (através de uma sucção inferior de resíduos de lodo) e todos os efluentes.

Alguns desses processos necessitam de insumos (produtos químicos) para o correto funcionamento. Para tanto, são calculados os custos mensais de manutenção baseado nestes produtos químicos.

5.1.6 VIABILIDADE DO REUSO

5.1.6.1 Quantificação da Operacionalidade

Para iniciar todo o dimensionamento de como será proposto este tratamento de águas residuais, devemos considerar qual o volume de água necessário ser tratado. A média geral encontrada durante os dados de estudos de vazões durante as safras de 2019 foi de uma média de 129,46m³/hora e de 118,01m³/hora em 2020. Todas estas vazões estão representadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Tabela de vazões para cálculo do tratamento residual.

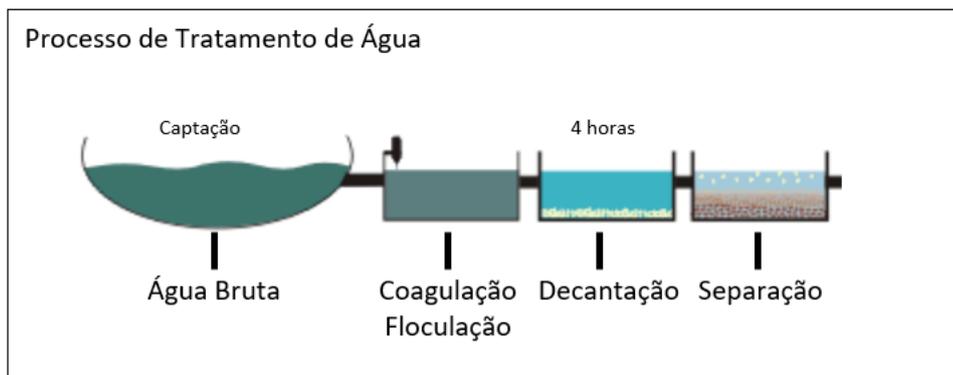
	2019	2020	2019 (sem vinhaça)	2020 (sem vinhaça)
Vazão média (m ³ /hora)	129,46	118,01	75,09	68,45
Vazão máxima (m ³ /hora)	152,46	143,85	88,43	83,43
Vazão mínima (m ³ /hora)	89,09	95,14	51,67	55,18
Vazão (m ³ /dia)	3107,04	2832,24	1802,08	1642,70

Fonte: Elaborado pelo Autor.

No entanto, ressalta-se que, parte desse valor, considerado, neste trabalho, como 42%, é de vinhaça, cujo destino é a fertirrigação. Com isso, o valor final de descarte residual que será considerado para tratamento se reduz. Para o dimensionamento correto do tratamento, a Consultoria tomou como base o processo mais delongado dentre o tratamento de águas residuais, o de decantação (ou sedimentação). Neste trabalho, foi considerado de 3 horas totais. O processo é descrito como gargalo entre os outros. Portanto, todo dimensionamento das bacias de processos e de meios devem ser calculados com base nas 3 horas do processo gargalo.

Considerando que a água residual média escoada na safra, segundo a Tabela 16, tenha sido de aproximadamente 75m³ e o tempo do processo de decantação seja de 4 horas, conforme mostrado a seguir, é necessária, então, a construção de duas bacias de 300m³ (4 horas de escoamento de água residual). Assim, a Consultoria propõe que as medidas das bacias sejam de acordo com preferência do cliente, conforme os valores sugeridos na Figura 34.

FIGURA 34 – Desenho Esquemático do Tratamento de Água.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Consultoria propôs ser ideal um tamanho extra de bacias para cada processo (ideal de 10 a 15% caso haja variação no volume de água emitido pela usina). A partir do dimensionamento da Decantação em dois tanques de 300m³ separados para tempo suficiente do processo ser completado, também são dimensionados: 2 tanques para coagulação e posterior à decantação. Não havendo a necessidade de tanques adicionais para desinfecção e/ou tratamento biológico, visto que neste trabalho teremos a expurgação da vinhaça direto às plantações.

Tabela 17 - Dimensionamento do tanque de decantação.

	Valor
Largura	10,00
Comprimento	15,00
Altura	2,00
m ³	300,00

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para toda a construção das bacias de tratamento de água e de toda as tubulações, a infraestrutura, a torre de comandos, as válvulas e a automação de entradas e saídas de fluxos, a Consultoria e a empresa fornecedora de produtos químicos estimam um custo aproximado de R\$ 1.837.000,00.

Além do custo de implementação, citado neste trabalho, o qual foi calculado para atender a demanda atual. Também foram calculados a vazão da usina estudada e os custos de insumos para o tratamento, a saber: (i) polímero, utilizado para o tratamento de coagulação, e (ii) cal, para equilíbrio do pH antes de iniciar o tratamento.

Para os resultados das análises de águas residuais apresentados pela usina, a empresa fornecedora de produtos químicos dimensiona os insumos para uma dosagem de 0,65kg de cal

para cada m³ de água e de 0,0007kg de polímero para também cada m³ de água tratada, com isto, chega-se aos valores de insumos necessários por dia da Tabela 18.

Tabela 18 - Uso diário de insumos.

	Uso por m ³	Vazão (m ³ /dia)	Uso diário (kg)
Cal	0,65	1802,08	1171,35
Polímero	0,0007		1,26

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Baseando-se nos orçamentos obtidos pela empresa fornecedora de produtos químicos para tratamento de águas, estima-se que para cal, tenha-se um custo estimado de R\$1,31 para cada m³ de água que é tratada e, uma média de polímeros para agrupamento de partículas, esteja por volta de R\$0,027. Estes dados são mostrados na Tabela 19.

Tabela 19 - Precificação do uso dos produtos químicos.

	R\$ por m ³	Vazão (m ³ /dia)	Uso diário (R\$)
Cal	R\$ 1,31	1802,08	R\$ 2.360,73
Polímero	R\$ 0,027		R\$ 48,66
TOTAL			R\$ 2.409,39

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Observação: todos os valores estimados de produtos químicos por metro cúbico tratado e todas as cotações destes produtos foram realizadas utilizando uma data base de outubro/2020 e com a cotação do dólar daquela data.

5.1.6.2 Cálculo de Viabilidade e Possibilidades

Com base nas informações coletadas, avaliam-se as possibilidades de utilização e de destinação da água em algumas vertentes, quais sejam: (i) realização da incorporação da água residual da usina, desconsiderando a água utilizada para sanitários e uso pessoal, na vinhaça e descartar ambas para a lavoura; (ii) segregação da vinhaça e da água residual para, posteriormente, ser descartada em diferentes pontos da lavoura; e/ou (iii) realizar o reuso da água residual de uma usina desconsiderando a vinhaça.

No caso da incorporação da água residual da usina na vinhaça, deve-se considerar a média vazão diária de água de vinhaça descartada pela usina em 2019 era de 1.304,96 m³/hora, discutidos na Tabela 20.

Tabela 20 - Vazões de vinhaça.

	2019	2020	2019 (sem vinhaça)	Vazão Vinhaça 2019	2020 (sem vinhaça)	Vazão Vinhaça 2020
Vazão média (m ³ /hora)	129,46	118,01	75,09	54,37	68,45	49,56
Vazão máxima (m ³ /hora)	152,46	143,85	88,43	64,03	83,43	60,42
Vazão mínima (m ³ /hora)	89,09	95,14	51,67	37,42	55,18	39,96
Vazão (m ³ /dia)	3107,04	2832,24	1802,0832	1304,96	1642,6992	1189,54

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Caso fosse toda a vazão residual fosse incorporada à vazão de vinhaça, para posteriormente serem descartadas pela usina, com envio para lavoura, a vazão média diária da usina seria de 3.107,04m³/dia. No entanto, prevê-se uma utilização diária de 15 litros por funcionário de uma usina, o que implicaria em considerar a utilização de água para sanitários e outros afins pessoais seria de 12m³/dia, valor este que é irrisório se colocado frente aos 3107,04m³/dia de descarte de água, tendo como média 800 funcionários. Esse valor foi desconsiderado do cálculo da primeira análise de viabilidade.

Com esse tipo de solução de destino da água residuária, a usina não teria nenhuma oneração financeira, uma vez que os ramais da indústria já são destinados à descarte total de águas residuais e vinhaças com retorno para a lavoura.

No que diz respeito à possibilidade de segregação da vinhaça e da água residual industrial, para descarte em pontos distintos da lavoura como forma de irrigação de solo. Essa possibilidade não foi explorada neste trabalho. No entanto, há ressalvas e considerações baseando-se no descarte solitário de águas residuais (sem a homogeneização com vinhaça) diretamente na lavoura.

A Tabela 13 apresenta características da água residual, que contém óleos e graxas. Assim, a homogeneização de água residual com vinhaça faz com que a carga orgânica da vinhaça seja distribuída, equilibrando-se às sujidades encontradas na água residual (primeira solução do estudo de viabilidade), assim, sendo benéfica para o meio ambiente e crescimento da lavoura de forma saudável. Portanto, a segunda opção de viabilidade é possibilitada pela usina de forma estrutural e financeira, mas, requer um estudo apropriado com relação as características físico-químicas da água a ser enviada à lavoura para tomada de decisão.

Quanto ao reuso da água dentro dos circuitos da usina para melhor reaproveitamento dos recursos hídricos, deve-se levar em consideração que, no estado de São Paulo, há um vínculo da empresa com o Comitê de Bacia Hidrográfica do Turvo/Grande, com custo de R\$0,01 para cada m³ de água captado diretamente e com custos totais sob uma empresa privada e de R\$0,02 para cada m³ que é consumido através de um usuário final, onde a captação é feito pelo município.

Para as usinas de cana-de-açúcar, a água captada deve sofrer um tratamento prévio antes de ser utilizada, já que os mananciais não garantem a qualidade adequada da água a ser utilizada. Dados da Consultoria revelam que o custo de tratamento da água captada é de aproximadamente R\$0,55 para cada metro cúbico captado. Esse custo consiste no tratamento das águas através de adição de agentes dispersantes e, até mesmo, fosfato, deixando a água em um estado de qualidade adequado para uso.

Portanto, baseando-se no custo de captação de R\$0,01 e de R\$0,55 para tratamento, se considerado o volume diário de vazão de 1802,08 metros cúbicos de água, chega-se a um valor diário de R\$1.009,16 mostrado na Tabela 21 para se realizar a captação e tratamento de água para uso.

Um ponto importante, é a consideração igualitária entre valor captado e valor residual descartado, visto que, em específico não é possível considerar o uso estimado pela ÚNICA (2013) de 22 m³/tons, e, a usina específica em estudo não disponibilizou a obtenção de informações referentes à captação de águas de mananciais.

Tabela 21 - Custo diário do tratamento para água captada.

	R\$ por m ³	Vazão (m ³ /dia)	Uso diário (R\$)
Agentes de Tratamento	R\$ 0,55	1802,08	R\$ 991,14
Captação	R\$ 0,010		R\$ 18,02
		TOTAL	R\$ 1.009,16

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Acrescenta-se ao custo de captação de água para uso um valor adicional com energia elétrica de captação e de eventuais custos operacionais para funcionamento desta captação, chegando-se a um valor diário de R\$1.211,00, o mesmo acontece para a água de tratamento, onde acrescenta-se os mesmos 20% para o custo de operação de uma estação de tratamento de água para reuso através de um processo físico-químico, chegando-se a um custo diário de R\$2.891,26.

Dessa forma, para que uma usina possa se manter com a utilização de água apenas por vias de captação em mananciais, sem realizar nenhuma reutilização de sua água, ela teria um desembolso financeiro diário de R\$1.211,00, frente a um valor de R\$2.891,26 para que haja algum tipo de reuso.

À luz dessa relação financeira, ponderando o valor de captação e o de tratamento da água captada, ou a possibilidade e a viabilidade de reuso de uma água já utilizada dentro do processo, chega-se ao comparativo financeiro na Tabela 22, entre as duas opções.

Tabela 22 - Tabela de comparativo de preços.

	R\$ por m ³	Vazão (m ³ /dia)	Custo por dia	Custo Operacional	Total Custo
Água de Captação	R\$ 0,560	1802,08	R\$ 1.009,16	R\$ 201,83	R\$ 1.211,00
Água de Reuso	R\$ 1,337		R\$ 2.409,38	R\$ 481,88	R\$ 2.891,26

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Assim, com o resumo da Tabela 22, entende-se que, para a vazão de águas residuais da usina estudada (que é de 1.802m³/dia) a captação de água, hoje a empresa se desprenderia de 138% a mais de recursos financeiros para que se pudesse realizar o reuso de águas, isto se for levado em consideração uma safra de 240 dias como média e base de cálculo da viabilidade de tratamento. Procedendo a uma análise de custos completa de uma safra, a Tabela 23 permite avaliar os custeios anuais dos dois modos de uso da água.

Tabela 23 - Custo Anual da utilização da água.

Tipo de Uso de Água	Dias de Safra	Custo Diário	Custo Anual
Água de Captação	240	R\$ 1.211,00	R\$ 290.639,46
Água de Reuso		R\$ 2.891,26	R\$ 693.901,72

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Ressalta-se, ainda que, para a utilização da água de reuso, é necessário o investimento de R\$ 1.837.000,00, avaliado pela Consultoria para construção de toda a infraestrutura deste tratamento, com estes dados, mostra-se na Tabela 24 o comparativo entre os meios de utilização de água.

Tabela 24 - Comparativo do Custo Anual da utilização da água.

Tipo de Uso de Água	Custo Anual	Custo Implementação	TOTAL
Água de Captação	R\$ 290.639,46	R\$ 0,00	R\$ 290.639,46
Água de Reuso	R\$ 693.901,72	R\$ 1.837.000,00	R\$ 2.530.901,72
Diferença	R\$ 403.262,25	R\$ 1.837.000,00	R\$ 2.240.262,25

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Assim, o ponto conclusivo é que, a viabilidade de reuso de águas residuais é operacionalmente 138% mais caro que o que é mantido pelas usinas hoje considerando as possibilidades 1 e 2 estudadas neste trabalho, no entanto, não só sendo mais caro que as primeiras possibilidades, a implementação de um projeto nesta magnitude, ainda implica em um desprendimento e oneração financeiro considerável.

6 CONCLUSÕES

Dentro do setor sucroalcooleiro, o reuso de águas residuais pode se dar de diversas maneiras. Os dados analisados neste trabalho levam a uma série de interpretações, as quais são sumarizadas na inviabilidade de reuso, considerando, apenas, o aspecto econômico. A partir da avaliação das vazões residuais da usina, por meio da medição diária na safra de 2019 e 2020, observou-se o valor médio de 10.278,78 kg/dia de carga orgânica e, também a presença significativa de óleos e graxas nas águas residuais, com isto, em alinhamento com as vazões obtidas, foi possível chegar a uma solução de tratamento residual através de um processo físico-químico.

A implementação do tratamento físico-químico das águas residuais possui a necessidade de investimento inicial do valor de R\$1.837.000,00 e um custo operacional anual de R\$693.901,72. Em contrapartida, a usina estudada utiliza hoje em seus processos uma água de captação e um tratamento primário de águas para utilização desta água, que lhe custa anualmente R\$290.639,46. Frente a este comparativo entende-se o custo de tratamento das águas residuais como um valor mais oneroso do que o valor de captação e tratamento para uso das águas diretas de mananciais, no entanto, neste comparativo financeiro, não são levados em consideração o valor benéfico da imagem da empresa como uma empresa de caráter sustentável ambientalmente e, também não levam a consideração da escassez de água crescente prevista para os próximos anos.

Conclui-se que o melhor tratamento proposto para a água residual da usina estudada é o tratamento físico-químico. Pelo uso estimado das safras, para o uso da água em seus processos, a usina possui um custo anual de captação de R\$ 290.639,46, já tecnologia de tratamento escolhida possui um custo de implementação de R\$ 1.837.000,00 e toda a sua operacionalidade durante um ano de safra da usina, custa R\$693.901,72. Frente a essa disparidade de custo do uso da água, chega-se a uma diferença de R\$ 403.262,26 entre a captação e o tratamento da água para reuso.

Assim, conclui-se que, as usinas sucroalcooleiras possuem a opção de captação em mananciais e a opção de tratamento de águas residuais para reuso, no entanto, observa-se que, de forma constante, as empresas estão buscando cada vez mais fontes e certificados internos e externos para captação de outras fontes de recursos, como foi mostrado claramente através do *RenovaBio*. Portanto, a diferença monetária do tratamento de água para reuso de uma usina sucroalcooleira é irrisória frente a todos os benefícios sociais e também econômicos destas certificações.

Isto, faz com que, todo o capital necessário de investimento e gastos operacionais que oneram a empresa para este tipo de operação, sejam nulos e não afetantes diretamente no fluxo de caixa da empresa, sendo somente estes, transformados em benefícios para a empresa, através de retornos por certificados e também pela imagem da empresa frente à seu destaque em sustentabilidade.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuros, um desenvolvimento de pesquisas que esteja relacionado ao uso e reuso de águas em uma indústria sucroalcooleira, baseadas nos tópicos a seguir:

7.1 AVALIAÇÃO DE SETORIZAÇÃO DO TRATAMENTO RESIDUAL

Realizar estudo com a proposta de se aprofundar especificamente em um processo produtivo e apresentar uma proposta de reuso e tratamento para este processo específico, a fim de evidenciar se há oportunidades de maximização de ganhos financeiros e qualitativos se o tratamento for setorizado.

7.2 VALIDAÇÃO DA PROPOSTA PARA EMPRESAS DE OUTRAS REGIÕES

Foi apresentado neste trabalho, uma proposta de reuso de águas residuais em uma empresa específica, sugere-se a realização de novos trabalhos similares em outras regiões e cidades do país, aplicando-se dos mesmos conceitos e práticas aqui utilizados, com o intuito de validar todas as métricas e parâmetros deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA CÂMARA DE NOTÍCIAS. Debatedores defendem diversificação de matriz energética e menos subsídios. **Agência Câmara de Notícias**, 16 de junho de 2021. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/773863-debatedores-defendem-diversificacao-de-matriz-energetica-e-menos-subsidios/>. Acesso em: 14 nov 2021.
- ALBUQUERQUE, F. M. **Processo de fabricação do açúcar**. Porto: Editora Universitária da UFP, 2009.
- ALMEIDA, A. C. S. *et al.* Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p.1441-1448, 2008.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **A implementação da cobrança pelo uso de recursos hídricos e agência de água das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí**. 2007. Disponível em: <https://agencia.baciaspcj.org.br/docs/livros/livro-cobranca-pcj-2007.pdf>. Acesso em: 27 out 2021.
- ARAÚJO, E. S.; SANTOS, J. A. P. O desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar no Brasil e sua relevância na economia nacional. **Facider, Colíder**, v. 4, n. 34342, p.1-16, 2012.
- AUGUSTO, L. G. S. *et al.* O contexto global e nacional frente aos desafios do acesso adequado à água para consumo humano. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1511-1522, jun 2012.
- BARBOSA, B. H.; SANTOS, C. S.; OLIVEIRA, S. Análise da eficiência energética do bagaço da cana na geração de vapor em uma usina sucroalcooleira. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, v. 8, n. 3, 2018.
- BOZA, Y.; HORRI, J. Influência da destilação sobre a composição e a qualidade sensorial da aguardente de cana-de-açúcar. **Food Science and Technology**, v. 18, n. 4, out 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-20611998000400006>. Acesso em: 26 nov 2021.
- BRAGA, A. **Poluição Atmosférica e seus efeitos na Saúde Humana**. São Paulo: USP/Faculdade de Medicina, 2003.
- BRAIBANTE, M. E. F. *et al.* A cana-de-açúcar no Brasil sob um olhar químico e histórico: uma abordagem interdisciplinar. **Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 3-10, 2013.
- BRAILE, P. M.; CAVALCANTI J. W.A. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1993.
- BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília: Senado Federal, 2016 [1988].
- BRASIL. **Lei n. 13.576**, de 26 de dezembro de 2017. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm. Acesso em: 14 nov 2021.

CERQUEIRA, D. A. *et al.* Caracterização de acetato de celulose obtido a partir do bagaço de cana-de-açúcar por 1H-RMN. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 20, n. 2, p. 85-91, 2010.

CESAR, C.; ABDALA, L.; KRESKI, S. **Sustentabilidade: ODS 6. Água potável e saneamento**. Relatório apresentado à disciplina de Sustentabilidade. 2019. Disponível em: https://www.pucsp.br/sites/default/files/download/eventos/bisus/1-agua_potavel_saneamento.pdf. Acesso em: 26 nov 2021.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Safra 2011/2012**. Terceiro Levantamento (novembro/2012). Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 14 nov 2021.

COSTA, P. R. O.; DUARTE, F. S.; A utilização da biomassa da cana-de-açúcar como fonte de energia renovável aplicada no setor sucroalcooleiro. **Revista de Administração da Fatea**, Lorena, v. 3, n. 3, p. 81-96, jan/dez 2010.

DEZOTTI, M. **Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos**. Rio de Janeiro: E-papers, 2008.

ELIA NETO, A.; SHINTAKU, A. Usos e Reusos de Água e Geração de Efluentes. *In*: ANA. Agência Nacional de Águas. **Manual de Conservação e Reuso de Água na Agroindústria Sucroenergética**. Brasília: ANA, 2009.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 14 nov 2021.

FREITAS, A. H. L.; FREITAS, J. B.; SILVA, L. H. D. Importância do uso consciente da água nos processos produtivos da agroindústria sucroalcooleira. **Rev. Eletrônica Organ. Soc.**, Iturama, v. 8, n. 9, p. 37-55, jan/jun 2019.

FREITAS, V. P. **Águas-aspectos jurídicos e ambientais**. 3. ed. Curitiba: Juruá, 2008.

GOULART, S. e MISOCZKY, M.C. A produção de álcool combustível no Brasil: reorganização do capital e superexploração do trabalho ou vamos nos jogar onde já caímos... tudo novo de novo. *In*: MISOCZKY, M. C.; FLORES, R. K.; MORAES, J. (org.). **Organização e práxis libertadora**. Porto Alegre: Dacasa, 2010. p. 185-208.

HONIG J. E. The lipids in cane sugar manufacture. **Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technology**, 1961.

HUGOT, E. **Manual da engenharia açucareira**. v. 1. São Paulo: Mestre Jou, 1977.

IEA. International Energy Agency. Transport, Energy and CO2: Moving towards Sustainability. 2018. Available in: <https://www.iea.org/news/transport-energy-and-co2-moving-toward-sustainability>. Access in: 27 Oct 2021.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 6. ed. Rio de Janeiro: ED-ABES, 2011.

KANADA, A. L. K. *et al.* Estudo de caso da porcentagem de extração de caldo de cana-de-açúcar no processo de moagem em uma usina. **Colloquium Exactarum**, v. 9, n. especial, p. 185-191, jul-dez 2017.

KESSERLINGH S. M. **Minimização e reuso de águas em indústrias sucroalcooleiras: estudo de caso.** Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

LEITE, H. T. C. Cobrança pelo uso da água e redução deste recurso natural no setor sucroalcooleiro. SIMPÓSIO DA UNIÃO NACIONAL DE BIOENERGIA, 2005. *In: Anais...* 2005.

LIVEIRA, L. M.; SERRA, J. C. V.; MAGALHÃES, K. B. Estudo comparativo das diferentes tecnologias utilizadas para produção de etanol. **Geoambiente On-line: Revista Eletrônica do Curso de Geografia**, Jataí, v. 19, p.1-23, jul/dez 2012.

MACEDO, I. C. **A Energia da Cana-de-açúcar: Doze estudos sobre a Agroindústria da Cana-de-açúcar no Brasil e a sua Sustentabilidade.** São Paulo: UNICA, 2005.

MACHADO, S. S. **Tecnologia da Fabricação do Açúcar.** Inhumas: IFG, 2012.

MANCUSO P. S.; HILTON F. S. **Reuso de Água.** São Paulo: Manole, 2003.

MATIAS, A. **Geopolítica do Etanol e do Petróleo.** 2015. Disponível em: <https://augustommatias.jusbrasil.com.br/artigos/260972981/geopolitica-do-etanol-e-do-petroleo>. Acesso em: 14 nov 2021.

MILARÉ, É. **Direito do ambiente: a gestão em foco.** 5. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2007.

MONTEIRO, A. F. S. **Avaliação das potencialidades de produção de bioetanol em Portugal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade do Porto, Porto, 2011.

MORAES, M. A. F. D. As profundas mudanças institucionais ao longo da história da agroindústria canavieira e os desafios atuais. **Econ. Aplic.**, São Paulo, v. 11, n. 4, p. 555-557, out/dez 2007.

MUNDO EDUCAÇÃO. **Consumo de água no mundo.** 2021. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/consumo-agua-no-mundo.htm>. Acesso em: 27 out 2021.

NETO, V. P. **Avaliação da qualidade da água de represas destinadas ao abastecimento do rebanho na Embrapa pecuária sudeste.** Dissertação (Mestrado em Ecologia). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

NOVA CANA. **A cana de açúcar como fonte de energia elétrica.** 2021. Disponível em: <https://www.novacana.com/estudos/a-cana-de-acucar-como-fonte-de-energia-eletrica-241013>. Acesso em: 27 out 2021.

NOVA CANA. **Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas.** 2021. Disponível em: <https://www.novacana.com/usina/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar>. Acesso em: 27 out 2021.

NOVA CANA. **Os números finais da safra 2018/19 – atualização quinzenal.** 2021. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/cana/safra/unica-numericos-finais-safra-2018-19-atualizacao-quinzenal-090419>. Acesso em: 27 out 2021.

PIACENTE, F. J. **Agroindústria canavieira e o sistema de gestão ambiental:** o caso das usinas localizadas nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Econômico). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

PINTO, C. P. **Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável.** Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos). Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 1999.

Processo de Tratamento de Caldo em Usinas Sucroalcooleiras. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/processo-de-tratamento-caldo-em-usinas-wellington-gomes/>. Acesso em: 12 de Outubro de 2019.

PUGLIESE, L.; LOURENCETTI, C.; RIBEIRO, M. L. Impactos ambientais na produção de etanol brasileiro: uma breve discussão do campo à indústria. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 20, n. 1, p. 142-165, 2017.

RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phase drought on different classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield, and quality of four sugarcane cultivars. **Journal of Agronomy & Crop Science**, v. 185, p. 249-258, 2000.

RAMOS, P. Trajetória e situação atual da agroindústria canavieira do Brasil e do mercado de álcool carburante. *In*: SANTOS, G. R. (org.). **Quarenta anos de etanol em larga escala no Brasil:** desafios, crises e perspectivas. Brasília: Ipea, 2016. p. 47–82.

REBOUÇAS, A. C. Água doce no Mundo e no Brasil. *In*: REBOUÇAS, A. C. (org.). **Águas doces no Brasil.** 2. ed. São Paulo: Escrituras editora, 2002. p.1-37.

ROCHA, A. L.; BARRETO, D.; IOSHIMOTO, E. **Caracterização e monitoramento do consumo predial de água.** Brasília: Ministério do Planejamento e Orçamento, 1998.

RODRIGUEZ M. F. C. **Uso de Água na Produção de Etanol de Cana de Açúcar.** Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

SCHWARTZ, S. B. **Segredos internos:** engenhos e escravos na sociedade colonial. São Paulo: Companhia das Letras, 1988.

SIDAÇUCAR. Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool no estado de Alagoas. **Boletim da safra 2011/2012**, n. 26. 2011. Disponível em: <http://www.sindicucar-al.com.br>. Acesso em: 14 nov 2021.

SILVA, M. A. *et al.* Agronomic performance of sugarcane families in response to water stress. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 3, p.655-661, 2008.

SILVA, R. O. Cana de mel, sabor de fel – Capitania de Pernambuco: uma intervenção pedagógica com caráter multi e interdisciplinar. **Química Nova na Escola**, v. 32, n. 2, p. 90-94, 2010.

TECNIPLANT. **Filtros de Descarga con Cuchilla**. 2021. Disponível em: <http://www.tecniplant.it/es/product-detail/filtros-de-descarga-con-cuchilla/>. Acesso em: 27 out 2021.

TEIXEIRA, R. S. **Utilização de resíduos sucroalcooleiros na fabricação de fibrocimento pelo processo de extrusão**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

TOMASINI, R. G. A. **O cultivo de beterraba para produção de álcool ou forragem na região sul do Brasil**. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1983.

TUNDISI, J. G. Novas perspectivas para a gestão de recursos hídricos, **Revista USP**, São Paulo, n.70, p. 24-35, Junho e agosto de 2003.

UDOP. União Nacional da Bioenergia. **A História da Cana-de-açúcar**. Da Antiguidade aos Dias Atuais. 2003. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2003/01/01/a-historia-da-cana-de-acucar-da-antiguidade-aos-dias-atuais.html>. Acesso em: 27 out 2021.

ÚNICA. União da Indústria da Cana-de-Açúcar. **FNS – Gestão dos Recursos Hídricos na Agroindústria Canavieira**. 2013. Disponível em: <https://www.unica.com.br/wp-content/uploads/2019/06/Gestao-dos-Recursos-Hidricos.pdf>. Acesso em: 27 out 2021.

VIEIRA, A. R. **Cadernos de educação ambiental água para vida, água para todos**: livro das águas. Brasília: WWF-Brasil, 2006.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. V. 1. 3. ed. Belo Horizonte: Ed da UFMG, 2005.

WILKIE, A. C.; RIEDESEL, K. J.; OWENS, J. M. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. **Biomass and Bioenergy**, v. 19, p. 63-102, 2000.

ZMRECSÁNYI, T. J. M. K.; MOREIRA, E. P. O Desenvolvimento da Agroindústria Canavieira do Brasil desde a Segunda Guerra Mundial. **Revista Estudos Avançados**, São Paulo, v. 5, n. 11, p. 57-79, jan/abr 1991.