



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



ELINE DE ARAÚJO ANDRADE

**ANÁLISE DE FLUXO DE MATERIAIS EM UMA USINA
SUCROALCOOLEIRA NA PARAÍBA**

ORIENTADORA:

Prof^a. Dr^a. Monica Carvalho

COORIENTADOR:

Prof. Dr. Rogério Santana Peruchi

**JOÃO PESSOA - PB
2023**

PPGER / PROJETO ACADÊMICO/Nº 96

ELINE DE ARAÚJO ANDRADE

**ANÁLISE DE FLUXO DE MATERIAIS EM UMA USINA SUCROALCOOLEIRA
NA PARAÍBA**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) como requisito à obtenção do título de **Mestre em Energias Renováveis**.

Orientadora:

Prof^a. Dr^a. Monica Carvalho

Coorientador:

Prof. Dr. Rogério Santana Peruchi

**JOÃO PESSOA - PB
2023**

ELINE DE ARAÚJO ANDRADE

**ANÁLISE DE FLUXO DE MATERIAIS EM UMA USINA SUCROALCOOLEIRA
NA PARAÍBA**

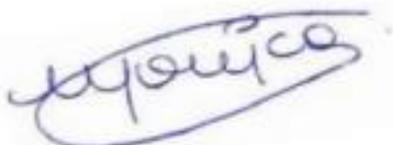
ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

ATA nº 104 da Sessão de Defesa Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba.

Ao vigésimo oitavo dia do mês de julho de dois mil e vinte e três foi instalada a Banca de Defesa de Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas de forma PRESENCIAL, as 14h00, no Auditório do Centro de Energias Alternativas e Renováveis a que se submeteu a defesa pública de **ELINE DE ARAUJO ANDRADE**, matrícula **20211020920**, com o título "**ANÁLISE DE FLUXO DE MATERIAIS EM UMA USINA SUCROALCOOLEIRA NA PARAÍBA**". A Comissão Examinadora esteve constituída pelos professores: MONICA CARVALHO (UFPB), ROGERIO SANTANA PERUCHI (UFPB) e ADRIANO DA SILVA MARQUES (UFPB) e NATALY ALBUQUERQUE DOS SANTOS (UFPB). Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, a candidata foi aprovada pela Comissão Examinadora. E, para constar, foi lavrada a presente ata, assinada pelos membros da Comissão.

Observações: A candidata deve implementar todas as correções e sugestões da banca.

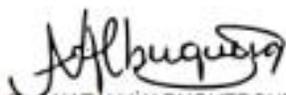
Membros da Banca Examinadora:



Prof.ª Drª MONICA CARVALHO
Orientadora



Prof. Dr. ROGERIO SANTANA PERUCHI
Coorientador



Prof. Dra. NATALY ALBUQUERQUE DOS SANTOS
Examinadora externa



Prof. Dr. ADRIANO DA SILVA MARQUES
Examinador Interno

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A553a Andrade, Eline de Araújo.

Análise de fluxo de materiais em uma usina
sucroalcooleira na Paraíba / Eline de Araújo Andrade. -
João Pessoa, 2023.

87 f. : il.

Orientação: Monica Carvalho.

Coorientação: Rogério Santana Peruchi.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Indústria sucroalcooleira. 2. Produção de açúcar.
3. Bioenergia. 4. Etanol. 5. Gases de efeito estufa. 6.
Efeito estufa - Avaliação do ciclo da vida. I.
Carvalho, Monica. II. Peruchi, Rogério Santana. III.
Título.

UFPB/BC

CDU 631.145(043)

DEDICATÓRIA

O Senhor, Tua é a grandeza, o poder, a glória, a vitória e a majestade, porque tudo que há no céu e na terra a Ti pertence. O SENHOR, o reino é Teu, e Tu governas soberano sobre tudo.

I crônicas 29:11

Dedico esta dissertação ao meu avô José Severo de Araújo (*in memoriam*), que tanto me incentivou a buscar meus sonhos, sempre fará parte das minhas conquistas.

Minha eterna gratidão!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu soberano Deus, por toda força, amparo e por me permitir ter a oportunidade desta conquista.

Aos meus pais Mayara Araújo e Jairo Santos que me apoiam diariamente com orientações e incentivo na busca pelos meus sonhos, a minha segunda família Eliezer Andrade e Deuzuita Adriano pelo apoio incondicional e por sempre acreditarem em mim.

Ao meu irmão Emanuel Jadson ao qual considero o mais legal, divertido e inteligente do mundo, que faz com que a carga pesada se torne mais leve, com suas brincadeiras e seu amor.

Aos meus avós Marinalva Santos e José Severo (*in memoriam*), pelo amor infinito, força e incentivo imensurável, e sobre ensinar-me sobre a vida, meu amor incondicional.

Um agradecimento especial a minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Monica Carvalho pela oportunidade, dedicação e constante compreensão durante a realização deste estudo. Esse espaço é pouco para agradecer a confiança, incentivo e por topar o desafio que foi este trabalho, contribuindo para o meu crescimento pessoal e profissional.

Ao Prof^o Dr^o Rogério Peruchi ao qual tive a honra de tê-lo como coorientador, sempre paciente buscando soluções para os problemas encontrados, por todo conhecimento compartilhado e pelos auxílios nas pesquisas.

As colegas de mestrado pelos conselhos e conhecimentos compartilhados, em especial Manuela Mesquita, Sidnéia Lira e Rosa Helena.

As minhas primas Simone Nunes, Isabelly Nunes e minha tia Madalena que mesmo longe fisicamente, se fazem tão presente em minha vida, através de conversas, orações e incentivo.

As minhas amigas Paula, Ademyllane, Tharine e aos demais colegas que foram essenciais para esse momento tão desafiador que foi trabalhar e estudar, tornando momentos tensos em diversões.

Aos Supervisor Jailson Alexandre e ao Eng. agrônomo Hugo Amorim, por toda ajuda nas informações, sempre pacientes, minha admiração por esses profissionais.

Quero agradecer a colaboração direta e indireta que recebi de todos os amigos e familiares, não conseguirei citar todos, mas estão no meu coração, Deus abençoe!

RESUMO

O setor sucroenergético no Brasil percorre um longo caminho no processo de modernização, mediante a incorporação de novas tecnologias com vista a alcançar maior produtividade e lucro. Todavia, para manter o crescimento no mercado é necessário que as usinas aumentem a produtividade conhecendo as entradas, estoques e saídas de materiais, assim como os impactos ambientais causados em seus processos. O primeiro objetivo desta pesquisa é aplicar a metodologia de Análise de Fluxo de Materiais (AFM) criando um diagrama de fluxo associados à produção de açúcar, etanol e bioenergia para determinação das perdas. O segundo objetivo é aplicar a metodologia da Avaliação do ciclo de vida (ACV) para quantificação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas ao excedente elétrico gerado e vendido. O estudo foi realizado em uma usina no estado da Paraíba, ao qual não terá o nome divulgado. Para a condução da pesquisa foi necessário além da busca de dados na literatura científica, por meio de uma pesquisa exploratória, a utilização do software SimaPro® para desenvolvimento da ACV junto com o método IPCC 2013 GWP 100a para quantificar os GEE emitidos. Como resultado, a AFM revelou o quantitativo total de perdas considerando uma entrada de 7.000 t/dia de cana-de-açúcar na usina. Na etapa de preparo e moagem foi identificado uma perda de açúcar de 38,50t. Já na etapa de filtração do caldo, houve a perda de 1,779t de açúcar na torta de filtro, no processo de fermentação para obtenção do etanol, houve uma perda de açúcar de 48,01t, na etapa de destilação a perda de etanol foi de 1.480,38L. Do ponto de vista ambiental, as emissões de GEE associadas à geração de bioeletricidade foi de 0,224 kg CO₂-eq/kWh gerado, evitando 132 kg CO₂-eq/kWh de serem emitidos para a atmosfera. Tanto a AFM e a ACV se mostraram eficaz no desenvolvimento da análise, destacando que é necessário a usina utilizar métodos para realização do balanceamento de massa mensal, trazendo ao foco a utilização do máximo potencial dos subprodutos como a torta de filtro e a vinhaça diminuindo o uso de fertilizantes que contribuem significativamente com as emissões dos gases de efeito estufa.

Palavras-Chaves: ACV, açúcar, bioenergia, cogeração, etanol, gases de efeito estufa.

ABSTRACT

The sugar-energy sector in Brazil is on a constant path in the modernization process, through the incorporation of new technologies with a view to achieving greater productivity and profit. However, to maintain growth in the market, it is necessary for the plants to increase productivity by knowing the inputs, stocks and outputs of materials, as well as the environmental impacts caused in their processes. The first objective is to apply the Material Flow Analysis (AFM) methodology to assemble a flow diagram associated with the production of sugar, ethanol and bioenergy to determine losses. The second objective is to apply a Life Cycle Assessment (LCA) methodology to quantify greenhouse gas (GHG) emissions associated with surplus electricity generated and sold. The study was carried out at a plant in the state of Paraíba, but the name will not be disclosed. In order to conduct the research, it was necessary, in addition to searching for data in the scientific literature, through an exploratory research, the use of SimaPro® software to develop the LCA along with the IPCC 2013 GWP 100a method to quantify the GHG emitted. As a result, AFM revealed the total amount of losses considering an entry of 7,000 t/day of sugarcane into the plant. In the preparation and manufacturing stage, a sugar loss of 38.50t was identified. In the broth filtration stage, there was a loss of 1,779t of sugar in the filter cake, in the fermentation process to obtain ethanol, there was a loss of sugar of 48.01t, in the distillation stage the loss of ethanol was 1,480.38L. From an environmental point of view, GHG emissions associated with the generation of bioelectricity amounted to 0.224 kg CO₂-eq/kWh generated, preventing 132 kg CO₂-eq from being emitted into the atmosphere. Both the AFM and the ACV proved to be effective in the development of the analysis, emphasizing that it is necessary to use methods to carry out the monthly mass balancing and bringing into focus the use of the maximum potential of by-products such as filter cake and vinasse, preventing the use of fertilizers that significantly contribute to greenhouse gas emissions.

Keywords: Bioenergy, cogeneration, ethanol, greenhouse gases, LCA, sugar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Panorama da cana de açúcar - principais players mundiais.....	18
Figura 2. Estados brasileiros com maior número de usinas operantes.....	21
Figura 3. Geração de emprego no setor sucroalcooleiro brasileiro	22
Figura 4. Fluxograma do processo produtivo do açúcar, etanol e bioenergia	23
Figura 5. Produção industrial de etanol	25
Figura 6. Principais países importadores Brasileiros de açúcar	26
Figura 7. Principais países importadores de etanol Brasileiro.....	27
Figura 8. Exportações e importações de etanol por safra	29
Figura 9. Representação esquemática geral de um diagrama AFM	31
Figura 10. Esquemática do fluxograma AFM.....	33
Figura 11. Esquemática do diagrama de Sankey.	34
Figura 12. AFM de embalagens de vidros.....	34
Figura 13. Balanço de vazão de água da Hoasuco	36
Figura 14. Balanço de açúcar da Hoasuco em toneladas.....	36
Figura 15. Fluxo de materiais na etapa de extração de matéria-prima	37
Figura 16. Material Flow Analysis (AFM) de metais pesados no rio Klang	38
Figura 17. AFM dos itens de pescas utilizadas pela frota.....	39
Figura 18. Representação dos elementos estruturais da ACV.....	41
Figura 19. Categorias <i>midpoint</i> e <i>endpoint</i> , assim como as suas relações em uma ACV.....	42
Figura 20. Balanço de massa no processo de moagem.....	47
Figura 21. Fluxo de matéria e energia para o processo de geração de eletricidade na usina.....	49
Figura 22. Fluxograma produção de vapor na Usina.....	50
Figura 23. Esquemática do conjunto de evaporadores da Usina.....	51
Figura 24. Processo de Fermentação para produção de Etanol.....	53
Figura 25. Processo de destilação para produção de Etanol.....	53
Figura 26 – Análise do fluxo de material na Usina Sucroenergética.....	66
Figura 27 – Gráfico de Pareto dos efeitos de umidade, fertilizante e pesticida.....	72
Figura 28 – Gráficos de efeitos principais de umidade, fertilizante e pesticida (II).....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparativo de área, produtividade e produção	17
Tabela 2. Diagrama simplificado da cadeia produtiva da cana no Brasil.....	20
Tabela 3. Estimativas dos números da cadeia sucroenergética em 2030	22
Tabela 4. Análise RFA de fontes de dados públicas e privadas	28
Tabela 5. Produção de etanol total no Nordeste (safra 2018/19 a 2020/21)	28
Tabela 6. Oferta interna de energia elétrica (OIEE).....	30
Tabela 7. Consumo vapor por etapa produtiva.....	31
Tabela 8. Cálculo das emissões de gases poluentes	44
Tabela 9. Balanço de emissões de GWP	45
Tabela 10. Análise de inventário- etapa: fertirrigação	60
Tabela 11. Análise de inventário- etapa: Aplicação de herbicida	60
Tabela 12. Análise de inventário- etapa: Aplicação pesticidas	60
Tabela 13. Planejamento de experimentos fatoriais em dois níveis para criação de cenários.....	61
Tabela 14. Indicadores de qualidade da cana de açúcar	64
Tabela 15. Distribuição das emissões de GEE associadas ao consumo de kWh.....	69
Tabela 16. Distribuição das emissões associadas ao processo de cultivo cana de açúcar.....	70
Tabela 17. Emissões de GEE na geração de bioeletricidade na usina estudada.....	70
Tabela 18. Combinação de umidades de bagaço e aplicação de insumos agrícola.....	72

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE A – Questionário a respeito do processo produtivo sucroalcooleiro.....	85
APÊNDICE B – Questionário a respeito dos impactos que ocorrem nas operações unitárias.....	86

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida

ART – Açúcares redutores totais

ATR – Açúcares totais recuperáveis

BC – Brix da Cana

BEN – Balanço Energético Nacional

CONAB - Companhia nacional de abastecimento

FC – Fibra da cana

GEE – Gases de Efeito Estufa

GWP - Global Warming Potential

IAA – Instituto do Açúcar e Alcool

IEA – Instituto de economia agrícola

INVEST- Agência Paulista de Promoção de Investimentos e Competitividade

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)

MAP - Fosfato monoamônico

MW – Megawatt

MWh Megawatt por hora

NPK – Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K)

ODS- Objetivos de desenvolvimento sustentável

OECD – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

PIB - Produto Interno Bruto

POL – Porcentagem de sacarose aparente

SEBRAE – Serviço brasileiro de apoio às micro e pequenas empresas

SIN – Sistema Interligado Nacional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 OBJETIVOS.....	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1 Indústria Sucroenergética.....	18
2.2 Análise do Fluxo de Materiais (AFM).....	32
2.2.1 AFM aplicada a estudo de caso nas indústrias.....	36
2.3 Avaliação do ciclo de vida.....	40
2.4 Dimensionamento das operações unitárias na indústria sucroenergética.....	46
2.4.1 Processo de extração do caldo.....	46
2.4.2 Geração de energia mecânica e térmica.....	49
2.4.3 Processo de extração do caldo.....	46
2.4.4 Geração de energia mecânica e térmica.....	49
2.4.5 Processo de extração do caldo.....	46
2.4.6 Geração de energia mecânica e térmica.....	49
2.4.7 Processo de extração do caldo.....	46
2.4.8 Geração de energia mecânica e térmica.....	49
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	45
3.1 Estudo de caso na usina sucroenergética na Paraíba.....	45
3.2 Dimensionamento das operações unitárias para coleta de dados.....	59
3.3 Coleta de dados.....	59
3.4 Objetivo, Escopo e Análise de inventário.....	59
3.4.1 Análise de regressão para avaliação de cenários.....	61
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58

4.1. Composição tecnológica da cana de açúcar.....	64
4.2 Análise do Fluxo de materiais (AFM) produção açúcar, etanol e bioenergia.....	65
4.3 Quantificação dos gases de efeito estufa.....	73
5 CONCLUSÃO	76
6 REFERÊNCIAS.....	78
7 APÊNDICE.....	81

1 INTRODUÇÃO

Desde o início, a cana-de-açúcar tem efetuado um grande papel no contexto socioeconômico do país, recebendo destaque por ser o maior produtor mundial, respondendo por quase 40% da produção no mundo (SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS- SEBRAE, 2018). Segundo Castro (2018) existem uma diversificação de produtos provenientes da matéria-prima da cana-de-açúcar, sendo eles: açúcar, etanol anidro (aditivo para gasolina) e etanol hidratado, para os mercados interno e externos. Até mesmo os resíduos como bagaço e folhas, podem ser usados para cogeração de energia elétrica a partir da biomassa, energia renovável, destinada a comercialização e ao consumo.

De acordo com Castro (2018), o setor sucroalcooleiro gera cerca de 12 bilhões de dólares por ano, sendo o 2º setor agropecuário mais importante para a economia brasileira, além de ser o maior produtor e exportador mundial de açúcar, o Brasil também é o maior produtor e exportador de etanol no mundo (IEA – INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA, 2020).

Em 2020, houve o agravamento da crise pandêmica e isto prejudicou a economia, abalando ainda mais a confiança dos investidores, em especial a produção canavieira do Brasil, que já estava em um tempo de crise, perdendo o capital investido, resultando na queda da eficiência e na baixa produtividade dos canaviais (IEA, 2020).

Para as indústrias sucroenergéticas continuarem competitivas e mantendo o patamar de maior produtora, são necessárias ferramentas que verifiquem se há perdas não mapeadas no processo. Uma das ferramentas que pode ser aplicada é a Análise de Fluxo de Material (AFM, do inglês *Material Flow Analysis*) que consiste em uma avaliação eficaz do fluxo de materiais em um sistema limitado pelo espaço e tempo (BRUNNER, 2005). A segunda ferramenta é a Avaliação do ciclo de vida (ACV, do inglês *Life Cycle Assessment*) que de acordo com Oliveira (2018) se destaca pela possibilidade de ser aplicada em grandes plantas industriais, analisando a e intensificação dos impactos ambientais.

O Resultado de uma AFM compara todas as entradas de dados, estoques e saídas do processo, podendo ser controlado por um balanço de materiais e energia, e esta característica a torna excelente para a gestão de recursos, resíduos e meio ambiente. Nguyen *et al.* (2016) estudaram uma usina sucroenergética no Vietnã e quantificaram as perdas no processo produtivo, verificando que o desperdício da sacarose representa 17,1% do potencial de produção. Os fluxos

sólidos de extração, filtração e cristalização representaram 10,6%, e o vapor liberado da evaporação e cristalização representam 6,5% da perda de sacarose.

Nguyen *et al.* (2016) destacaram que a clarificação se mostrou como sendo o processo mais ineficiente na usina estudada, com uma perda de açúcar nove vezes maior que o valor de referência. Widiyanto *et al.* (2007) observou na AFM uma oportunidade de analisar uma usina sucroenergética na Indonésia que produz 12.000 toneladas de açúcar, verificando-se oportunidades perdidas para comercializar o bagaço não utilizado.

Diante desta problemática e baseado no conceito da AFM e ACV, esta pesquisa compara todas as entradas de dados, estoques e saídas, assim como detalha as composições, emissões, perigos e os potenciais destinos de materiais em fim de vida útil de uma usina sucroenergética. Esta usina está localizada no estado da Paraíba, e não será identificada devido a um acordo de confidencialidade.

Como contribuição acadêmica, este estudo mostra a efetividade na utilização de ferramentas de melhoria contínua, ao proporcionar a indústria uma visão panorâmica, necessária para tomadas de decisões referente a eficiência produtiva e energética na usina, considerando a necessidade de promover o alinhamento com os objetivos para o desenvolvimento Sustentável (principalmente referente a energia acessível e limpa) e mostrando a diversificação das fontes de geração de energia elétrica para matriz elétrica Brasileira, em concordância com os objetivos do PPGER (Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis).

1.1 OBJETIVOS

Aplicar a metodologia da AFM e ACV a uma usina sucroenergética para identificar e quantificar os fluxos de materiais e os impactos ambientais associados.

Os objetivos específicos são:

- Conhecer e esquematizar o processo produtivo de uma usina Sucroenergética, cujos produtos são açúcar, etanol e bioenergia.
- Quantificar os fluxos de massa ao longo da cadeia produtiva da usina, determinando o consumo real das operações existentes e identificando as principais perdas.
- Quantificar as emissões de gases de efeito estufa associadas à exportação de bioeletricidade.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Indústria Sucroenergética

O Brasil é responsável pela maior produção de cana-de-açúcar do mundo, realizando mais de 654 milhões de toneladas na safra 2020/21, por intermédio de 422 usinas e mais 70.000 produtores rurais de cana-de-açúcar (CONAB, 2021). Na safra 2017/2018 o produto interno bruto foi elevado em cerca de R\$ 85 bilhões, produzindo empregos diretos em mais de 20% dos municípios Brasileiros, alcançado uma marca de 800 mil empregos (SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS - SEBRAE, 2018). Conforme Tabela 1, houve um crescimento na produção norte/nordeste na safra 21/22 comparado a safra 20/21.

Tabela 1. Comparativo de área, produtividade e produção

Região	Área (mil ha)			Produtividade (kg /ha)			Produção (mil t)		
	Safra 20/21	Safra 21/22	%	Safra 20/21	Safra 21/22	%	Safra 20/21	Safra 21/22	%
NORTE/ NORDESTE	895,4	890,9	0,5	58.006	59.868	3,2	51.937	53.337	2,7
CENTRO- SUL	7.720,8	7.531	2,4	78.048	76.316	2,2	602.590	574.800	4,6
BRASIL	8.616,1	8.422	2,2	75.965	74.576	1,8	654.527	628.137	4,0

Fonte: Adaptado de CONAB, 2022.

Segundo Machado *et al.* (2003), em 1532 Martim Affonso de Souza trouxe a primeira cultura da cana para o Brasil, vindo da Ilha de Nova Guiné. Martim iniciou o seu cultivo na Capitania de São Vicente. Ao verificar o seu campo abundante e o rápido crescimento, foi criado o primeiro engenho de açúcar, chamado de “governador”, logo após foi criado o “São Jorge dos Éramos”, dessa forma os engenhos foram crescendo principalmente na Bahia e em Pernambuco.

A cana-de-açúcar é uma matéria prima flexível e pode ser desenvolvida em solos sem muitos recursos, situados nas faixas de clima tropical e subtropical. Para Rodrigues *et al.* (2020) os fatores específicos benéficos que mais chamaram atenção para o desenvolvimento da cana foram: solos férteis, águas em boas condições, altas temperaturas, relevos planos e mão de obra indígena abundante, sustentado no desejo de manter o território, onde no futuro seriam retiradas grandes quantidades de ouro.

Da matéria-prima, produzem-se açúcar, etanol anidro (aditivo para gasolina) e etanol hidratado, para os mercados interno e externo, com demandas e dinâmica de preços diferentes. Os resíduos da cana, tais como bagaço e palhas, podem ser usados para cogeração de energia elétrica, sendo uma energia limpa e renovável, destinada ao próprio consumo da usina ou à comercialização (CASTRO, 2018).

No cenário mundial de produção de cana, dez países se destacam como os maiores produtores, conforme apresenta a Figura 1, são eles: Brasil, Índia, China, Tailândia, Paquistão, México, Colômbia, Austrália Guatemala e Estados Unidos. Juntos, esses países concentram cerca de 80% do total da produção global de cana-de-açúcar.

Figura 1. Panorama da cana-de-açúcar – principais players mundiais.



Fonte: Adaptado de SEBRAE, 2018.

A Índia se sobressai como o segundo maior país produtor de cana-de-açúcar do mundo após o Brasil. Para Singh *et al.* (2014), a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma das mais importantes culturas agroindustriais. Em 2010-11 na Índia a cana-de-açúcar foi plantada em 4,98 milhões de hectares em todo o país.

Depois do Brasil e da Índia, a China é o terceiro maior país produtor de cana-de-açúcar do mundo. Esta indústria produz cerca de 13 milhões de toneladas de açúcar e muitos outros produtos como celulose, papel, álcool, fermento, xilitol, produtos químicos, bio-esterco, ração e eletricidade. Segundo Zheng *et al.* (2022) durante a última década, a China se tornou a principal cultura da região sul.

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB,2013), o mais importante processo de ocupação agrícola no Brasil e no período colonial foi o setor sucroalcooleiro. O açúcar era produzido na região nordeste, por uma indústria definida pelo grande atraso tecnológico e a utilização de mão de obra escrava nos séculos XVI e XIX. Nos últimos anos, o setor sucroalcooleiro no Brasil apresentou um forte crescimento por ser um dos mais antigos, dessa forma o sistema agroindustrial da cana, está ligado aos principais eventos históricos e é de enorme importância para o País.

Por ano, existe uma movimentação de cerca de US\$ 43,4 bilhões, números aproximados de 2,35% do PIB brasileiro, considerando o total dos diversos elos que compõem o sistema agroindustrial da cana, esse patamar alcançou US\$ 107,7 bilhões (SEBRAE,2018). A Propensão é que valores como estes continuem crescendo, fazendo com que os subprodutos que não têm tantos destaques, ganhem mais importância na geração de riquezas do setor, como a bioenergia, as leveduras, os plásticos biodegradáveis, o diesel de cana, o bi butanol, o etanol celulósico e os créditos de carbono (CASTRO, 2018).

De acordo com a União das Indústrias de Cana-de-açúcar (ÚNICA,2018), a região Centro-Sul responde por mais de 90% da produção do setor no país. Minas Gerais representa cerca de 10% da produção. Na safra 2017/18, a produção de cana chegou a 596 milhões de toneladas, reduzindo 1,8% em relação à safra anterior. Esse resultado foi procedente pelo rápido estreitamento na área disponível para colheita e a diminuição da capacidade agrícola do canavial. A produção de açúcar foi de 36,1 milhões de toneladas (93% da produção nacional), com ligeira alta de 1,2% no comparativo com a safra 2016/17. A Tabela 2 configura os resultados por estado da safra 2017/18.

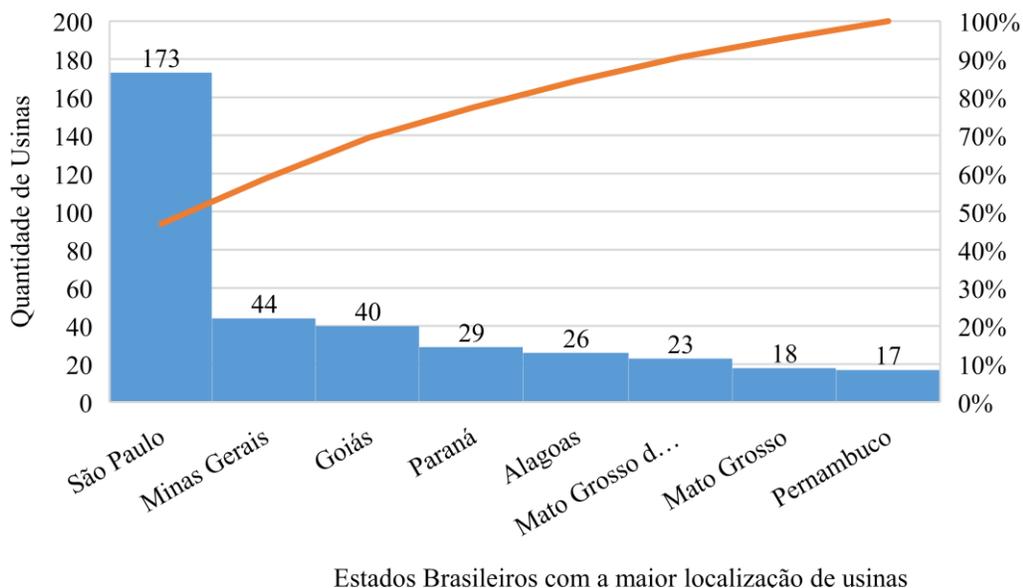
Tabela 2. Diagrama simplificado da cadeia produtiva da cana no Brasil

Estados	Cana de Açúcar (t)	Açúcar (t)	Etanol Anidro (m³)	Etanol Hidratado (m³)	Etanol Total (m³)
Espírito Santo	2.381	127	80	11	90
Goiás	70.622	2.235	1.323	3295	4.626
Mato Grosso	16.134	411	539	960	1499
Mato Grosso do Sul	46.940	1.492	878	1754	2632
Minas Gerais	64.886	4.237	1.067	1.642	2708
Paraná	37.047	2921	570	699	1269
Rio de Janeiro	1.062	35	0	46	46
Rio Grande do Sul	45	0	0	2	2
Santa Catarina	0	0	0	0	0
São Paulo	357.142	24.591	5.963	7.260	13.223
Centro-Sul	596.260	36.048	10.419	15.669	26.088
Norte-Nordeste	44.806	2.548	947	823	1.771
Brasil	641.066	38.596	11.366	16.492	27.859

Fonte: Adaptado de UNICA, 2018.

Como pode-se observar, o estado de São Paulo tem destaque como sendo a produção canavieira mais dinâmica do país. Segundo a Agência Paulista de Promoção de Investimentos e Competitividade de São Paulo (INVEST-SP, 2022) a área plantada corresponde por 55% da área plantada de todo Brasil. A cana de açúcar mais plantada atualmente no país é a variedade SP81-3250, por apresentar mais controle com relação as pragas recorrentes em canaviais, esta variedade foi desenvolvida em Piracicaba (INVEST-SP, 2022). A Figura 2 apresenta os estados brasileiros com as maiores quantidades de usinas operantes atualmente.

Figura 2: Estados brasileiros com maior número de usinas operantes

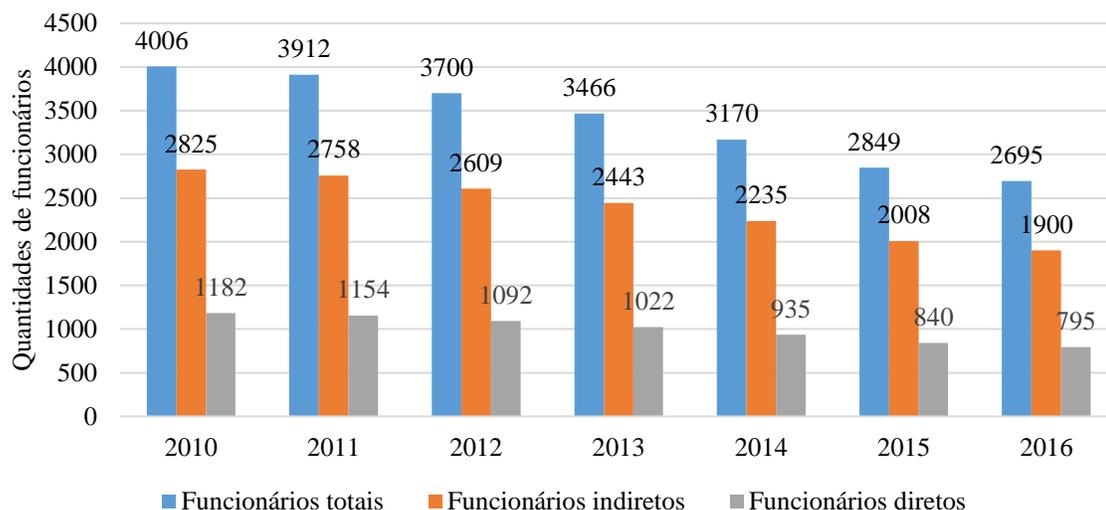


Fonte: Adaptado de Nova Cana, 2022.

O setor canavieiro tem uma alta taxa de carteira de trabalho assinada, se tornando diferente dos outros setores, chegando a um percentual de 95% de vínculos empregatício. De acordo com o (CENTRO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS DO SETOR SUCROENERGÉTICO E BIOCMBUTIVEIS - CEISE, 2019) a exigência por trabalhadores qualificados só aumentam mediante avanço tecnológicos das usinas e uma organização melhor. Conforme Figura 3, porém de maneira geral em todo o setor da agroindústria, esse percentual só chega a 58% (CEISE, 2019).

Segundo a CNI (2017) para o desenvolvimento econômico de um município, gerar riquezas e movimentação financeira são fundamentais para um país, estado ou região. Os impostos recebidos exercem um importante papel sendo distribuidores de renda, uma vez que juntam dos que trabalham e estes distribuem o dinheiro arrecadado adquirindo bens e serviços.

Figura 3. Geração de emprego no setor sucroalcooleiro Brasileiro.



Fonte: Adaptado de SEBRAE, 2018.

A partir dos dados apresentados, nota-se a importância da cana-de-açúcar para a geração de capital no Brasil. De acordo com o SEBRAE-MG (2018) para 2030, está previsto ser produzido 942,75 milhões de toneladas de cana, uma média produtiva de 148,08 kg de ATR por tonelada de cana-de-açúcar, uma produção de 100 toneladas de cana por hectare. Para esta operação, serão necessários 11,8 milhões de hectares no total (3,13 milhões de hectares a mais que na safra 2016/17), considerando uma taxa de renovação de 20%. A Tabela 3 apresenta as estimativas dos números da cadeia sucroenergética em 2030.

Tabela 3. Estimativas dos números da cadeia sucroenergética em 2030

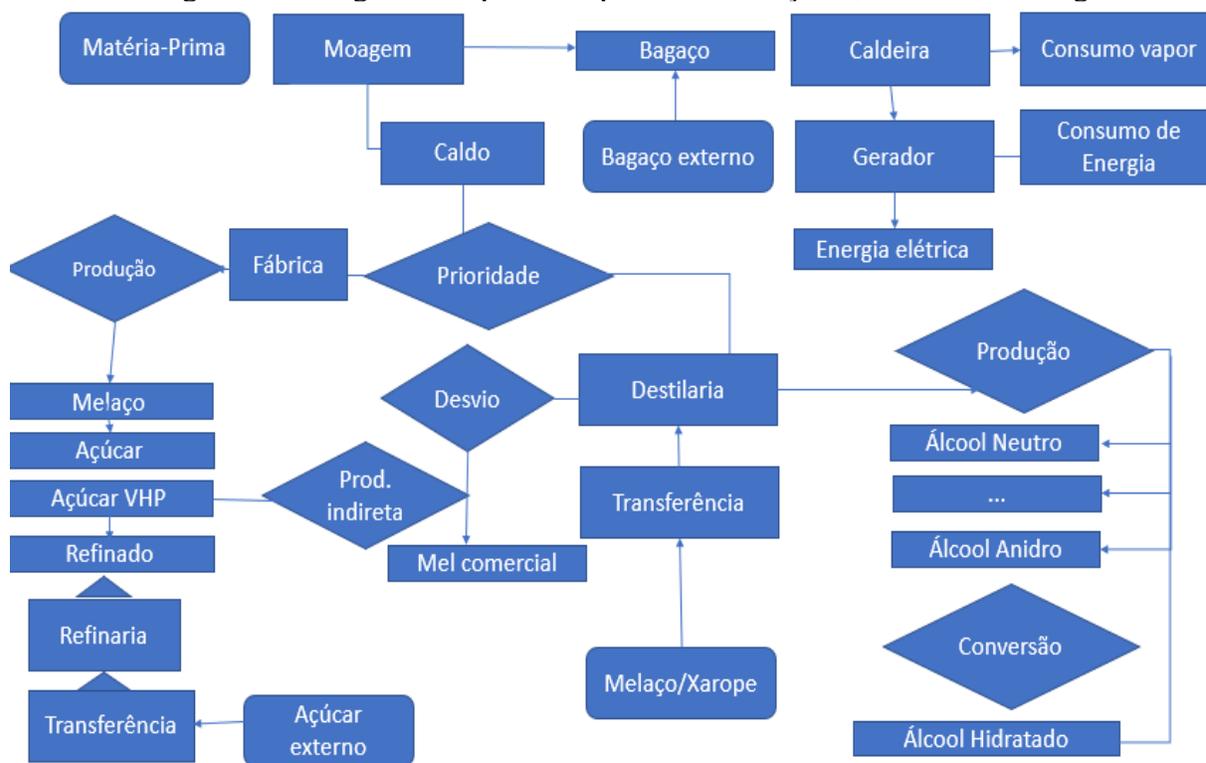
Estados	2013 ¹	2030 ²
PIB (Bilhões)	US\$ 43,4	US\$ 74,5
Movimentação financeira (Bilhões)	US\$ 107,7	US\$ 206,6
Impostos (Bilhões)	US\$ 8,5	US\$ 19,2
Empregos (Mil)	181	261
Massa salarial (Bilhões)	R\$ 3,05	R\$ 5,90
Produção Cana (Milhões t)	658,9	942,7
Área (Milhões hectares)	8,8	11,8

¹Cotação do dólar: US\$ 1 = R\$ 2,25 ² Cotação do dólar: US\$ 1 = R\$ 4,44

Fonte: Adaptado de SEBRAE MINAS, 2018.

Para Flausinio (2015) existem duas etapas no processo produtivo do açúcar, etanol e bioenergia: a agrícola e a industrial. De acordo com Marques (2009) o primeiro grupo de operações, abrange os processos de entrada de cana, preparo de cana, extração do caldo, tratamento do caldo e evaporação, que estão ligadas basicamente à fase de início de medição, limpeza da cana e transformação em caldo. A Figura 4 apresenta um fluxograma simplificado das etapas industrial da matéria prima da cana de açúcar para a obtenção de açúcar e álcool.

Figura 4. Fluxograma do processo produtivo do açúcar, etanol e bioenergia



Fonte: Adaptado de Paiva, 2012.

Normalmente, a cana colhida manualmente é levada para abater as impurezas que afetam de forma negativa o processo produtivo, porém a preocupação referente a lavagem da cana na mesa de recepção, são as perdas de sacarose elevadas. Prevendo não haver perdas, as usinas estão iniciando o processo de utilização do sistema de limpeza a seco com jatos de ar sobre a cana (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE, 2009).

Após a lavagem, a cana passa por rolos triturados e produz o melado, 70% do produto original vira caldo e 30 % da parte sólida se transforma em bagaço. O melado segue para o processo

de fabricação do etanol e o bagaço segue para produção de energia para suprimentos da demanda interna (NUNES, 2017).

Segundo Pellegrini (2009), o caldo contém bastante impurezas, tanto minerais quanto vegetais, após sair da fase de extração, dessa forma ele precisa ser tratado para que possua conformidades na qualidade e não prejudique os processamentos subsequentes. O tratamento deve ser feito para que os sólidos insolúveis sejam removidos.

Para o tratamento do caldo, a decantação é a operação correta, o caldo é peneirado e realizado o tratamento químico por coagulação, floculação e precipitação das impurezas (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE, 2009). Ao retornar da moenda, o caldo é filtrado e separado do lodo. O caldo é enviado para as centrifugas até as peneiras vibratórias ou estáticas com o intuito de remover as maiores impurezas. No momento a mais usual é a peneira rotativa por favorecer a não contaminação microbiana (RIBEIRO, 1999). Porém, há uma grande variação da quantidade de impurezas, dependendo principalmente da variedade da cana.

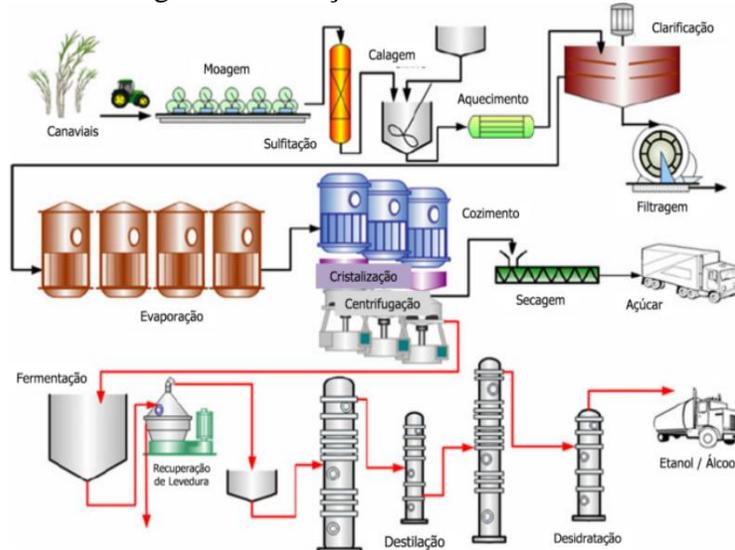
Os processos de estação de tratamento de água, geração de vapor, geração de energia mecânica e térmica, fazem parte do segundo grupo das operações unitárias da usina, onde a água é transformada em vapor, a partir da transferência do calor específico de combustão do bagaço, dessa conversão é gerada a eletricidade.

A outra fase do processo de concentração é a cristalização onde ocorre a formação dos cristais de açúcar, a massa é cozida e descartada nos tanques a vácuo dos cristalizadores. Em seguida segue para o setor de centrifugação, onde o melaço é separado dos cristais de sacarose, o açúcar despejado das centrifugas apresenta um teor de umidade de (0,5% a 2%) e uma alta temperatura (65°C a 85°C), devido a lavagem no vapor. Na última etapa, entra o processo de secagem do açúcar onde passa uma corrente de ar impelida por um ventilador, a uma temperatura entre 35°C e 40°C e um teor de umidade de 0,03% a 0,04%. O açúcar é enviado para as etapas de empacotamento, pesagem e armazenamento.

Logo após, é feito o processo de produção do etanol misturado ao vinho fermentado, nas dornas é iniciado a fermentação alcoólica que é a ação de leveduras sobre açúcares fermentáveis contidos em uma solução, após a transformação de açúcar em etanol, o líquido segue para as colunas de destilação onde é aquecido até se evaporar, na evaporação o vinho é separado do etanol, conforme a Figura 5, produzindo o álcool hidratado, usado como etanol combustível, com grau alcoólico em cerca de 96%. Com o álcool hidratado separado, a água restante é retirada, onde um

solvente é misturado ao álcool e evaporado juntos, dessa forma surge o álcool anidro, com graduação alcoólica de 99,5% utilizado como combustível (NUNES, 2017).

Figura 5. Produção industrial de etanol



Fonte: Adaptado de URV- Departamento de engenharia química, 2020.

O setor sucroenergético pode ser denominado biorrefinaria, segundo a (AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA– AIE, 2009), é uma unidade onde pode-se realizar processamentos sustentáveis de biomassa e produção de energias comercializáveis, trazendo consigo, formas mais eficientes e ecologicamente sustentáveis. A biorrefinaria pode ser definida como uma instalação que integra processos e equipamentos de conversão de biomassa para a produção de combustíveis, energia e produtos químicos (MAITY, 2014).

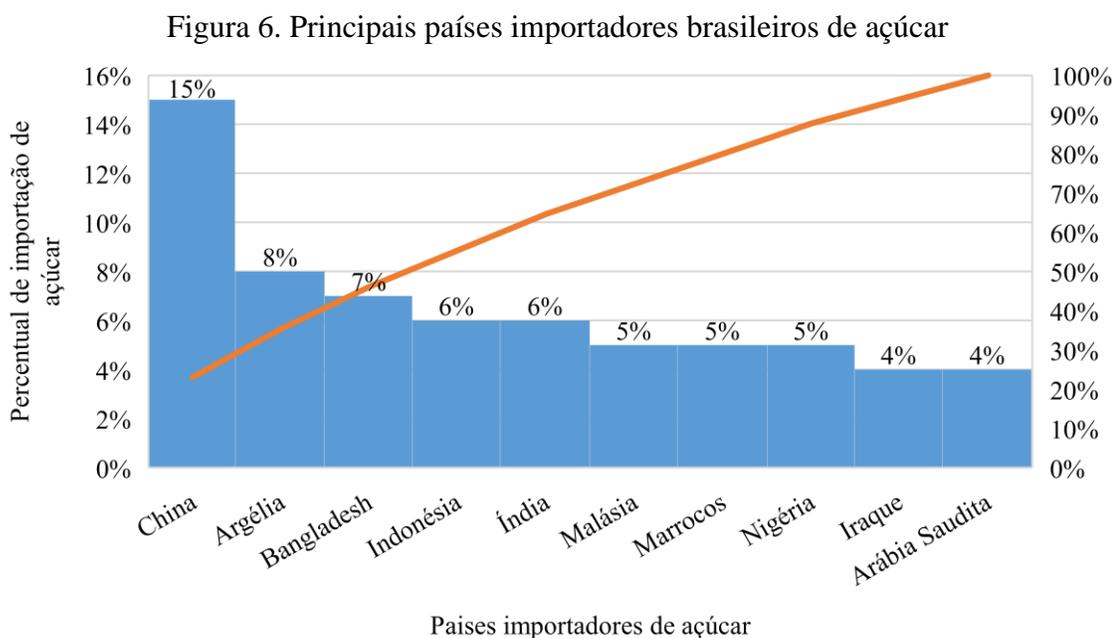
2.1.1 Açúcar

Segundo o Instituto de Economia Agrícola (IEA), a produção de açúcar representou um total de 22%, ou seja, 179,9 milhões de toneladas na safra 2020/21. A expectativa é que na safra 2021/22, a produção seja de 186 milhões de toneladas. O favorecimento dos preços do açúcar no mercado internacional foi um dos fatores que contribuiu para o aumento da demanda externa em 2020.

O Brasil obteve a marca de 30,7 milhões de toneladas de açúcar exportados, quantidade superior a exportação de 2019 (IEA, 2021). Conforme Figura 6, a comercialização aconteceu para

vários países, mas 65% do volume exportado foram comercializados para China, Argélia, Bangladesh, Índia, Indonésia, Nigéria, Marrocos, Malásia, Arábia Saudita e Iraque.

O consumo de açúcar no Brasil aumentou nos últimos 60 anos, sobretudo, por mudanças no padrão do consumidor e no crescimento da população. Em meados de 1930, o consumo anual per capita de açúcar era de 15 kg. Já nos anos 1940, o número passou a ser 22 kg. Em 1970, a média era de 40 kg. Em 1990, esse índice anual estabilizou-se ao redor de 50 kg de açúcar por habitante (EMBRAPA, 2009).



Fonte: MAPA (2021).

Em 2025, a previsão é que a produção alcance 210,03 t (aumento de 39,21 t de açúcar). O crescimento projetado para 2030 é de 36,4%, chegando a 232,9 milhões de toneladas (OECD - FAO, 2016). No Brasil, se destacam os tipos de açúcar abaixo:

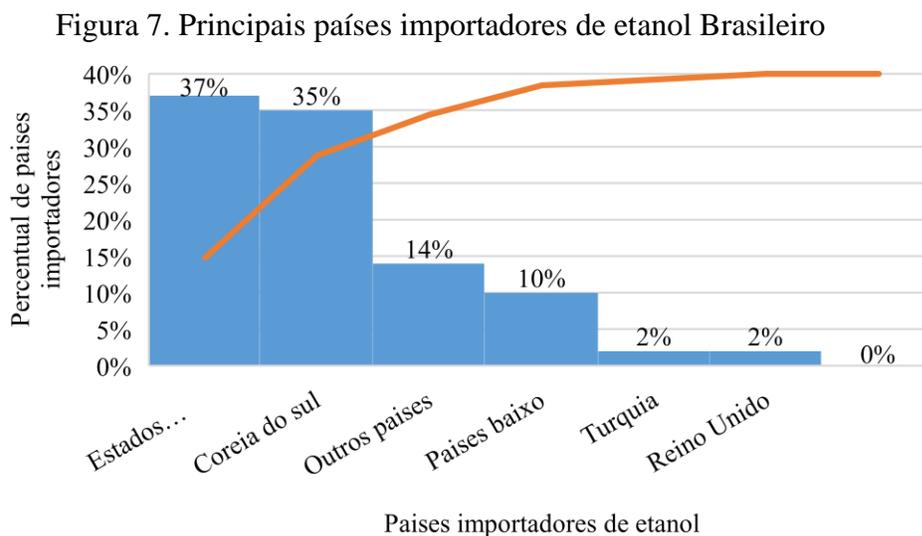
- Açúcar Cristal: Produzido sem refino, utilizado na indústria alimentícia.
- Açúcar Demerara: Produto da cor escura, os cristais contêm melaço e mel residual da própria cana.
- Açúcar mascavo: Não passa pelo processo de branqueamento, é úmido e de cor amarronzada, tem sabor forte assim como a rapadura.

- Açúcar Orgânico: Produzido sem qualquer aditivo químico, tanto na fase agrícola quanto na industrial.
- Açúcar Very High Polarization (VHP): É o tipo mais exportado pelo Brasil. No seu branqueamento não há a utilização de anidrido sulfuroso.
- Açúcar de confeitaria: É designado para a indústria alimentícia.

2.1.2 Etanol

Em função das restrições da pandemia, o volume de etanol comercializado no Brasil em 2020 foi 19,25 bilhões de litros, dos quais 10,13 bilhão de litros foram comercializados no Estado de São Paulo (IEA, 2020).

De acordo com Brasil (2021), os destinos ao qual o Brasil exportou 2,69 bilhões de litros de etanol foram: Estados Unidos, Coreia do Sul, Países Baixos (Holanda), Japão e Nigéria, como pode-se visualizar na Figura 7.



Fonte: MAPA (2021).

Segundo a associação de combustíveis renováveis (RFA, 2022), os Estados Unidos é o maior produtor mundial anual de etanol combustível com 55% do volume mundial produzido, já o Brasil aparece em segundo com 27% do volume mundial produzido.

O Canadá, o Brasil e a Índia são os principais mercados para o etanol americano, porém em 2020 o volume das exportações dos Estados Unidos aumentou para a Coreia do Sul e China

(LEWIS, 2021). No cenário mundial, o Brasil é o segundo maior produtor de etanol combustível. Fica atrás apenas dos Estados Unidos conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Análise RFA de fontes de dados públicas e privadas

Região	2018 (Gal)	2019 (Gal)	2020 (Gal)	2021 (Gal)	% da produção Mundial
Estados Unidos	16.091	15.778	13.941	15.015	55%
	8.060	8.860	8.100	7.430	27%
Brasil					
União Europeia	1.300	1.350	1.280	1.350	5%
China	810	1.010	930	860	3%
Índia	430	460	540	860	3%

Fonte: Adaptado de Renewable Fuels Association, 2022.

Com relação ao etanol, o Nordeste responde por apenas 6% da produção nacional. Os maiores produtores regionais são: Alagoas, Pernambuco e Paraíba. A Bahia e o Maranhão também possuem um volume de produção relevante, conforme Tabela 5. Juntos, os cinco estados respondem por aproximadamente 87% da produção total de etanol na safra 2019/20.

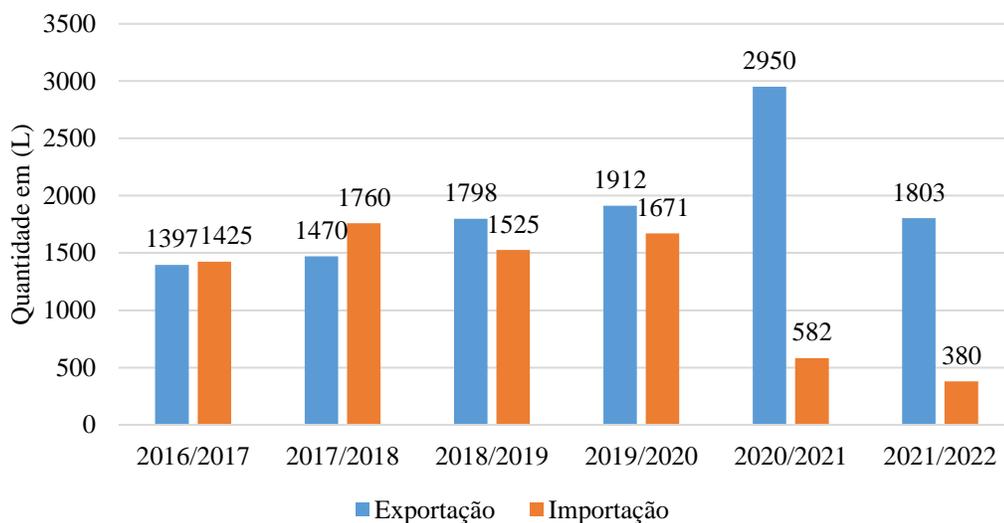
Tabela 5. Produção de etanol total no Nordeste (safras 2018/19 a 2020/21)

Estados	2018/19 (L)	2019/20 (L)	2020/21 (L)
Maranhão	147.916,0	168.061,0	192.404,3
Piauí	37.480,0	46.457,0	38.611,0
Rio Grande do Norte	104.977,0	124.398,0	104.438,0
Paraíba	382.000,0	442.746,0	444.078,8
Pernambuco	431.893,0	450.730,0	347.492,0
Alagoas	490.409,0	522.528,8	436.633,0
Sergipe	100.902,0	111.163,0	67.523,3
Bahia	245.698,0	249.021,0	290.500,0
Nordeste	1.941.275,0	2.115.104,8	1.921.608,4

Fonte: Adaptado de CONAB, 2021.

As exportações brasileiras de etanol estão apresentando crescimento desde o começo da safra 2019/20, totalizando 310,1 milhões de litros entre abril e junho deste ano. O volume de etanol exportado no primeiro trimestre desta safra representa um aumento de 3,0% em relação ao mesmo período da safra anterior (CONAB, 2021) conforme Figura 08.

Figura 08 – Exportações e importações de etanol por safra



Fonte: CONAB/ Ministério da Economia (2021).

2.1.3 Bioeletricidade

A bioeletricidade renovável é feita a partir da biomassa advinda da moagem da cana-de-açúcar (bagaço e palha), de restos de madeira, carvão vegetal, casca de arroz, capim-elefante e outras biomassas, sendo considerada uma energia limpa e benéfica ao meio ambiente.

Mediante seu alto teor de fibras, o bagaço tem sido empregado na produção de vapor e energia elétrica desde a revolução industrial, garantindo que as usinas sejam autossuficientes durante o período de safra, mas além de atender as necessidades das agroindústrias, o bagaço permite a geração de excedentes de energia elétrica que são fornecidos para o sistema elétrico brasileiro (UNICA, 2018).

Em 2020, a Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) ficou em 547.587 GWh, montante superior 1,8% ao de 2019. Por fonte, merecem destaque os aumentos de 1.065 GWh na oferta por eólica, e uma diminuição de 6.984 GWh por gás natural. A geração solar teve aumento de 4.095 GWh, mas sobre uma base ainda baixa em 2019. A supremacia da geração hidráulica ficou menos acentuada em 2020, chegando a 396.327 GWh da OIEE (incluindo a importação de Itaipu), contra os 397.877 GWh em 2019. A Tabela 6 apresenta a oferta interna de energia elétrica.

Tabela 6. – Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE)

Estados	2019 (GWh)	2020 (GWh)	20/19 %	2019 (%)	2020 (%)
Hidráulica	397.877	396.327	-0,4	61,1	61,4
Bagaço de cana	36.827	38.776	5,3	5,7	6,0
Eólica	55.986	57.051	1,9	8,6	8,8
Solar	6.655	10.750	61,5	1,0	1,7
Outras renováveis	18.094	19.966	10,3	2,8	3,1
Óleo	6.926	7.745	11,8	1,1	1,2
Gás Natural	60.448	53.464	-11,6	9,3	8,3
Carvão	15.327	11.946	-11,6	2,4	1,8
Nuclear	16.129	14.053	-12,9	2,5	2,2
Outras não renováveis	12.060	11.121	-7,8	-7,8	1,7
Importação	24.957	24.718	-1,0	-1,0	3,8
Total ©	651.285	645.915	-0,8	100,0	100,0
Brasil	540.395	547.587	1,3	83,0	84,8

Fonte: Adaptado de BRASIL (2021).

Em dezembro de 2022 a potência total da geração hídrica era de 109.189 MW de capacidade instalada, representando 60,5% do total em operação. Térmicas a biomassa somava 15.214 MW (8,4%), usinas a gás totalizavam 16.505 MW (9,2% do total), enquanto eólicas somavam 23.162 MW (12,8%); térmicas a óleo, 4.199 MW (2,3%); térmicas a carvão, 3.017 MW (1,7%); nucleares, 1.990 MW (1,1%) e solares fotovoltaicas com 6.917 MW, ou 3,8% do parque gerador nacional (SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL - SIN, 2022).

De acordo com Vilela (2013) foi realizado um estudo indicando os maiores consumidores de eletricidade no sistema produtivo de uma usina sucroenergética, conforme a Tabela 7.

Tabela 7. Consumo vapor por etapa produtiva

Tipo	%
Apoio e manutenção	2,32%
Uso interno	2,35%
Armazenamento	1,85%
Fabricação de açúcar	24,59%
Uso de água	8,99%
Obtenção de etanol	4,89%
fermentação Química	8,92%
Cogeração	25,50%
Tratamento do caldo	11,08%
Extração do caldo	9,50%

Fonte: Adaptado de VILELA (2013).

As energias renováveis estão em crescimento, para 2035 a projeção de acordo com dados BP (2016), é que estas representem 8% da matriz energética mundial e um montante de produção proporcional de 1.359,4 milhões de toneladas de petróleo equivalentes. Em comparação a 2005, o crescimento será superior a 1.500% quando o montante consumido era de 84,9 milhões de toneladas de petróleo equivalentes, e uma participação de 0,8% na matriz energética mundial (CNI,2017).

Na década de 90, a energia total era gerada para consumo próprio sem o uso de rede pública, mas com o avanço da legislação, o autoprodutor pode vender excedentes ao mercado, por essa e outras vantagens, a biomassa tem um papel importante na oferta de energia elétrica e hidráulica do Brasil, sendo fundamental para a economia da energia elétrica.

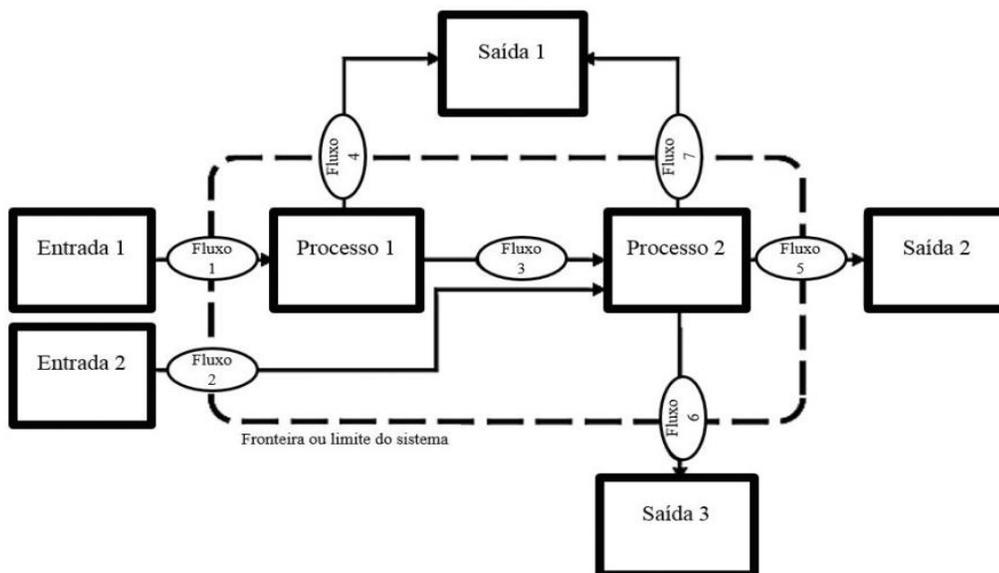
2.2 Análise de Fluxo de Materiais (AFM)

A AFM, é uma metodização dos fluxos e estoques de materiais e energia dentro de um sistema definido no espaço e no tempo. A AFM conecta as fontes, caminhos e sumidouros intermediários e finais de um material, se tornando um método atrativo para suporte à decisão na gestão de recursos, gestão de resíduos e gestão ambiental (BRUNNER, 2005).

Segundo Bringezu *et al.* (2002) o termo AFM refere-se a um conjunto de ferramentas descritivas e analíticas baseadas no balanço de materiais, que pode ser aplicado a diferentes níveis de detalhes. A AFM produz informações abrangentes sobre todos os fluxos e estoques de qualquer material específico em um sistema. Usando AFM, pequenas mudanças que poderiam afetar o

sistema ao longo da vida podem ser identificadas. De acordo com Brunner *et al.* (2005), a AFM fornece um conjunto completo e consistente de informações sobre todos os fluxos, estoques e energia dentro de um sistema. O balanceamento de entradas e saídas, os fluxos de resíduos e cargas ambientais tornam-se visíveis, e as perdas físicas, bioquímicas, microbiológicas e econômicas podem ser identificadas. A Figura 09 mostra o desenho de um fluxo AFM com as entradas, processos e as saídas de materiais. Uma seta simboliza os fluxos, para cada um existe um processo de origem e um processo de destino que precisa ser definido, o fluxo que entra no sistema é chamado de processo de importação e o fluxo que saem do sistema levam a processo de exportação. Quando a AFM não dá um bom resultado podem ser atribuídos a métodos inadequados na definição de sistemas.

Figura 09. Representação esquemática geral de um diagrama AFM



Fonte: Adaptado de Brunner e Rechberger (2005).

A AFM baseia-se em conceitos anteriores de balanceamento de materiais e energia. As primeiras AFM foram apresentadas no início da década de 1990 para Áustria (Steurer, 1988) e Japão (Agência Ambiental do Japão, 1992).

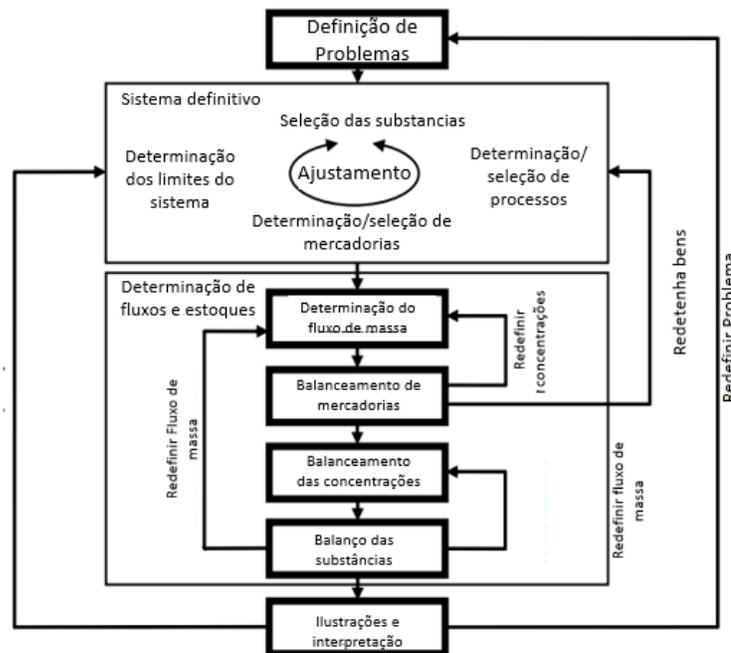
Ainda segundo Brunner *et al.* (2005) a AFM foi aplicada em campos diversos como: medicina, química, economia, engenharia e ciências, antes de se tornar uma ferramenta para gerenciar recursos, resíduos e meio ambiente. No século 20, os conceitos de AFM surgiram em vários campos de estudo em tempos diferentes. Antes que o termo AFM fosse inventado, e antes

que sua metodologia abrangente fosse desenvolvida, muitos pesquisadores usavam a lei da conservação da matéria para equilibrar os processos (BRUNNER, 2005).

De acordo com Rechberger (2005), os primeiros estudos nas áreas de conservação de recursos e gestão ambiental, surgiram na década de 1970, e as duas áreas originais de aplicação foram, o metabolismo das cidades e a análise das vias de poluentes em regiões como bacias hidrográficas ou áreas urbanas. Nas décadas seguintes, a AFM tornou-se uma ferramenta difundida em muitos campos, incluindo controle de processos, e águas residuais em tratamento, gestão de nutrientes agrícolas, gestão da qualidade da água, recursos de conservação e recuperação, design de produto, avaliação do ciclo de vida (ACV) e outros.

A Figura 10, mostra a forma de se elaborar graficamente uma AFM, que começa com a definição do problema e em seguida são definidas as substâncias relevantes, processos e produtos selecionados, logo após, os fluxos de massas e as concentrações das substâncias são avaliadas, os resultados são apresentados de forma adequada para visualização e conclusões e para facilitar a implementação de decisões. O processo produtivo está diretamente ligado a esfera ambiental, e os impactos no meio ambiente podem ser reduzidos conforme se consegue reaproveitar determinadas quantidades de bens ou substâncias nos processos.

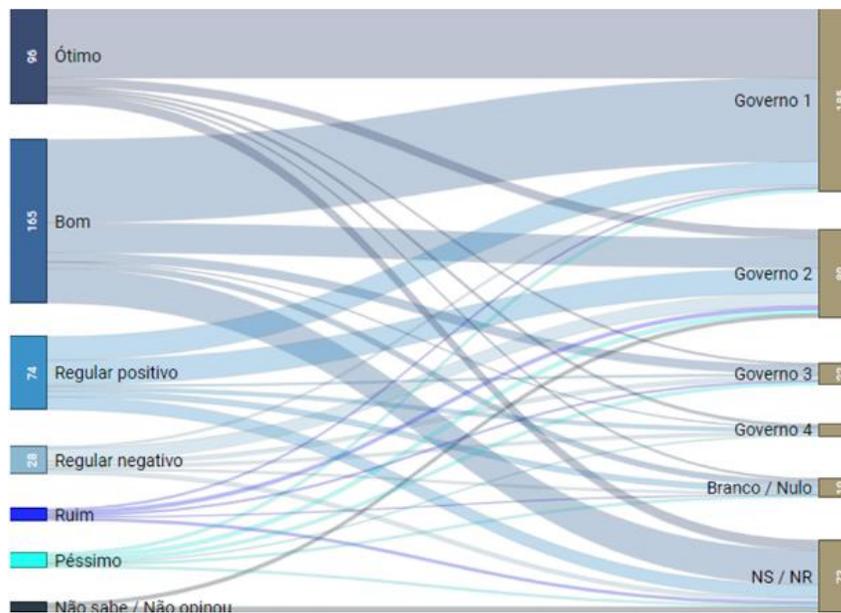
Figura 10. Esquemática do fluxograma AFM



Fonte: Adaptado de Brunner e Rechberger (2005).

Segundo Brunner *et al.* (2005) para ajudar o leitor a avaliar rapidamente a importância de um fluxo, pode-se empregar diagramas de Sankey, onde a largura do fluxo é proporcional ao seu valor numérico. Como mostra a Figura 11, este tipo de ilustração, conhecido como diagrama de Sankey, é usado para exibir materiais, energia e fluxos de caixa.

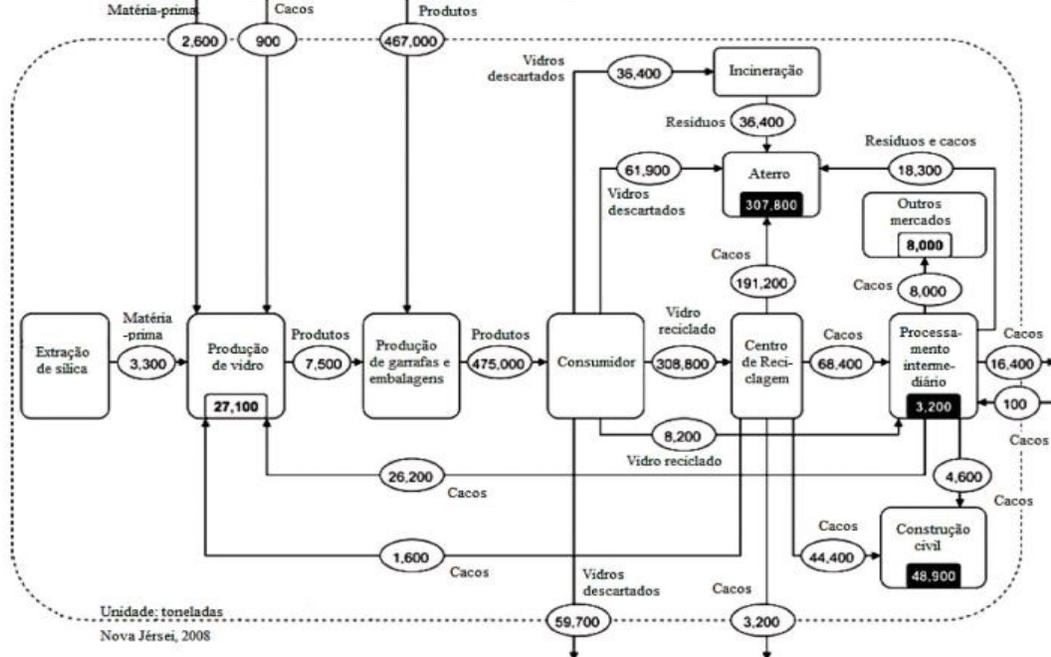
Figura 11. Esquemática do diagrama de Sankey



Fonte: Adaptado de Firmino (2020).

Conforme pode-se ver na Figura 12, a esfera ambiental está diretamente ligada a um processo produtivo, e os impactos no meio ambiente podem ser reduzidos conforme se consegue reaproveitar determinadas quantidades de bens ou substâncias nos processos (BRUNNER, 2005).

Figura 12. AFM de embalagens de vidro.



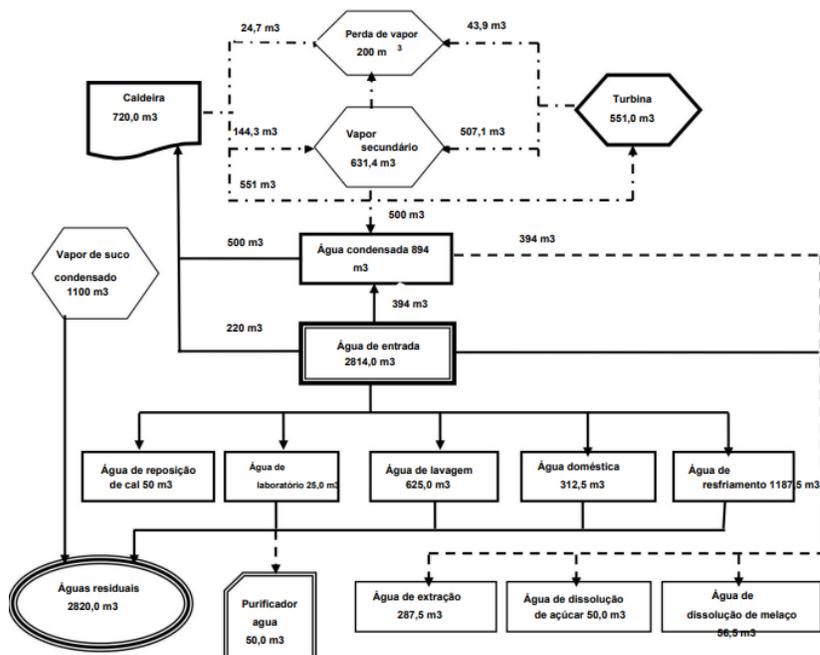
Fonte: Adaptado de TSAI *et al.* (2012).

2.2.1 AFM aplicada a casos de estudo em indústrias

Nguyen *et al.* (2016) desenvolveram uma AFM na usina sucroenergética Hoa Binh Sugar Company (Hoasuco) no Vietnã, para ajudar a reduzir os desperdícios com base em uma entrada de 1.250 t/dia e uma produção de 93.000 t de cana por safra. As Figuras 13 e 14 mostram o balanço de água e de açúcar, respectivamente.

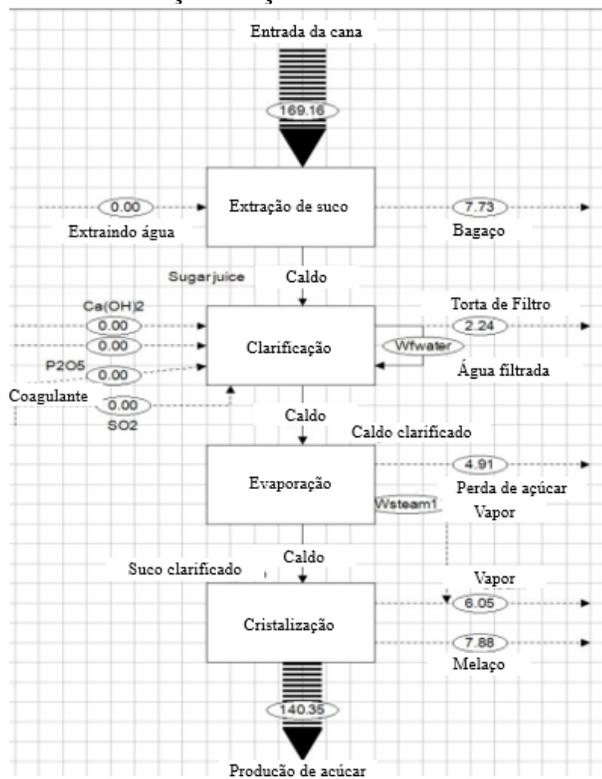
Os resultados mostraram que a perda de açúcar somou 17,1% do potencial de produção, um valor muito significativo. Os fluxos sólidos de extração, filtração e cristalização representaram 10,6% e os 6,5% restante são perdidos no vapor liberado da evaporação e cristalização. A Hoasuco perdeu 30% de açúcar pelo melaço. O consumo de água na Hoasuco variou entre 18 e 23 m³ por tonelada de cana, considerado extremamente alto quando comparado com o valor de referência 0,5 a 0,9 m³ por tonelada de cana.

Figura 13. Balanço de vazão de água da Hoasuco



Fonte: Adaptado de Nguyen *et al.* (2016).

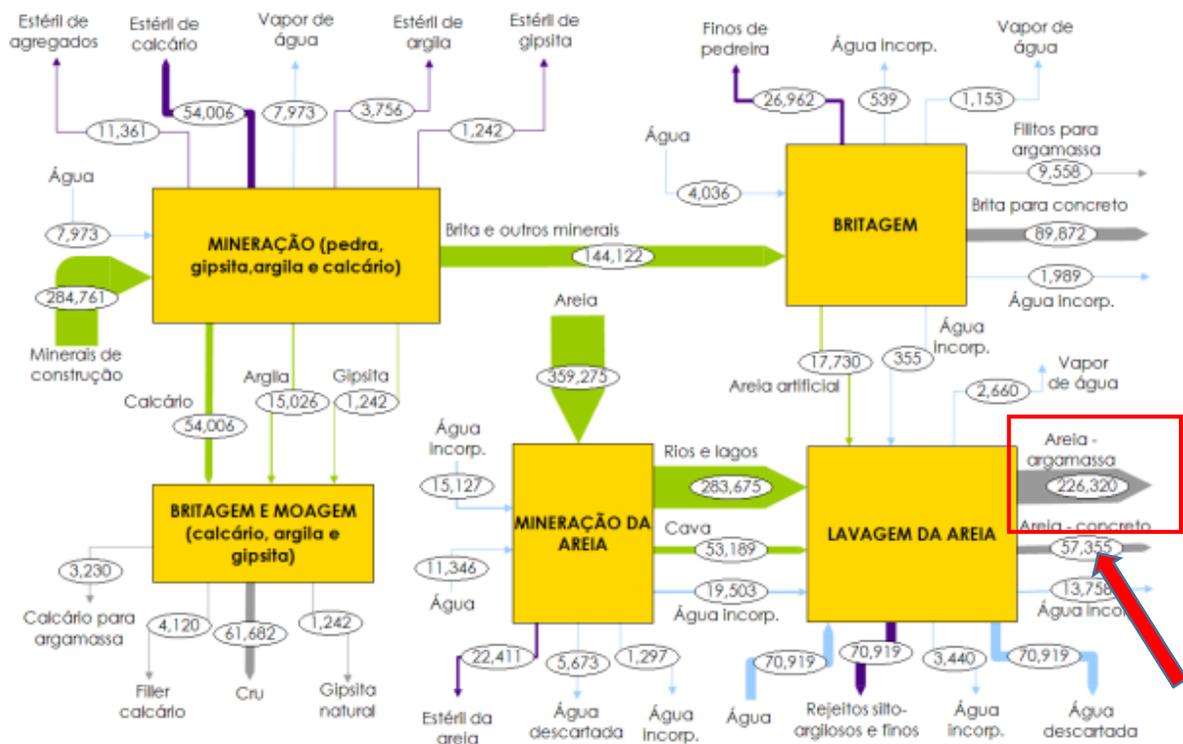
Figura 14. Balanço de açúcar da Hoasuco em toneladas



Fonte: Adaptado de Nguyen *et al.* (2016).

Widiyanto *et al.* (2007) analisou através da AFM uma fábrica com capacidade de 12.000 toneladas de cana moída por dia e produção de 3.980 toneladas de bagaço e descarte de 4.100 toneladas de água. A fábrica produziu excesso de bagaço a uma taxa de 600-800 toneladas/dia, permitindo a exportação do excesso à rede elétrica. Reis (2020) desenvolveu um estudo utilizando a ferramenta AFM para quantificar o uso de recursos de forma simples e acessível a pequenas e médias empresas. Por meio dos conceitos da AFM foi desenvolvido um conjunto de indicadores, intensidade de material e eficiência, circularidade e taxa de geração de resíduos, voltados para a indústria da construção, a fim de contabilizar o consumo de materiais. A Figura 15 mostra por meio da AFM que a principal fonte de ineficiência estava nos rejeitos da etapa de mineração, enquanto para argamassa as perdas em obra foi o processo que mais impactou na redução da eficiência.

Figura 15. Fluxo de materiais na etapa de extração de matéria-prima



Fonte: Adaptado de Reis (2020).

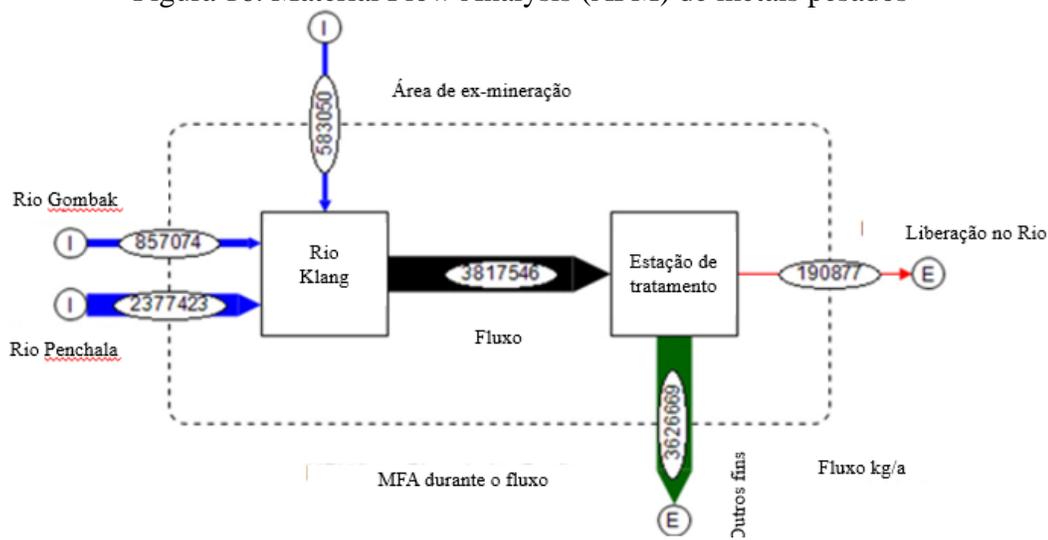
Ferronato *et al.* (2021) aplicou a AFM para analisar a cadeia de suprimentos de carnes, a fim de compreender melhor a circularidade do sistema. De acordo com Caldeira *et al.* (2019) a adoção de uma abordagem holística baseada na combinação de AFM, leva em conta toda a cadeia de suprimentos sendo útil para avaliar e quantificar os fluxos de carne, para identificar as principais

fontes de perdas e desperdícios, levando à proposta de estratégias de mitigação dos impactos ambientais. A AFM revelou que em 2013 foram consumidos 3,33 mt de carne na Itália, equivalente a 0,15 kg /dia e 55,23 kg /ano per capita. Durante a análise foi identificado um elemento de incerteza em relação ao AFM quanto a quantificação das perdas de água causadas pela maturação e processamento da carne.

Adam *et al.* (2021) utilizaram a análise probabilística de fluxo de material, que mapeia os fluxos de uma substância ao longo de seu ciclo de vida em direção ao meio ambiente, levando em conta as incertezas associadas aos dados de entrada. Também foi desenvolvido um indicador que combina todos os avanços separados do método em um abrangente código de software. Os resultados mostraram a grande importância de considerar o ciclo de vida completo dos nano produtos incluindo as diferentes etapas de reciclagem, as diferenças entre países e as formas dos materiais liberados.

Shahbudin *et al.* (2021) realizaram um estudo para determinar a eficácia de um sistema de tratamento em remoção de metais pesados dentro do limite do sistema, sob a suposição de que a estação de tratamento opera com 95% de eficiência; analisando a geração de metais pesados desde as fontes de poluição até o sistema de tratamento; e comparando a eficácia dos sistemas de remoção de metais pesados com base em diferentes cenários, de acordo com as necessidades dos requisitos padrão de descarga de efluentes conforme Figura 16.

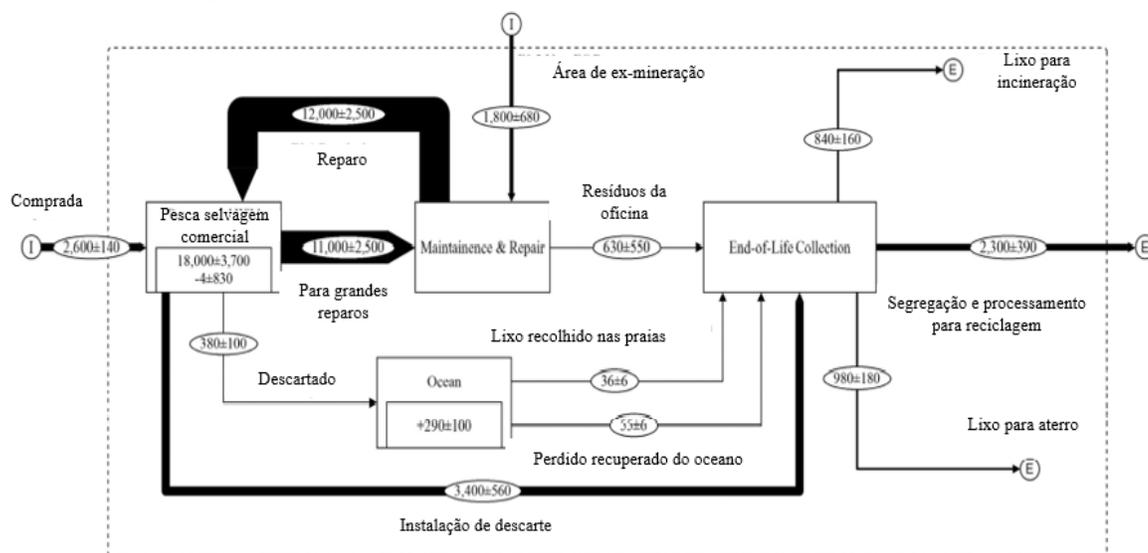
Figura 16. Material Flow Analysis (AFM) de metais pesados



Fonte: Adaptado de Shahbudin Kamal (2021).

Deshpande *et al.* (2020) utilizaram AFM e determinaram que a pesca comercial na Noruega contribui com cerca de 380 t/ano de lixo plástico, assim como linhas, sacos e redes de pesca perdidas. A abordagem AFM mostrou um potencial significativo como ferramenta holística de apoio à decisão para a indústria, conforme Figura 17. O estudo também gerou evidências importantes sobre a poluição plástica em nível regional do setor pesqueiro e destacou possíveis mecanismos que podem auxiliar nas melhorias propostas.

Figura 17. AFM dos itens de pescas utilizadas pela frota.



Fonte: Adaptado de Deshpande (2020).

2.3 Avaliação de ciclo de vida

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia que quantifica os potenciais impactos ambientais associados com um processo, atividade ou produto, utilizada para análise ambiental.

De acordo com Alves *et al.* (2019) a metodologia ACV teve sua origem na indústria de embalagens, conquistando espaço em outros setores como a mineração e a metalurgia. A crescente conscientização quanto à importância da proteção ambiental e seus potenciais impactos associados aos produtos, tem aumentado o interesse para melhor compreensão desses impactos.

De acordo com Chehebe *et al.* (1998) a ACV pode incluir desde o início do processo de manufatura até a disposição do produto, todas essas considerações permitem uma visão abrangente

dos impactos provocados ao meio ambiente, sendo possível a identificação das medidas mais adequadas do ponto de vista ambiental e econômico.

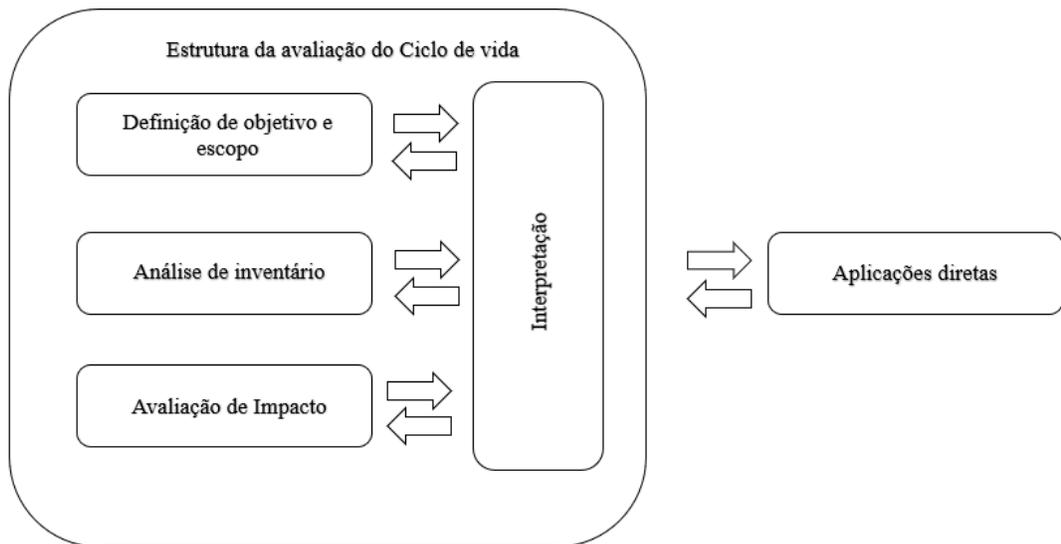
A ACV é normatizada pela *International Organization for Standardization* (ISO, Organização Internacional de Padronização) ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006). No Brasil, estas normas foram traduzidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) nas normas de mesma numeração (NBR 14040; 2014a; NBR 14044, 2014b).

A ACV possui quatro etapas inter-relacionadas (ISO 14040, 2006), conforme Figura 18.

- A 1ª etapa consiste em uma fase qualitativa onde realiza-se a definição dos objetivos de forma detalhada, assim como seu escopo, suas proporções da análise ambiental e sua unidade funcional. Durante essa fase alguns aspectos devem ser abordados e documentados, como: pretensão dos produtos/resultados, limitações e premissas, público-alvo e resultados do estudo. No escopo são definidos os requisitos de metodologia, qualidade e geração de relatórios. Segundo Marzur *et al.* (2011) é necessário ter de maneira clara as razões pelas quais o estudo está sendo feito, ou seja, a profundidade do estudo e o impacto que terá sobre o público-alvo.
- Na 2ª etapa ocorre a análise de inventário do ciclo de vida, onde realiza-se as coletas de dados utilizando cálculos para quantificação dos fluxos de massa e energia, que entram e saem durante todo o processo considerando as fronteiras definidas no escopo. Duas modelagens são utilizadas na prática: Atribucional e Consequencial. A modelagem atribucional faz uso de dados com incerteza conhecida, dados mensuráveis e históricos incluindo processos relevantes para o sistema que está sendo estudado. A atribucional, caracterizada pelo uso de dados médios de ICV e de alocação de coprodutos, tem como objetivo a avaliação dos impactos ambientais de um produto, em um sistema estático. A ACV consequencial consiste na avaliação das consequências ambientais em um sistema dinâmico, orientado por mudanças. Em outras palavras, a abordagem consequencial procura “medir” as consequências de uma decisão, enquanto a atribucional não (GUILLÉN-LAMBEA, ABRAHÃO, CARVALHO, 2023). De acordo com Marzur (2011) para se ter um inventário completo é necessária uma validação dos dados para diminuir os riscos de qualidade.

- Na 3ª etapa o objetivo é avaliar a significância dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto. De acordo com a ABNT (2014a) as categorias de impacto da AICV são associadas, e o resultado dos indicadores de categoria fornecem informações sobre a questão ambiental da entrada e saída do sistema de produto. É nesta etapa que o método de avaliação de impacto ambiental selecionado é aplicado ao inventário, expressando o impacto ambiental na unidade desejada.
- A 4ª etapa é a fase da interpretação, considera-se todas as informações em conjunto e os procedimentos da ACV, neste caso o objetivo do estudo está ligado ao seu resultado podendo ser recomendado para tomadas de decisões, sendo base para conclusões, recomendações e tomadas de decisões de acordo com o objetivo e o escopo (ABNT, 2014a; ABNT 2014b).

Figura 18. Representação dos elementos estruturais da ACV



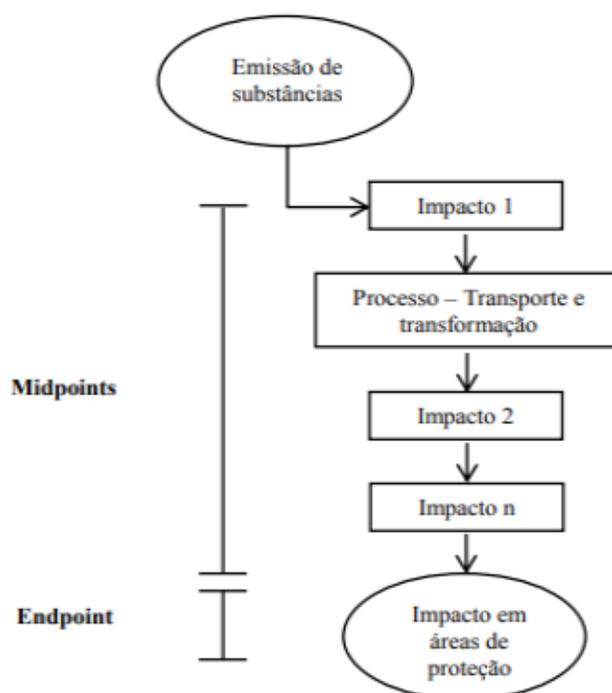
Fonte: Adaptado de ABNT (2014b).

A terceira etapa pode ser desenvolvida utilizando os métodos *midpoint* ou *endpoint*, esses métodos de caracterização são conhecidos como métodos para AICV (Figura 19). No nível *midpoint*, os impactos são entendidos como "problemas ambientais", como por exemplo as mudanças climáticas, já o *endpoint* são separados em categoria de danos, como a saúde humana.

Segundo Cavalett *et al.* (2012) todas as substâncias referentes a ACV são adequadamente agregadas em categorias de impactos, de acordo com uma característica comum no efeito do

mecanismo ambiental. Sobre a modelagem *endpoint*, esta consiste em caracterizar as consequências e a gravidade das categorias de impacto nas áreas de proteção, tendo sua quantificação feita no final das emissões, porém segundo Bare *et al.* (2000) o método *endpoint* são mais relevantes na tomada de decisão.

Figura 19. Categorias *midpoint* e *endpoint*, assim como as suas relações em uma ACV



Fonte: Adaptado de Finveden et al. (2009).

2.3.1 Estudos de ACV em usinas sucroenergética

Theodoro *et al.* (2020) avaliaram o impacto do ciclo de vida na produção de etanol, nas etapas do campo, colheita, transporte e fabricação de produto em uma destilaria independente ao qual o nome não foi exposto, tendo como foco os impactos que são liberados dos gases poluentes do ar. A análise foi realizada considerando uma produção de 200 dias com 24h de operação, desenvolvendo-se o escopo, o inventário e o estudo de análise. Foi calculado com o apoio da literatura e através da base de dados as avaliações de impactos do ciclo de vida do etanol, comparando o cenário atual da fabricação com cenários alternativos para cada etapa através da ferramenta SimaPro, a avaliação do impacto foi feita através do método IPCC 2013 GWP 20a.

Como o foco é a pegada de carbono, foram definidas as quantidades totais de área de cultivo, cana transportada e etanol produzido.

Pode-se observar que a etapa de cultivo e manejo foi de $3,4 \times 10^3$ kg CO₂-eq, para esta etapa o fator que determinou a emissão de CO₂ na atmosfera foi o uso de cal, herbicidas e inseticidas, além do combustível fóssil queimado pela maquinaria utilizada. A autora afirmou que a fertirrigação contribui para a diminuição de fertilizantes e a diminuição de CO₂. Para a etapa da colheita o valor encontrado foi de $9,6 \times 10^3$ kg CO₂-eq é o fator determinante foi a queima de combustíveis utilizando o maquinário para colher a cana. Para a etapa de transporte o valor foi de $6,2 \times 10^3$ kg CO₂-eq, o fator determinante foi a liberação de gases no ar através da queima dos combustíveis fósseis utilizados para transportar todas as cargas de cana até a destilaria.

Na Fabricação, o valor encontrado foi de $8,28 \times 10^3$ kg CO₂-eq, emitindo mais gases poluentes no ar, entretanto considera-se que na etapa de colheita há o fator de sequestro de carbono para a fotossíntese, que ajuda a equilibrar a emissão. Como esperado, a etapa de cogeração representa o maior ofensor categoria fabricação, com valor obtido de 5×10^3 kg CO₂-eq, representando cerca de 47,64% do valor total. Os resultados obtidos demonstraram que para a diminuição do uso de fertilizantes, a usina sucroenergética tem uma grande oportunidade para a utilização de seus subprodutos como a vinhaça e a torta de filtro.

Dias *et al.* (2021) realizou a análise do ciclo de vida da produção de etanol em uma usina sucroenergética, considerando a viabilidade econômica do biocombustível, do açúcar, da eletricidade e da geração de vinhaça. O autor utilizou uma revisão sistemática utilizando a base de dados scopus no período de janeiro de 1990 a agosto de 2021. A análise resultou em 442 publicações, das quais 344 são artigos, afirmando que houve um aumento de 81% no número de publicações nos últimos 10 anos. A ACV deste estudo considerou processos que podem gerar impactos ambientais, os resultados foram obtidos através do software GREET®, podendo-se observar que tanto nas emissões dentro do canavial quanto nas emissões urbanas há uma elevação no nível de gases de efeito estufa como CO₂, CH₄ e N₂O.

Tendo em vista, que os compostos voláteis estão presentes na atmosfera assim como os carbonos orgânico particulado que constituem elementos de poluição atmosférica, conforme Tabela 8.

Atrelado a isso, há uma elevada quantidade de água utilizada durante o plantio, o que torna necessária a busca por alternativas para a irrigação dos canaviais. Uma das alternativas

previamente apresentadas, e que apresenta bons resultados, é a fertirrigação utilizando a vinhaça gerada durante o processo de produção do etanol.

Tabela 8. Cálculo das emissões de gases poluentes

Emissões Internas		Recursos		Emissões Urbanas	
Gases	Resultados	Materiais	Resultados	Gases	Resultados
CO ₂	231 g	Água total	2,49 x 10 ¹² km	CO ₂	18,9 g
COV	3,39 g	Petróleo bruto	1,94 MJ	COV	0,0122g
CO	0 g	Gás natural	2,66 MJ	CO	0,0141 g
NO ₂	3,33g	Carvão	6,93 x 10 ² MJ	NO ₂	0,0289 g
MP10	3,53g	Resíduo florestal	1,39 x 10 ¹ MJ	MP10	2,38 x 10 ³ g
MP2,5	1,24 g	Coque de petróleo	2,08 x 10 ³ MJ	MP2,5	1,86 x 10 ³ g
SO ₂	0,814g	Renováveis	6,93 x 10 ⁴ MJ	SO ₂	0,0113 g
CH ₄	2,31 g	Urânio	2,02 x 10 ¹⁰ t	CH ₄	0,0217 g
N ₂ O	8,98 g	Hidroelétrica	3,46 x 10 ¹ MJ	N ₂ O	5,13 x 10 ⁴ g
BC	1,73 g	Energia Nuclear	2,12 x 10 ² MJ	BC	2,31 x 10 ⁴ g
COP	0,404 g	Energia Geotérmica	6,93 x 10 ⁴ MJ	COP	4,57 x 10 ⁴ g
		Energia Solar	6,93 x 10 ⁴ MJ		
		Energia Eólica	6,24 x 10 ³ MJ		
		Cana-de-açúcar	8,41 MJ		
		Betume	1,85 x 10 ¹ MJ		
		Óleo de xisto	1,85 x 10 ¹ MJ		

Fonte: Adaptado de Dias *et al.* (2021).

Vilela (2013) analisou o desempenho ambiental e energético, para propor soluções ecoeficientes a um modelo industrial utilizando a ACV (Avaliação do ciclo de vida) na usina Jalles Machado S/A, a usina tem uma capacidade produtiva de 573 t/h. As categorias de impactos ambientais avaliadas foram as de Potenciais de Aquecimento Global e Depleção Abiótica de recursos fósseis. Os balanços se basearam no sistema de impacto ambiental CML 2001, atualizado em 2011, respectivamente Global Warming Potential (GWP 100 years). Analisando as proporções de CO₂, nota-se que a cogeração é responsável pela maior emissão (78,92 %) e que se apresentou balanço negativo na etapa de venda energia (-2,26 %), resultado relacionado a quantidade de emissões evitadas, devido ao não uso de energia proveniente do mix brasileiro de eletricidade. Os dois primeiros casos estão relacionados ao consumo de petróleo devido ao transporte, já o último caso está relacionado ao não uso de uma certa proporção de fontes fósseis incluídas no mix brasileiro de geração de eletricidade

A pesquisa realizada por Vilela (2013) mostrou que a cogeração de energia foi a etapa que mais impactou em todos os quesitos estudados ao longo da produção industrial sucroenergética, assim como consumo de água, utilização de vapor, consumo de eletricidade e geração de emissões, conforme demonstrado no Tabela 9. Ao final do estudo, realizou um comparativo entre produtividade, balanço de CO₂ e quantidade de energia vendida para os cenários avaliados.

Tabela 9. Balanço de emissões de GWP por etapa produtiva.

Elos da cadeia produtiva	Etapa produtiva	GPW / kg CO ₂ -eq/t
Processo industrial, armazenamento de produtos e fornecimento de insumos	Fermentação	27,65
	Geração de vapor	219,24
Distribuição de produtos	Recepção	4,59
	Tratamento de água	0,07
	Tratamento do Caldo	21,35
	Armazenamento de vinhaça	1,12
	Distribuição de açúcar	2,12
	Distribuição de etanol anidro	0,28
	Distribuição de etanol hidratado	0,38
	Distribuição de levedura seca	0,02
	Torta de filtro	0,62
	Uso de diesel	0,39
Processo auxiliar	Energia vendida	271,52

Fonte: Adaptado de Vilela et al. (2021).

2.4 - Dimensionamento das operações unitárias na indústria sucroenergética

A primeira etapa da produção do açúcar, etanol e bioenergia, consiste na análise de parâmetros:

- 1) Fibra da cana, FC - Porcentagem de fibra da cana-de-açúcar- São representadas pelos sólidos insolúveis, que é a matéria que não se solubiliza, contida na cana e no colmo da cana, tem estrutura frágil e fina que forma as células isodiamétricas de estocagem do caldo, com alto teor de sacarose.
- 2) Teor de sacarose aparente na cana, POL -Para a indústria canavieira, quanto mais elevados os teores de sacarose, melhor.

- 3) Brix da cana, BC - O Brix é a porcentagem peso total/peso dos sólidos solúveis, contidos em uma solução pura de sacarose, ou seja, é a porcentagem aparente de sólidos solúveis contidos em uma solução açucarada impura.
- 4) Pureza, PR – Porcentagem de sacarose contida nos sólidos solúveis ou matéria seca. Pode ser determinada pela relação $POL/Brix \times 100$. Quanto maior a pureza da cana, melhor a qualidade da matéria.
- 5) Açúcares redutores totais, ART - indica a quantidade total de açúcares da cana (sacarose, glicose e frutose).

2.5 Processo de extração do caldo

No processo de moagem, o objetivo é extrair o máximo de caldo por meio de sucessivos esmagamentos da camada de cana preparada. Antes da matéria-prima entrar no 1º terno de moagem, a cana passa pelo preparo que consiste em abrir a fibra, romper o maior número possível de células que armazena o caldo utilizando, os equipamentos como picadores e desfibradores. Nesse processo entram no 1º terno de moagem 297 t/h de cana de açúcar, no primeiro estágio a cana possui 39,03 t/h de fibra, após a cana ser triturada, são produzidos 257,97 t/h de caldo, denominado caldo absoluto, que contém toda a água da cana e os sólidos dissolvidos.

No primeiro terno da moenda a água de embebição não é adicionada, dessa forma são obtidos 166,91 t/h de caldo extraído. Do primeiro terno de moagem saem 130,09 t/h de bagaço e 39,03 t/h de fibra.

Do segundo terno de moagem são extraídos, 11,83 t/h de caldo por cento de cana, simultaneamente é adicionado 129,24 t/h de água de embebição, produzindo de caldo misto 141,06 t/h. Após a moagem no segundo terno são produzidos 118,26 t/h de bagaço.

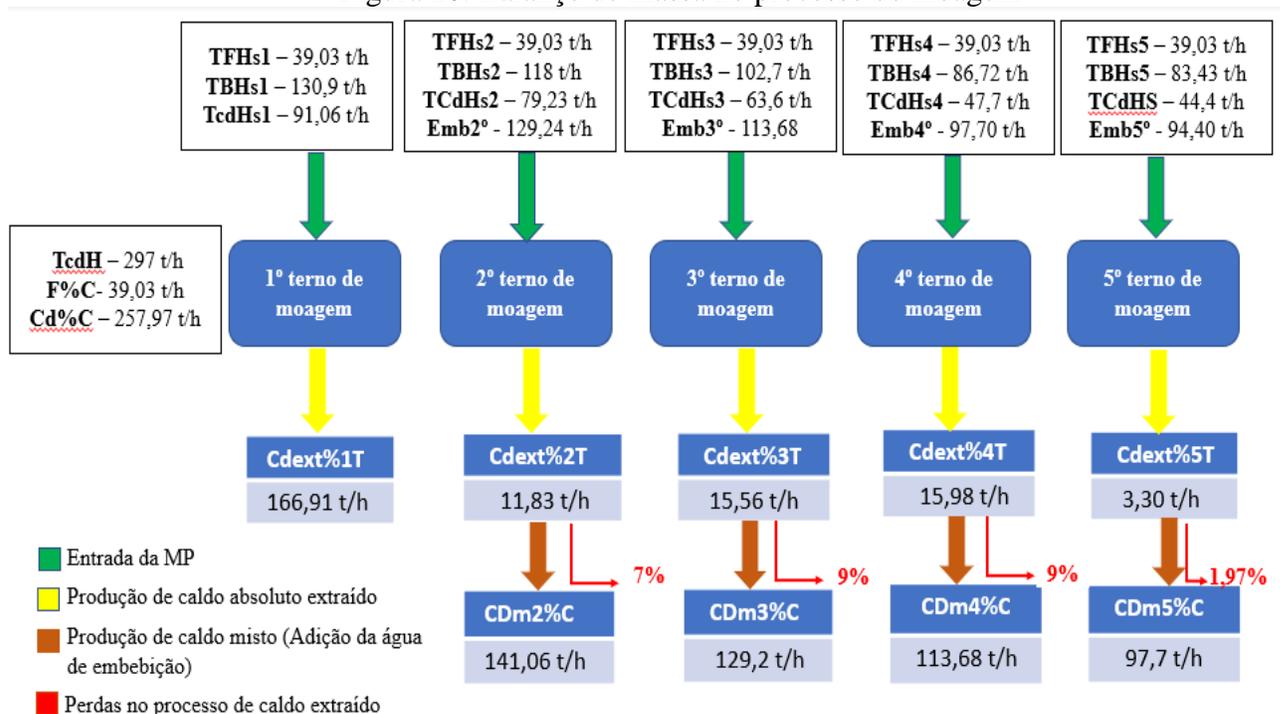
Do terceiro terno de moagem são extraídos, 15,56 t/h de caldo por cento de cana, simultaneamente é adicionado 113,68 t/h de água de embebição, produzindo de caldo misto 129,24 t/h. Após a moagem no terceiro terno são produzidos 102,70 t/h de bagaço.

Do quarto terno de moagem são extraídos, 15,98 t/h de caldo por cento de cana, simultaneamente adiciona-se 97,70 t/h da água de embebição, produzindo de caldo misto 113,68 t/h. Após a moagem do quarto terno são produzidos 86,72 t/h de bagaço.

Do quinto terno de moagem são extraídos, 3,30 t/h de caldo por cento de cana, simultaneamente é adicionado, 94,40 t/h de água de embebição, produzindo de caldo misto 97,70 t/h. Após a moagem no quinto terno é produzido 86,72 t/h de bagaço.

A Figura 20 mostra o balanço de massa obtido do processo de moagem, onde F%C refere-se à fibra por cento de cana, Cd%C é o caldo absoluto por cento de cana, F%Bc é a fibra do bagaço por cento de cana, TFHs refere-se a tonelada fibra por hora, TCdHs refere-se a tonelada de caldo por hora, Cdext%C é o caldo extraído por cento de cana, Cdm%C é o caldo misto por cento de cana, e AE%C é a água de embebição por cento de cana

Figura 20. Balanço de massa no processo de moagem



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A eficiência da extração do caldo na usina chega a 97% no 1º terno, e a umidade final do bagaço em torno de 50,37%. Considerando valores de referência e adicionando a água de embebição, a extração pode chegar de 94 a 97%, com 50% de umidade do bagaço final (LOPES, 1986). A umidade do bagaço reduz a eficiência energética da combustão, quanto maior a umidade menor a capacidade de geração.

O caldo misto extraído pelas moendas, possui entre 13 e 16 Brix, começa a ser purificado já na saída, através da peneiragem, que tem a finalidade de retirar todos os sólidos insolúveis que estão no caldo, como pedaço de bagaço, palha e cana.

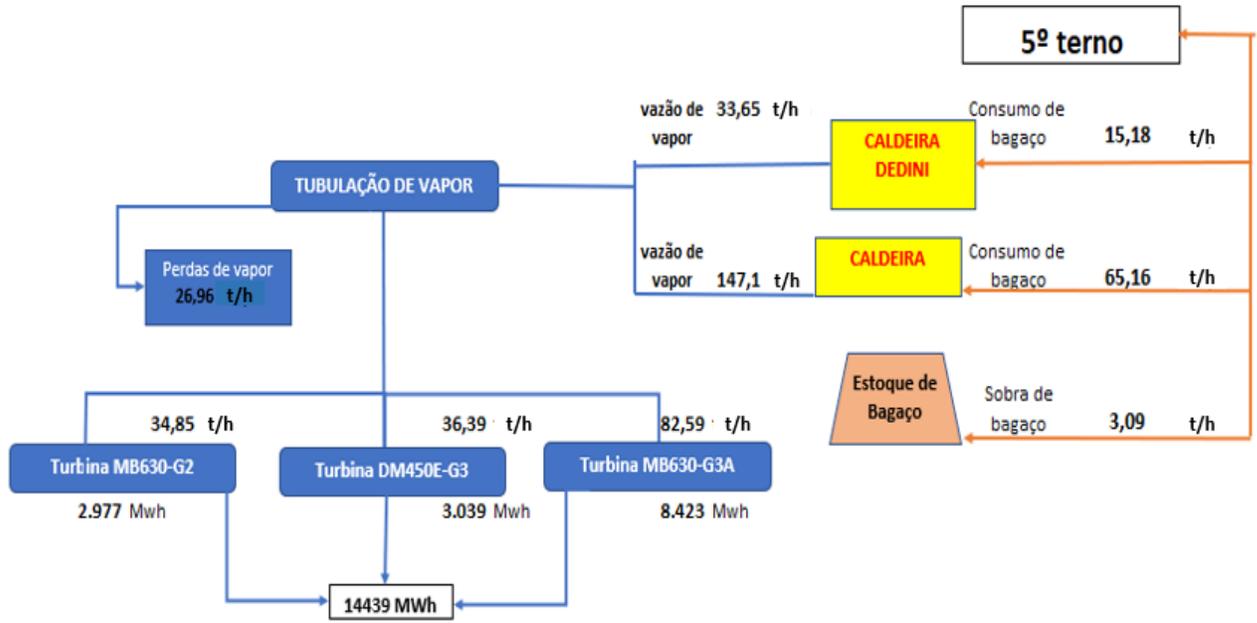
O controle no tempo de moagem é importante para o gerenciamento da usina, pois é necessário entender o motivo das paradas e criar plano de ação para realizar as medidas corretivas. O aproveitamento do tempo de extração de caldo é essencial para avaliação do trabalho operacional da extração de cana. Na safra 2021/2022, houve o aumento de 2,22% de tempo aproveitado, com 93,80% de eficiência comparado a safra de 2021/2022.

2.6– Geração de energia mecânica e térmica

Após o bagaço sair do 5º terno de moagem segue para a geração de energia. A usina tem duas caldeiras aquatubulares, a primeira tem um consumo de bagaço de 15,18 t/h e gera uma vazão de vapor de 33,65 t/h, já a segunda caldeira tem um consumo de bagaço de 65,16 t/h produzindo uma vazão de vapor de 147,1 t/h. O bagaço excessivo é transportado para o pátio, pois é utilizado quando a usina estiver com falta de matéria-prima ou quando não for suficiente para manter o fluxo de moagem. A usina possui um sistema de captação de água, pois é necessário que ela seja desmineralizada e desaerada, para evitar transtornos com acúmulo de material fortemente aderido, sobre a superfície da caldeira, por exemplo as incrustações. A geração de energia é impactada pela descontinuidade do processo, qualidade do combustível, qualidade da água e eficiência dos geradores de vapor.

A perda de vapor nas duas caldeiras é de 26,96 t/h. O vapor gerado passa pela tubulação que alimenta as três turbinas, a turbina MB630-G2 com um consumo de vapor de 34,85 t/h e geração de 2.977 MWh. A turbina DM450E-G3 com consumo de 36,39 t/h e geração de 3.039 MWh. E a terceira turbina MB630-G3A consumo de 82,59 t/h e geração de 8.423 MWh. O total de eletricidade produzido é de 14.439 MWh, conforme esquema da Figura 21.

Figura 21. Fluxo de matéria e energia para o processo de geração de eletricidade na usina



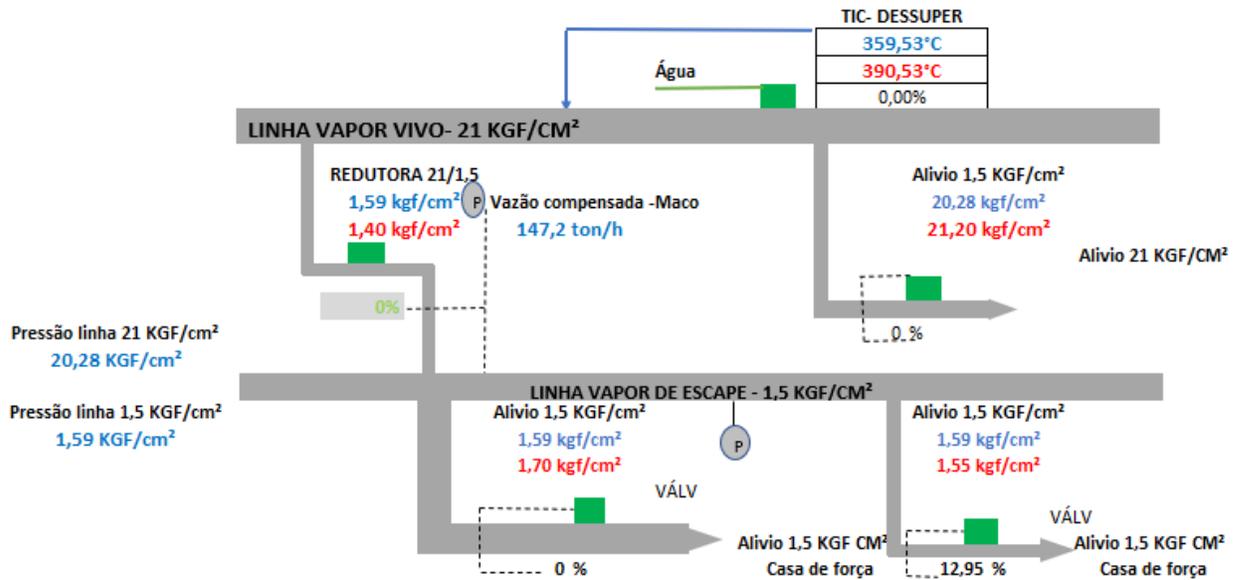
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Utilizando o bagaço residual de 3,09 t/h na produção, a usina conseguiria produzir 555 MWh a mais, ou seja, 14.994 MWh. O calor residual que sai das turbinas pode ser utilizado no processo produtivo. O vapor é gerado a 21 kgf/cm² e 360°C (Vapor superaquecido) e liberado a 1,5 kgf/cm² e 130°C (Usado no pré-evaporador), as turbinas acionam alguns componentes da usina como os picadores, desfibradores, as moendas e os geradores de energia.

Em relação a água de alimentação das caldeiras, esta deve ser desmineralizada e 100% pura, e para isto é necessário passar por um desaerador, que é responsável pela remoção de oxigênio e outros gases dissolvidos na água de alimentação, para os geradores de vapor, e faz parte do sistema de aquecimento de água de alimentação. A Figura 22 mostra o balanço de energia para a produção de vapor na usina estudada.

A cogeração utilizada nas usinas é do tipo Topping que utiliza a biomassa para produzir energia usando as turbinas a vapor de contrapressão. O vapor que sai das turbinas (vapor de escape) possui calor residual para ser utilizado em um processo produtivo.

Figura 22. Fluxograma produção de vapor na Usina



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A usina é autossuficiente em produção de geração de energia, comercializando 3MW/h para vendas concessionárias. Assim, considerando a autossuficiência, as diversas medidas capazes de aumentar a produção de energia elétrica promoveriam a importante função de geração de excedentes de energia para o setor elétrico.

No período de 14 dias na safra 2022/2023 foram exportados 1.338 MWh e na safra 2021/2022 foram exportados 1.351 MWh. A usina não informou os preços da comercialização vendido e comprado durante a safra anterior.

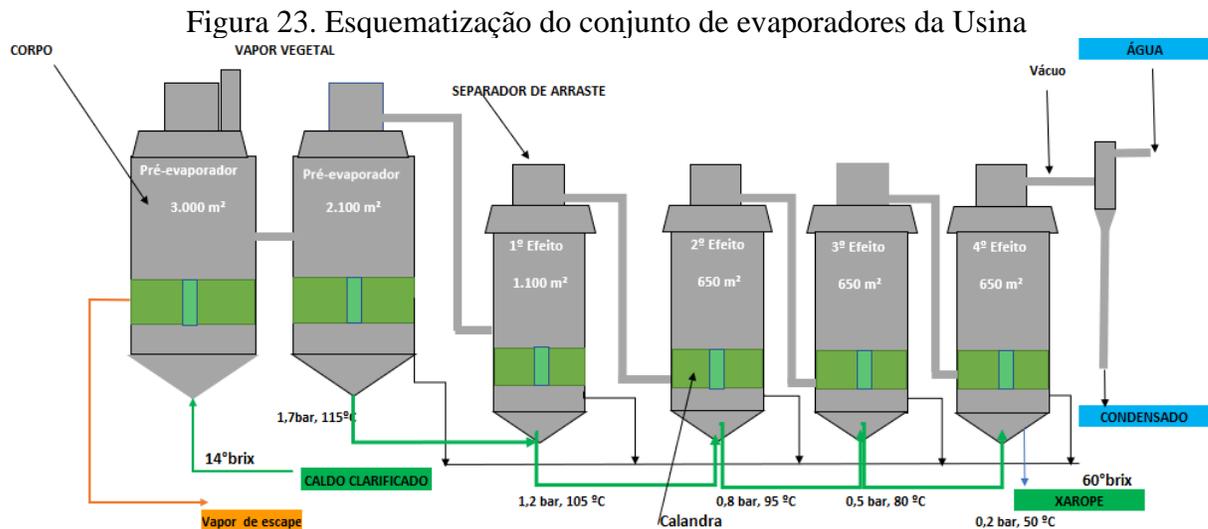
2.7 Processo de aquecimento

A usina estudada possui cinco aquecedores de caldo, um encontra-se em stand by e quatro em operação, antes de entrar no aquecedor o caldo está a uma temperatura entre 38°C e 45°C e é aquecido até chegar a uma temperatura de 105°C a 110°C, com a finalidade de acelerar as reações químicas e facilitar a reação do caldo, diminuindo a viscosidade, provocando a floculação, eliminando e impedindo o crescimento das bactérias.

2.8 Processo de evaporação do caldo

O setor de evaporação, é composto por dois pré- evaporadores e quatro efeitos, o caldo circula por meio de tubos. Nessa etapa o caldo entra com o Brix de 14°C e é liberado com 60°C. O 2º evaporador recebe o calor do efeito anterior. No primeiro efeito entra o vapor de escape, que é condensado e transferido para o caldo dentro dos tubos, evaporando a água.

Os evaporadores da usina são principalmente formados por uma calandra tubular que serve como trocador de calor, o vapor de aquecimento envolve os tubos externamente e o caldo a ser evaporado está no interior do tubo. O vapor entra na calandra com uma temperatura e pressão fixa, condensa, livrando o calor latente. A Figura 23 mostra o esquema do conjunto de evaporadores da Usina.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

2.9 Processo de cozimento de caldo e centrifugação

O processo de cozimento constitui o primeiro estágio de concentração do caldo tratado, onde o caldo torna-se grosso e amarelado contendo cerca de 85% de água, que é evaporada. A usina tem sete cozedores, um de 180hL e seis de 250hL.

O setor de centrifugas da usina é composto por oito centrifugas 1 da marca TGB (Com capacidade de 450 kg/ciclo cada). A capacidade de massa cozida no cesto da centrifuga é de aproximadamente 1.000 kg por carga, com uma velocidade de centrifugação de 1.170 rpm, podendo centrifugar até 500 kg de açúcar por ciclo.

O Processo de cozimento requer várias atenções, entre elas: o monitoramento do magma no processo de cozimento, pois o magma serve para o crescimento dos cristais de açúcar, por isso é importante realizar os ajustes na granulometria no cozimento. O preparo e conservação das sementes é outro ponto importante na cristalização, pois o processo de preparação de semente no laboratório deve seguir procedimentos simples que buscam uniformizar a semente preparada, para que se atenda as características do açúcar final, como exemplo: Cor, brilho, uniformidade dos grãos e que não se produza pó durante o processo de secagem.

A continuidade do processo de moagem é fundamental para melhorar a eficiência, principalmente da evaporação, que pode contribuir ou prejudicar o balanço térmico e qualidade do açúcar produzido. A cristalização e cozimento são influenciados pela qualidade da semente e do magma, do brix e das impurezas presentes no xarope e nos méis, além da pressão do vapor e da água com baixa temperatura nas colunas barométricas para manter um vácuo adequado nos equipamentos.

2.10 Processo de fermentação e destilação

A fermentação é o ponto chave para se ter o controle da reação biológica, que ocorre durante o processo fermentativo, essa reação é quando a glicose, frutose e sacarose são convertidos em energia celular. Na Usina inicia-se o processo de produção de etanol com o fermento e finaliza-se com o mesmo fermento, ou seja, não há troca e não há renovação do fermento, garantindo uma menor reposição das leveduras, que já estão adaptados ao meio, esse processo é conhecido como Melle-Boinot, nessa operação ocorre a recuperação das células por centrifugação. A atividade das leveduras desempenha maior função nas temperaturas de 32° a 34°C. Quando a usina identifica a acidez elevada é realizada uma injeção de levedura novas.

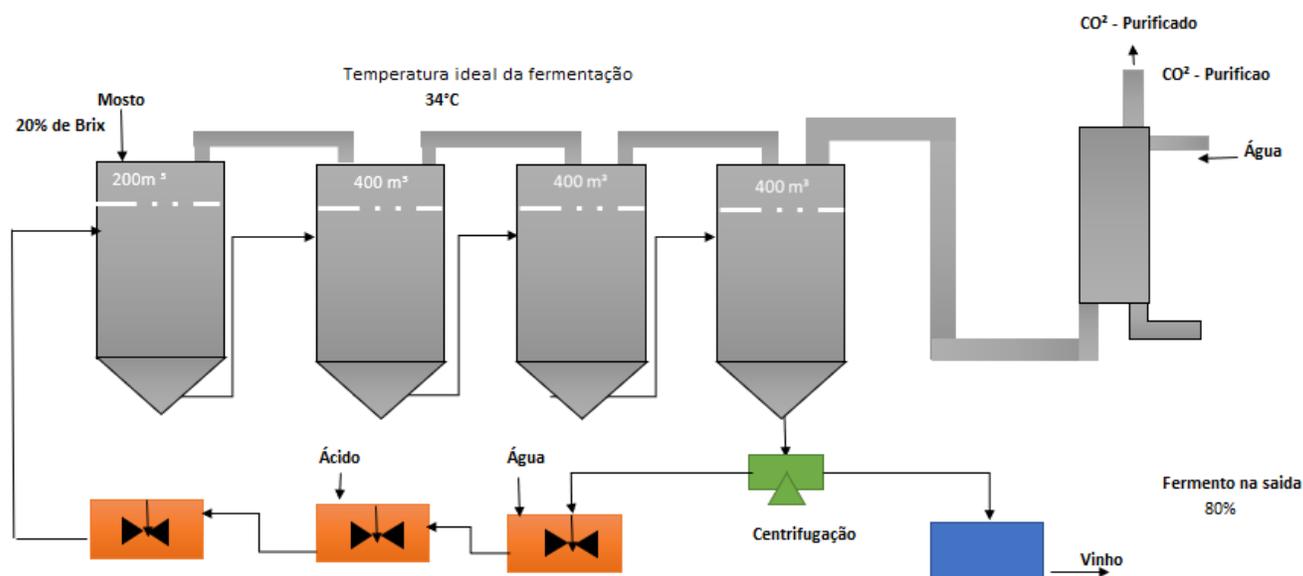
A fermentação é controlada pelo Brix° de alimentação, 20% do caldo que está sendo extraído da moenda é direcionado para produção de etanol, onde realiza-se a mistura do mel final com água. A dorna de fermentação é alimentada com 18 a 20° de Brix, esse Brix é o que vai determinar o teor alcoólico da fermentação. A reação de fermentação é exotérmica, onde é liberado calor. Cada dorna tem seu trocador de calor refrigerado com água, para manter a fermentação em temperaturas ideais, sendo a temperatura ideal na faixa de 34°C.

Caso seja necessário realizar a assepsia da fermentação, é adicionado o ácido sulfúrico, que também é um agente para acabar a contaminação de bactérias e manter a levedura em condições

para operar. A levedura estará recirculando e apta para receber os nutrientes. Ao sair da centrífuga, a levedura vai separar o leite puro que é o fermento do vinho. O vinho gerado é encaminhado para as colunas de destilação, onde passará pelo processo final da produção de etanol. O vinho é uma mistura hidroalcolica, sendo os principais componentes o etanol e a água. Conforme Figura 24 cada dorna de fermentação tem capacidade para 400m³.

A parte fermentativa, é uma das etapas mais importante, porque a qualidade da matéria prima pode prejudicar consideravelmente o rendimento da produção. Portanto, ela deve apresentar um baixo índice de contaminação bacteriana. O fermento também deve ser tratado com quantidades de nutrientes e agentes bactericidas suficiente para resistir a vários ciclos fermentativos. Com a reação de fermentação ocorre a liberação de calor, por ser uma reação exotérmica é fundamental o controle da temperatura para não favorecer a multiplicação de bactérias termofílicas, que consomem o açúcar que seria convertido em etanol.

Figura 24. Processo de Fermentação para produção de Etanol



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O vinho liberado da centrífuga (mosto fermentado com 7% de etanol) é bombeado para coluna de destilação A, o teor alcoólico do vinho produzido é de aproximadamente 9°GL. O ponto de ebulição da água (100°C) e do etanol (78,4°C) se baseia no princípio da destilação.

A coluna de destilação é dividida em três partes: coluna A, A1, coluna D. A coluna A constitui a primeira etapa da produção de etanol. A seção A possui entre 18 e 24 bandejas e é responsável pelo esgotamento do vinho. No topo da seção A1 o vinho é alimentado, e obtém-se a mistura hidroalcoólica procedente da fermentação, possuindo um nível de concentração de etanol entre 6 e 12 %v. O vinho é aquecido nessa seção que concentra a fase vapor e os componentes mais voláteis do processo, possuindo de quatro a oito estágios.

O vinho passa no primeiro condensador, que inclui um deflegmador, que recebe vapores alcoólicos da coluna B, chamada de Coluna de Retificação, onde a concentração da mistura atinge 96°GL. Quando o vapor alcoólico é liberado entra imediatamente no deflegmador e troca calor com o vinho. O vinho tem uma temperatura de saída de 32° a 35°C e aumenta até 70°C. Depois de retirado do condensador, o vinho segue para o trocador de calor, onde é aquecido com a vinhaça que é o resíduo da coluna A. Dessa forma, o vinho entra com 70°C, troca calor com a vinhaça e eleva sua temperatura até 95°C que é a temperatura de ebulição do vinho.

Em seguida, a coluna A é alimentada, o vinho entra a uma temperatura de 95°C, e desce bandeja a bandeja. O vapor de aquecimento (V1) aquece a base que está trabalhando a uma faixa de temperatura de 110°C a 112°C. O vinho entra nos compartimentos inferiores e os vapores alcoólicos sobem, enriquecendo à medida que vai subindo. A vinhaça, resíduo rico em potássio usado na fertirrigação, sai pela base da coluna A.

2.11- Processo de desidratação para produção do etanol anidro e hidratado.

Para produção do álcool hidratado, são utilizadas as colunas A, A1 e D. O vinho segue para coluna A1, mas antes passa pelo processo de aquecimento, onde acontece as trocas térmicas entre os vapores originados da coluna de retificação (Coluna B), trocando calor com a vinhaça que provém da coluna A. O vapor que sai da coluna A1 segue direto para a coluna D, onde os produtos voláteis são concentrados. Após passar pela coluna A1 o vapor é enviado para os condensadores, onde acontece a troca de calor com a água provenientes de torres de resfriamento, é nesses condensadores que ocorrem a extração do etanol com uma alta quantidade de água. A coluna B é alimentada pela flegma, produto que contém impurezas obtidas da primeira destilação do fermentado. Na parte superior da coluna B, os vapores que têm maior concentração de etanol são extraídos, obtendo assim o etanol hidratado.

Para obtenção do etanol anidro é necessário passar pelo processo de desidratação, para eliminar o que restou de água no etanol, e assim atingir um teor alcoólico de 99,3° INPM. Quando o álcool entra na coluna C, especificamente na bandeja 26, é realizada a injeção do composto ciclohexano. A Coluna C possui 42 estágios para aumentar a concentração de etanol. O ciclohexano separa a água do álcool que se caracteriza como destilação azeotrópica, ele é alimentado no topo e o etanol passa a desidratado um pouco abaixo.

Na coluna C o etanol anidro separa-se no fundo, e sustenta a mistura binária etanol-desidratante na parte intermediária e no topo a mistura azeotrópica ternária, etanol-água-desidratante. Os Condensadores H e H1 recebem o resfriamento contido na mistura ternária na Coluna C, na mesma coluna a fase orgânica é reaproveitada, enquanto para a coluna P a fase aquosa é direcionada. Nessa etapa ocorre a recuperação do desidratante e do etanol por destilação simples.

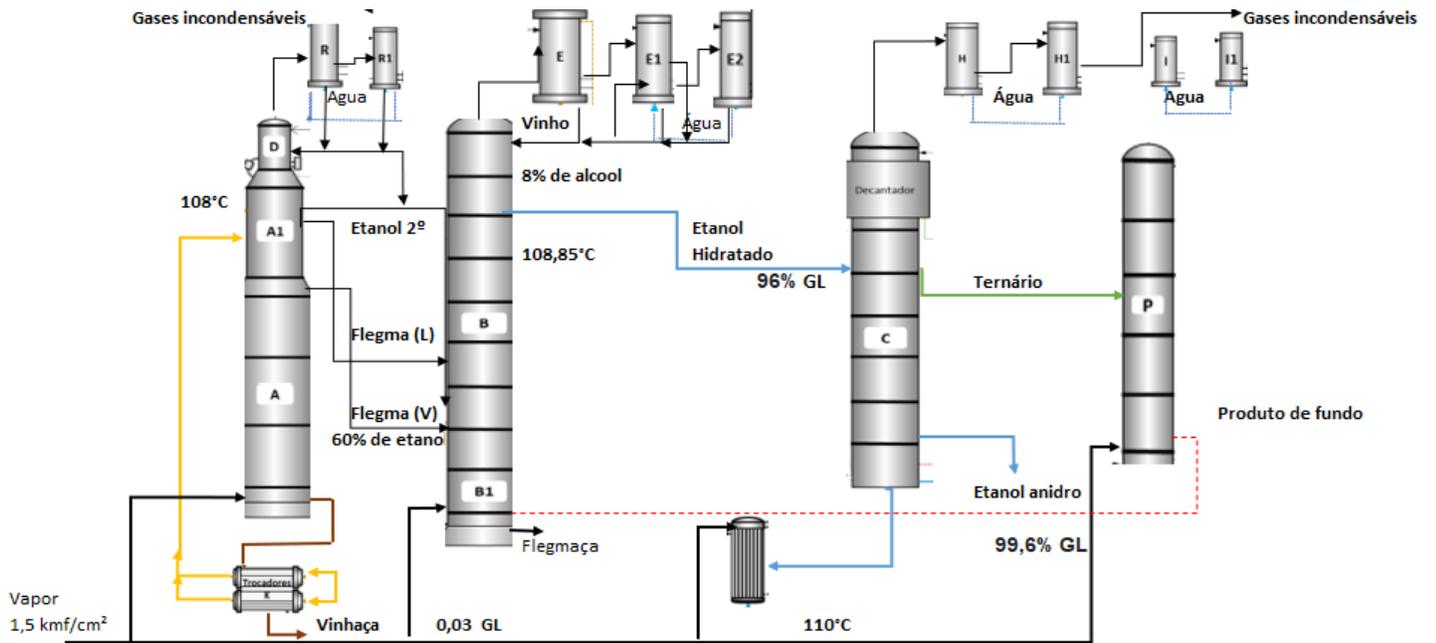
Na própria coluna retorna o condensado, para manter o fluxo e para manter a eficiência no processo de desidratação do etanol hidratado, a outra parte é encaminhada ao decantador. A água que contém etanol é retirada da base da coluna P, dessa forma, pode ser encaminhada para a base da coluna de retificação, visando evitar perdas de etanol.

A concentração do álcool de segunda acontece na seção D, onde são recebidos 10% dos vapores alcoólicos provenientes da seção A1, relacionado ao quantitativo da flegma vapor. Nos permutadores R e R1 os vapores do topo da coluna D são condensados, havendo defasagem dos elementos mais voláteis pelo processo de troca térmica, contracorrente com água de resfriamento. Logo após, ocorre a reciclagem do condensado e a outra parte é removida como etanol de segunda, mistura água e álcool com concentração entre 85 e 92 %m. Na base da coluna D é retirada a flegma líquida. O Processo complexo de purificação e concentração de etanol ocorre nas seções B1 e B.

Nos trocadores de calor E1 e E2, é realizado o processo de condensação, enquanto o condensador E, utiliza o vinho oriundo da fermentação para troca térmica por integração. Ao ser pré-aquecido, o vinho finaliza seu aquecimento nos trocadores de calor K, atingindo temperatura igual ou superior a 90 °C, impulsionando o ganho energético no processo de destilação, o antes de alimentar o topo da seção A1, conforme Figura 25.

Na destilação, é crucial uma estabilidade na pressão de vapor para evitar perdas na vinhaça e água com temperatura baixa para o sistema de refrigeração dos condensadores. O controle operacional também deve ser realizado por pessoas capacitadas para não comprometer a integridade dos equipamentos e o funcionamento da destilar

Figura 25. Processo de destilação para produção de Etanol



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Estudo de caso na Usina Sucroenergética

A pesquisa realizada nesse trabalho, pode ser definida como um estudo de caso. A tendência do estudo de caso é definir e esclarecer as decisões a serem tomadas, se tornando uma pesquisa exploratória, com o intuito de proporcionar uma maior familiaridade com a problemática e construção de hipóteses (GIL, 2007). Outro fator que caracteriza esse tipo de estudo é a coleta de dados dentro da organização, com o propósito de explorar e introduzir de forma mais detalhada o tema em questão.

3.2 Dimensionamento das operações unitárias para coleta de dados

A Análise do fluxo de materiais foi baseada em um fluxo de entrada de 291 t/h de cana de açúcar na moenda, e uma entrada diária de 7.000 t, com a fabricação ocorrendo durante 24 horas durante toda a safra.

O procedimento para a AFM consistiu em:

1) Definir a localização.

A indústria selecionada para o estudo de caso, foi uma usina sucroenergética localizada no estado da Paraíba, ao qual durante este estudo não identificamos, mediante termo de confidencialidade. A indústria pertence ao setor agroindustrial, mas apesar de ter acompanhado a evolução do mercado mundial, não adota metodologias estatísticas para acompanhamento das perdas. A ausência de aplicação de métodos faz com que a organização não tenha um conhecimento detalhado do processo. A coleta de dados ocorreu por meio de visitas técnicas, realizadas no dia 01 de setembro de 2022 das 8:00h às 12:00h e no dia 24 de outubro de 2022 das 8:00h às 9:00h, para conhecimento das fronteiras selecionadas.

2) Conhecer as fronteiras do sistema produtivo no espaço e no tempo.

A primeira etapa desse estudo, consistiu em analisar todas as operações unitárias do processo produtivo do açúcar, etanol e bioenergia, onde realizou-se um levantamento de dados para obter as informações do quantitativo de matéria-prima e energia, utilizada pelos equipamentos na produção de açúcar e etanol. Informações sobre a composição química da cana, foram obtidas por

meio de questionário aplicado aos setores de produção (Apêndice A) e informações sobre os principais fatores que impactam nas operações unitárias da usina (Apêndice B).

A usina tem uma área total de 13.400 hectares, dos quais 7.200 hectares é área cultivada e 6.238 hectares é área colhida. Na Safra 2019 foram moídas 846.000 t, sendo 412.000 t de cana própria e 434.000 t de cana comprada de fornecedores. A safra na usina ocorre nos meses de agosto a fevereiro e a colheita é realizada pelo corte semimecanizado, que abrange o corte manual e mecanizado.

A cana de açúcar vem do campo em veículos longos, chamados treminhão, tendo três carretas acopladas com capacidade de transporte de 45 t, medindo 19,8 m de comprimento e 4,40m de altura, contendo oito eixos, na lavoura, o treminhão desengata as carretas que são conduzidas por tratores-reboques até o equipamento que irá realizar o carregamento. Após carregadas, são devolvidas ao local de engate onde novamente são acopladas ao caminhão. Ao chegar na usina é realizada a pesagem do caminhão, assim como a retirada da amostra da cana. E é uma das operações mais importantes, pois é a partir dessa operação que o setor consegue administrar a sua produtividade.

3) Conhecer o balanço de massa entre os fluxos da fronteira selecionada.

A usina realizou um balanço de massa nos seus processos, desde a entrada da cana no processo de moagem, até a produção do produto. Todos os processos na fronteira selecionada foram observados, assim como investigados o total de entradas, saídas e estoques. Os fluxos de materiais foram rastreados desde o início (da extração do caldo contido na cana, até a saída do produto acabado, o açúcar, etanol e bioenergia). Mediante um balanço de massa realizado pela usina, foi obtido os valores que constam na Figura 26.

4) Selecionar o menor número de processos, que permite descrição completa de todos os fluxos e estoques necessário.

Uma vez determinados os limites de fronteiras, contabilizam-se os fluxos de entrada e saída do sistema estudado, as fronteiras selecionadas foram:

1. Processo de moagem.
2. Processo de produção de bioenergia.
3. Produção de caldo misto.

4. Produção de caldo caleado.
5. Filtração do caldo.
6. Processo de decantação.
7. Produção de xarope.
8. Produção do açúcar.
9. Produção do mosto fermentado.
10. Produção do etanol anidro e hidratado.

3.4 Objetivo, escopo e análise de inventário na construção da ACV

Para o desenvolvimento da ACV, utilizou-se o procedimento normatizado pela ISO 14040 da Associação Brasileira de Normas Técnicas, que consistiu em:

1. Foi realizada a definição dos objetivos de forma detalhada, assim como seu escopo.
2. Ocorreu a análise de inventário do ciclo de vida, onde realizou-se as coletas de dados.
3. Foi avaliado a significância dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto.
4. Considera-se todas as informações em conjunto e os procedimentos da ACV.

O software utilizado foi o SimaPro 9.3.0.2 (2022) com a base de dados Ecoinvent 3.8 (2021) para avaliar o desempenho ambiental, contribuindo com alternativas que mitiguem os impactos ambientais.

No software SimaPro®, a base de dados Ecoinvent foi selecionada por conter processos representativos da realidade brasileira, e por ser frequentemente atualizada. O método de avaliação de impacto ambiental utilizado foi o IPCC 2013 GWP 100a (2013), que quantifica as emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao longo de um horizonte temporal de 100 anos. Esse método expressa o impacto ambiental de diferentes GEE, numa métrica comum, em termos de CO₂-eq (utilizando os fatores de potencial de aquecimento global publicados pelo IPCC em seus relatórios).

A unidade funcional considerada foi a geração de 1 kWh de bioeletricidade na usina, a partir do bagaço de cana. A quantidade de bioeletricidade gerada diminui o consumo de eletricidade da concessionária, resultando em emissões evitadas. Para uma representação mais recente e adequada do mix elétrico brasileiro, a base de dados Ecoinvent (2021) foi adaptada seguindo a metodologia proposta por Carvalho e Delgado (2017). O mix elétrico mais recente disponível foi

considerado (Operador Nacional do Sistema, 2022): 63,35% hidroelétrica, 12,10% eólica, 11,49% gás natural, 4,37% biomassa, 2,77% carvão, 2,47% nuclear, 2,17% óleo combustível, e 1,29% solar.

No processo de geração de bioeletricidade a partir do bagaço de cana-de-açúcar (15,4 MJ/kg de bagaço seco), a base de dados Ecoinvent foi adaptada em relação ao teor de umidade do bagaço (o processo original considera umidade de 21%), todavia a umidade original do bagaço na usina é de 50%. O processo de geração de bioeletricidade a partir do bagaço de cana-de-açúcar, inclui os equipamentos necessários, a entrada de bagaço, as emissões atmosféricas e o descarte das cinzas, bem como as substâncias necessárias para a operação: óleo lubrificante, amônia, produtos químicos orgânicos, cloreto de sódio, cloro e água. A produção de cana-de-açúcar considerou uma plantação com uma vida útil de 5 anos e inclui os insumos da produção de 1 kg de cana-de-açúcar, assim como a plantação, gerenciamento, e limpeza da plantação.

O processo original também foi adaptado em relação ao uso de fertilizantes, herbicidas e pesticidas. A Tabela 10 descreve os valores utilizados na fertirrigação, e a Tabela 11 e 12 descreve as composições dos herbicidas e pesticidas.

Tabela 10. Análise de inventário- etapa: Fertirrigação

Descrição	Quantidade	
Utilização da vinhaça por hectare (m ³ /ha)	300	
1ª dosagem de NPK- Na fundação (%)	12-24-18	500 kg /ha
2ª dosagem de NPK- Na fundação (%)	11-00-27	500 kg /ha
1ª dosagem de MAP- Na fundação (%)	11-52-00	250 kg /ha
1ª dosagem de MAP- Na fundação (%)	10-00-30	400 kg /ha

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 11. Análise de inventário- etapa: Aplicação de Herbicidas

Descrição	Quantidade
Aplicação da água (L)	200
Clomazona (g)	500
Hexazinona (g)	250
Diurom (g)	11-52-00

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 12. Análise de inventário- etapa: Aplicação pesticidas

Descrição	Quantidade
Aplicação da água (L)	200
Fipronil (g)	500
Evidence (g)	700

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

O conjunto de dados inclui todas as operações de máquinas e as respectivas infraestruturas e galpões. Com relação ao plantio, considerou-se 40% mecanizado e 60% manual, tecnicamente denominado semimecanizado, por envolver operações manuais e mecanizadas. Esse alto percentual de colheita manual, se dá pelo fato de haver um relevo mais acidentado na região e pela disponibilidade de mão de obra. As operações de máquinas incluem o cultivo do solo, semeadura, fertilização, controle de ervas daninhas, controle de pragas e patógenos, transporte da colheita combinada do campo para a fazenda (1 km). Além disso, as emissões diretas do campo também estão incluídas.

Outro fator que será calculado é referente o excedente de bagaço estocado e comercializado, mostrando o potencial de utilização da queima do bagaço, devido sua importância por ser a biomassa brasileira mais representativa em relação a cogeração energética, para sua quantificação segue a Equação (4).

$$P_T = P_D \times D \tag{Eq.4}$$

P_T = Produção de bagaço na safra em toneladas,
 P_D = Produção de bagaço diário em toneladas/dia, e D = número de dias de produção
(aqui 117 dias foram considerados).

Para a identificação da quantidade de bagaço enviada para caldeira utiliza-se a Equação (5).

$$B_c = P_D \times H \times D \quad (\text{Eq.5})$$

B_c = Quantidade de bagaço enviada para caldeira em t/h, P_D = produção de bagaço diária em t/dia, e H_{prod} horas de produção (aqui se considerou 24 horas).

O bagaço excedente é quantificado pela Equação (6).

$$B_e = P_t - B_c \quad (\text{Eq.6})$$

3.4.1 – Análise de regressão para avaliação de cenários

A fim de evidenciar e destacar o melhor cenário para evitar as emissões de CO₂ na atmosfera, o modelo utilizado foi de regressão linear múltiplas. Os modelos de regressão são métodos estatísticos que tem a finalidade de observar e descrever o relacionamento entre as variáveis. Na regressão múltipla, envolvem situações com duas ou mais variáveis (MONTGOMEY, 2010).

A regressão linear pode ser do tipo simples ou múltiplas, a diferença está no número de variáveis explicativas, conforme equação 7.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \varepsilon_1 \quad (\text{Eq.7})$$

Onde:

- Y_i é o i -ésimo valor da variável resposta;
- β_0 e β_1 são os parâmetros (coeficientes de regressão);
- X_1 é o i -ésimo valor da variável preditora (é uma constante conhecida, fixo);

- ϵ_i é o termo do erro aleatório com $E(\epsilon_i) = 0$ e $\sigma^2(\epsilon_i) = \sigma^2$, sendo σ^2 a variância;

O modelo de regressão linear múltipla é dado pela Equação 8.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon_i \quad (\text{Eq.8})$$

Onde:

- $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ são os parâmetros (coeficientes de regressão);
- X_1, X_2, \dots, X_n são constantes conhecidas;
- ϵ_i são independentes com distribuição $N(0, \sigma^2)$;
- $i = 1, 2, \dots,$

O modelo expresso em (9) é um sistema de n equações, que pode ser expresso na notação matricial com

$$y = X\beta + \epsilon \quad (\text{Eq.9})$$

Onde:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_3 \end{bmatrix} \quad e \quad \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_3 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.10})$$

Em geral, y é um vetor ($n \times 1$) das observações considerada variável dependente, X é uma matriz ($n \times k$) dos níveis das variáveis independentes, β é um vetor ($k + 1 \times 1$) dos coeficientes de regressão e ϵ é um vetor ($n \times 1$) dos erros aleatórios. A matriz X é frequentemente chamada de matriz modelo.

Seguindo os conceitos apresentados acima, o procedimento para planejar cenários e avaliar impacto ambiental por análise de regressão seguiu as seguintes etapas.

1. Criar cenários através de planejamento de experimentos fatoriais;
2. Coletar dados de emissões de gases de efeito estufa;
3. Criar modelo de regressão das emissões em função dos fatores de impacto ambiental;

4. Avaliar fatores significativos e identificar níveis dos fatores que minimizam as emissões.

O modelo de regressão linear da variável dependente “emissões de GEE”, foi construído em função dos fatores umidade, fertilizante e pesticida. Os coeficientes do modelo foram obtidos usando a Eq. 7 do método de mínimos quadrados ordinários, utilizado para que a soma dos quadrados dos erros seja a menor possível.

$$CO2eq = 0,0943 + 0,0027Umidade + 0,002Fertilizante + 0,00012Pesticida + 0,00007Umidade * Fertilizante \quad (Eq.7)$$

Com objetivo de minimizar o impacto ambiental das operações, no passo 1 um planejamento fatorial de experimentos pode ser conduzido para avaliação de cenários. Sugere-se a definição de 2k experimentos, onde o impacto ambiental de k fatores é explorado. Considerando um estudo com 3 fatores em dois níveis (-1) Nivel baixo e +1(Nivel alto), a Tabela 13 mostra o planejamento experimental para avaliação de cenários.

Tabela 13 – Planejamento de experimentos fatoriais em dois níveis para criação de cenários

Cenário	X1	X2	X3	Ex'missões kg CO ₂ eq/kWh
1	-1	-1	-1	
2	1	-1	-1	
3	-1	1	-1	
4	1	1	-1	
5	-1	-1	1	
6	1	-1	1	
7	-1	1	1	
8	1	1	1	

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1- Composição tecnológica da cana de açúcar

A Tabela 14 mostra os resultados dos indicadores de qualidade da cana-de-açúcar obtidos da usina estudada, comparando-os aos valores apresentados nas referências bibliográficas. Os indicadores da cana têm relação direta com a análise de fluxo de materiais e na determinação das perdas no processo, principalmente a fibra com baixos teores, podem provocar danos mecânicos e perdas na indústria.

Tabela 14. Indicadores de qualidade da cana de açúcar

Indicadores de qualidade	Estudo de caso		Valores recomendados
POL	15,76%	>14	(Ripoli, 2004); (Santos, 2016)
PUREZA	84,79%	>85%	(Ripoli, 2004); (Santos, 2016)
ATR	16,5%	>15%	(Ripoli, 2004); (Santos, 2016)
AR	0,87%	<0,8%	(Ripoli, 2004); (Santos, 2016)
FIBRA	13,07%	11 a 13%	(Ripoli, 2004); (Santos, 2016)
UMIDADE	50,37%	50%	(Carvalho, 2020)

Fonte: Elaborado pela autora

A análise da Tabela 10, revela que a Pol da cana na usina estudada é de 15,76%. Como o valor recomendado pela literatura científica é acima de 14%, a usina estudada está em conformidade com esse parâmetro. A Pol é um indicador que quantifica a sacarose contida na cana.

A Pureza foi de 84,79%, de acordo com Santos *et al.* (2016) o valor recomendado deve estar acima de 85%. A usina estudada ficou ligeiramente abaixo do esperado nesse parâmetro, pois quanto maior a pureza melhor a qualidade da matéria-prima para se recuperar o açúcar.

O ATR neste caso, foi de 16,5% acima do valor de referência. Este indicador avalia a quantidade de açúcar presente na planta e define o retorno financeiro durante a safra, diante deste resultado demonstra que a usina está levando em consideração a variável de planejamento para realização da colheita.

Já o parâmetro AR apresentou um percentual 0,8% estando assim dentro dos valores recomendados. Os açúcares redutores não são comercialmente cristalizáveis, mas exercem

influência no processo de cozimento, este indicador determina a quantidade conjunta de frutose e glicose contida na cana de açúcar.

A Fibra da cana foi de 13,07% estando dentro do valor recomendado que é 13,00%. Quanto maior o percentual da fibra da cana, menor será a eficiência da extração, entretanto quando a fibra da cana está baixa, acama e quebra com o vento, perdendo açúcar na hora da lavagem.

A Umidade da cana está dentro do parâmetro recomendado pela literatura com 50,37%. A causa primária das perdas de energia nas caldeiras é o alto teor de umidade da cana, pois reduz o poder calorífico nela contido., em casos da umidade está fora do parâmetro ideal, causaria problemas nas etapas de produção de vapor e energia.

4.2 Análise do fluxo de material do processo produtivo sucroenergético

A Figura 26 mostra o resultado da AFM para o processo de produção de açúcar, etanol e bioenergia. Após a definição da localização do espaço e tempo definidos, o resultado do modelo permitiu compreender como se comporta uma produção que tem uma entrada de 7.000 t/dia de cana de açúcar, ou seja, em média 291 t/h.

Na moagem são adicionados 3.150.767 L de água de embebição, a temperatura de 80°C, a fim de evitar o desenvolvimento de microrganismos. Com a adição da água de embebição uma maior quantidade de açúcar pode ser recuperada, a produção do caldo totalizou 8.494.051L de caldo misto.

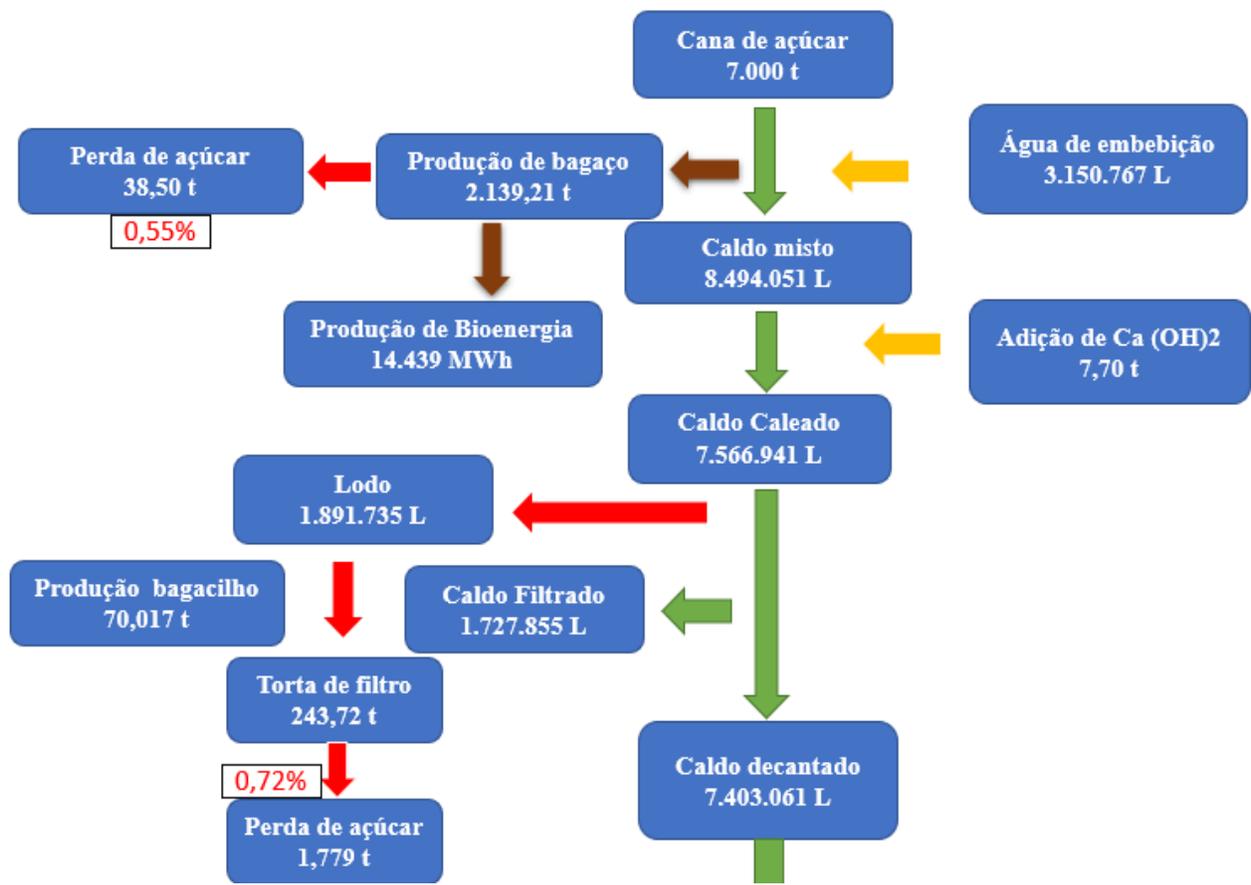
A perda de açúcar apresentada no processo de moagem foi de 0,55%, um total de 38,50t/dia, isto demonstra o quanto a Usina realiza um preparo adequado antes da cana entrar na moagem, pois o corte mecanizado carrega uma grande quantidade de impurezas minerais e fibrosas, como terra e pedras que colaboram diretamente para as perdas de açúcar, outro fator importante que influenciam a perda é o tempo de moagem, velocidade, energia e temperatura que são parâmetros essenciais que devem ser controlados.

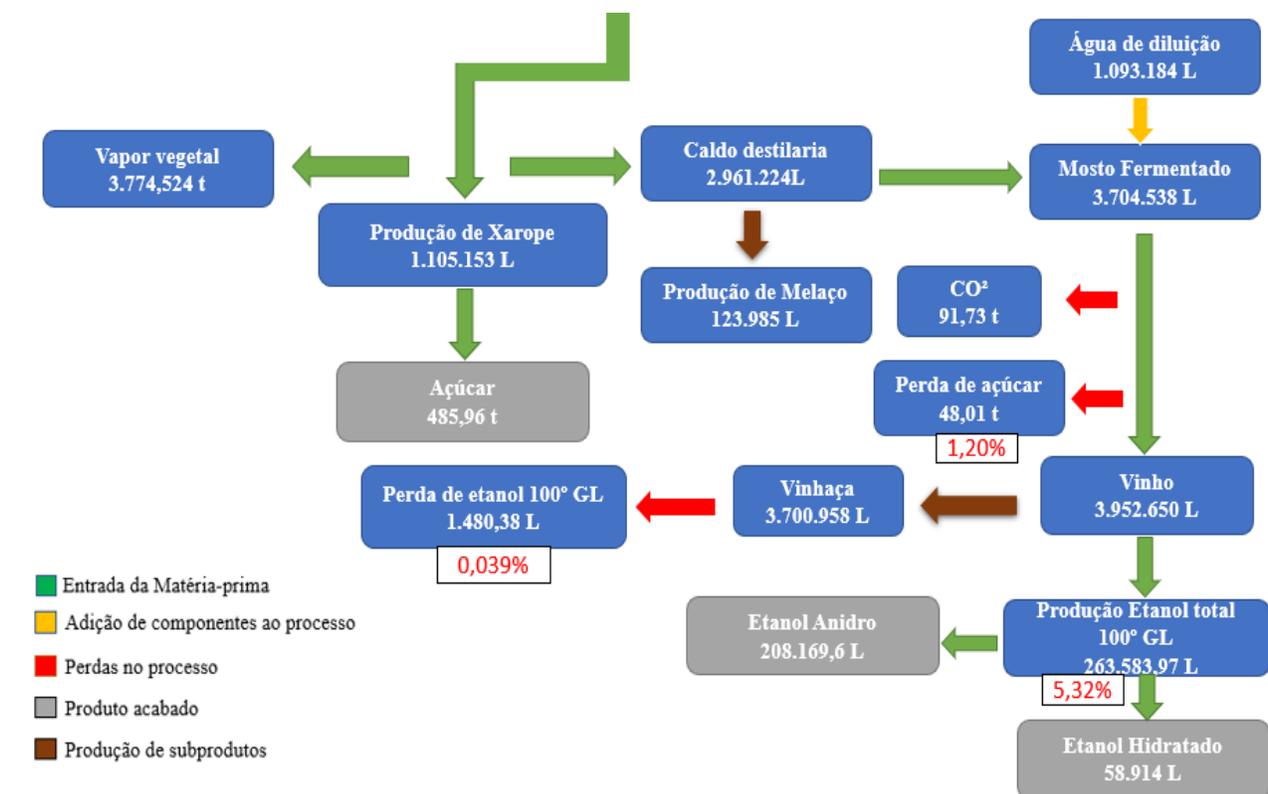
O processo de cogeração gera 647,04 t/dia de vapor perdido na caldeira, considerando que a geração de energia elétrica nos turbogeradores está diretamente associada ao fluxo de vapor dentro das turbinas, as medidas de controle e análise do bagaço final das moendas é de extrema importância, uma vez que há uma relação inversa entre a umidade e a eficiência energética.

A próxima produção de tratamento do caldo, foi de 7.403.061L, o material retido no filtro recebe o nome de torta e é enviado à lavoura para ser utilizado como adubo, neste caso a torta de

filtro chegou a 243,72 t, representando uma perda de açúcar na torta de 0,72%. Para auxiliar na filtração é adicionado bagacilho que nesse caso foi de 70,017t, objetivando recuperar o açúcar contido no lodo.

Figura 26 – Análise do fluxo de material na Usina Sucroenergética





Elaborada pela autora (2022).

Após o caldo ser decantado, segue para a produção de xarope, que ainda não é o açúcar, este é direcionado para os cozedores, na usina o total de xarope confeccionado foi de 1.105.153L. Após o término do cozimento, a massa que passou do estado líquido para o semissólido é descarregada nos cristalizadores, onde se resfria lentamente pela circulação de água em calandras, não há ganho ou perda de massa produzindo 485,96t de açúcar dia.

Na etapa de fermentação alcoólica a perda de açúcar foi de 48,01t, representando 1,20%. Que pode ser atribuído a falta de ajuste nas dornas, de forma que grandes concentrações de açúcar não prejudique a ação das leveduras, o ponto de atenção é referente aos reatores devido a contaminação por bactérias que consomem o açúcar destinado a leveduras.

Durante o processo do mosto fermentado ocorre uma intensa liberação de CO₂ pela parte superior dos tanques, mediante diferença de pressão o CO₂ irá para um reservatório, a perda de CO₂ foi de 91,73 t, seguindo a literatura de acordo com Martins *et al.* 2009, considerando todo o açúcar que a levedura utilizará como sendo a glicose, assim 100 kg do açúcar produzirão 51,1 kg de etanol e 48,9 kg de CO₂.

A próxima perda encontrada foi a perda do etanol na vinhaça representando 0,039%, totalizando 1.480,38L. A usina deve-se atentar ao fenômeno de inversão de pressão entre as colunas A e B, o que impede a saída da flegma vapor fazendo com que mais etanol esteja presente na coluna A, conseqüentemente retendo o etanol na vinhaça. A produção de etanol totalizou 263.583,97L, dividindo-se em Etanol anidro 208.169,6L com aproximadamente 99,7° GL e 58.914L de etanol hidratado com teor alcoólico mínimo de 92,6° GL.

4.3 Quantificação dos gases de efeito estufa

Considerando o mix de geração elétrica brasileiro e aplicando o método de Carvalho e Delgado (2017), obtém-se o valor para as emissões de GEE associadas ao consumo de eletricidade da rede elétrica brasileira (0,268 kg CO₂-eq/kWh consumido), distribuídas conforme a Tabela 15.

Tabela 15. Distribuição das emissões de GEE associadas ao consumo de kWh.

Fonte de energia – mix elétrico nacional	Emissões kg CO₂-eq
Hidroelétrica	0,05730
Eólica	0,00224
Gás Natural	0,08010
Biomassa	0,00650
Nuclear	0,00037
Carvão	0,06890
Óleo combustível	0,02870
Solar	0,00126
Perdas (transmissão, distribuição)	0,02263
Total	0,26800

Fonte: Elaborado pela autora a partir dos dados da ACV (2023).

Para o processo de geração de bioeletricidade da usina estudada, obteve-se 0,224 Kg CO₂-eq/kWh gerado. Esse processo leva em consideração as operações reais da usina (teor de umidade do bagaço, processo produtivo da cana-de-açúcar). Comparando ao mix elétrico nacional (0,268 kg CO₂-eq/kWh) e considerando-se o excedente de 3 MWh da usina, obtém-se de emissões evitadas, 132 kg CO₂-eq/kWh, ocorrendo porque quando se consome bioeletricidade, evita-se o consumo de eletricidade da rede elétrica. Mediante as emissões evitadas e considerando os 117 dias de produção, a usina tem a oportunidade de obter R\$ 53.745,12 em sua receita através da venda de crédito de carbono, considerando que quantidade de 1 crédito de carbono equivale a 1 tonelada

e o preço varia entre R\$ 75 a R\$ 145 (CREDCARBO, 2023), mas até o momento da pesquisa a usina não utiliza este benefício.

Observa-se que, essa quantificação de emissões evitadas, depende fortemente do mix elétrico que será substituído. À medida que recursos energéticos renováveis vão sendo inseridos nacionalmente, as emissões associadas a matriz elétrica brasileira vão diminuindo. Considerações a esse respeito foram feitas por Guillén-Lambea, Abrahão e Carvalho (2023) para o mix elétrico espanhol. Os autores ressaltam que, a quantificação das emissões evitadas é um processo dinâmico, que deve pensar em quais tecnologias geradoras serão substituídas num futuro próximo.

Outra maneira de afetar a quantificação das emissões evitadas, é alterar algum processo interno na produção de bioeletricidade. As emissões associadas a geração de bioenergia estão distribuídas como mostrado na Tabela 16.

Tabela 16: Emissões de GEE na geração de bioeletricidade na usina estudada (kg CO₂-eq/kWh).

Equipamento	Operação e Manutenção do equipamento	Produção do açúcar	Descarte	TOTAL
0,000682	0,006707	0,216300	0,000576	0,224265

Fonte: Elaborado pela autora a partir dos dados da ACV (2023).

Observa-se que, a maior parte das emissões está associada ao processo produtivo da cana-de-açúcar. Reafirmando as considerações realizadas por Vilela (2013) e Theodoro *et al.* (2020) de que a cogeração é a maior responsável pela liberação das emissões.

A Tabela 17, mostra a distribuição das emissões associadas à produção da cana-de-açúcar, necessária para geração de 1 kWh de bioeletricidade na usina (3,13 kg) de cana de açúcar.

Tabela 17. Distribuição das emissões associadas ao processo de cultivo cana de açúcar.

Emissões de Gases de Efeito Estufa (kg CO ₂ -eq)						
Fertilizante	Herbicida	Pesticida	Irrigação	Transporte/Tratores	Uso da terra	TOTAL
0.047418	0.004989	0.004405	0.101202	0.049469	0.008817	0.21630
(21.92%)	(2.31%)	(2.04%)	(46.79%)	(22.87%)	(4.08%)	

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Analisando a Tabela 17, verifica-se que a utilização de fertilizantes (vinhaça + NPK + MAP), herbicidas e pesticidas, contribuem com 26,27% das emissões finais associadas à produção de 3,13 kg de cana-de-açúcar. O maior contribuinte é a irrigação, que inclui não somente o volume de água aplicado, mas também toda a infraestrutura necessária. O terceiro maior contribuinte nesse cenário é a questão da utilização de maquinário a diesel, e por último a categoria de uso da terra.

A aplicação da vinhaça, reduz em 40% a aplicação de fertilizantes, os fertilizantes são adicionados no solo através da adubação, na falta de nutrientes são bons fornecedores e apresentam um alto desempenho na produtividade. Como outros trabalhos (Carvalho *et al.*, 2016; Neves *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2020 e Ağbulut *et al.*, 2022) já haviam identificado a importante contribuição dos fertilizantes, no impacto final de biocombustíveis.

Outra ACV foi realizada com o processo padrão Ecoinvent (umidade do bagaço 20%, utilização de fertilizantes NPK e Ureia, e uso de sulfonilureia, glifosato, atrazina, e 2,4D Norton). O resultado foi 0,152 kg CO₂-eq/kWh. Nesse caso embora se utilizem outros fertilizantes e agrotóxicos (em maior quantidade), necessita-se de muito menos bagaço para gerar 1 kWh de bioeletricidade (1,98 kg).

Com relação a eficiência da biogeração de energia, a umidade da cana é o parâmetro que mais influência significativamente no PCI. Quanto menor a umidade do bagaço, maior o poder calorífico interno, gerando um maior poder de queima. Silva *et al.* (2018) analisaram que a variação do brix não gera modificações no poder calorífico, variando a umidade de 0% a 50%. Desta forma, quanto maior o poder calorífico do bagaço menor a necessidade de bagaço queimado.

Focando em alta produtividade e eficiência, sugere-se que a umidade do bagaço deva estar mais baixa possível. Entretanto, se a caldeira aumentar sua temperatura em função do seu poder calorífico, trabalhará fora de suas especificações com redução de sua vida útil e riscos de acidente, pois irá extrapolar as especificações da temperatura máxima de vapor para operação das turbinas.

A Tabela 18, mostra as possibilidades de combinação de umidades de bagaço (setup1: 50% e setup2: 20%), e aplicação de fertilizantes. Neste caso, o setup será utilizado para testar os diversos cenários e possibilidades, a fim de encontrar potenciais ganhos e informar perdas, o setup1 representa os dados obtidos da usina, onde foi realizado este estudo, utilizando (umidade do bagaço 50%, e utilização do fertilizante NPK (Nitrato de Amônia: 24%, sulfeto de Amônia: 22% e para fechar a fórmula cloreto de potássio: 32%, a atrazina não é utilizada) e o setup2: padrão ecoivent

(umidade do bagaço 20%, e utilização de fertilizantes NPK e Ureia, e uso de sulfonilureia, glifosato, atrazina, e 2,4D Norton) convertidos em padrões estatísticos.

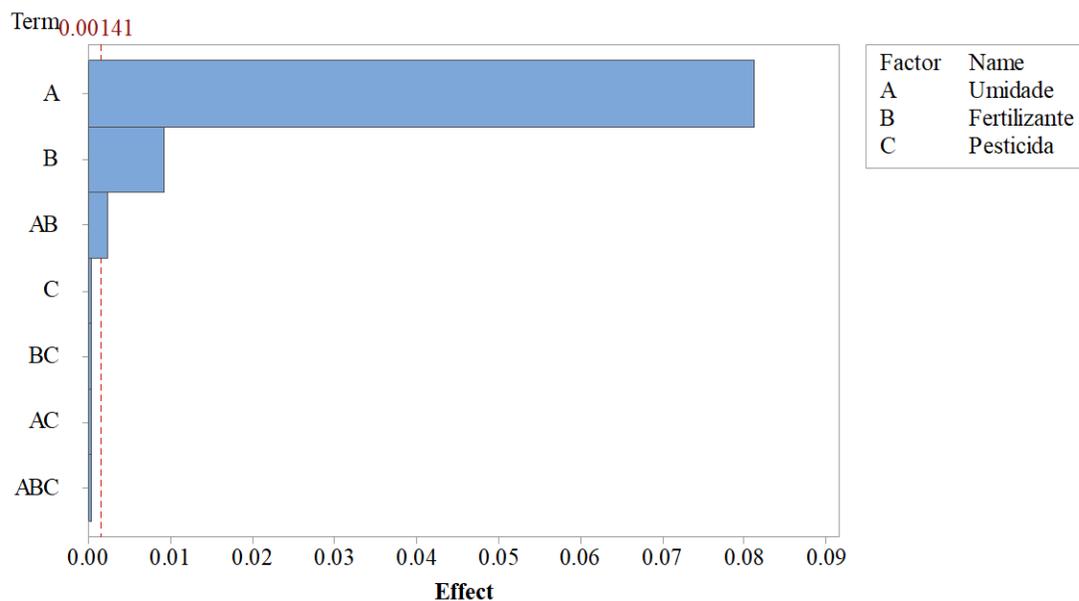
Tabela 18- Combinação de umidades de bagaço e aplicação de insumos agrícola

Cenário	Umidade %	Fertilizante	Pesticida	Emissões kg CO ₂ eq/kWh
1	20	Setup 1 (Usina)	Setup 1 (Usina)	0.145
2	50	Setup 1 (Usina)	Setup 1 (Usina)	0.224
3	20	Setup 2 (ecoinvent)	Setup 1 (Usina)	0.152
4	50	Setup 2 (ecoinvent)	Setup 1 (Usina)	0.235
5	20	Setup 1 (Usina)	Setup 2 (ecoinvent)	0.145
6	50	Setup 1 (Usina)	Setup 2 (ecoinvent)	0.224
7	20	Setup 2 (ecoinvent)	Setup 2 (ecoinvent)	0.152
8	50	Setup 2 (ecoinvent)	Setup 2 (ecoinvent)	0.236

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 27 mostra um gráfico de Pareto que destaca estatisticamente o efeito que cada fator (umidade, fertilizante e pesticida) provoca nas emissões de GEE, pois são levados para as caldeiras não apenas o bagaço, mas uma parte da palha também. Destaca-se, com 5% de significância, que a umidade é o fator mais significativo. Em seguida, o efeito de fertilizante e a interação umidade*fertilizante são os demais termos que determinam impacto significativo na variação das emissões de GEE. O fator pesticida e demais interações não são relevantes para explicar a variação da emissão dos GEE.

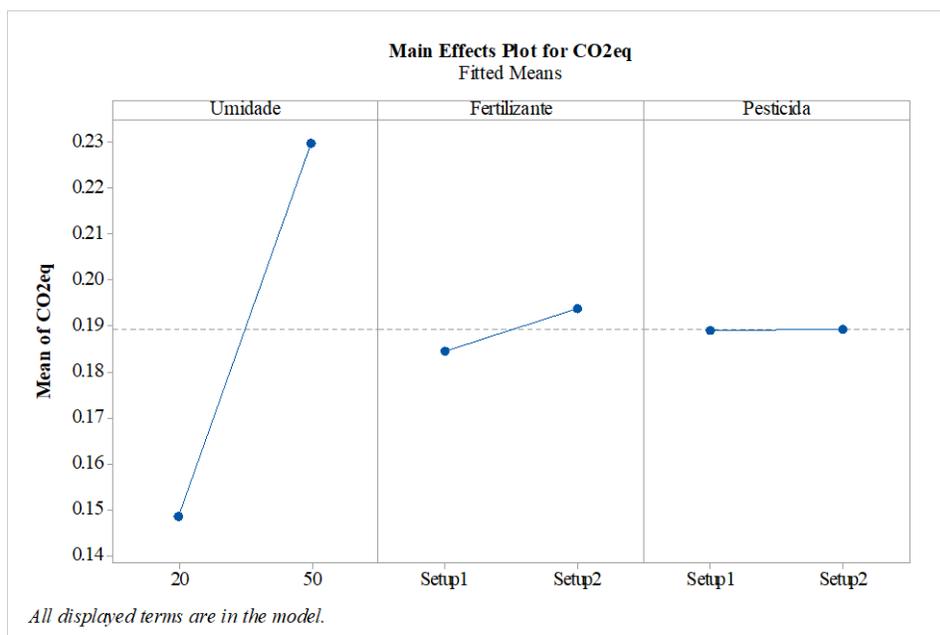
Figura 27 – Gráfico de Pareto dos efeitos de umidade, fertilizante e pesticida



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A Figura 28, apresenta gráficos de efeitos principais dos fatores com seus níveis operacionais. Observa-se novamente que a umidade é o fator mais relevante para modelar as emissões de GEE. Considerando o objetivo de minimizar as emissões de GEE, a melhor configuração para o sistema envolve baixa umidade combinada com o cenário de fertilizante. O fator pesticida não apresentou impacto relevante na variação das emissões de GEE.

Figura 28 – Gráficos de efeitos principais de umidade, fertilizante e pesticida (II)



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Também não há diferença de emissões entre os mesmos cenários, quando a umidade é 50%. Conclui-se que realmente a aplicação de diferentes fertilizantes repercute bastante no resultado das emissões, e que há pouquíssima influência dos herbicidas/pesticidas empregados. Essa observação deve ser analisada com extrema cautela, pois deve-se lembrar que o método IPCC 2013 GWP 100a quantifica as emissões atmosféricas de GEE. Há impactos ambientais extremamente danosos associados ao uso de herbicidas e pesticidas, no caso de emissões ao solo e à água.

4.2.1 Estudo sobre a eficiência e a gestão de estoque do bagaço

A usina produz aproximadamente 290 t de cana moída por hora, representando aproximadamente 820.000 t até o final da safra, resultando em 2.139 t de bagaço por dia. A resolução da Equação (4) quantifica a produção de bagaço total na safra com 250.286,40 t, e o resultado da Equação (5) determinou a quantidade de bagaço enviada para caldeira como 225.591,72 t. A quantidade de bagaço excedente é a diferença entre esses resultados, sendo calculado pela Equação (6) como 24.691,67 t, uma das desvantagens para o alto excedente de bagaço é a falta de espaço físico para a estocagem, formando grandes pilhas e mediante seu alto

teor de umidade, provoca ações microbianas deteriorando o bagaço excedente, gerando preocupação para a gestão da usina.

Outros trabalhos sobre a eficiência energética e gestão dos estoques de bagaço já foram realizados, entre eles Silva Segundo *et al.* (2016) realizou um estudo na usina AGROVAL (Paraíba) quantificando as emissões de bioeletricidade como sendo 0,227 kg CO₂-eq/kWh, e o estudo comparou essas emissões com as de uma termoeletrica local que emprega óleo combustível (0,900 kg CO₂-eq/kWh). Maués (2007), analisou o balanço energético de uma usina Sucroenergética onde foi verificada uma grande quantidade de bagaço excedente, existindo a oportunidade de produção de bioenergia. Avaliando o consumo médio brasileiro por residência Brasil (2022) é de 172,82 kWh/mês, a Tabela 18 apresenta um comparativo de energia produzida para cada excedente de bagaço de cana. Os autores Maués e Segundo consideraram o consumo médio de 152,2 kWh/mês.

Tabela 18. Comparação do excedente de bagaço e umidade do bagaço em três estudos.

	Maués (2007)	Silva Segundo <i>et al.</i> (2016)	Usina estudada (2022)
Cana processada (t)	2.000.000	700.000	820.000
Excedente de bagaço (t)	99.000	18.500	24.463
Umidade (%)	50%	50%	50%
Produção de bioeletricidade	19.682 MW	3.678 MW	4.918 MW
Quantidade de residência que podem ser abastecidas	129.316	24.165	28.457

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Observa-se que as umidades do bagaço são equivalentes, porém as quantidades de cana processada são maiores na usina estudada por Maués (2007), gerando mais bagaço excedente e abastecendo um número maior de residências, tendo em vista que no ano do estudo o consumo médio brasileiro por residência que o autor considerou foi de 152,2 kWh/mês. Houve aproximação dos resultados comparando o estudo do autor Silva Segundo *et al.* (2016) a este estudo, tanto na quantidade de cana processada quanto na produção de bagaço excedente.

Considerando a necessidade de promover o desenvolvimento sustentável e o alinhamento com os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (principalmente referente a energia acessível e limpa), este trabalho contribui com recomendações para o aumento do acesso das pessoas e da comunidade a eletricidade, com a utilização de fontes de energia que não poluam ou

prejudiquem o meio ambiente, garantindo a segurança energética e a redução das emissões de gases do efeito estufa. As decorrentes mudanças climáticas acompanham o desenvolvimento do setor industrial e confirmam a necessidade da busca por alternativas que mitiguem o impacto ambiental.

5 CONCLUSÃO

Com a finalidade de alcançar os objetivos propostos, a abordagem da AFM se mostrou eficaz, ao proporcionar uma visão panorâmica necessária para tomadas de decisões, referente a eficiência produtiva e energética da usina. Como demonstrado no levantamento de dados, os principais parâmetros que influenciam na qualidade da cana: Sacarose aparente, Açúcar Total Recuperável, Açúcares redutores e UMIDADE apresentaram resultados favoráveis, controlados de forma que não haja perdas, apenas a pureza apresentou o valor abaixo do recomendado, desse modo tornando-se um ponto de atenção para a usina, devido esta composição ser relacionada diretamente a recuperação do açúcar. A operação de moagem também se mostrou eficiente principalmente ao utilizar o sistema de embebição composta, obtendo assim em torno de 97% de eficiência na extração, com uma umidade do bagaço final de 50%. O processo de controle de moagem foi fator crucial para avaliação do rendimento dos tandes da moenda.

Aplicando a metodologia AFM, foi possível identificar que através da entrada 7.000t de cana de açúcar por 117 dias, são produzidos 485,96t de açúcar e um total de 263.583,97L de etanol, dividindo-se em 208.169,6L de etanol anidro e 58.914L de etanol hidratado. A Análise de fluxo de materiais auxiliou na identificação das perdas e as oportunidades existente nas fronteiras selecionadas. A perda de açúcar na etapa de moagem foi de 38,50 t/dia, sendo atribuídas a manutenções inadequadas. O segundo processo que apresentou perdas foi a filtração do caldo, gerando um desperdício de 1,779t torta de filtro, sendo atribuídas a vazamento nas tubulações, falta de procedimento, falta de check-list dos equipamentos. Porém, mesmo contribuindo com a manutenção da fertilidade e melhorias no solo, é necessário entender quais os impactos que a torta de filtro traz nas emissões de CO₂, devido sua decomposição anaeróbia.

O terceiro processo que apresentou perda de açúcar foi o mosto fermentado, com 48,01t de açúcar perdido, neste caso a dorna deve ser ajustada, de forma que grandes concentrações de açúcar não prejudique a ação das leveduras. Já no processo de produção do álcool destilado, a perda de etanol chegou a 1.480,38L, a usina deve-se atentar ao fenômeno de inversão de pressão entre as colunas A e B, o que impede a saída da flegma vapor, fazendo com que mais etanol esteja presente na coluna A, consequentemente retendo o etanol na vinhaça.

Referente a cogeração de energia, a usina é autossuficiente, comercializando 3 MWh para a rede elétrica, produzindo 14.439 MWh através de 3 turbinas potentes gerando uma perda de vapor

de 26,96 t/h, contudo a usina tem a oportunidade de aumentar sua potência produzindo 555 MWh a mais, utilizando o bagaço excedente.

Para o processo de produção de bioeletricidade da usina, por meio de uma ACV obteve-se 0,224 kg CO₂-eq/kWh gerado. A ACV levou em consideração as operações reais da usina (teor de umidade do bagaço, processo produtivo da cana-de-açúcar). As emissões evitadas foram de 132 kg CO₂-eq. Considerando que as emissões de GEE associadas ao consumo de eletricidade da rede elétrica brasileira é 0,268 kg CO₂-eq/kWh consumido, as emissões da usina encontram-se abaixo do valor apresentado no mix elétrico nacional, gerando benefício ao meio ambiente. Verificou-se que a utilização de fertilizantes (vinhaça + NPK + MAP), herbicidas e pesticidas contribuem com 26,27% das emissões finais associadas à produção de cana-de-açúcar, porém um dos maiores contribuinte de emissões é a irrigação que inclui não somente o volume de água aplicado, mas também toda a infraestrutura necessária, e a cogeração, pois são levados para as caldeiras não apenas o bagaço, mas uma parte da palha também.

Na possibilidade de desenvolvimento de estudos experimentais, sugere-se testes com diferentes combinações de fertilizantes, herbicidas, e pesticidas para ver como variam as emissões em função da produtividade alcançada. A segunda sugestão é o estudo da utilização do máximo potencial da biomassa como fonte alternativa para utilização em motores veiculares, assim como a utilização da vinhaça, cinzas e principalmente a utilização da torta de filtro, nos solos agrícolas reduzindo o uso de fertilizantes químicos, tornando a torta de filtro protagonista, pois ao ser utilizada no solo estimula a atividade biológica e fornece matéria orgânica e nutriente, apresentando vantagens nutricionais para o solo.

7 REFERÊNCIAS

- ABELWI, N.; KWAN, A.; REZGUI, Y. 2017, Using Material and Energy Flow Analysis to Estimate Future Energy Demand at the City Level, *Energy Procedia*, Saudi Arabia. v.115, n.4, pp. 440-450
- ADAM, Véronique; WU, Qie; NOWACK, Bernd. Integrated dynamic probabilistic material flow analysis of engineered materials in all European countries. *NanoImpact*, v. 22, p. 100312, 2021.
- AĞBULUT, Ümit et al. Exergy, exergoeconomic, life cycle, and exergoenvironmental assessments for an engine fueled by diesel–ethanol blends with aluminum oxide and titanium dioxide additive nanoparticles. *Fuel*, v. 320, p. 123861, 2022.
- AGÊNCIA PAULISTA DE PROMOÇÃO DE INVESTIMENTOS. Açúcar. 2022. Disponível em: <[https:// www.investe.sp.gov.br](https://www.investe.sp.gov.br)> Acesso em: 09 de Abr de 2022
- ALVES, Adilson Rangel; DOS REIS COUTINHO, Aparecido. Life cycle assessment of niobium: A mining and production case study in Brazil. *Minerals Engineering*, v. 132, p. 275-283, 2019.
- ARAÚJO, Frederico Augusto Dantas de. Intensificação do processo de purificação do caldo da cana-de-açúcar por decantação química e adsorção. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia química) - Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14040: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2014a.
- AYRES, Robert U.; AYRES, Leslie (Ed.). *A handbook of industrial ecology*. Edward Elgar Publishing, 2002.
- BACCINI, Peter; BRUNNER, Paul H. *Metabolism of the anthroposphere: analysis, evaluation, design*. mit Press, 2012.
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (Brasil). *Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável*.2008. 314 p.
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (Brasil). *Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável*. 2008. 314 p.
- BARE, J. et al. Life cycle impact assessment midpoints vs. endpointsThe sacrifices and the benefits. *Int. J. LCA*, v. 5, n. 6, 2000.
- BARE, Jane C.; GLORIA, Thomas P. Critical analysis of the mathematical relationships and comprehensiveness of life cycle impact assessment approaches. *Environmental science & technology*, v. 40, n. 4, p. 1104-1113, 2006.

- BIOELETRICIDADE: A energia verde e inteligente do Brasil. ÚNICA- União Da Indústria De Cana De Açúcar , v. 18, 27 maio 2010. Cartilha da bioeletricidade, p. 5. <<http://www.siamig.com.br>> Acesso: 10 de Abr de 2022.
- BLUMMEL, M. et al. Evaluation of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) used for bioethanol production in the context of optimizing whole plant utilization. *Animal Nutrition and Feed Technology*, v. 9, n. 1, p. 1-10, 2009.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Exportações Brasileiras de etanol*. 1. ed. Brasília, DF: Mapa, 2022.
- BRASIL. Ministério de Minas e energia. Secretaria de planejamento e desenvolvimento energético. 1. ed. Brasília, DF: Mapa, 2020.
- BRINGEZU, Stefan; MORIGUCHI, Yuichi. Material flow analysis. In: *Green accounting*. Routledge, 2018. p. 149-166.
- BRUNNER, Paul H.; RECHBERGER, Helmut. *Handbook of material flow analysis: For environmental, resource, and waste engineers*. CRC press, 2016.
- BUYLE, Matthias; BRAET, Johan; AUDENAERT, Amaryllis. Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 26, p. 379-388, 2013.
- CABALLERO-GUZMAN, Alejandro; SUN, Tianyin; NOWACK, Bernd. Flows of engineered nanomaterials through the recycling process in Switzerland. *Waste management*, v. 36, p. 33-43, 2015.
- CALDEIRA, Carla et al. Quantification of food waste per product group along the food supply chain in the European Union: A mass flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 149, p. 479-488, 2019.
- CARVALHO, Monica et al. Life cycle assessment of the transesterification double step process for biodiesel production from refined soybean oil in Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 23, p. 11025-11033, 2016.
- CARVALHO, Monica; DE MELLO DELGADO, Danielle Bandeira; CHACARTEGUI, Ricardo. Life cycle analysis as a decision criterion for the implementation of solar photovoltaic panels in as Northeast Brazil hospital. *energy, transportation and global warming*, p. 295-310, 2016.
- CASTRO, Bárbara Alves Araújo. *Análise do setor sucroenergético do Triângulo Mineiro*. Minas Gerais. 2018. E-book.
- CAVALETT, Otávio et al. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 18, p. 647-658, 2013.

- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2009. Disponível em:< <http://www.siamig.com.br>> . Acesso em 04 jun. 2022.
- CENTRO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS DO SETOR SUCROENERGÉTICO E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). 2019. Disponível em: < <http://www.siamig.com.br>> . Acesso em 04 maio. 2022.
- CHEHEBE, José Ribamar B. Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000. Qualitymark Editora Ltda, 1997.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2013. Disponível em:< <https://www.conab.gov.br/> > Acesso em 04 jun. 2022.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2021. Disponível em:< <https://www.conab.gov.br/> > Acesso em 04 jun. 2022.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2022. Disponível em:< <https://www.conab.gov.br/> > Acesso em 04 jun. 2022.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA., 2017. Disponível em:< <https://www.portaldaindustria.com.br>> Acesso em 05 mai. 2023.
- CORREA, Viviane da Silva Martins Lopes. Investigação experimental sobre o impacto do herbicida atrazina sobre a interação neuromuscular. 2020. Dissertação (Doutorado em cirurgia e medicina translacional) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Campus Botucatu, 2020.
- DE MEDEIROS SILVA, Wallysson Klebson et al. Sustainable enhancement of sugarcane fertilization for energy purposes in hot climates. *Renewable Energy*, v. 159, p. 547-552, 2020.
- DE OLIVEIRA, Camila Gomes Henriques; SILVA, Diogo Aparecido Lopes; DE OLIVEIRA, José Augusto. Gestão do Ciclo de Vida (GCV) para a sustentabilidade de Pequenas e Médias Empresas (PMEs) na região de Sorocaba/SP: principais entraves e desafios. Edição especial Nº 2, 2018.
- DESHPANDE, Paritosh C. et al. Using Material Flow Analysis (MFA) to generate the evidence on plastic waste management from commercial fishing gears in Norway. *Resources, Conservation & Recycling: X*, v. 5, p. 100024, 2020.
- DIAS, Ananda Silva. Avaliação do ciclo de vida dos produtos de uma usina e panorama do uso e aplicações tecnológicas da vinhaça. Dissertação (mestrado em Tecnologia Ambiental)- Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda.
- DIÓGENES, R. L. Análise do Ciclo de Vida de Edificações Residenciais. 2006. Tese (Doutorado

- em edificações). MSc. Thesis, Universidade do Minho. Portugal. 2006.
- ELITE do setor: 30 maiores grupos têm prejuízos combinados duas vezes maior do que lucros. Nova cana. Disponível em: <<https://www.novacana.com>> Acesso em: 09 de Abr de 2022.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Mercado Brasileiro de açúcar. Brasília. 2009. 314 p.
- FERNANDES, Antonio Carlos. Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar. Piracicaba: Stab, 2003.
- FERNANDES, Mariana Cristina Santos. Estudo da indústria de fertilizantes nitrogenados: fontes, produção, mercado e impacto ambiental. 2022.
- FERREIRA, F. M. et al. Cogeração no setor sucroalcooleiro em Goiás. Dissertação Monografia (MBA em Gestão Sucroalcooleira)—Centro Universitário de Lins—Unilins. Lins, SP, 2010.
- FERRONATO, Giulia et al. The Italian meat production and consumption system assessed combining material flow analysis and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 321, p. 128705, 2021.
- FLAUSINIO, Bruna de Fátima Pedrosa Guedes. Produção de energia elétrica a partir do aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar gerado no setor sucroalcooleiro de Minas Gerais. 2015. Tese (Doutorado de Engenharia Nuclear e da Energia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- GIL, Antonio Carlos et al. Como elaborar projetos de pesquisa. São Paulo: Atlas, 2002.
- GUILLÉN-LAMBEA, Silvia; ABRAHÃO, Raphael; CARVALHO, Monica. Life cycle assessment of power generation systems in Spain: Exploring a broader view from a consequential perspective. *Sustainable Production and Consumption*, v. 38, p. 28-40, 2023.
- HIRAISHI, Takahiko et al. (Ed.). 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol. Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
- INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA (Brasil). Alta na produção e nas exportações de açúcar marca a safra 2020/21 de cana. 2020.
- ISO, ISO14040. 14040. Environmental management—life cycle assessment—principles and framework, p. 235-248, 2006.
- LIMA, Aldemi Coelho; FERRARESI, Valtair Antonio. Desgaste em Equipamentos de Processamento de Cana-de-Açúcar em Destilaria de Álcool. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, v. 16.

- LOPES, Claudio Hartkopf. Glossário de termos técnicos para a indústria sucro-alcooleira. Ministério da Indústria e do Comércio, Instituto do Açúcar e do Alcool, Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-Açúcar, 1986.
- MACHADO, Fulvio de Barros Pinheiro. Brasil, a doce terra-História do Setor. Disponível na internet:< [http://www. procana. com. br](http://www.procana.com.br)>. Acesso em: janeiro, 2009.
- MAITY, Sunil K. Opportunities, recent trends and challenges of integrated biorefinery: Part I. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 43, p. 1427-1445, 2015.
- MARQUES, Pedro Valentim. Custo de produção agrícola e industrial de açúcar e álcool no Brasil na safra 2007/2008. 2009.
- MARTINS, Petrônio Garcia; LAUGENI, Fernando Piero. Administração da produção. 2005.
- MAUÉS, J. ARONE. Maximização da geração elétrica a partir do bagaço e palha em usina de açúcar e álcool. Revista Engenharia, v. 583, p. 88-98, 2007.
- MAZUR, Fabiane. Avaliação do ciclo de vida do produto: uma ferramenta de gestão ambiental. 2012.
- MEENA, Ram Swaroop et al. Impact of agrochemicals on soil microbiota and management: A review. Land, v. 9, n. 2, p. 34, 2020.
- MIRANDA, Mariana Maia de. Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida. 2012. Tese (Doutorado em ciência da engenharia ambiental). Universidade de São Paulo. São Paulo. 2012.
- MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. Applied statistics and probability for engineers. John wiley & sons, 2010.
- NEVES, Talles Iwasawa et al. Environmental evaluation of the life cycle of elephant grass fertilization—*Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone—using chemical fertilization and biosolids. Environmental monitoring and assessment, v. 190, p. 1-8, 2018.
- NGUYEN, T.; OLOF, D. J. Análise De Fluxo De Materiais Para Uma Produção Mais Limpa Em Hoa Binh Companhia De Açúcar. 2016. Vietnã, Revista ARPN de Engenharia e Ciências Aplicadas v.11, ISSN 1819-6608.
- NUNES, ELIS FERNANDO. Cana-de-Açúcar: a produção de etanol e seus benefícios. Monografia (Técnico em Agronegócios). Instituto Federal de Ciências e Tecnologia de São Paulo. Barretos, 2017.
- OHNO, Taiichi. O sistema Toyota de produção além da produção. Bookman, 1997.

- OLIVEIRA, Jhones L. de et al. Zein nanoparticles as eco-friendly carrier systems for botanical repellents aiming sustainable agriculture. *Journal of agricultural and food chemistry*, v. 66, n. 6, p. 1330-1340, 2018.
- PELLEGRINI, Luiz Felipe. Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade. 2009. Tese (Doutorado em engenharia mecânica), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.
- PINTO, Julian Torres de Miranda; AMARAL, Karen Juliana; JANISSEK, Paulo. Potencialidades da análise de fluxo de materiais no processo produtivo de fibras ópticas poliméricas. *Polímeros*, v. 24, p. 324-331, 2014.
- RAMALHO, Janilson André do Nascimento. Eficiência térmica da cogeração na usina vale verde— produção de álcool e eletricidade. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2018.
- REIS, Daniel da Costa. Fluxo de materiais e eficiência no uso de recursos na indústria da construção. 2020. Tese (Doutorado em ciências), Universidade de São Paulo, 2020.
- RENEWABLE FUELS ASSOCIATION GLOBAL (U.S). World Fuel Ethanol Production by Region, 2020. Disponível em: > <https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>. Acesso em: 26 de fev. de 2021.
- RIBEIRO, C.; BLUMER, S.; HORII, J., 1999. "Tecnologia do açúcar". Universidade de São Paulo.
- RIPOLI, Tomaz Caetano Cannavam; RIPOLI, Marco Lorenzo Cunali. Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente. 2009.
- RODRIGUES, Gelze Serrat de Souza Campos; ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil: perspectivas geográfica, histórica e ambiental. Edufu, 2020.
- SANTOS, Fernando; BORÉM, Aluízio. Cana-de-açúcar do plantio à colheita. 2013.
- SEQUEIRA, Daniel Filipe Pereira. Aplicação para controlo de um software de LCA através da sua COM interface. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Informática e Computação)- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. 2010.
- SHAFIE, Farah Ayuni et al. Urban-scale material flow analysis for cities in greater Kuala Lumpur, Malaysia. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, v. 234, p. 424-433, 2016.
- SHAHBUDIN, Nur Rahishahanim; KAMAL, Norashikin Ahmad. Establishment of material flow analysis (MFA) for heavy metals in a wastewater system. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 12, n. 2, p. 1407-1418, 2021.
- SILVA SEGUNDO, V.B.S.; FREIRE, M. G. M.; JUNIOR, L. M. C.; CARVALHO, M, 2016. Análise de Ciclo de Vida comparativa para a geração de energia elétrica a partir de bagaço de

- cana-de-açúcar: estudo de caso na usina Agroval. Joao Pessoa: Universidade Federal da Paraíba . 23 p.
- SILVA, R. N. D. (2018). Redução da umidade do bagaço de cana-de-açúcar para otimização do processo de geração de energia (Bachelor's thesis).
- SIMAPRO. Pré Sustainability. Software 2019. Disponível em: www.simapro.nl. Acesso em: 10 abr. 2022.
- SINGH, Suman; GAIKWAD, Kirtiraj; MORE, P. K. Spoilage of sugarcane juice: A problem in sugarcane industry. *International Journal of Agricultural Engineering*, v. 7, n. 1, p. 259-263, 2014.
- STREICHER-PORTE, Martin et al. Key drivers of the e-waste recycling system: Assessing and modelling e-waste processing in the informal sector in Delhi. *Environmental impact assessment review*, v. 25, n. 5, p. 472-491, 2005.
- THEODORO, Giulia Silva. Análise do ciclo de vida do etanol produzido em uma destilaria autônoma. 2020. Trabalho de graduação. Universidade Federal da paraiba, Paraiba, 2020.
- TSAI, Ching-Ling; KROGMANN, Uta. Material flows and energy analysis of glass containers discarded in New Jersey, USA. *Journal of industrial ecology*, v. 17, n. 1, p. 129-142, 2013.
- VENTURA, Magda Maria. O estudo de caso como modalidade de pesquisa. *Revista SoCERJ*, v. 20, n. 5, p. 383-386, 2007.
- VILELA, Frederico Sampaio Vasconcelos. Avaliação do ciclo de vida da produção industrial de etanol e açúcar: estudo de caso: Usina Jalles Machado S/A. 2013. Dissertação (Mestrado em ciências mecânicas). Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- WEISS, Antonio E. *Key business solutions: essential problem-solving tools and techniques that every manager needs to know*. Pearson UK, 2012.
- WIDIYANTO, A. ATSUTA, Y. TACHIBAN. R., 2007, *Material Flow Analysis and Energy management at Sugar Mills in indonésia*.
- ZHENG, Yi et al. Development of a phenology-based method for identifying sugarcane plantation areas in China using high-resolution satellite datasets. *Remote Sensing*, v. 14, n. 5, p. 1274, 2022.

APÊNDICE A

APÊNDICE A – Questionário a respeito dos dados referente ao processo de produção na Usina Estudada ENTREVISTA DE AVALIAÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO

Prezado Colaborador,

Estou elaborando um estudo de caso para mensurar as entradas, estoques e as saídas de materiais atreladas as etapas de produção do processo produtivo sucroalcooleiro. A empresa será mantida em sigilo e as informações coletadas serão utilizadas com o objetivo de promover melhorias ao processo produtivo. Desde já agradeço sua atenção e colaboração.

1. Quantos sacos de açúcar são produzidos por dia?
2. A cana colhida no campo é mecanizada?
3. Quais os meses de safra e entre safra na Usina?
4. Quantas amostras devem ser coletadas? Qual o nº mínimo e máximo?
5. Na Usina a amostragem é feita por?
6. qual a temperatura da água de embebição?
7. Qual o tipo e embebição? É adicionada caldo e água ao bagaço ou apenas a água?
8. A amostragem feita na usina é por qual método? *Amostragem diretamente nos veículos de transporte, Sonda horizontal ou sonda oblíqua?
9. A usina tem pré- evaporador?
10. Referente a composição da cana, consegue me ajudar com o % contido na cana para cada tópico abaixo? Sólidos insolúveis, caldo absoluto, sólidos solúveis, águas, açúcares- sacarose/ glicose e frutose, não açúcares, Orgânicos e inorgânicos.
11. Quais os dados abaixo em % da Pol, Pureza, ATR, AR, Fibra e Umidade do bagaço?

APÊNDICE B

APÊNDICE B – Questionário a respeito dos impactos que ocorrem nas operações unitárias

ENTREVISTA DE AVALIAÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO

Prezado Colaborador,

-----Estou elaborando um estudo de caso para entender quais são os principais impacto que podem afetar na produtividade ou em perdas no processo de produção do açúcar e álcool e posteriormente criar um diagrama de causa e efeito. Abaixo segue perguntas necessárias para formação deste estudo. Desde já agradeço sua atenção e colaboração.

1. Quais os principais fatores de impacto que afetam o processo de moagem?
2. Quais os principais fatores de impacto que afetam o processo de produção de energia?
3. Quais os principais fatores de impacto que afetam o processo de evaporação, Cristalização e cozimento?
4. Quais os principais fatores que impactam no processo de produção de Etanol?