

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Rodrigo Fucci Bertoletti Becho

**Potencial do aproveitamento energético de
subprodutos do cultivo de cana de açúcar: uma
análise técnico-ambiental**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de
Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Florian Alain Yannick Pradelle
Coorientador: Sergio Luiz Pinto
Castiñeiras Filho

Rio de Janeiro
Dezembro de 2023

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Florian, e coorientador, Sérgio Luiz, agradeço a oportunidade de realizar este trabalho. Sua paciência e dedicação em me introduzir a um novo tema foram fundamentais. Agradeço pelas inúmeras horas dedicadas, oferecendo suporte e orientações essenciais para o progresso do projeto. Sua presença constante foi crucial para o andamento do trabalho de forma tranquila e proveitosa. Obrigado por tornarem esta jornada engrandecedora e significativa.

Agradeço à Puc-Rio por ter sido palco de uma das experiências mais enriquecedoras da minha vida. Obrigado por ter me proporcionado um ambiente onde pude me desenvolver profissionalmente e pessoalmente.

Agradeço a minha mãe, Marisa, por sempre estar ao meu lado e não poupar esforços para me ajudar a alcançar meus objetivos. Obrigado por sempre acreditar em mim. Ao meu pai, Luís Sergio, por todos os conselhos e por me ensinar a sempre enfrentar meus desafios com calma e bom humor. Hoje, ao concluir mais um objetivo, reconheço que isso só foi possível graças às oportunidades que vocês me proporcionaram. Por isso, minha eterna gratidão e amor.

Aos meus irmãos, Pedro e Luiz Eduardo, por sempre me apoiarem em todos os momentos da vida. Agradeço por ter vocês como meus irmãos mais velhos e modelos ao qual quero seguir.

Agradeço a minha namorada, Aline. Obrigado por ter sido minha companheira e meu ponto de paz no meio de tantos desafios desses últimos 2 anos. Sua presença foi essencial para me motivar a concluir esse trabalho. A você dedico meu eterno amor.

Por último, expresso minha profunda gratidão à minha irmã, Ana Luisa. É graças a você que posso levar uma vida normal. Embora um único parágrafo não seja capaz de transmitir toda minha gratidão, espero um dia poder retribuir o que fez por mim. Agradeço também por todo apoio e suporte durante toda essa jornada. Esta conquista é tão minha quanto sua.

RESUMO

Potencial do aproveitamento energético de subprodutos do cultivo de cana de açúcar: uma análise técnico-ambiental

A cana-de-açúcar desempenha um papel fundamental na economia brasileira, sendo uma matéria-prima versátil, que impulsiona diversos setores. Além de ser a base para a produção de açúcar, um importante produto de exportação, a cana é essencial na fabricação de etanol e energia elétrica, contribuindo significativamente para a matriz energética do país. O desafio atual no setor está em expandir a produção das usinas de maneira ecologicamente responsável e sustentável. A gestão eficiente dos subprodutos provenientes da produção de etanol emerge como uma prioridade crucial. Esses subprodutos incluem bagaço, palha, vinhaça e torta filtro. Os dois primeiros resíduos podem ser aproveitados para a produção de energia nos sistemas de cogeração, biogás nos sistemas de biodigestão anaeróbica e podem também ser utilizados para gerar etanol de 2ª geração. Para esse último sistema, ainda é possível obter mais dois subprodutos, a torta de lignina e licor de pentoses. Com o intuito de maximizar as gerações energéticas, evitando o descarte indevido de rejeitos e reduzindo os impactos ambientais associados, o presente estudo se propôs a desenvolver uma análise técnico-ambiental, a partir de pesquisas bibliográficas dos possíveis rendimentos e utilizações de cada subproduto, e a partir desses dados gerar análises de diferentes cenários, compostos por combinações dos subprodutos das usinas de cana de açúcar (para o caso base, cenário 1, 2 e 3, o bagaço foi a principal biomassa utilizada; para os cenários 4, 5 e 6, a palha foi a principal biomassa utilizada; nos cenários 1 ao 6, a torta filtro e vinhaça foram utilizadas para biodigestão; nos cenários 3 e 6 houve a utilização da torta de lignina e licor de pentoses), e desenvolver cálculos de métricas energéticas e impactos ambientais a fim de se chegar a um cenário ótimo de aproveitamento desses materiais. Ao final concluímos que os cenários 1 e 3, quando comparados ao caso base, apresentaram os melhores resultados, com destaque para o cenário 3, com valores da razão entre a energia extraída na planta sobre os insumos energéticos iguais a 0,951 (0,717 para o caso base), uma geração de energia elétrica excedente de 234.012 MJ (113.309 MJ para o caso base), emitindo 193.797 kg CO₂ (163.893 para o caso base), assim, apresentando um impacto líquido de 0,168 kg CO₂/MJ etanol (0,167 kg CO₂/MJ etanol).

Palavras chaves: Cana-de-açúcar, Etanol, Subprodutos, Energia, Dados de referência, Geração de cenários, Análise de métricas.

ABSTRACT

Potential for energy utilization from by-products of sugarcane cultivation: a technical-environmental analysis

Sugarcane plays a fundamental role in the Brazilian economy, serving as a versatile raw material that drives various sectors. In addition to being the foundation for sugar production, a significant export product, sugarcane is essential for ethanol and electricity generation, contributing significantly to the country's energy matrix. The current challenge in the sector is to expand refinery production in an ecologically responsible and sustainable manner. Efficient management of by-products from ethanol production emerges as a crucial priority. These by-products include bagasse, straw, vinasse, and filter cake. The first two residues can be utilized for energy production in cogeneration systems, biogas in anaerobic biodigestion systems, and can also be used to generate second-generation ethanol. For this latter system, it is still possible to obtain two more by-products, lignin cake, and pentose liquor. In order to maximize energy generation, avoid improper waste disposal, and reduce associated environmental impacts, this study aimed to develop a technical-environmental analysis based on bibliographic research on the possible yields and uses of each by-product (for the base case, scenarios 1, 2, and 3, bagasse was the main biomass used; for scenarios 4, 5, and 6, straw was the main biomass used; in scenarios 1 to 6, filter cake and vinasse were used for biodigestion; in scenarios 3 and 6, lignin cake and pentose liquor were used.). Using this data, different scenarios were analyzed, consisting of combinations of sugarcane refinery by-products, and calculations of energy metrics and environmental impacts were conducted to determine an optimal scenario for utilizing these materials. In conclusion, scenarios 1 and 3, when compared to the base case, yielded the best results, with scenario 3 standing out. It demonstrated a ratio between the energy extracted at the plant and energy inputs equal to 0.951 (0.717 for the base case), surplus electricity generation of 234,012 MJ (113,309 MJ for the base case), emitting 193,797 kg of CO₂ (163,893 for the base case). Therefore, it presented a net impact of 0,168 kg CO₂/MJ of ethanol (0,167 kg CO₂/MJ of ethanol).

Keywords: Sugarcane, Ethanol, By-products, Energy, Reference data, Scenario generation, Metrics analysis.

Sumário

1.	Introdução.....	1
1.1.	Contextualização.....	1
1.2.	Objetivo.....	9
1.3.	Estrutura do trabalho.....	10
2.	Revisão da Literatura	11
2.1.	Características da Cana de açúcar	11
2.2.	Plantio e Coleta da Cana de açúcar.....	12
2.3.	Processo de produção de etanol	15
2.3.1.	Preparação da cana e extração do caldo.....	17
2.3.2.	Tratamento do caldo	17
2.3.3.	Concentração do caldo	18
2.3.4.	Fermentação	18
2.3.5.	Destilação	19
2.3.6.	Desidratação	20
2.3.7.	Planta de etanol de 2ª geração	23
2.3.8.	Pré-tratamento da hidrolise enzimática	23
2.3.9.	Hidrolise enzimática	24
2.4.	Subprodutos da produção de etanol de 1ª e 2ª geração.....	25
2.4.1.	Palha	25
2.4.2.	Bagaço.....	28
2.4.3.	Torta Filtro.....	30
2.4.4.	Vinhaça	32
2.4.5.	Licor de Pentoses	33
2.4.6.	Torta de Lignina	33
3.	Metodologia:	35
3.1.	Descrição do sistema e Dados de referência.....	37

3.1.1.	Colheita	37
3.1.2.	Refinaria de etanol de 1ª geração	39
3.1.3.	Sistema de Hidrolise Enzimática	41
3.1.4.	Sistema de biodigestão	43
3.1.5.	Sistema de cogeração	44
3.2.	Cálculo dos parâmetros de performance dos cenários	47
3.2.1.	NER	47
3.2.2.	Emissões de CO ₂ e impacto líquido	49
4.	Resultados e Discussão:	51
4.1.	Caso Base:	51
4.2.	Cenário 1:	53
4.3.	Cenário 2:	55
4.4.	Cenário 3:	57
4.5.	Cenário 4:	60
4.6.	Cenário 5:	63
4.7.	Cenário 6:	65
4.8.	Visao Geral	67
4.8.1.	Balanço energético e oferta térmica	68
4.8.2.	Resultados NER	70
4.8.3.	Emissões totais de CO ₂ e impacto líquido	71
4.8.4.	Emissões liquidas de CO ₂ antes e depois de aplicado o método de substituição	73
5.	Conclusão:	75
6.	Referências:	77

Lista de Figuras

Figura 1 - Matriz energética brasileira em 2021 por fonte (Elaboração própria baseado em dados do EPE, 2022)	2
Figura 2 - Produção de eletricidade por fonte no Brasil entre 1985 e 2021 (Ember, 2023)	2
Figura 3 - Produção de cana de açúcar ao redor do mundo no ano de 2021 (FAOSTAT, 2023).	3
Figura 4 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ComCiência, 2019)	5
Figura 5 - Estruturas aéreas da cana de açúcar (CTC, 2015).....	11
Figura 6 - Estruturas subterrâneas da cana de açúcar (Quinelato, 2016)	12
Figura 7 - Fluxograma da produção de etanol de 1ª e 2ª geração e uso de seus subprodutos	
Figura 8 - Esquemático simplificado do processo de destilação do vinho (Bonomi et al., 2012).....	20
Figura 9 - Esquemático do processo de desidratação por adição de ciclohexano (Abdala, 2017).....	21
Figura 10 - Esquemático do processo de desidratação por peneira molecular (Ferreira et al., 2016).....	22
Figura 11 - Esquemático do processo de desidratação por adição de MEG. (Ponce et al., 2014).....	22
Figura 12 - Palha da cana de açúcar deixada nos campos após a colheita (CNPED, 2017).....	26
Figura 13 – Bagaço da cana de açúcar (Ferreira, Blog Syngenta Digital)	28
Figura 14 – Torta filtro (Fertilizer-Machinery)	31
Figura 15 – Vinhaça (Chiappini, 2022)	32
Figura 16 – Energia Gerada Total e Energia Consumida Total de todos os cenários e caso base	68
Figura 17 – Balanço Energético Total de todos os cenários e caso base	
Figura 18 – Razão de oferta e demanda térmica de todos os cenários em comparação com caso base	
Figura 19 – Comparação do parâmetro NER de todos os cenários com o caso base	71

Figura 20 – Comparações das emissões de CO ₂ total dentre os cenários e o caso base	72
Figura 21 – Impacto Líquido em kg de CO ₂ por MJ de etanol produzido	73
Figura 22 – Emissões específicas antes e depois de aplicar o método de substituição por emissões equivalentes de gás natural	73

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Produtividade e rendimento de etanol das diferentes biomassas (Elaboração própria baseada em dados de Manochio et al., 2017)	
Tabela 2 - Composição média do biogás (Elaboração própria baseado em dados de Moraes et al., 2015).....	7
Tabela 3 - Possíveis destinos para cada subproduto da produção de etanol da cana de açúcar.....	35
Tabela 4 – Parâmetros referentes a etapa de colheita da cana de açúcar e coleta de palha	38
Tabela 5 – Rendimento por subproduto da produção de etanol de 1ª geração.....	40
Tabela 6 – Rendimentos do sistema de hidrólise enzimática	42
Tabela 7 – Consumos energéticos e emissões referentes ao sistema de hidrólise enzimática	42
Tabela 8 – Rendimentos do sistema de biodigestão	44
Tabela 9 – Consumos elétricos do sistema de biodigestão	44
Tabela 10 – Combustíveis utilizados cada cenário.....	45
Tabela 11 – PCI e conversões energéticas de cada combustível do sistema de cogeração	46
Tabela 12 - Tabela de parâmetros para cálculo do NER dos cenários contendo bagaço como principal biomassa	48
Tabela 13 - Tabela de parâmetros para cálculo do NER dos cenários contendo palha como principal biomassa	48
Tabela 14 –Poderes caloríficos inferiores para o cálculo do NER.....	
Tabela 15 – Rendimentos dos produtos e subprodutos do caso base	51
Tabela 16 – Dados Energéticos para cálculo do NER do caso base	51
Tabela 17 – Dados de emissões de CO ₂ e impacto líquido para o caso base.....	52
Tabela 18 - Rendimentos dos produtos e subprodutos do cenário 1	53
Tabela 19 - Dados Energéticos para cálculo do NER do cenário 1	53
Tabela 20 - Dados de emissões de CO ₂ e impacto líquido para o cenário 1 ..	54
Tabela 21 - Rendimentos dos produtos e subprodutos do cenário 2	55
Tabela 22 - Dados Energéticos para cálculo do NER do cenário 2	55
Tabela 23 - Dados de emissões de CO ₂ e impacto líquido para o cenário 2 ..	56

Tabela 24 - Rendimentos dos produtos e subprodutos do cenário 3	57
Tabela 25 - Dados Energéticos para cálculo do NER do cenário 3.....	58
Tabela 26 - Dados de emissões de CO ₂ e impacto líquido para o cenário 3 .	59
Tabela 27 - Rendimentos dos produtos e subprodutos do cenário 4	60
Tabela 28 - Dados Energéticos para cálculo do NER do cenário 4.....	60
Tabela 29 - Dados de emissões de CO ₂ e impacto líquido para o cenário 4 .	62
Tabela 30 - Rendimentos dos produtos e subprodutos do cenário 5	63
Tabela 31 - Dados Energéticos para cálculo do NER do cenário 5.....	63
Tabela 32 - Dados de emissões de CO ₂ e impacto líquido para o cenário 5 .	64
Tabela 33 - Rendimentos dos produtos e subprodutos do cenário 6	65
Tabela 34 - Dados Energéticos para cálculo do NER do cenário 6.....	66
Tabela 35 - Dados de emissões de CO ₂ e impacto líquido para o cenário 5 .	66

1. Introdução

1.1. Contextualização

Suprir a constante e crescente demanda energética, mitigar os impactos ambientais e reduzir a dependência de fontes de energia fósseis, de forma simultânea, se tornou um dos principais desafios do século. Embora as pesquisas e desenvolvimentos por fontes alternativas estejam em foco, fontes de energia não renováveis ainda dominam a matriz energética global, representando cerca de 85,9%, dados para o ano de 2022 (EPE, 2023). Nesse contexto, os biocombustíveis são protagonistas na busca por um mundo sustentável e desenvolvido. Derivados de matéria orgânica, os biocombustíveis, desempenham um papel crucial na transição energética mundial devido a sua baixa emissão de gases de efeito estufa, menor pegada de carbono, e ser um combustível proveniente de fontes renováveis (Raízen, 2021).

Segundo a EPE (2023), o Brasil, em 2022, possui cerca de 47,4% da sua matriz energética produzida por fontes renováveis. Dentre elas, 15,4% correspondem à energia proveniente de derivados da biomassa da cana de açúcar, ficando atrás somente da energia proveniente de petróleo, com 35,6%. A relevância dessa parcela, que a biomassa da cana representa, pode ser analisada a partir da Figura 1.

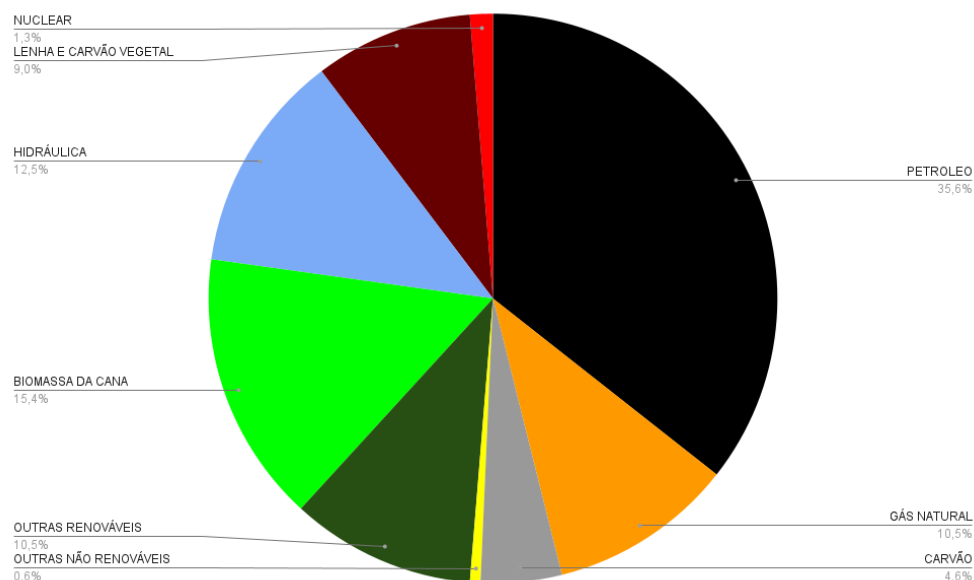


Figura 1 - Matriz energética brasileira em 2021 por fonte (Elaboração própria baseado em dados da EPE, 2022)

O país possui uma oferta de biomassa abundante, vindo principalmente do cultivo da cana-de-açúcar, do café e do arroz (da Costa et al., 2021), gerando assim um potencial enorme para produção de energia e uma fonte promissora de energia mais ecológica. A Figura 2 mostra a produção de eletricidade por fonte.

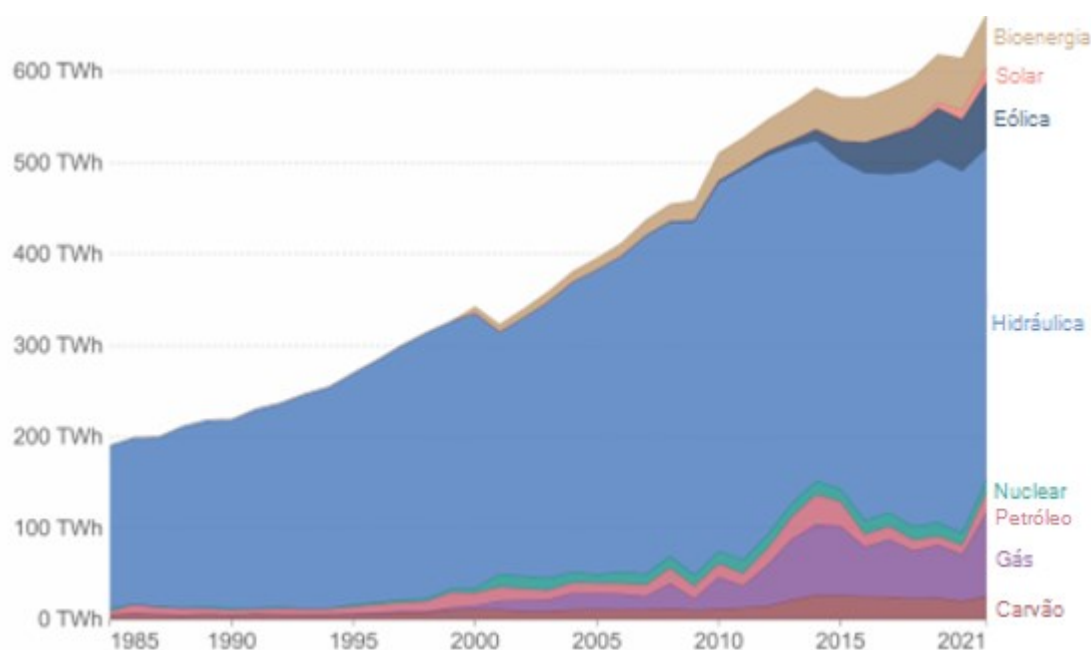


Figura 2 - Produção de eletricidade por fonte no Brasil entre 1985 e 2021 (Ember, 2023)

Embora a energia elétrica produzida por fontes hídricas seja dominante no país, com participação de 61,9%, nas últimas décadas podemos ver um crescimento expressivo na produção de energia elétrica proveniente de biomassas (EPE, 2023).

O agronegócio brasileiro é um dos setores mais importantes para a economia do país. Em 2022, exportou-se cerca de US\$ 159,09 bilhões de dólares, segundo o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA, 2023), e representou cerca de 19,35% da população ocupada (CEPEA et al., 2022a) e 24.8% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional (CEPEA et al., 2022b).

O setor, no país, é moderno, dinâmico, eficiente e competitivo, sendo uma grande potência. Com um tamanho continental, clima diversificado, chuvas regulares e água doce abundante, o Brasil possui cerca de 7,6% (Novaes et al., 2022) de seu território voltado para a agricultura, aproximadamente 64 milhões de hectares, hoje é o maior produtor de soja e cana-de-açúcar. É também o terceiro maior produtor de milho e feijão, estando entre outras posições de destaque (EMBRAPA. Ciência e tecnologia tornaram o Brasil um dos maiores produtores mundiais de alimentos. 2022).

A Figura 3 mostra a produção de cana de açúcar ao redor do mundo, em que o Brasil lidera o ranking, seguido pela Índia e China.

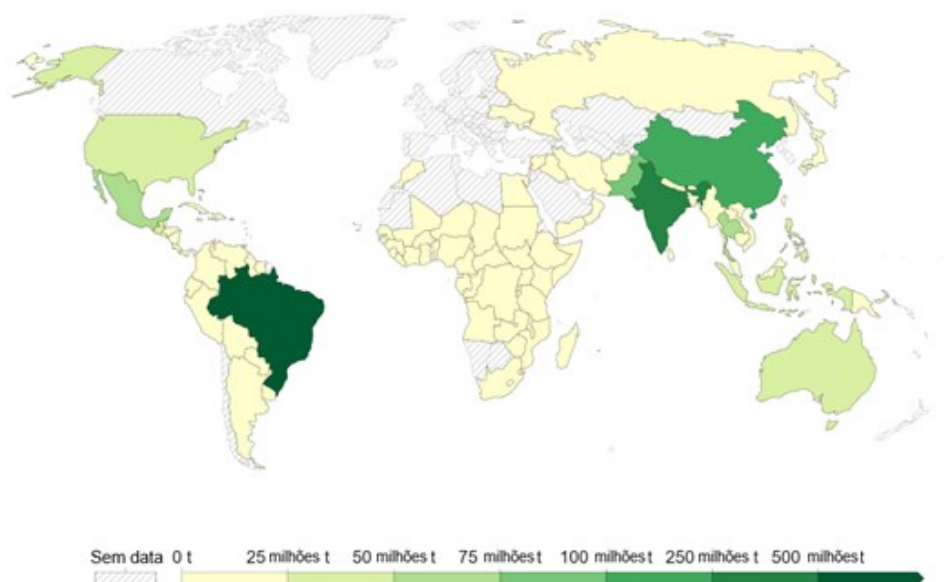


Figura 3 - Produção de cana de açúcar ao redor do mundo no ano de 2021 (FAOSTAT, 2023).

A cana é explorada por todo o território nacional, porém hoje se concentra principalmente na região sudeste do país, nos estados de São Paulo e Minas

Gerais. Com uma área plantada de aproximadamente 8,4 milhões de hectares e uma produção de 610.131,4 mil toneladas na safra 2022/2023 (CONAB, 2023), a cana de açúcar destaca-se pela sua versatilidade. A partir dela é possível produzir, por exemplo, açúcar, etanol e energia elétrica. Com um forte ciclo de crescimento nas últimas décadas, movido pelo crescimento da demanda de açúcar no mercado internacional e pelo aumento do consumo de etanol, causado pela popularização de veículos com motores Flex Fuel, o Brasil continua com investimentos constantes na área (Díaz, 2011).

O etanol pode ser produzido de qualquer biomassa que contenha a presença de açúcares ou de oligômeros, como é o caso da celulose e do amido. As três principais biomassas, seja em termos de eficiência de produção de etanol ou eficiência da produtividade nos campos, são o milho, a cana de açúcar e a beterraba (Manochio et al., 2017).

A Tabela 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta uma comparação em termos de produtividade de biomassa por hectare, eficiência de conversão de etanol e rendimento de etanol.

*Tabela 1 - Produtividade e rendimento de etanol das diferentes biomassas
(Elaboração própria baseada em dados de Manochio et al., 2017)*

Biomassa	Produtividade (ton/ha)	Eficiência de conversão (L/ton)	Rendimento de etanol (m³/ha)
Beterraba	13-100	100-110	5,0-10
Cana de açúcar	50-120	70-90	5,4-10,8
Milho	7,5-10	360-460	2,0-4,6

Em termos de produtividade, o etanol do milho apresenta uma eficiência muito superior em relação às outras biomassas, algo em torno de 360 a 460 L ton⁻¹. Em compensação, o processo é muito mais complexo e custoso, visto que é necessário uso de combustíveis fósseis para suportar a operação. Cerca de 50% do material colhido é composto por biomassa secas, que são deixadas nos campos, e necessita de grandes porções de terra para a viabilidade da produção, devido ao seu baixo rendimento de etanol por hectare. Em relação a produtividade de cada biomassa, a cana de açúcar lidera, com aproximadamente de 50 a 120 ton ha⁻¹;

para a beterraba, em plantações não irrigadas, esse valor chega a até 25 ton ha⁻¹, enquanto para plantações irrigadas, pode atingir 100 ton ha⁻¹. Embora sejam ambas biomassas ricas em açúcares, uma das grandes divergências da produção de etanol a partir da cana de açúcar e a partir da beterraba, vem na etapa da colheita. Por ser uma raiz, a beterraba precisa ser colhida por inteira, tendo seu ciclo de vida nas fazendas de aproximadamente 1 ano. Já a cana de açúcar, é colhida sem danificar suas raízes, apenas o caule da planta é cortado e coletado, possibilitando que a planta cresça novamente e tenha outros ciclos, podendo durar até 6 anos (Manochio et al., 2017)

Com o crescimento expressivo do setor sucroalcooleiro brasileiro, também vêm crescendo as preocupações com causas relacionadas à sustentabilidade e ao meio ambiente, um exemplo é a ONU (Organização das Nações Unidas) que, em 2015, desenvolveu uma série de 17 metas e compromissos, apresentados na Figura 4, os ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável), com o objetivo de promover um futuro mais próspero por todo o mundo até 2030.



Figura 4 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ComCiência, 2019)

O setor sucroalcooleiro brasileiro, inspirado pelos compromissos mundiais com o meio ambiente, vem, ao longo das últimas décadas, promovendo mudanças com intuito otimizar e desenvolver sua cadeia de produção, contribuindo com os objetivos traçados, em especial o ODS 6 (água potável e saneamento), ODS 7 (energia limpa e acessível), ODS 12 (consumo e produção responsáveis) e ODS 13

(ação contra a mudança global do clima). É um setor que necessita de atenção especial quanto ao controle de seus resíduos, a queima da lavoura de cana, as emissões atmosféricas geradas pelas unidades de geração de calor e eletricidade a partir da biomassa e os subprodutos líquidos resultados principalmente da produção de etanol, como a vinhaça, são 3 pontos com grande potencial de danos ao meio ambiente e a saúde de seres humanos, e que já foram e vêm sendo combatidas ao longo dos anos (ONU, 2023).

Uma possível estratégia do setor para cumprir com as ODS está voltada ao manejo correto e pesquisas para novos destinos dos subprodutos da sua cadeia produtiva. Os subsistemas de cogeração, biodigestão e geração de etanol de 2ª geração, são as principais áreas de foco, visto que essas tecnologias podem dar um destino benéfico tanto do ponto de vista ecológico quanto econômico para os subprodutos das usinas. A título de exemplo, o sistema de cogeração de uma planta de produção de etanol, é responsável por fornecer toda a energia elétrica e vapor necessários para a operação dos sistemas por via do bagaço, sem recorrer a fontes externas de energia (como combustíveis fosseis) e sem importação de energia pela rede elétrica (Castiñeiras-Filho, 2020).

Após a crise energética em meados do ano de 2001, o governo brasileiro promoveu uma série de reformas que incentivassem a oferta de energia no país (OECD, 2021). Produtores de energia independente passaram a ter a autorização para vender a energia excedente de seus sistemas diretamente para a rede elétrica. Dessa forma, os sistemas que usualmente eram operados com vapor a baixas pressões e temperaturas, promovendo uma baixa eficiência e alto consumo de biomassa, foram aperfeiçoados a ponto de produzir toda a energia elétrica, mecânica e térmica necessária para o pleno funcionamento da planta e ainda vender a energia excedente (Dias et al., 2011).

Com intuito de otimizar a geração de etanol e energia da planta, pesquisas a respeito do uso de outros combustíveis vêm sendo realizadas. O material comumente utilizado para ser consumido nas caldeiras é o bagaço da cana de açúcar, porém outras biomassas como a palha da cana de açúcar, torta de lignina e o biogás (gerado pelo processo de digestão anaeróbia aplicada sobre resíduos orgânicos) também possuem usos promissores. O uso de outras biomassas como combustível do sistema de cogeração é de grande interesse para as usinas, visto que, promove o melhor aproveitamento dos rejeitos da produção de etanol.

Podemos ter como exemplo, o uso da palha como combustível, que é um material geralmente ignorado nos processos da colheita, normalmente sendo deixados sobre os campos. O aproveitamento da palha poderia tornar o bagaço uma matéria prima disponível para os processos de etanol de 2ª geração, assim, sustentando os gastos energéticos da planta ao mesmo tempo que mais etanol é gerado sem a necessidade de aumentar significativamente as dimensões das plantações. Além dos benefícios citados acima, o bagaço para gerar etanol de 2ª geração, passa por processos de pré-tratamento e hidrólise enzimática, gerando subprodutos chamados torta de lignina e licor de pentose. O primeiro pode ser utilizado para queima nas caldeiras do sistema de cogeração, e o segundo pode ser utilizado como substrato para o sistema de biodigestão (Menandro et al. 2016).

A digestão anaeróbia é um processo biológico complexo que ocorre na ausência de oxigênio, utilizando microrganismos especializados, em uma sequência de etapas chamadas acidogênese, acetogênese e metanogênese. O propósito é converter a biomassa da cana de açúcar, obtendo como produto final o biogás e o digestato (Parsaee et al., 2019). É importante garantir as condições ideais para que as culturas de microrganismos realizem as conversões de forma estável e controlada. Fatores como pH, alcalinidade, presença de macronutrientes e micronutrientes adequados tem influência importante na digestão anaeróbia (Moraes et al., 2015).

O biogás pode ser obtido de diversas biomassas da produção de etanol da cana de açúcar, como por exemplo, a vinhaça, torta filtro, bagaço, palha e licor de pentose. Cada um desses subprodutos irá originar uma composição específica de biogás, porém, todos possuem a presença elevada de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Uma composição média do biogás proveniente dessas biomassas pode ser vista na Tabela 2 (Moraes et al., 2015).

Tabela 2 - Composição média do biogás (Elaboração própria baseado em dados de Moraes et al., 2015)

Gases	Concentrações (%)
Metano (CH_4)	40 - 75
Dióxido de carbono (CO_2)	25 - 40
Nitrogênio (N_2)	0,5 - 2,5

Oxigênio (O)	0,1 - 1,0
Sulfeto de hidrogênio (H₂S)	0,1 - 0,5
Amônia (NH₃)	0,1-0,5
Monóxido de carbono (CO)	0,0 - 0,1
Hidrogênio (H)	1,0 - 3,0

Diferentes métodos de pré-tratamento podem ser utilizados em biomassas para aumentar o rendimento e qualidade do processo de digestão anaeróbia. Para biomassas sólidas, diversas técnicas podem ser utilizadas, como: processamento mecânico, pré-tratamento ácido, pré-tratamento alcalino, pré-tratamento com amônia e explosão de vapor (Agarwal et al, 2022). Muitos estudos apontam o uso da vinhaça diretamente nos biogeradores, porém existem literaturas que mostram bons resultados no uso de pré-tratamentos como ozonização e uso de peroxidase. (Marques et al., 2013)

O uso de biogás beneficia significativamente o balanço energético das biorefinarias. Seu alto teor de metano o torna um ótimo combustível para os sistemas de cogeração. Embora suas vantagens do ponto de vista energético sejam vastas, o biogás é uma corrente muito corrosiva devido a presença de sulfeto de hidrogênio (H₂S) em sua composição, gerando a necessidade de cuidados especiais com os equipamentos utilizados. Além de ser um elemento agressivo em termos de corrosão, é considerado uma substância poluente para o ar, tendo suas emissões limitadas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e extremamente perigoso para a vida humana (Salomon et al. 2009)

O uso de biogás como combustível em equipamentos motogeradores era limitado de acordo com a sua concentração de impurezas. As fabricantes recomendavam o uso desse combustível com até 100 ppmv de H₂S. Com o tratamento desse produto da digestão anaeróbia, retirando impurezas como sulfeto de hidrogênio, siloxanos e umidade, passou a ser possível a utilização em equipamentos motogeradores. Também é possível remover o dióxido de carbono, aumentando as concentrações de metano e por consequência, a sua densidade de energia. Diversas técnicas vêm sendo utilizadas na indústria, como por exemplo: absorção química (pode usar água ou produtos químicos), *pressure swing adsorption*, separação por membrana e técnicas criogênicas (Nguyen et al., 2021).

Digestato é o material que sobra após o processo de digestão anaeróbia. Devido a sua alta carga orgânica, possui um uso promissor como fertilizante, porém com alguns pontos negativos, como a possibilidade de contaminação dos reservatórios subterrâneos de água (devido à sua baixa capacidade de retenção de nutrientes) ou também emissão de CO₂ devido à quebra de frações de carbono não recalcitrante (Agarwal et al., 2022)

Tratamentos como gasificação, pirólise, carbonização hidrotérmica e inserção em biorefinarias de microalgas são algumas das possibilidades. Os dois primeiros tratamentos utilizam da componente sólida do digestato para produzir syngas (majoritariamente composto por CO+H₂), um combustível gasoso, e char, que pode ser utilizado para intensificar as reações da digestão anaeróbia para produzir mais metano. No processo de carbonização térmica é obtido elementos compostos de CO₂ e hidrochar, esse último pode ser utilizado como condicionador de solo. Por fim, pode ser utilizado como fonte de nutrientes quando inserido em biorefinarias de microalgas (Agarwal et al., 2022).

Na digestão anaeróbia da vinhaça, o sulfato é removido, reduzindo o teor de enxofre para uma concentração de menos de 1%, ao mesmo tempo que as concentrações de nutrientes essenciais, como potássio, nitrogênio e fósforo são mantidas. Com isso, tornou-se possível produzir biogás da vinhaça e simultaneamente não perder suas capacidades fertilizantes, podendo então ser aplicada nos campos (Parsaei et al., 2019)

1.2. Objetivo

O objetivo principal consiste em realizar um levantamento dos volumes e dos possíveis usos energéticos dos subprodutos do cultivo e processamento de cana de açúcar, sendo a palha, o bagaço, a torta filtro, a vinhaça, o licor de pentoses e a torta de lignina (estes dois últimos sendo gerados após a hidrólise do bagaço). A partir desse levantamento, pretende-se desenvolver simulações no software Excel para uma análise energética e de impacto ambiental que envolva a combinação de diversos cenários, com a caracterização energética dos processos de produção, podendo assim chegar a uma avaliação da eficiência e do impacto ambiental de uma biorrefinaria.

1.3. Estrutura do trabalho

Esse trabalho foi dividido em introdução, revisão da literatura, metodologia, resultados e conclusão.

Na introdução foi dada uma contextualização da importância do mundo sucro-alcooleiro para o Brasil, assim como informações da importância e as motivações para o desenvolvimento desse trabalho.

Na revisão da literatura, foi estudado o processo de geração de etanol e seus subsistemas. Além disso, foi feita uma extensa coleta de dados para servirem de referência para o desenvolvimento do estudo.

No tópico da metodologia, todo o processo para desenvolver a análise, como cenários de estudo e parâmetros calculados, foram explicados. Foi definido também, todos os dados que serão usados nas contas, como por exemplo, rendimentos de subprodutos e consumos energéticos.

Nos resultados foram exibidos os valores de todos os parâmetros calculados cenário a cenário

Por fim, na conclusão, os melhores cenários foram estabelecidos, demonstrando seus benefícios em comparação aos demais.

2. Revisão da Literatura

2.1. Características da Cana de açúcar

Da ordem das gramíneas, a cana de açúcar é uma planta da família *Poaceae*, assim como o milho, sorgo e arroz, a cana cresce em formato de touceira, como uma grande moita. É composta por duas partes, a aérea e a subterrânea. Como demonstrado na Figura 5, a parte aérea é dividida em estruturas, seu caule é em colmos (segmentado em nós e entrenós), suas folhas verdes (estrutura complexa compostas por bainha, colar e lâmina foliar), folhas secas e por fim o ponteiro (Marafon et al., 2012).

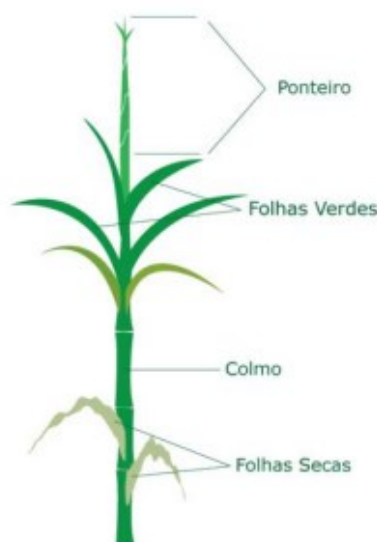


Figura 5 - Estruturas aéreas da cana de açúcar (CTC, 2015)

A parte subterrânea é subdividida em raízes e um tipo de caule subterrâneo chamado rizoma (Figura 6), que assim como o colmo, é segmentado em nós e entrenós (Silva et al., 2012).

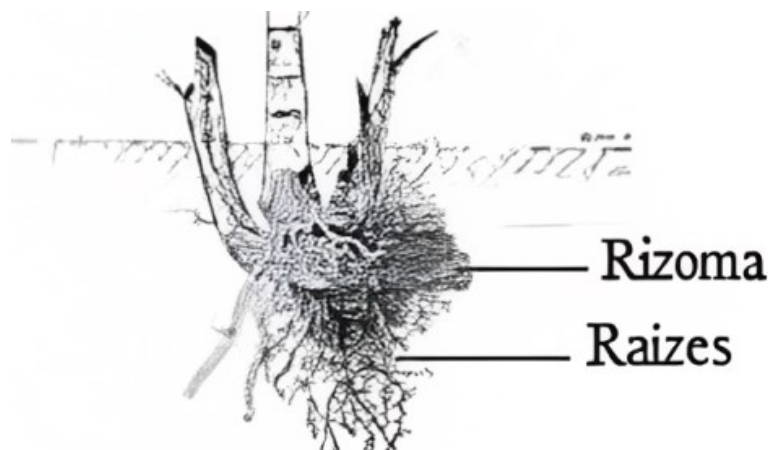


Figura 6 - Estruturas subterrâneas da cana de açúcar (Quinelato, 2016)

2.2. Plantio e Coleta da Cana de açúcar

Para o plantio de cana de açúcar, muitas variáveis precisam ser estudadas antes de se iniciar a operação. É necessário realizar uma pesquisa a respeito da melhor espécie da planta para se adaptar às condições do local escolhido. Essa etapa é essencial pois aumenta a produtividade, reduz o retrabalho e diminui potenciais gastos financeiros com novas mudas, mão-de-obra, dentre outros gastos (Rossetto et al., 2022). Análises de amostras de solo para correção de pH e medição da capacidade de fornecimento e de disposição de nutrientes, é de grande importância para que seja identificada a adubação correta, de maneira que nenhuma substância esteja presente acima e nem abaixo dos níveis ótimos, gerando um ambiente adequado para promover o crescimento das plantas, além de reduzir gastos com fertilizantes, corretivos e agrotóxicos (IFOPE Educacional, 2021).

Um canavial é dividido em talhões, que é uma porção do terreno disposta entre dois sulcos, sendo preferencialmente feitos planos e em linhas retas para otimizar as atividades dos maquinários pesados. Após a preparação e estudo do solo, as mudas são plantadas nos talhões. Nessa etapa existem dois métodos: o plantio manual ou mecanizado. No sistema mecanizado é usado uma máquina chamada “Plantadora de cana picada”, que distribui as mudas junto com adubo e inseticida, caso seja necessário (EMBRAPA, 2022). O método manual, que pode

também ser chamado de semimecanizado, consiste em utilizar uma máquina para fazer os talhões que, ao mesmo tempo deposita o adubo e o inseticida enquanto trabalhadores distribuem as mudas manualmente.

As melhores condições climáticas e ambientais para uma muda se desenvolver envolvem água em abundância, temperaturas altas e uma grande incidência solar. Existem sistemas de plantio ano-e-meio (cana de 18 meses), onde a muda é plantada entre os meses de janeiro a março, se desenvolve durante o final do verão e um crescimento muito lento com a entrada do outono devido ao frio e a indisponibilidade de água. A partir de setembro até abril do próximo ano o organismo entra em hibernação, para, então amadurecer quando completar 16-18 meses. Em algumas regiões do país também se é utilizado o sistema de ano (cana de 12 meses), sendo um método complementar ao sistema de ano-e-meio. Sua vantagem é gerar uma segunda época de plantio, otimizando o uso dos maquinários e da mão de obra; como desvantagens, o sistema tem uma produtividade reduzida, tendo em vista que o tempo para desenvolvimento das mudas é menor, e a falta de tempo disponível entre cada leva dificulta o preparo do solo, como a retirada das soqueiras e a incorporação de corretivos e adubos (EMBRAPA, 2022).

Antigamente, a prática da queima da palha da cana de açúcar era amplamente utilizada nas fazendas. Seu princípio era incendiar as plantações antes das colheitas, com o objetivo de facilitar o corte manual da planta, aumentar a segurança dos trabalhadores, e aumentar percentualmente a concentração de sacarose devido a evaporação da água (Ronquin et al., 2010). Hoje, é uma técnica proibida diante da promulgação, em 19 de setembro de 2002, da lei federal nº 11.241 (ALESP, 2002), na qual foi estabelecido um cronograma de proibição gradual dessa prática. A queima da cana gera poluição ao meio ambiente, liberando grandes quantidades de gases como monóxido de carbono, metano e óxido nitroso, que contribuírem para o aquecimento global e também representam uma ameaça à saúde humana, podendo causar sérias doenças respiratórias devido a partículas de fuligem dispersas no ar. Além de agravar a qualidade do ar e o avanço do aquecimento global, a queima do canavial também causa uma degradação do solo, pois as altas temperaturas eliminam grande parte da matéria orgânica, nitrogênio e bactérias, todos componentes importantes para a nutrição do solo. É uma ameaça à fauna e flora locais, visto que animais utilizam das plantações em busca de abrigo e

alimento, ficando a flora adjacente suscetível a possíveis incêndios acidentais, visto que as queimadas são realizadas em períodos de estiagem (Ronquin et al., 2010).

O início da mecanização dos campos no Brasil, tomou forma no final da década de 50, com o desenvolvimento do Plano Nacional da Indústria de Tratores Agrícolas (Jacto, 2023). Antes do desenvolvimento do plano, muitas fazendas optavam por continuar a base do trabalho manual devido ao fato de que o investimento para se ter um maquinário agrícola era elevado, tendo em vista que todos os produtos eram importados das mais diversas nacionalidades. Em decorrência disso, havia muitos problemas como a falta de assistência técnica, falta de peças de reposição, falta de um plano de revisão e manutenção e até mesmo falta de conhecimento e treinamento para operar os equipamentos. Com o Plano Nacional da Indústria de Tratores Agrícolas, a acessibilidade à mecanização foi facilitada, com uma melhor manutenção e maior estrutura para atendimento das necessidades gerais dos clientes, tornando a opção do trabalho mecanizado muito mais competitiva através de fontes nacionais (Amato Neto, 1985). Um ato mais recente que impulsionou ainda mais a implementação, foi o Protocolo Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro Paulista, cujo principal objetivo era oferecer uma série de benefícios aos produtores de cana. Dentre eles, destaca-se os incentivos à mecanização dos campos, em troca de antecipar o cronograma de fim da prática da queima imposto pela lei federal nº 11.241, aumentar a conservação do solo, a preservação das matas, além de outras ações (Gov. SP, 2012)

No processo da colheita, seja manual ou mecanizada, sem queima prévia, o foco é o colmo da planta, que passa por uma série de cortes, separando a base da planta, o ponteiro e o colmo, o qual é então picado. No sistema mecanizado, colhedoras atuam em conjunto com veículos de transbordo, normalmente um trator com uma caçamba acoplada. A colhedora avança sobre o plantio, utilizando seu sistema de corte, composto por dois discos de 700 mm responsáveis por cortar a base da planta, aproximadamente 20 cm acima do solo, e pelo eliminador de ponteiros que separa a ponta da planta do resto do corpo. O colmo da planta então é transportado por dois rolos até o picador, onde são cortados em pedaços de 230 mm a 350 mm, levados pela esteira até as caçambas, depositados nos caminhões, e levados até a usina de etanol (Magalhães, 2022).

2.3. Processo de produção de etanol

No estudo, não foi considerada a produção conjunta de açúcar. A Figura 7 apresenta um esquemático geral da produção de etanol de 1ª e 2ª geração.

Uma planta de etanol de 1ª geração contempla as fases de preparação da cana e extração do caldo, tratamento do caldo, concentração do caldo, fermentação, destilação e desidratação. No processo de produção de etanol de 2ª geração, uma etapa de pré-tratamento seguida de uma etapa de hidrólise são adicionadas ao sistema de 1ª geração. Toda a energia elétrica e calor para os processos da planta foram produzidos por cogeração na própria unidade.

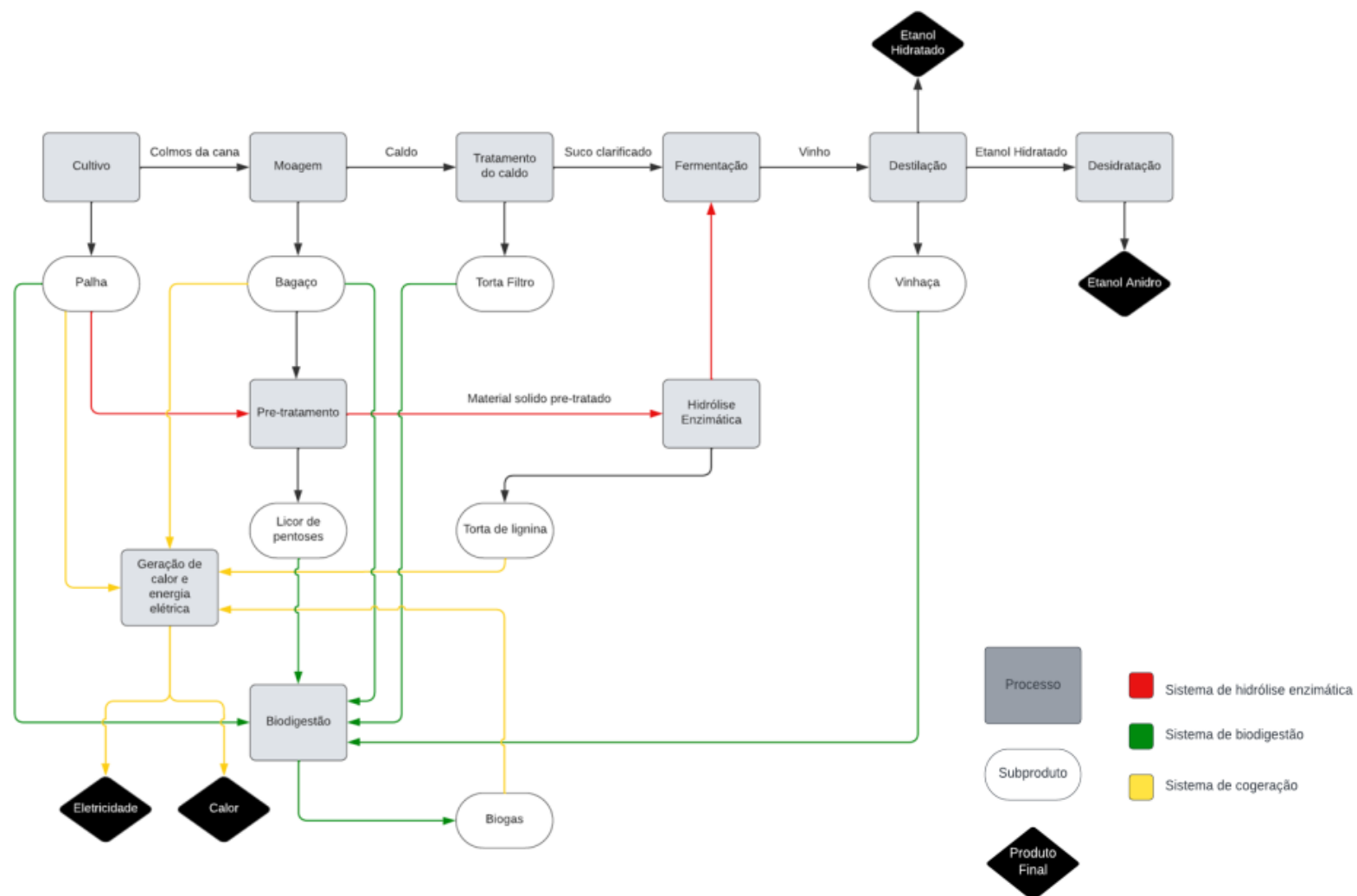


Figura 7 – Fluxograma do processo de produção de etanol de 1ª e 2ª geração (Elaboração própria baseado em dados de Palacios-Bereche et al, 2013)

2.3.1. Preparação da cana e extração do caldo

A cana de açúcar colhida é transporta por caminhões até as usinas. Ao chegar, passam por um processo de lavagem a seco, para retirar impurezas minerais e vegetais e preparar o material para as próximas etapas. É importante citar que uma lavagem utilizando água possivelmente iria acarretar a perda de açúcares, devido ao material recebido já estar picado (Dias et al., 2015). Os colmos são levados para serem picados por uma série de lâminas, quebrando as fibras e formando um corpo mais uniforme de matéria (Díaz, 2011).

A moagem é realizada por uma série composta de quatro a seis moinhos, e cada um deles possui um conjunto de 3 a 5 rolos de compressão. O colmo picado entra no primeiro moinho e, após o processo de extração do suco, é alimentado no próximo e assim por diante. No último moinho é adicionada água morna para embebição, aumentando a recuperação de sacarose no caldo (Dias et al., 2015). Usualmente, quando as usinas produzem tanto açúcar quanto etanol, o suco extraído pelos primeiros conjuntos de rolos é usado para produção de açúcar, devido a sua maior pureza do caldo, e o suco extraído pelos últimos conjuntos de rolos é usado para gerar etanol. Toda a etapa de preparação, extração e partida dos equipamentos tem um consumo de energia de 16 kWh/ton de cana (Carpio et al., 2017).

O caldo extraído passa por um filtro para separar pequenos pedaços de fibra e partículas que ainda estavam presentes. Esse material é então misturado à corrente sólida obtida após a moagem e formam um subproduto chamado de bagaço. Diferentes destinos podem ser dados ao bagaço, sendo o mais comum sua utilização para cogeração de energia elétrica e calor, porém, também pode servir como matéria-prima dos processos de hidrolise enzimática para produção de etanol de 2ª geração e para geração de biogás através da digestão anaeróbia (Castiñeiras-Filho, 2020).

2.3.2. Tratamento do caldo

Após extraído o caldo bruto da cana, esse líquido precisa passar por uma série de processos físico-químicos para remover impurezas antes de ser introduzido na etapa da fermentação. Segundo Dias et al. (2015), o suco é introduzido junto a uma corrente composta por material reciclado do final do tratamento do caldo. Os

processos são executados na seguinte ordem: filtração, primeiro aquecimento, calagem, segundo aquecimento e clarificação. Na primeira etapa, o caldo é filtrado, removendo quaisquer partículas que tenham restado. O primeiro aquecimento eleva a temperatura da mistura até por volta de 70°C, em seguida é adicionado cal em conjunto com o segundo aquecimento, até 105°C. Um processo de desaeração é realizado por um desaerador de condensado flash. Por fim é aplicado um polímero floculante seguido por uma última filtração. No final de todas essas etapas, obtemos dois subprodutos, o suco clarificado e uma lama.

Essa lama pode passar por um processo de calagem e filtração, formando um lodo chamado torta filtro (Castiñeiras-Filho, 2020). A torta filtro pode ser utilizada para fins de fertilizante, retornando ao canavial. Pode ser utilizado também para produção de biogás através da digestão anaeróbia.

2.3.3. Concentração do caldo

O suco clarificado precisa ser concentrado para atingir os níveis de açúcar desejados para ser realizada a etapa da fermentação. Segundo Castiñeiras-Filho (2020), sistemas de evaporação múltiplo efeito, com 5 estágios, são utilizados. Esse tipo de equipamento apresenta menor consumo de vapor em relação aos evaporadores de um único estágio, por aproveitar o calor residual do processo para aquecer a solução dos estágios subsequentes.

É enviado somente uma parte do caldo clarificado para o evaporador. As frações do volume enviado para a etapa de concentração e a corrente de suco clarificado que irá permanecer, são calculadas de forma a se obter uma concentração final de 22% de sacarose (Castiñeiras-Filho, 2020) para o processo posterior de fermentação.

2.3.4. Fermentação

A conversão dos açúcares em etanol ocorre na etapa de fermentação. A transformação do caldo concentrado em etanol é precedida por um processo de esterilização dessa corrente. Através de um choque de temperatura, os microrganismos presentes são eliminados, assim evitando qualquer possibilidade de competição do material a ser fermentado pelas leveduras (Castiñeiras-Filho, 2020).

Geralmente é conduzida através de um processo de fermentação em bateladas alimentadas. Leveduras de processos de fermentação anteriores, são

adicionadas em um tanque, previamente à introdução do caldo concentrado. Após introduzido, a mistura descansa no tanque por algumas horas, a uma temperatura de aproximadamente 30-34°C, em que os açúcares vão lentamente sendo fermentados e no final desse processo são obtidas duas correntes, uma líquida chamada vinho, que possui um teor de 10g/L de etanol e outra gasosa, rica em CO₂. A corrente gasosa é enviada para lavagens em colunas de absorção com o intuito de recuperar o etanol que foi carregado em forma de vapor (Dias et al., 2015). O vinho passa por um sistema de centrifugação para separar os materiais sólidos e recuperar o lêvedo (Castiñeiras-Filho, 2020).

2.3.5. Destilação

As correntes líquidas contendo o etanol enviadas para o processo de destilação. O processo mais comumente encontrado no Brasil é o de colunas de destilação, representado de forma simplificada na Figura 8. O vinho é processado inicialmente na coluna intermediária A1. O topo desta coluna alimenta a base da coluna D, enquanto a base da coluna A1, alimenta o topo da coluna A. Na coluna D são obtidos efluentes líquidos ricos em etanol, chamado flegma líquido e uma corrente de vapor que é eliminada do sistema, tendo uma parte reciclada e outra rejeitada. No fundo da coluna A, é obtido uma corrente líquida chamada vinhaça e no topo uma corrente de vapor, rica em etanol, chamada de vapor de flegma. Em um segundo conjunto de colunas de destilação, composto pela coluna B e B1, são inseridas as correntes de flegma, sendo obtidos o etanol hidratado no topo da coluna B, flegmassa no fundo da coluna B1 e óleo fúsel em uma região intermediária entre as duas colunas (Dias et al., 2015).

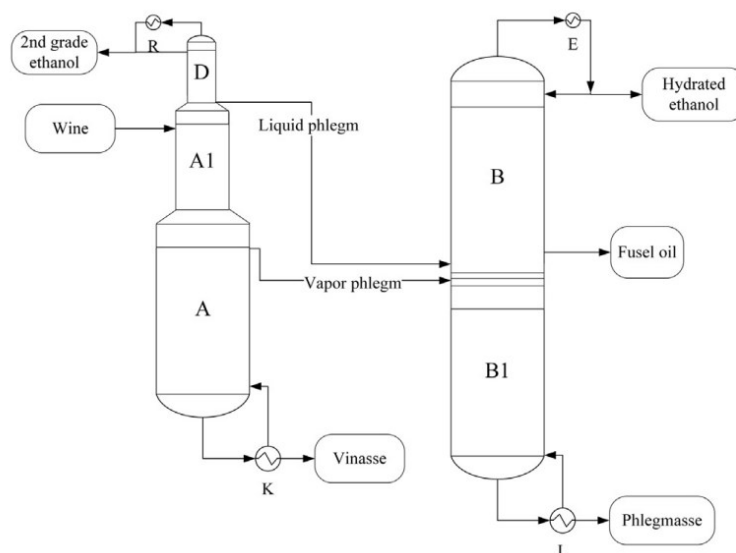


Figura 8 - Esquemático simplificado do processo de destilação do vinho (Bonomi et al., 2012)

A vinhaça obtida, no fundo da coluna A, normalmente é um rejeito do processo, com grande potencial de causar danos ambientais. Hoje, pode voltar aos campos para ser utilizada como fertilizante para as plantações de cana e também pode ser introduzida em um processo de biodigestão para formar biogás através da digestão anaeróbica (Purwanta et al.2022).

2.3.6. Desidratação

Por fim, uma parcela de etanol hidratado entra na etapa de desidratação. O etanol hidratado possui em média uma concentração de 95%, sendo necessário atingir cerca de 99,3% para ser misturado à gasolina comum. No Brasil, os métodos mais utilizados são os de destilação azeotrópica com ciclohexano, absorção em peneiras moleculares e destilação extrativa com monoetilenoglicol (Dias et al., 2015).

Destilação azeotrópica com ciclohexano: Nesse processo, é utilizado uma coluna de desidratação, representado pela Figura 9. O ciclohexano é adicionado no topo da coluna e o álcool a ser desidratado é inserido próximo do meio da coluna. O ciclohexano em contato com o etanol hidratado, causa uma reação formando uma mistura ternária heterogênea. Etanol anidro é produzido na base da coluna de desidratação, enquanto a mistura ternária é removida pelo topo da coluna. Essa

mistura é resfriada e separada em duas correntes líquidas no decantador, uma corrente orgânica, rica em ciclohexano, que é reciclada e inserida de volta na coluna de desidratação e outra corrente aquosa que é enviada para uma coluna de recuperação onde é produzido água pura e uma corrente contendo etanol que é enviada novamente para o início do processo (Abdala, 2017).

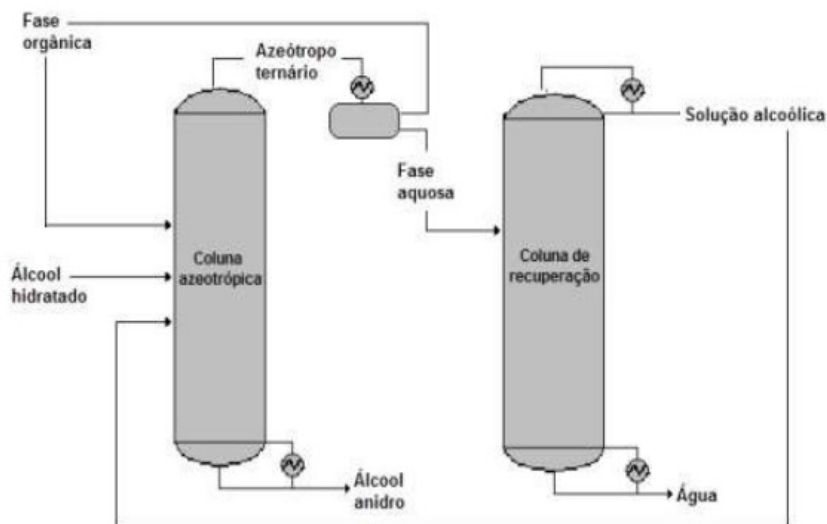


Figura 9 - Esquemático do processo de desidratação por adição de ciclohexano (Abdala, 2017).

Absorção em peneiras moleculares: Trata-se de um método não destilativo para se realizar a desidratação. É fundamentado na capacidade de alguns materiais de absorver seletivamente outros compostos de uma corrente. Comumente, o material utilizado são zeólitas, que é um sólido com uma estrutura microporosa capaz de absorver seletivamente moléculas de água (Lopes et al., 2011).

O etanol hidratado é superaquecido e inserido em uma coluna. A etapa de superaquecimento é importante para vaporizar a corrente de álcool que ao adentrar a coluna entra em contato com uma superfície de zeólita, tendo as moléculas de água absorvidas pelo desidratante e o vapor de etanol anidro é coletado, condensado e resfriado. As camadas de zeólita, ao ficarem saturadas de água, precisam passar pelo processo de regeneração. Assim, esses sistemas operam com duas ou mais colunas contendo camadas de zeólita, enquanto uma realiza o processo de desidratação, as outras são regeneradas (Abdala, 2017).

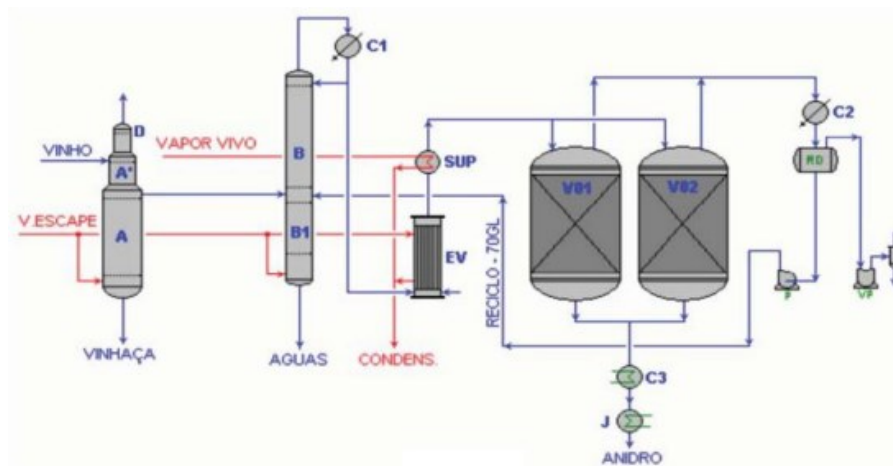


Figura 10 - Esquemático do processo de desidratação por peneira molecular (Ferreira et al., 2016)

Destilação extrativa com monoetilenoglicol: Segundo Dias et al. (2015), também é conhecido como destilação azeotrópica homogênea. Acompanhando o esquemático da Figura 11, é adicionado monoetilenoglicol (MEG) junto a corrente de etanol hidratado, quebrando o azeótropo original e formando um novo com a água (Abdala, 2017). Toda a coluna é aquecida, enquanto a mistura contendo o MEG se acumula no fundo, o vapor de etanol anidro é coletado no topo, condensado e resfriado. A corrente do fundo da coluna é enviada para um processo de recuperação do solvente, onde o MEG purificado será realimentado no início do sistema

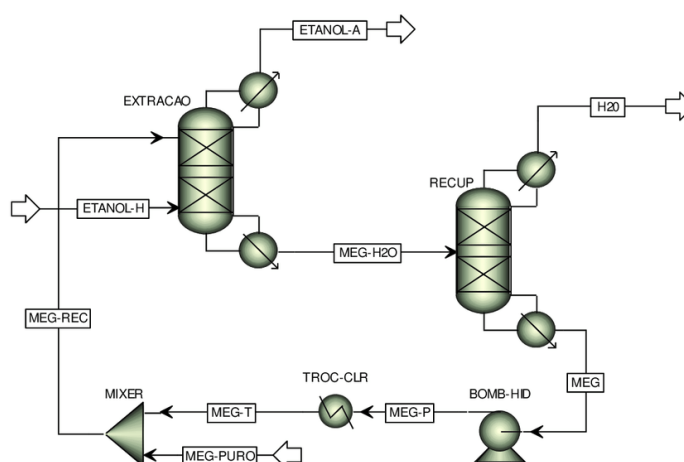


Figura 11 - Esquemático do processo de desidratação por adição de MEG. (Ponce et al., 2014)

2.3.7. Planta de etanol de 2ª geração

Devido a preocupações a respeito do foco das plantas de produção, seja açúcar ou etanol e com objetivo de otimizar os processos como um todo, incrementando o uso dos rejeitos e reduzindo os danos ambientais, muitas usinas estão integrando um sistema de geração de etanol de segunda geração a sua estrutura (Harding et al., 2012). É uma tecnologia muito vantajosa pois, como pode-se ver na Figura 7, é possível aproveitar-se da estrutura já estabelecida no processo de 1ª geração, reduzindo a quantidade de investimentos em sistemas (concentração, fermentação, destilação, desidratação e armazenamento), e aumentando a produção de etanol (sem precisar aumentar o tamanho das fazendas de plantio de cana), e tendo como matéria-prima uma classe de biomassa que não é tipicamente aproveitada para produção de etanol.

O bagaço e a palha da cana de açúcar podem ser utilizados como matéria-prima desse novo sistema. Todavia, naturalmente a produção de eletricidade e vapor são afetados, visto que, esses materiais também são insumos para a cogeração. É necessário um cuidado especial nessa etapa, visto que o uso de combustíveis vindos de fontes externas, potencialmente fósseis (gás natural, óleo combustível, etc.) seria indesejado (Harding et al., 2012).

2.3.8. Fase de Pré-tratamento da hidrólise enzimática

A etapa de pré-tratamento da biomassa lignocelulósica tem como objetivos, segundo Canilha et al. (2012), aumentar a área de contato do material, descristalizar a celulose, despolimerizar parcialmente a celulose, solubilizar a hemicelulose/lignina, modificar estruturalmente a lignina, maximizar o rendimento do processo de hidrólise enzimática, minimizar a perda de açúcares, e minimizar o custo operacional.

Como demonstrado em Gao et al., (2013), pode-se dividir o processo de pré-tratamento em 4 categorias: físico, físico-químico, químico e biológico, podendo ser usado mais de um tipo na mesma linha de produção.

- Pré-tratamentos físicos: moagem, pirólise e micro-ondas.
- Pré-tratamentos físico-químico: explosão por vapor, explosão por de amônia e explosão por CO₂

- Pré-tratamento químico: Ácido, alcalino, delignificação alcalina, ozonólise e organosolv
- Pré-tratamento biológico: Fungo lignolítico

O mais comum, no Brasil, é o pré-tratamento físico-químico por explosão de vapor. Em um reator, uma mistura de material lignocelulósico entra em contato com o vapor aquecido a 1250 kPa e 300 °C e correntes de H_2SO_4 (Castiñeiras-Filho, 2020). Grande parte da hemicelulose é hidrolisada em pentoses e utilizando um filtro, o licor de pentose é separado da corrente sólida obtida. Esse licor pode ser inserido na etapa de biodigestão ou, embora ainda não esteja sendo aplicado em escalas industriais, pode ser enviado para a etapa de fermentação, com uso de outros microorganismos, para se produzir etanol. A fração sólida obtida após o pré-tratamento é encaminhada a hidrólise enzimática (Dias et al, 2012).

De acordo com Nieder-Heitmann et al.(2020), o consumo de energia elétrica e de vapor do método organosolv é de aproximadamente 0,52 kW / ton matéria seca e 47,1 ton de vapor / ton de matéria seca. Para explosão de vapor foi encontrado um valor de aproximadamente 0,15 kW / ton de matéria seca e 11,0 ton de vapor / ton de matéria seca. E para ácido diluído 0,24 kW / ton de matéria seca e 5,5 ton de vapor / ton de matéria seca. Segundo Carvalho et al. (2020), foi encontrado um valor de consumo de energia elétrica e de vapor para o pré-tratamento por explosão de vapor de 9,5 kWh / ton de cana e 32,9 kg / ton de cana.

2.3.9. Hidrólise enzimática

A hidrólise enzimática é um processo bioquímico que utiliza enzimas catalisadoras que se ligam às ligações químicas do material a ser hidrolisado, adicionando uma molécula de água (H_2O), quebrando a ligação, e dividindo a molécula de celulose e hemicelulose (Souza et al., 2016). Os oligossacarídeos são então quebrados em açúcares menores: para a celulose, esse processo tem como resultado a produção de hexoses (glicose), e para a hemicelulose o resultado é a produção de xilose (Castiñeiras-Filho, 2020).

A corrente obtida é filtrada, separando uma corrente sólida, chamada torta de lignina, do licor de glicose. Esse material sólido, pode ser usado para fins de

cogeração na planta, enquanto o licor de glicose é misturado no caldo concentrado do processo de produção do etanol de 1ª geração (Castiñeiras-Filho, 2020).

2.4. Subprodutos da produção de etanol de 1ª e 2ª geração

2.4.1. Palha

Após a mecanização do campo, a palha da cana de açúcar passou a ser uma biomassa abundante. Sendo gerada a partir das folhas secas e pontas da planta, como podemos ver na Figura 12. É um material lignocelulósico, que pode variar sua composição de acordo a qualidade do solo, espécie da planta e as condições climáticas. A cada tonelada de cana coletada (colmos), são gerados cerca de 140kg de palha (Santos et al., 2013), do qual, segundo Menandro et al. (2016), 40% são compostos por ponteiros da cana açúcar e 60% de folhas secas.

Ungureanu et al. (2022) indica que sua composição em média se constitui de 40% de celulose, 25% hemicelulose e 18-20% de lignina; todavia, tal composição é significativamente variável, conforme dados revisados por Palacios-Bereche (2013), que aponta composições de 40, 30 e 23% para lignina, celulose e hemicelulose, respectivamente. Se mantidas sobre o solo, podem trazer benefícios como reduzir evaporação de água, reduzir a variação de temperatura do solo, aumento das atividades biológicas, redução da proliferação de ervas daninha (Rossetto et al., 2013), aumento no sequestro de carbono (Cerri et al., 2011) e reciclagem de nutrientes (Oliveira et al., 1999). Porém também existem malefícios de manter esse material nos campos, como causar um pior desenvolvimento do broto, maior incidência de insetos da cana e aumento dos riscos de incêndio (Rossetto et al., 2013). De acordo com um estudo realizado por Carvalho et al. (2017), a quantidade ótima de palha da cana de açúcar a ser deixada sobre o solo deveria ser de 7 ton / ha, porém o mesmo afirma que outros estudos apontam que 50% devem ser deixados. Naturalmente, diferentes espécies de planta e diferentes condições edafoclimáticas vão gerar diferentes quantidades de palha, por isso, o valor ótimo é variável caso a caso. A demanda energética dos equipamentos relacionados ao processamento da palha (como por exemplo transporte e coleta nos campos) foi de 25 kWh/ ton de palha (Sampaio et al., 2019).



Figura 12 - Palha da cana de açúcar deixada nos campos após a colheita (CNPq, 2017)

Nas últimas décadas, houve uma grande movimentação da comunidade científica para a pesquisa e desenvolvimento de outras maneiras de se aproveitar esses materiais, que até então eram queimados ou deixados sobre o solo. A palha da cana de açúcar demonstrou potencial para a produção de etanol de 2ª geração, eletricidade, calor (Santos et al., 2012) e biogás (Aguilar et al., 2021).

- **Etanol de 2ª geração:**

Obtendo-se uma concentração de glicose de 55,9% para ponteiros e 57,0% para folhas secas, após um pré-tratamento pelo método organosolv, Menandro et al. (2016) encontrou um rendimento de cerca de 94,1 kg de etanol / tonelada de ponteiro e 105,6 kg de etanol / tonelada de folhas secas. A partir do processo de hidrólise enzimática, segundo Santos et al. (2012), considerando um rendimento máximo teórico, com todas as reações estequiométricas sob conversão de 100%, pode-se obter 287 litros de etanol por tonelada de palha. Já, considerando uma concentração de glicose de $33,45 \pm 0,87$ g/L após um material pré-tratado por ácido diluído passar 24 h em hidrólise enzimática sob condições ótimas, uma fermentação subsequente resultou em $12,67 \pm 0,52$ g/L de etanol, com o rendimento do etanol de aproximadamente 62,74%, tem-se que é possível produzir cerca de 158.3 L de etanol por tonelada de cana (Mesa et al., 2017).

- **Cogeração:**

Menandro et al. (2016) realizou ensaios com 234 amostras para determinar seu respectivo poder calorífico. O material foi submetido a combustão em um calorímetro de combustão Ika Works C-200. Foram obtidos os valores de poder calorífico superior em barris de óleo equivalente (BOE), sendo assim, 2,6 BOE t⁻¹ para as folhas secas e 1,8 BOE t⁻¹ para os ponteiros. Para os valores de poder calorífico inferior, foram encontrados 11,2 MJ/kg de ponteiros e 15,6 MJ/kg de folhas secas.

Durante o estudo foi observado que materiais com grandes concentrações de potássio, cloro e enxofre tem uma tendência de causar incrustações no gerador de vapor, o que aumenta a complexidade do processo e os gastos com manutenção. Os ponteiros da cana em comparação com as folhas secas, possuem elevados níveis de K, Cl e S, tornando as folhas secas a matéria prima ideal para a cogeração.

De acordo com Suarez et al. (2010), usando um calorímetro isoperibólico, obteve-se um poder calorífico superior de 17,19 MJ/kg de palha e um poder calorífico inferior de 15,69 MJ/kg de palha. Santos et al. (2012) achou valores equivalentes a aproximadamente de 1,2 a 2,8 BOE por tonelada de palha e podendo gerar 500kWh de energia elétrica por tonelada de palha (ÚNICA, Cartilha da bioeletricidade, 2020).

- **Biodigestão:**

Em um estudo conduzido por De Paoli et al. (2011), foram feitos ensaios em 4 amostras de palha, sendo realizado pré-tratamento por reforma a vapor sob diferentes temperaturas (180, 190 e 200 °C), além de um experimento sem o pré-tratamento. Todas as amostras foram inseridas em um processo de digestão anaeróbia com intuito de produzir biogás. O maior rendimento de biogás foi da segunda amostra (190 °C), apresentando uma produção de 475 litros normais (1013 mbar e 273 K) por quilograma de solido volátil, sabendo que 74.9% da matéria seca dessa amostra de palha é composta por sólidos voláteis. Desse total de biogás, foi possível obter 229 litros normais de metano por quilograma de solido volátil.

Um outro estudo, desenvolvido por Janke et al. (2017), realizou uma combinação de pré-tratamento mecânico com diferentes concentrações de NaOH. O

experimento com melhor resultado foi o que utilizou maior concentração de NaOH, obtendo uma produção de metano de 291 mL por grama de sólido volátil, de uma palha com 68,3% de material volátil em sua composição. No sistema utilizado, foi consumido 5559 kWh/dia pelos equipamentos que misturam continuamente a corrente dentro dos biogeradores, e foram produzidos cerca de 406 toneladas de digestato por dia.

2.4.2. Bagaço

A fibra resultante após a extração do caldo da cana de açúcar, no processo de moagem, é chamada de bagaço (Figura 13). Assim como a palha, também é um material lignocelulósico, que pode variar sua composição de acordo da qualidade do solo, espécie da planta e as condições climáticas. Em média possui as proporções de 40% de celulose, 35% de hemicelulose e 15% de lignina (FAPESP, 1998).



*Figura 13 – Bagaço da cana de açúcar, produto final do processo de moagem
(Ferreira, Blog Syngenta Digital)*

O principal destino do bagaço é ser utilizado como combustível de caldeiras para a produção de energia elétrica, sendo a principal fonte de energia para o funcionamento das usinas, exatamente por ser uma biomassa de disponibilidade praticamente imediata. Por ser uma biomassa rica em celulose, também se torna um material interessante para ser usado produção de etanol de 2ª geração, além da produção de eletricidade. Para cada tonelada de cana de açúcar que é moída, 140

kg de bagaço são gerados (Santos et al., 2013). Já segundo Carpio et al. (2017), para cada tonelada de cana moída 250 kg de bagaço são gerados.

- **Etanol de 2ª geração:**

Segundo Grasel et al. (2017), após passar por pré-tratamento por ácido sulfúrico diluído e um processo de hidrólise ácida, o bagaço proporciona um rendimento de açúcar produzido de 13g/100g da biomassa em questão, obtendo posteriormente na fermentação, 96 litros de etanol por tonelada de bagaço. Shiyou Pan et al. (2023), encontrou, em uma cadeia de produção de xilose, um resultado de 124 litros de etanol por tonelada de bagaço da cana. Após um pré-tratamento químico utilizando ácido diluído, Carpio et al. (2017) encontrou uma produção de 158 litros de etanol por tonelada de bagaço.

- **Cogeração:**

Em relação a produção de eletricidade e calor, é estimado que cerca de 85% do bagaço disponível seja direcionado para cogeração na planta de etanol (Manochio et al., 2017). O bagaço possui um poder calorífico superior de 17,32 MJ/kg de bagaço e um poder calorífico inferior de 15,84 MJ/kg de bagaço (Suarez et al., 2010). Palacios-Bereche (2011) e Castiñeiras-Filho e Pradelle (2020) consideram em modelagem um poder calorífico inferior de 7,4 MJ/kg. Furtado (2023) considerou 6,7 MJ/kg na análise de sistemas de cogeração. Assim, o poder calorífico do bagaço possui certa variabilidade, a depender de seu conteúdo de fibras e grau de umidade. Segundo a Cartilha de Bioeletricidade (2020) produzida pela ÚNICA, uma tonelada de bagaço é capaz de gerar mais de 300 kWh para a rede elétrica, já Turdera et al. (2018), informa um valor de 120 kWh produzido por tonelada de bagaço. De acordo com os cálculos apresentados por Carpio et al. (2017), com uma tonelada de bagaço foi possível gerar cerca de 3,12 MWh.

- **Biodigestão:**

Assim como descrito no tópico da Palha, De Paoli et al. (2011) realizou os mesmos ensaios em 4 amostras de bagaço. Os maiores rendimentos de biogás foram na amostra pré-tratada a 190°C, obtendo um valor de 564 litros normais por quilograma de sólido volátil e um rendimento de metano de 265 litros

normais por quilograma de sólido volátil, sabendo que 97,4% do bagaço presente na amostra é composto por sólidos voláteis.

Um estudo realizado por Argwal et al. (2022), analisou a eficiência de geração de metano em diversos pré-tratamentos, como explosão por vapor, condicionamento de meio ácido ou alcalino, e uso de amônia. De acordo com seus resultados, a explosão por vapor obteve o maior rendimento com 197,5 mL de metano/g de bagaço.

2.4.3. Torta Filtro

Segundo Alves et al. (2017), a torta filtro é um material formado principalmente por matéria orgânica, composto do bagaço moído com lodo do processo de decantação (Figura 14). Sua composição pode variar devido a fatores como qualidade do solo, espécie da cana de açúcar, método de extração do caldo, método de filtragem e dentre outros parâmetros (Rabelo et al., 2015). Porém independentemente, é um material com alto teor de matéria orgânica e minerais como fósforo, nitrogênio, cálcio e magnésio, tornando assim um subproduto de grande impacto na adubação do solo, reduzindo custos e contaminação ambiental. A aplicação de torta filtro na colheita de cana de açúcar, de acordo com Gonçalves et al. (2021), em uma quantidade ligeiramente maior que as de fertilizantes minerais (de 102% a 109%), pode resultar nos mesmos benefícios para a produção, ao mesmo tempo que evita gastos com fertilizantes minerais.



Figura 14 – Torta filtro obtida após o processo de tratamento do caldo (Fertilizer-Machinery)

Outros usos para a torta filtro vem sendo pesquisados, como por exemplo o seu uso em processos de digestão anaeróbica com o intuito de produzir biogás para a produção de energia elétrica. Segundo o BNDES (2018), para cada tonelada de cana moída, é extraído do seu caldo, aproximadamente de 30 a 40 kg de torta filtro, e para cada tonelada desse subproduto é possível extrair através da digestão anaeróbica, cerca de 90 a 120 Nm³ de biogás (variando entre 54 e 72 Nm³ de biometano, considerando 60% de biometano na composição do biogás).

Um estudo realizado por Janke et al. (2019), analisou 3 amostras de torta filtro em um processo de biodigestão anaeróbia. A primeira foi submetida ao processo de forma crua, sem algum pré-tratamento, a segunda foi inserida em um sistema de autoclave e a terceira amostra foi inserida em um sistema de autoclave junto a uma corrente de NaOH. Foi constatado que os benefícios do pré-tratamento foram vistos somente no sistema semi-contínuo, obtendo uma concentração de metano de 251 mL/grama de material sólido volátil na terceira amostra. Na composição do material da amostra pré-tratada no sistema de autoclave com NaOH, 15% da matéria é composta por sólidos e dessa fração 52% de material volátil.

2.4.4. Vinhaça

Também conhecida como vinhoto, tiborna ou restilo, a vinhaça é um subproduto resultado da produção de álcool, após o processo de destilação fracionada do caldo de cana de açúcar fermentado (NOVACANA. Uso da vinhaça na cultura da cana-de-açúcar.). Caracteriza-se por ser um líquido de cor amarronzada, odor forte, com ph ácido (3.5 - 5.0), alta demanda química e biológica de oxigênio (Torres et al., 2023.) e com composição que consistem em 93% de água e 7% de sólidos, com grandes concentrações de potássio, compostos fenólicos e melanoidina (de Godoi et al., 2019). Para cada litro de bioetanol gerado, 10-15 litros de vinhaça são produzidos (Purwanta et al., 2022). Isso se somado às suas características descritas anteriormente, a tornam um subproduto de alto potencial de contaminação ambiental, portanto alternativas para sua utilização são necessárias.



Figura 15 – Vinhaça resultante da etapa de destilação do vinho (Chiappini, 2022)

A fertirrigação, é uma alternativa muito utilizada nos dias de hoje, devido ao seu baixo custo de aplicação e manutenção, fácil introdução nas colheitas, pois não depende de um maquinário complexo e gera aumento do rendimento das safras (Christofolletti et al., 2013). A transformação da vinhaça em fertilizante organo-mineral é uma opção vantajosa em relação a fertirrigação. Isso reduz a perda de

nitrogênio, diminui a emissão de gases de efeito estufa, beneficia a microbiologia do solo, promove o crescimento das raízes e aumenta a oferta de fósforo (Carpanez et al., 2022).

Outra alternativa é a fermentação anaeróbica para produzir biogás. Segundo Purwanta et al. (2022), em temperaturas termofílicas e utilizando um reator de leito fixo, é possível chegar a uma produção de energia de gás biometano de 177,7 MJ/m³ de vinhaça, outros estudos apontam resultados como uma produção de 9,20 m³ de biogás para cada m³ de vinhaça em um processo (Longati et al., 2020) e 10 m³ de biogás (60% metano) para cada m³ de vinhaça (Pazuch et al., 2017). Em um biogerador por membrana de dois estágios, foi consumido um total de 17 MWh/ano obtendo uma produção de metano de 5,4 Nm³/m³ de vinhaça.

2.4.5. Licor de Pentoses

Segundo Mariano et al. (2013), com 58,3 toneladas de material lignocelulósico seco, isso inclui bagaço, palha e materiais não reativos do processo de produção de etanol de 2ª geração, é possível gerar cerca de 13,7 toneladas de açúcares em uma corrente de 110.8 m³ de licor de pentose. Através da biodigestão desse subproduto, pode-se gerar 3045 Nm³ de biometano por hora, que então é encaminhado para a cogeração na caldeira.

Alguns estudos apontam que através de 15,3 kg de bagaço pode gerar, através do mesmo processo, cerca de 130kg de licor de pentose, e com um resultado final de 0,924 kg de biogás através da biodigestão (Palacios-Bereche et al., 2013).

Lima et al. (2020), achou resultados a respeito do rendimento de biometano a partir da biodigestão do licor de pentoses, de aproximadamente 496,00 L de biometano / kg de solido volátil, com uma concentração de sólidos voláteis de 91%.

2.4.6. Torta de Lignina

Resultado do processo de filtragem da corrente que sai da etapa da hidrólise enzimática, a torta de lignina tem seu principal uso sendo sua queima nos sistemas de cogeração. Segundo Palacios-Bereche et al. (2013), para cada 15,3 kg de biomassa que são enviados para a produção de etanol de 2ª geração, 6,5 kg de torta de lignina são gerados. Já, de acordo com Carvalho et al. (2020), para cada

tonelada de bagaço, são gerados 79,2 kg de torta de lignina. Logo após ser filtrada, a torta de lignina possui uma concentração de água de cerca de 70%. Para servir como um bom combustível nas caldeiras, esse material precisa passar por um processo de remoção de água, reduzindo a concentração para cerca de 50%, e consumindo nessa etapa cerca de 56,09 kWh/kg de matéria seca. Após esse processo, é alcançado um valor de poder calorífico inferior de cerca de 8,3 MJ/kg de torta de lignina (Palacios-Bereche et al., 2017). Em outras literaturas foi encontrado o valor de poder calorífico inferior de aproximadamente 6,4 MJ/kg de torta de lignina (Carvalho et al., 2020)

3. Metodologia:

Para o desenvolvimento da metodologia desse trabalho, serão utilizadas, como dados de referência, as informações coletadas na pesquisa realizada na seção 2 e dados coletados de duas modelagens conduzidas em Castiñeiras-Filho e Pradelle (2020), uma contendo todo o bagaço para cogeração, essa irá representar o caso base, e outra contendo todo o bagaço para hidrólise enzimática. Para avaliação do melhor uso para os subprodutos da produção de etanol da cana de açúcar, diferentes cenários serão analisados levando em conta três principais parâmetros a serem calculados, são eles: eficiência energética (NER), as emissões totais de CO₂ e o impacto líquido em kg de CO₂. Na Tabela 3, é possível visualizar as possíveis aplicações de cada subproduto.

Tabela 3 - Possíveis destinos para cada subproduto da produção de etanol da cana de açúcar.

Resíduos Processos	Palha	Bagaço	Torta Filtro	Vinhaça	Licor de Pentose	Torta de Lignina
Cogeração	X	X	-	-	-	X
Etanol de 2ª geração	X	X	-	-	-	-
Biodigestão	X	X	X	X	X	-

Serão estudados 6 diferentes cenários com um caso base para fins de comparação. Em todos os casos, a vinhaça e a torta filtro serão utilizados nos sistemas de biodigestão, exceto no caso base. A grande diferença de caso para caso será o destino da palha e do bagaço. Nos cenários 1, 2 e 3, somente o bagaço é utilizado, sem uso da palha em nenhum dos sistemas. Já nos cenários 4,5 e 6, é o inverso, somente a palha é utilizada, sem uso do bagaço em nenhum dos subsistemas. Para os cenários 3 e 6, onde há a utilização do sistema de etanol de 2ª geração, haverá a produção de licor de pentoses, que será inserido no sistema de biodigestão, e torta de lignina, que seria introduzida no sistema de cogeração

- **Cenário 0: Caso Base**

Neste cenário, toda a palha é deixada nos campos, portanto não é utilizada em nenhum dos sistemas da usina. Todo o bagaço produzido é utilizado como combustível nas caldeiras do sistema de cogeração, gerando vapor e eletricidade para alimentar a cadeia produtora. A vinhaça e torta filtro geradas são descartadas. Como não há produção de etanol de 2ª geração, os subprodutos originados do processo de hidrólise não são produzidos. Os índices coletados e calculados para esse cenário serão utilizados como referência para os demais cenários

- **Cenário 1: Bagaço para cogeração**

Neste cenário, toda a palha é deixada nos campos, portanto não é utilizada em nenhum dos sistemas da usina. Todo o bagaço produzido é utilizado como combustível nas caldeiras do sistema de cogeração, gerando vapor e eletricidade para alimentar a cadeia produtora. A torta filtro e a vinhaça gerados, são consumidos pelos biodigestores para produzir biogás, posteriormente sendo queimado no sistema de cogeração. Como não há produção de etanol de 2ª geração, os subprodutos originados do processo de hidrólise não são produzidos.

- **Cenário 2: Bagaço para biodigestão**

Neste cenário, toda a palha é deixada nos campos, portanto não é utilizada em nenhum dos sistemas da usina. Todo o bagaço produzido é destinado aos sistemas de biodigestão, que, assim como a torta filtro e vinhaça, irão produzir biogás para servirem de combustível nos sistemas de cogeração. Como não há produção de etanol de 2ª geração, os subprodutos originados do processo de hidrólise não são produzidos.

- **Cenário 3: Bagaço para etanol de 2ª geracao**

O bagaço, nesse caso, é utilizado para a produção de etanol de 2ª geração. A torta filtro e a vinhaça serão utilizadas para geração de biogás. Os diferenciais, além da maior produção de etanol, é a disponibilidade do licor de pentose e da torta de lignina. O primeiro será utilizado na cogeração, como alimento das caldeiras e o segundo será inserido nos biodigestores para produção de biogás.

- **Cenário 4: Palha para cogeração**

A partir desse cenário, o bagaço passa a não ser considerado nas análises e a palha passa a ser a principal biomassa. Toda a palha é queimada nas caldeiras, o bagaço não é utilizado em nenhum processo. A torta filtro e a vinhaça são consumidos pelos biodigestores para produzir biogás. Como não há produção de etanol de 2ª geração, os subprodutos originados do processo de hidrólise não são produzidos.

- **Cenário 5: Palha para biodigestão**

Nesse cenário a palha é introduzida no sistema de biodigestão, assim como a vinhaça e a torta filtro, sendo consumidas e gerando biogás para cogeração. Como não há produção de etanol de 2ª geração, os subprodutos originados do processo de hidrólise não são produzidos.

- **Cenário 6: Palha para etanol de 2ª geração**

Toda a palha é introduzida nos sistemas de etanol de 2ª geração, aumentando a produção de etanol em comparação com os cenários anteriores. A torta filtro e vinhaça geradas são utilizadas nos sistemas de cogeração. Dos subprodutos da hidrólise, a torta de lignina é utilizada nos sistemas de cogeração e o licor de pentose é biodigerido para produção de biogás.

3.1. Descrição do sistema e Dados de referência

3.1.1. Colheita

Todos os dados utilizados para o cálculo dos parâmetros, foram gerados, tendo como base, um processamento de 500 toneladas de cana de açúcar. Tendo em vista que uma usina de produção de etanol convencional, tem a capacidade média de processamento de 500 ton .h⁻¹ de cana, todos os valores encontrados são referentes a uma operação de 1 hora das usinas (Castiñeiras-Filho, 2020).

A primeira etapa é a colheita da cana de açúcar. A máquina colheitadeira corta a planta, separando o colmo, do ponteiro, folhas e raízes. Veículos leves, transportam a matéria prima dentro dos terrenos das fazendas e depositam sua

carga em caminhões que farão o transbordo da cana até as refinarias (Cardoso et al, 2013). Para suprir o funcionamento desses equipamentos, é consumido 13,52 MJ de óleo diesel/ton de cana (Castiñeiras-Filho, 2020) e, por consequência, emitido 31,8 kg de CO₂/ton de cana (Furtado, 2023).

O ponteiro e as folhas, que foram separados do colmo, são deixados nos campos, para secarem naturalmente, e formam o subproduto da palha, em um rendimento de aproximadamente 140 kg de palha/ton de cana (Santos et al., 2013). Nesse estudo, para os cenários 4, 5 e 6, 50% da palha produzida é coletada a partir do sistema de *baling* (Cardoso et al, 2013), e então utilizada para cogeração, biodigestão ou hidrólise enzimática. Nesse sistema de coleta, a palha é compactada, amarrada em fardos para facilitar o transporte e armazenamento, e então levada para as usinas por meio de caminhões. Os outros 50% são deixados nos campos para fins já demonstrados na seção 2.4.1.

Para suprir todo o maquinário de processamento e transporte da palha, é consumido 237 MJ de óleo diesel/ton de cana (Carvalho et al., 2017), emitindo 2,6 kg CO₂/litro de óleo diesel (De Carvalho, 2011), além de também consumir 90 MJ/ton de palha de energia elétrica (Sampaio et al., 2019).

É importante frisar que, para a coleta de emissões e consumo do sistema, foi considerado uma distância percorrida pelos caminhões de cerca de 30 km das fazendas até as refinarias (Cardoso et al, 2013).

Para auxílio das contas referentes ao consumo energético e emissões do óleo diesel, foram utilizados um poder calorífico inferior de 42,18 MJ/Kg de óleo diesel e uma densidade de 0,84 Kg/L de óleo diesel (GOV.BR - Anuário fatores de conversão, 2020).

A Tabela 4 apresenta os dados referentes a etapa da colheita, para a realização das análises.

Tabela 4 – Parâmetros referentes a etapa de colheita da cana de açúcar e coleta de palha

Dados gerais da etapa de colheita da cana de açúcar:		
Cana de Açúcar (ton)	500,00	Castiñeiras-Filho (2020)
Cana de açúcar (ton /ha.ano)	76,60	Castiñeiras-Filho (2020)

Consumo de diesel no canavial (MJ/ha.ano)	1035,30	Castiñeiras-Filho (2020)
Consumo de diesel para coleta e transporte da cana (MJ/ton cana)	13,52	Castiñeiras-Filho (2020)
Consumo de diesel para preparo e transporte da palha (MJ/ton palha)	237,00	Carvalho et al. (2017)
Consumo de energia elétrica para preparo e transporte da palha (MJ/ton palha)	90,00	Sampaio et al. (2019)
Emissões de CO₂ do Óleo Diesel (kg CO₂/L Diesel)	2,60	De Carvalho (2011)
Emissões de CO₂ das etapas de colheita da cana de açúcar (kg/ton cana)	31,80	Furtado (2023)
Densidade do diesel (kg/L)	0,84	GOV.BR - Anuário fatores de conversão (2020)
Densidade do CO₂ (kg/m³)	1,84	Gas Encyclopedia
PCI Diesel (MJ/kg)	42,18	GOV.BR - Anuário fatores de conversão (2020)

3.1.2. Usina de etanol de 1ª geração

Chegando na usina, a cana passa por uma lavagem a seco para retirada de impurezas e em seguida é inserida na etapa de moagem, onde passa por uma série de rolos que comprimem os colmos, separando o bagaço do caldo da cana (Dias et al., 2015). Essa etapa de moagem consome cerca de 16 kWh/ton de cana (Carpio et al., 2017) e gera, aproximadamente 264 kg de bagaço/ton de cana (Castiñeiras-Filho, 2020). O caldo segue para a etapa de tratamento e o bagaço pode ser utilizado em três possíveis sistemas que serão aprofundados em breve, o sistema de cogeração, sistema de biodigestão e sistema de hidrólise enzimática.

O caldo bruto é introduzido nos sistemas de tratamento, onde irá passar por uma série de etapas, envolvendo filtrações, aquecimentos, calagem e clarificação (Dias et al., 2015). Essa etapa tem como objetivo separar o suco clarificado de uma lama, que posteriormente é tratada e filtrada, obtendo o subproduto da torta filtro. Esse, será utilizada para alimentar os biodigestores e produzir biogás. Para os cálculos, foi utilizado um rendimento de aproximadamente 32 kg de torta filtro/ton de cana (Castiñeiras-Filho, 2020).

O suco clarificado precisa agora ser concentrado para alcançar os níveis de açúcares necessários para a etapa de fermentação, para isso, a corrente é introduzida em um sistema de evaporação múltiplo efeito, onde passa por uma série de 5 estágios de aquecimento, separação das fases líquida e vapor e troca de calor entre as fases (Castiñeiras-Filho, 2020).

Na fermentação, o caldo concentrado é adicionado em um tanque e entra em contato com leveduras, que irão lentamente fermentar os açúcares e transformar esse caldo em uma corrente chamada vinho. No final, o vinho é centrifugado para remoção de partículas sólidas e enviado para a destilação (Dias et al., 2015).

A corrente de vinho é aquecida e injetada em colunas de destilação, onde são obtidos diferentes subprodutos, mas dentre os que nos interessam estão presentes o etanol hidratado, que parte é extraído para ser comercializado, com um rendimento de 33,51 kg/tonelada de cana e a outra parte segue para a etapa de desidratação (Castiñeiras-Filho, 2020). A vinhaça também é um produto da destilação, obtida a uma fração de 11 L/L de etanol (Castiñeiras-Filho, 2020). A vinhaça é introduzida nos sistemas de biodigestão para produção de biogás.

Foi considerado que parte desse etanol hidratado é extraído do sistema para ser comercializado, a outra parte segue para a desidratação, com o intuito de ser convertido em etanol anidro. A corrente de etanol hidratado é adicionada em um destilador por monoetilenoglicol (MEG), processo também conhecido como destilação azeotrópica homogênea. Ao entrar em contato com as partículas de MEG, o azeótropo original é quebrado e é formado um novo com a água presente no etanol. Esse novo azeótropo se acumula na base do destilador, enquanto o etanol anidro é extraído pelo topo com um rendimento de 35,45 kg/tonelada de cana (Castiñeiras-Filho, 2020).

A Tabela 5, resume os rendimentos de cada subproduto da produção de etanol de 1ª geração.

Tabela 5 – Rendimento por subproduto da produção de etanol de 1ª geração

Produtos da Usina Convencional	Rendimento	Referencias
Palha (kg/ton de cana)	140,00	Santos et al. (2013)
Bagaço (kg/ton de cana)	264,00	Castiñeiras-Filho (2020)
Torta Filtro (kg/ton de cana)	32,00	Castiñeiras-Filho (2020)
Vinhaça (L/L etanol)	11,00	Castiñeiras-Filho (2020)

Etanol Hidratado (kg / tonelada de cana)	33,51	Castiñeiras-Filho (2020)
Etanol Anidro (kg / tonelada de cana)	35,45	Castiñeiras-Filho (2020)

3.1.3. Sistema de Hidrolise Enzimática

Com intuito de gerar mais etanol, é possível introduzir biomassas lignocelulósicas, como bagaço e palha em sistemas de hidrolise enzimática. A biomassa precisa, inicialmente ser pré-tratada em sistemas de explosão de vapor, onde boa parcela da hemicelulose do material é transformado em licor de pentoses, em um rendimento de 10 L/kg de biomassa pré-tratada. Pode ser utilizada como alimento dos biodigestores para produção de biogás (Lima et al., 2020).

Em seguida, o material é enviado para a hidrólise enzimática, onde entra em contato com enzimas catalisadoras que transformam a celulose e a hemicelulose restante em açúcares fermentáveis. Uma etapa de filtração é realizada para separar a torta de lignina da corrente líquida de açúcares, com um rendimento de 0,42 kg de torta de lignina/kg biomassa hidrolisada (Palacios-Bereche et al., 2013). Essa corrente líquida é inserida na etapa de fermentação do sistema original de produção de etanol de 1ª geração e a torta de lignina pode ser utilizada nos sistemas de cogeração.

No cenário 3, todo o bagaço é alimentado nos sistemas de hidrólise enzimática, segundo a simulação de Castiñeiras-Filho (2020), para cada tonelada de bagaço consumido, 36 kg de etanol de 2ª geração é produzido.

Já, para o cenário 6, onde toda a palha é alimentada nos sistemas de hidrolise, foi utilizado um rendimento, encontrado em Menandro et al. (2016), de cerca de 94,1 kg de etanol/tonelada de ponteiro e 105,6 kg de etanol/tonelada de folhas secas. Para fins de facilitar os cálculos, foi utilizado uma média desses valores por tonelada de palha, obtendo assim 99,85 kg de etanol/ton de cana de açúcar.

Na Tabela 6, estão resumidos os rendimentos dos subprodutos da produção de etanol de 2ª geração, como também os rendimentos de etanol de 2ª geração para cada tipo de biomassa hidrolisada.

Tabela 6 – Rendimentos do sistema de hidrólise enzimática

Subprodutos	Rendimentos	Referencias
Licor de pentoses (L/kg de biomassa pré-tratada)	10,00	Lima et al. (2020)
Torta de Lignina (kg/kg biomassa hidrolisada)	0,42	Palacios-Bereche et al. (2013)
Etanol 2ª geração do bagaço (kg/ton bagaço)	36,00	Castiñeiras-Filho (2020)
Etanol 2ª geração da palha (kg/ton de palha)	99,85	Menandro et al. (2016)

Após o processo de filtragem, a torta de lignina exibe inicialmente uma concentração de água em torno de 70%. Para otimizar seu uso como combustível nas caldeiras, é necessário submetê-la a um procedimento de remoção de água. Esse processo visa reduzir a concentração para aproximadamente 50%, demandando uma energia de aproximadamente 56,09 kWh por kg de torta de lignina (Palacios-Bereche et al., 2017).

A Tabela 7 apresenta as demandas energéticas e emissões de CO₂ do sistema de hidrólise enzimática. Foi considerado um consumo de cerca de 0,55 kg de vapor/kg de biomassa pré-tratada, para o processo de pré-tratamento por explosão de vapor, e um consumo elétrico de aproximadamente 0,46 kWh/kg de biomassa hidrolisada referente ao equipamento de alimentação de biomassa (Palacios-Bereche et al., 2017).

Durante o processo de hidrólise, foi estimado um consumo de enzimas catalisadoras de 20g/kg biomassa hidrolisada (Chandel et al., 2019). Essas, emitem uma parcela de CO₂ referente a 5,1 kg CO₂/kg de enzima (Wang et al., 2014).

Tabela 7 – Consumos energéticos e emissões referentes ao sistema de hidrólise enzimática

Consumos energéticos e emissões do sistema de hidrólise enzimática		
Consumo de vapor no pré-tratamento (kg de vapor / kg de biomassa pré-tratada)	0,55	Palacios-Bereche et al. (2017)

Consumo elétrico para remoção de água da torta de lignina (kWh/kg torta de lignina)	56,09	Palacios-Bereche et al. (2017)
Consumo elétrico para alimentação das biomassas no sistema (kWh / kg de biomassa hidrolisada)	0,46	Palacios-Bereche et al. (2017)
Consumo de enzima (g/kg de biomassa hidrolisada)	20,00	Chandel et al. (2019)
Emissões de CO₂ do sistema de hidrolise enzimática (kg CO₂ / kg de enzima)	5,10	Wang et al. (2014)

3.1.4. Sistema de biodigestão

Para a simulação desse processo foi assumido uma concentração de biometano no biogás de aproximadamente 60% (Janke et al., 2017). Diferentes subprodutos foram considerados como alimento para os reatores de biodigestão, são eles: bagaço, palha, torta filtro, vinhaça e licor de pentoses.

Para o bagaço, foi considerado uma produção de biometano de 197,5 L/kg bagaço (Argwal et al., 2022).

Para a palha, foi assumido uma produção de biometano de 229 L/kg de sólido volátil, considerando uma concentração de sólidos voláteis de 68% (De Paoli, 2011).

No caso da torta filtro, diferentes valores foram encontrados nas referências, portanto foi assumido um valor médio dentre os apresentados por BNDES (2018) e Janke et al. (2019), assim, foi obtido uma conversão de biometano de 48,6 m³/ton torta filtro.

Para a vinhaça, foi assumido um valor, retirado do Pazuch et al. (2017), de 6 m³ de biometano/m³ de vinhaça.

Por fim, para o licor de pentose, diferentes estudos foram considerados, e seus valores debatidos, chegando a uma conclusão de que Lima et al. (2020) era o mais consistente. O rendimento utilizado foi de 496,31 L de biometano/kg de sólido volátil, considerando uma concentração de sólidos voláteis de 91%.

A Tabela 8 resume todos os rendimentos de biometano por subproduto, incluindo as concentrações de sólidos voláteis para a palha e licor de pentoses.

Tabela 8 – Rendimentos do sistema de biodigestão

Subproduto	Rendimento	Referencias
Bagaço (L/kg bagaço)	197,50	Argwal et al. (2022)
Palha (L/kg de solido volátil)	229,00	De Paoli (2011)
Torta Filtro (m³/ton torta filtro)	48,60	Estimado a partir de BNDES (2018) e Janke et al. (2019)
Vinhaça (m³ / m³ de vinhaça)	6,00	Pazuch et al. (2017)
Licor de pentoses (L/kg de solido volátil)	496,31	Lima et al. (2020)
Concentração de sólidos voláteis na palha	68%	De Paoli (2011)
Concentração de sólidos voláteis no licor de pentoses	91%	Lima et al. (2020)

Em relação ao consumo elétrico do reator, foram considerados dois valores distintos. O primeiro valor é de 131,67 kWh/ton de biomassa (Janke et al., 2017), esse consumo é referente a biodigestão da palha, mas devido à dificuldade de encontrar referências a respeito dos outros subprodutos, foi assumido esse parâmetro para a biodigestão da palha, bagaço, torta filtro e licor de pentoses. Para a vinhaça, foi utilizado o valor de 0,046 kWh/m³ (Salomon et al., 2011). Esses consumos são referentes ao equipamento para movimentar a mistura dentro dos reatores. A Tabela 9 resume os valores de consumo elétrico.

Tabela 9 – Consumos elétricos do sistema de biodigestão

Consumo de Eletricidade		
Consumo referente ao reator dos subprodutos sólidos (kWh/ton de biomassa)	131,67	Janke et al. (2017)
Consumo referente ao reator da vinhaça (kWh/ m³ de vinhaça)	0,046	Salomon et al. (2011)

3.1.5. Sistema de cogeração

Para suprir as demandas elétricas e térmicas da usina, é empregado um sistema de cogeração operando de acordo com um ciclo rankine. Em uma caldeira, é adicionado combustível para queima, gerando vapor superaquecido, que circula a altas pressões e temperaturas pelo ciclo. O sistema possui quatro turbinas, três

delas são responsáveis por produzir eletricidade, gerando 16 kWh de energia elétrica, para alimentar os sistemas da usina, e eletricidade excedente, e a quarta é responsável pela produção direta de 12kWh de trabalho necessário para operar os sistemas de moagem (Castiñeiras-Filho, 2020). Ao longo do ciclo, parcelas do vapor gerado são desviados para suprir as necessidades térmicas dos processos de concentração, fermentação, destilação, desidratação e dependendo da configuração da usina, pré-tratamento por explosão a vapor.

Para cada cenário desse estudo, diferentes combustíveis foram utilizados para alimentar as caldeiras, em alguns casos sendo utilizado mais de um combustível. A Tabela 10, resume os combustíveis utilizados em cada cenário, incluindo o caso base.

Tabela 10 – Combustíveis utilizados cada cenário

Cenários	Combustíveis
Caso Base	Bagaço
Cenário 1	Bagaço Biogás
Cenário 2	Biogás
Cenário 3	Biogás Torta de Lignina
Cenário 4	Palha Biogás
Cenário 5	Biogás
Cenário 6	Biogás Torta de Lignina

Para o cálculo da energia elétrica gerada, foi considerado um poder calorífico inferior (PCI) dos subprodutos, que são demonstrados na Tabela 11. Para os subprodutos sólidos, foi considerado uma conversão para energia elétrica nas turbinas de 20% (Castiñeiras-Filho, 2020) e quanto ao biometano, uma conversão para energia elétrica nas turbinas de 32% (Procknor, 2021).

Para o cálculo das ofertas térmicas referentes a cada cenário, devido a dificuldades encontradas na busca por referências, foi considerado que, a parcela de energia não convertida em eletricidade, seria referente a produção de calor para

o suprir as demandas da usina. Portanto, foi considerado 80% e 68% de conversão em energia térmica para os casos de queima de subprodutos sólidos e biogás, respectivamente.

As demandas térmicas dos cenários 1, 2, 4 e 5 foram consideradas a mesma do caso base, ou seja, consumo térmico nas etapas de concentração, fermentação, destilação e desidratação.

Para o cenário 3, foram utilizadas as demandas térmicas presentes na simulação, na qual todo o bagaço é introduzido na hidrólise enzimática, gerada em Castiñeiras-Filho (2020). Foram consideradas consumo térmico nas etapas de concentração, fermentação, destilação, desidratação e pré-tratamento por explosão de vapor.

A demanda térmica do cenário 6, é calculada com base no cenário 3, realizando algumas equivalências devido a menor oferta, logo, menor processamento de biomassa, o que causa uma menor demanda térmica.

Tabela 11 – PCI e conversões energéticas de cada combustível do sistema de cogeração

Subprodutos	PCI (MJ/kg)	Conversão para energia elétrica (%)	Conversão para energia térmica (%)	Referencias
Bagaço	7,32	20	80	Castiñeiras-Filho, (2020)
Palha	13,4	20	80	Menandro et al., (2016)
Torta de Lignina	8,3	20	80	Palacios-Bereche et al., (2017)
Biometano	21,5	32	68	Moraes et al., (2014)

Para o cálculo das emissões referentes ao sistema de cogeração para cada cenário, foi considerado um valor de 1,12 kg CO₂/kg de biomassa. Esse valor foi estimado coletando as emissões totais do caso base e dividindo pela quantidade de bagaço total. Esse valor será então utilizado para o cálculo das emissões da queima do bagaço, da palha e da torta de lignina.

Para o cálculo das emissões do biogás, serão duas parcelas. A primeira, é referente a concentração de CO₂ de 40% no biogás, em complemento à fração de metano. A segunda parcela vem de uma assumpção de que durante a queima do biogás, o biometano irá se comportar como um gás ideal, produzindo, para cada m³ de biometano queimado, um m³ de CO₂, conforme a reação de combustão. A densidade utilizada para o CO₂ foi de 1,84 kg/Nm³ (Gas Encyclopedia).

Ao realizar a análise das demandas e ofertas térmicas, é possível que em alguns cenários, os subprodutos disponíveis por si só não sejam capazes de atender às demandas sem a necessidade de incorporar um combustível fóssil externo. Nessas situações, surge um déficit térmico, levando-nos a considerar a introdução de gás natural para suprir essa lacuna. Para esta avaliação, adotamos um valor específico de emissão associado ao gás natural, fixado em 202 kg CO₂/MWh, conforme indicado por Castineiras-Filho (2023).

3.2. Cálculo dos parâmetros de performance dos cenários

3.2.1. NER (Net Nergy Ratio)

O *Net Energy Ratio* (NER), é uma medida de avaliação da eficiência energética de um processo de produção. Essa métrica compara a energia útil produzida por um sistema em relação à energia total investida ao longo de seu ciclo de vida.

Para o cálculo do NER dos cenários, é preciso considerar todas as formas de energia empregadas durante o ciclo de vida do processo, abrangendo não apenas a energia obtida do biocombustível final, mas também a energia empregada na produção dos insumos agrícolas, no processamento da biomassa, no transporte e em todas as etapas associadas.

$$NER = \frac{\text{Output de energia}}{\text{Input de energia}} \quad (1)$$

Os parâmetros utilizados para o cálculo do NER dos cenários do bagaço como principal biomassa, estão disponíveis na Tabela 12 e dos cenários da palha como principal biomassa, na Tabela 13.

Tabela 12 - Tabela de parâmetros para cálculo do NER dos cenários contendo bagaço como principal biomassa

Entradas	Saídas
Consumo de diesel para coleta da cana (CC)	Eletricidade Excedente
Consumo de cana	Produção de etanol 1ª geração
Déficit Térmico	Produção de etanol 2ª geração
	Superávit Térmico

Para os cenários do bagaço a fórmula final ficaria como está demonstrado a seguir.

$$NER = \frac{\text{Eletricidade excedente} + m_{Eth\ 1G} * PCI_{Eth} + m_{Eth\ 2G} * PCI_{Eth} + \text{Superávit Térmico}}{m_{cana} * PCI_{cana} + CC + \text{Déficit Térmico}}$$

Tabela 13 - Tabela de parâmetros para cálculo do NER dos cenários contendo palha como principal biomassa

Entradas	Saídas
Consumo de diesel para coleta da cana (CC)	Eletricidade Excedente
Consumo de diesel para coleta e preparo da palha (CP)	Produção de etanol 1ª geração
Consumo de cana	Produção de etanol 2ª geração
Déficit Térmico	Superávit Térmico

Para os cenários da palha, a fórmula final ficaria como está demonstrado a seguir:

$$NER = \frac{\text{Eletricidade excedente} + m_{Eth\ 1G} * PCI_{Eth} + m_{Eth\ 2G} * PCI_{Eth} + \text{Superávit Térmico}}{m_{cana} * PCI_{cana} + CC + CP + \text{Déficit Térmico}}$$

A eletricidade excedente, é calculada subtraindo o consumo elétrico dos subsistemas empregados nos cenários, pela eletricidade gerada nos sistemas de cogeração. O $m_{Eth\ 1G}$ e $m_{Eth\ 2G}$ são as vazões mássicas referentes a produção de

etanol de 1ª e 2ª geração, respectivamente. Essas vazões, quando multiplicadas pelo poder calorífico interior do etanol (PCI_{Eth}), 26,36 MJ/kg para etanol hidratado e 28,24 MJ/kg para etanol anidro (Castiñeiras-Filho, 2020), retornam o conteúdo energético dessas correntes que são obtidas como produto final da usina. Importante frisar que o uso do superavit térmico, implica na não existência de déficit térmico. Quando a demanda térmica da usina é fornecida e há um excedente de vapor, utilizamos o superavit térmico, quando a demanda não é fornecida, gás natural precisa ser importado para os sistemas da usina para suprir esse déficit térmico. As demandas térmicas de cada cenário foram fornecidas pela simulação realizada em Castiñeiras-Filho (2020) e a oferta térmica foi calculada utilizando o produto da eficiência de conversão térmica, vazão mássica do subproduto usado como combustível e seu respectivo PCI. O produto da vazão mássica m_{cana} pelo PCI_{cana} (equivalente a 2,93 MJ/kg), resulta no conteúdo energético, referente a cana de açúcar, que é inserido no sistema. Os parâmetros CC e CP representam o consumo de óleo diesel para a coleta da cana de açúcar e o consumo de óleo diesel para coleta e preparo da palha.

3.2.2. Emissões de CO₂ e impacto líquido

As emissões totais de CO₂ foram calculadas de acordo com as contribuições dos subsistemas empregados em cada cenário estudado, contribuições da queima do gás natural, caso haja déficit térmico, e as contribuições do uso de óleo diesel para as operações de coleta de cana e de coleta de palha.

Também foi analisado o impacto líquido, calculando as emissões específicas dos cenários por meio da aplicação do método de substituição. Para isso, foram consideradas as emissões totais de CO₂ do cenário, deduzindo as emissões resultantes da geração de uma determinada quantidade de energia, equivalente ao excedente de eletricidade, usando gás natural. Após essa dedução, o valor resultante foi dividido pelo volume energético total do etanol produzido, resultando em um indicador de emissões específicas expresso em kg CO₂/MJ de etanol.

Uma segunda análise das emissões específicas foi conduzida, envolvendo cálculos prévios e posteriores à aplicação do método de substituição. Nessa abordagem, houve uma alteração no denominador, passando de MJ de etanol para toneladas de cana. Isso resultou em um indicador de emissões específicas expresso em kg CO₂/ton de cana, fornecendo uma perspectiva adicional sobre o impacto

ambiental do processo. Essa variação no denominador possibilita uma compreensão melhor das emissões associadas à produção de etanol em relação à quantidade de matéria-prima utilizada.

A abordagem por substituição é uma estratégia interessante para avaliar o impacto líquido ambiental dos processos da usina. Essa metodologia compara as emissões de CO₂ de um certo cenário com as que ocorreriam em cenários alternativos. No caso da produção de etanol, por exemplo, as emissões são comparadas com as do uso de combustíveis convencionais. Essa abordagem implica que o excedente de eletricidade gerado é capaz de substituir uma quantidade equivalente de eletricidade originada de fontes mais intensivas em carbono, como por exemplo, o gás natural.

4. Resultados e Discussão:

4.1. Caso Base:

Tabela 14 – Rendimentos dos produtos e subprodutos do caso base

Produtos e subprodutos do caso base	
Bagaço total (kg)	132.175
Vinhaça (m³)	477
Torta Filtro (kg)	16.035
Etanol anidro (kg)	17.725
Etanol hidratado (kg)	16.755

O caso base será utilizado como parâmetro para comparar os índices gerados pelos outros cenários. As informações de entrada, para os cálculos desse caso, foram baseadas na simulação feita por Castiñeiras-Filho (2020). Para esse caso, todo o bagaço produzido a partir de 500 toneladas de cana, foi utilizado para alimentar os sistemas de cogeração. As correntes de torta filtro e vinhaça não foram utilizadas, sendo assim descartadas dos cálculos. A *Tabela 14* apresenta o rendimento de etanol anidro, hidratado e os subprodutos.

Tabela 15 – Dados Energéticos para cálculo do NER do caso base

Balanço Energético	
Energia elétrica gerada total (MJ)	142.109
Energia elétrica consumida total (MJ)	28.800
Eletricidade Excedente (MJ)	113.309
Superávit Térmico (MJ)	52.796
Consumo de diesel (MJ)	6.757
Conteúdo Energético da cana de açúcar (MJ)	1.465.000
Conteúdo Energético do etanol (MJ)	942.209
NER	0,717

Para o cálculo da energia elétrica gerada total, foram extraídas da simulação as gerações elétricas das três turbinas produtoras de eletricidade. As três são referentes à utilização de toda a massa de bagaço na cogeração. A soma dessas

contribuições forma a energia elétrica gerada total. A energia elétrica consumida total, é constituída apenas do consumo de 16 kWh por tonelada de cana para suprir as demandas elétricas da usina. Por fim, a eletricidade excedente é composta pela subtração desses dois parâmetros calculados.

Nesse cenário, a demanda térmica é suprida completamente e é obtido um excedente de vapor. Portanto, podemos utilizar um superavit térmico para o balanço do NER.

Para os *inputs* de energia, foram considerados apenas o consumo de diesel nos campos e o volume energético presente na palha alimentada no sistema. As informações para o cálculo do NER, assim como seu valor, estão presentes na Tabela 15

Tabela 16 – Dados de emissões de CO₂ e impacto líquido para o caso base

Emissões de CO ₂ e impacto líquido	
Emissões de CO₂ Total (kg CO₂)	163.893
Emissões equivalentes de Gás Natural (kg CO₂)	6.367
Emissões líquidas biogênicas antes da substituição (kg CO₂/ton cana)	295
Emissões líquidas fósseis antes da substituição (kg CO₂/ton cana)	31,8
Emissões líquidas biogênica depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	295
Emissões líquidas fósseis depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	12
Impacto Líquido (kg CO₂/MJ Eth)	0,167

A Tabela 16 apresenta os resultados do cálculo das emissões totais de CO₂, o impacto líquido por MJ de etanol e as emissões líquidas antes e depois do método de substituição por tonelada de cana. As contribuições vieram do consumo de diesel nos campos e dos gases de exaustão do sistema de cogeração.

4.2. Cenário 1:

Tabela 17 - Rendimentos dos produtos e subprodutos do cenário 1

Produtos e subprodutos do cenário 1	
Bagaço total (kg)	132.175
Vinhaça (m³)	477
Torta Filtro (kg)	16.035
Etanol anidro (kg)	17.725
Etanol hidratado (kg)	16.755
Biometano (m³)	3.643

No cenário 1, sua grande diferença para o caso base será a utilização dos subprodutos torta filtro e vinhaça para a produção de biogás. Na Tabela 17, está demonstrado o rendimento desse novo produto, junto das correntes que já estavam presentes no caso base.

Tabela 18 - Dados Energéticos para cálculo do NER do cenário 1

Balanço Energético	
Energia elétrica gerada total (MJ)	167.170
Energia elétrica consumida total (MJ)	36.480
Eletricidade Excedente (MJ)	130.690
Superávit Térmico (MJ)	106.051
Consumo de diesel para coleta da cana (MJ)	6.757
Conteúdo Energético da cana de açúcar (MJ)	1.465.000
Conteúdo Energético do etanol (MJ)	942.209
NER	0,801

Analisando a Tabela 18, notamos que a energia gerada total, teve um aumento considerável, em comparação com o caso base, devido à queima do biometano produzido pelo uso da vinhaça e da torta filtro. Outra consequência do

uso desses subprodutos, é um aumento no consumo elétrico, causado pela operação dos sistemas de biodigestão.

Comparando com o caso base, é lógico concluir que a oferta térmica será superior à demanda. Isso ocorre porque não há a adição de nenhum outro sistema que demande energia térmica para operar, enquanto simultaneamente ocorre a introdução de biometano, contribuindo para a geração de vapor nas caldeiras. Isso resulta em um excedente térmico maior no cenário 1, quando comparado ao caso base.

No que diz respeito às outras contribuições para o cálculo do NER, não houve alterações. Observamos que a introdução do biometano no sistema resultou em um aumento significativo no valor do NER, devido ao fato de que sua geração elétrica é consideravelmente maior do que o consumo para produzi-lo.

Tabela 19 - Dados de emissões de CO₂ e impacto líquido para o cenário 1

Emissões de CO₂ e impacto líquido	
Emissões de CO₂ Total (kg CO₂)	175.058
Emissões equivalentes de Gás Natural (kg CO₂)	7.344
Emissões líquidas biogênicas antes da substituição (kg CO₂/ton cana)	318
Emissões líquidas fósseis antes da substituição (kg CO₂/ton cana)	31,8
Emissões líquidas biogênicas depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	318
Emissões líquidas fósseis depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	14
Impacto Líquido (kg CO₂/MJ Eth)	0,178

Com os resultados apresentados na Tabela 19, podemos comparar o cenário 1 ao caso base. As emissões totais aumentaram devido à queima do biogás no sistema de cogeração. Como, temos um aumento dos valores de eletricidade excedente, para os cálculos de substituição, a contribuição das emissões equivalentes de gás natural também aumenta.

Nos cálculos de emissão líquida antes e depois da aplicação do método de substituição, observamos um aumento nas emissões líquidas biogênicas antes da substituição, resultado da queima de biogás, um processo biogênico. Nos

parâmetros após a substituição, notamos que a contribuição fóssil não foi eliminada completamente, porém sofreu uma redução considerável.

No impacto líquido por MJ de etanol, podemos identificar um leve aumento. Embora a energia excedente tenha sido incrementada com a queima do biometano, portanto as emissões equivalentes de gás natural também aumentam, esse incremento não foi suficiente para ultrapassar a adição de emissões de CO₂ do biogás nas emissões de CO₂ total. Dessa forma, contribuindo para uma pegada de carbono mais significativa em comparação com o caso base.

4.3. Cenário 2:

Tabela 20 - Rendimentos dos produtos e subprodutos do cenário 2

Produtos e subprodutos do cenário 2	
Bagaço total (kg)	132.175
Vinhaça (m³)	477
Torta Filtro (kg)	16.035
Etanol anidro (kg)	17.725
Etanol hidratado (kg)	16.755
Biometano (m³)	29.747

Nesse cenário, todo o bagaço será utilizado, assim como a vinhaça e a torta filtro, nos sistemas de biodigestão para produzir biogás. Na Tabela 20 temos os rendimentos das correntes do cenário 2. Quando comparado ao cenário 1, é possível perceber um aumento considerável na produção de biometano, devido ao fato de o bagaço ter sido utilizado no subsistema de biodigestão.

Tabela 21 - Dados Energéticos para cálculo do NER do cenário 2

Balanço Energético	
Energia elétrica gerada total (MJ)	204.661
Energia elétrica consumida total (MJ)	99.132
Eletricidade Excedente (MJ)	105.528

Déficit Térmico (MJ)	-173.153
Consumo de diesel para coleta da cana (MJ)	6.757
Conteúdo Energético da cana de açúcar (MJ)	1.465.000
Conteúdo Energético do etanol (MJ)	942.209
NER	0,636

Embora seja perceptível, analisando os resultados da Tabela 21, um aumento na energia elétrica gerada total do cenário 2, quando comparado ao caso base, ou até mesmo, o cenário 1, a energia elétrica consumida total também aumenta consideravelmente, devido ao maior processamento de matéria nos biodigestores, resultando em uma eletricidade excedente inferior ao caso base e ao cenário 1.

Um ponto negativo para o cenário 2, é o fato de a queima do biogás não suprir com as demandas térmicas da usina, sendo necessário a utilização de gás natural para ofertar esse déficit térmico. Impactando negativamente o cálculo do NER e emitindo maiores quantidades de CO₂.

Por fim, foi obtido um valor para o NER consideravelmente inferior aos cenários demonstrados acima. Isso se deve principalmente a redução da eletricidade excedente e a introdução do déficit térmico no denominador da fórmula do NER.

Tabela 22 - Dados de emissões de CO₂ e impacto líquido para o cenário 2

Emissões de CO₂ e impacto líquido	
Emissões de CO₂ Total (kg CO₂)	118.133
Emissões equivalentes de Gás Natural (kg CO₂)	5.930
Emissões líquidas biogênicas antes da substituição (kg CO₂/ton cana)	182
Emissões líquidas fósseis antes da substituição (kg CO₂/ton cana)	53
Emissões líquidas biogênica depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	182
Emissões líquidas fósseis depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	42
Impacto Líquido (kg CO₂/MJ Eth)	0,119

Os dados apresentados na Tabela 22 revelam uma eficiência no controle das emissões totais de CO₂. Considerando que, mesmo com a necessidade de recorrer ao gás natural para atender às demandas térmicas da usina, as emissões totais permanecem inferiores tanto em relação ao caso base quanto ao cenário 1. Isso se dá pela grande diferença de emissões entre a queima do bagaço e a queima do biogás.

Analisando as emissões líquidas antes de aplicar o método de substituição, é notável perceber que a parcela biogênica é consideravelmente inferior se comparado ao caso base, isso se dá pela baixa emissão de CO₂ na queima do biogás. Porém, o mesmo não se pode afirmar sobre a parcela fóssil, enquanto nos outros cenários, as contribuições fosseis eram emitidas somente pelo consumo de diesel no campo, no cenário 2, além dessa contribuição do campo, é necessário o uso do gás natural para suprir as demandas térmicas. Os resultados após aplicar o método de substituição, não foram positivos, observa-se a permanência da parcela de emissões líquidas fosseis, isso se dá pela alta emissão de CO₂ proveniente de fontes fosseis e uma menor emissão equivalente de gás natural, devido à baixa eletricidade excedente.

Quanto ao impacto líquido, o resultado foi positivo em comparação com os cenários anteriores, principalmente pela diferença considerável nas emissões totais, visto que o volume energético do etanol é o mesmo para o caso base e cenário 1.

4.4. Cenário 3:

Tabela 23 - Rendimentos dos produtos e subprodutos do cenário 3

Produtos e subprodutos do cenário 3	
Bagaço total (kg)	132.175
Vinhaça (m³)	543
Torta Filtro (kg)	16.035
Torta de lignina (kg)	79.993
Licor de pentoses (m³)	289
Etanol anidro (kg)	17.725

Etanol hidratado (kg)	16.755
Etanol 2ª geração (kg)	4.763
Biometano (m³)	24.421

O cenário 3 apresenta um nível de complexidade maior em comparação com os cenários estudados anteriormente. Visto que, com a utilização de todo o bagaço para hidrólise enzimática, são adicionados dois novos subprodutos ao sistema, a torta filtro e o licor de pentoses, além de uma maior produção de etanol devido a introdução do etanol de 2ª geração, que, por consequência da etapa de destilação, produz mais vinhaça que o caso base. A Tabela 23 demonstra todos os rendimentos obtidos.

Tabela 24 - Dados Energéticos para cálculo do NER do cenário 3

Balanco Energético	
Energia elétrica gerada total (MJ)	468.144
Energia elétrica consumida total (MJ)	194.132
Eletricidade Excedente (MJ)	234.012
Superávit Térmico (MJ)	89.918
Consumo de diesel para coleta da cana (MJ)	6.757
Conteúdo Energético da cana de açúcar (MJ)	1.465.000
Conteúdo Energético do etanol (MJ)	942.209
NER	0,951

O cenário 3 apresentou valores promissores quanto a sua análise de balanço energético, como apresentado na Tabela 24. A introdução da torta de lignina no sistema de cogeração e do licor de pentoses para produção de biogás resultou em valores consideravelmente elevados para a energia elétrica gerada total, apresentando um valor mais que três vezes maior que o caso base. Embora a complexidade do sistema tenha aumentado, consequentemente aumentando o consumo elétrico devido a implementação do sistema de hidrólise enzimática, a

energia elétrica excedente apresentou um resultado consideravelmente elevado em comparação com os outros cenários apresentados.

Embora a biomassa inserida no sistema de hidrólise enzimática, precise ser pré-tratada por explosão de vapor, acrescentando uma parcela energética referente ao consumo de vapor a demanda térmica previamente analisada no cenário base, esse cenário apresentou um superavit térmico, ofertando com sucesso energia térmica para seus processos. Isso é um resultado do grande incremento energético do sistema, com novos subprodutos sendo utilizados em conjunto com os que já eram usados.

O desempenho do NER registrou um aumento extremamente positivo, refletindo melhorias significativas em praticamente todos os parâmetros que compõem o numerador de sua fórmula. Esses incrementos ocorreram simultaneamente, enquanto os parâmetros do denominador permaneceram inalterados. A produção de eletricidade excedente demonstrou um aumento considerável, assim como o volume energético do etanol, especialmente com a inclusão do etanol de 2ª geração. O superavit térmico, embora ligeiramente inferior ao apresentado no cenário 1, revelou-se relativamente próximo.

Tabela 25 - Dados de emissões de CO₂ e impacto líquido para o cenário 3

Emissões de CO₂ e impacto líquido	
Emissões de CO₂ Total (kg CO₂)	193.797
Emissões equivalentes de Gás Natural (kg CO₂)	13150
Emissões líquidas biogênicas antes da substituição (kg CO₂/ton cana)	355
Emissões líquidas fosseis antes da substituição (kg CO₂/ton cana)	31,8
Emissões líquidas biogênica depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	355
Emissões líquidas fosseis depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	5
Impacto Líquido (kg CO₂/MJ Eth)	0,168

Na Tabela 25 as emissões de CO₂ total apresentaram seu maior valor no cenário 3, isso é resultado dos grandes volumes energéticos queimados no sistema de cogeração. Embora seja a maior numericamente, o impacto líquido por MJ de

etanol demonstrou um resultado menor que o caso base e o cenário 1. Isso é o resultado de uma maior produção de etanol, em conjunto com uma emissão equivalente de gás natural mais elevada.

Para as emissões líquidas biogênicas e fósseis antes de aplicar o método de substituição, os resultados foram levemente maiores que os apresentados no cenário 1 e caso base, resultado de um maior consumo de combustíveis nas caldeiras para uma mesma quantidade de cana de açúcar que é inserido no sistema. Para os resultados após a utilização do método de substituição, pode-se perceber que, assim como no caso 1, há uma redução considerável nas emissões do sistema, quase eliminando completamente a parcela fóssil.

4.5. Cenário 4:

Tabela 26 - Rendimentos dos produtos e subprodutos do cenário 4

Produtos e subprodutos do cenário 4	
Palha total (kg)	35.000
Vinhaça (m³)	477
Torta Filtro (kg)	16.035
Etanol anidro (kg)	17.725
Etanol hidratado (kg)	16.755
Biometano (m³)	3.643

A partir desse cenário, o bagaço deixa de ser a biomassa principal, e a palha passa a ser utilizada. Como já dito anteriormente, apenas 50% da palha gerada nos campos, é utilizada nas usinas. A torta filtro e a vinhaça produzidas são utilizadas para produção de biogás. Os rendimentos dos subprodutos estão dispostos na Tabela 26.

Tabela 27 - Dados Energéticos para cálculo do NER do cenário 4

Balanco Energético	
Energia elétrica gerada total (MJ)	118.861

Energia elétrica consumida total (MJ)	39.630
Eletricidade Excedente (MJ)	79.231
Déficit Térmico (MJ)	-179.604
Consumo de diesel para coleta da cana (MJ)	6.757
Consumo de diesel para coleta da palha (MJ)	6.969
Conteúdo Energético da cana de açúcar (MJ)	1.465.000
Conteúdo Energético do etanol (MJ)	942.209
NER	0,615

Conforme evidenciado na tabela, mesmo considerando uma quantidade significativamente menor de palha em termos de massa para este cenário e os dois subsequentes, a produção total de energia elétrica não apresentou uma redução proporcional à diminuição na vazão mássica. Esse fenômeno é atribuído ao maior poder calorífico inferior da palha em comparação com o bagaço.

No que diz respeito ao consumo elétrico total, observa-se um efeito oposto ao ocorrido na geração total de energia elétrica. Mesmo com o processamento de uma quantidade menor de biomassa, o consumo elétrico foi mais elevado em comparação com o caso base e o cenário 1. Esse aumento é atribuído ao incremento no consumo de energia elétrica associado ao processamento e à coleta da palha nos campos. Resultando então em uma energia elétrica excedente inferior, do que quando comparada com o caso base.

Esse cenário não consegue suprir as demandas térmicas da usina, isso é resultado do volume energético reduzido quando comparado com o caso base. Portanto é necessária a utilização de gás natural para suprir essa demanda.

No cálculo do NER, os resultados não apresentaram um cenário muito favorável. A produção de eletricidade excedente foi a menor entre todos os cenários analisados até o momento, enquanto o volume energético do etanol permanece inalterado em relação ao caso base. Além disso, há um déficit térmico, e o denominador inclui uma contribuição adicional de consumo de diesel para as operações de coleta e preparo da palha. As contribuições do diesel para a coleta da cana e o volume energético da cana introduzida na usina permanecem inalterados.

Tabela 28 - Dados de emissões de CO₂ e impacto líquido para o cenário 4

Emissões de CO₂ e impacto líquido	
Emissões de CO₂ Total (kg CO₂)	78.234
Emissões equivalentes de Gás Natural (kg CO₂)	4.452
Emissões líquidas biogênicas antes da substituição (kg CO₂/ton cana)	100,70
Emissões líquidas fósseis antes da substituição (kg CO₂/ton cana)	55,00
Emissões líquidas biogênica depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	100,70
Emissões líquidas fósseis depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	46,00
Impacto Líquido (kg CO₂/MJ Eth)	0,078

As emissões totais de CO₂, embora seja necessário queimar gás natural para suprir as demandas térmicas, apresentaram um valor bem abaixo em comparação ao caso base. Isso se dá pela queima de menos biomassa analisando por uma questão mássica.

Os valores de emissão líquida por tonelada de cana, antes da aplicação do método de substituição, também demonstraram resultados significativamente inferiores aos do caso base. Contudo, ao aplicar o método de substituição, devido às emissões equivalentes de gás natural não apresentarem um valor considerável devido à baixa eletricidade excedente, não é possível compensar as emissões líquidas fósseis do sistema.

No que diz respeito ao impacto líquido, o cenário apresenta um resultado positivo, uma vez que, a produção de etanol permanece inalterada em relação ao cenário base, e observa-se uma redução significativa nas emissões totais.

A Tabela 28 a seguir, demonstra os resultados para as emissões e impacto líquido desse cenário.

4.6. Cenário 5:

Tabela 29 - Rendimentos dos produtos e subprodutos do cenário 5

Produtos e subprodutos do cenário 4	
Palha total (kg)	35.000
Vinhaça (m³)	477
Torta Filtro (kg)	16.035
Etanol anidro (kg)	17.725
Etanol hidratado (kg)	16.755
Biometano (m³)	9.117

Para esse cenário, toda a palha será utilizada para biodigestão, gerando biogás para ser queimado nos sistemas de cogeração. A tabela a seguir apresenta os rendimentos do cenário.

Tabela 30 - Dados Energéticos para cálculo do NER do cenário 5

Balanço Energético	
Energia elétrica gerada total (MJ)	62.724
Energia elétrica consumida total (MJ)	56.220
Eletricidade Excedente (MJ)	6.504
Déficit Térmico (MJ)	-474.770
Consumo de diesel para coleta da cana (MJ)	6.757
Consumo de diesel para coleta da palha (MJ)	6.969
Conteúdo Energético da cana de açúcar (MJ)	1.465.000
Conteúdo Energético do etanol (MJ)	942.209
NER	0,485

Esse cenário apresenta péssimos resultados energéticos, como pode-se ver na Tabela 30. A energia elétrica gerada total é extremamente inferior quando comparada com o caso base, menos da metade da energia gerada pelo mesmo,

isso é resultado do baixo rendimento de produção de biogás. O consumo elétrico é extremamente elevado, até mesmo quando comparado ao cenário 4, pois leva em consideração o consumo do sistema de biodigestão somado às contribuições do preparo e processamento da palha nos campos. Foi constatado um déficit térmico enorme, o que irá acarretar um consumo elevado de gás natural.

O NER encontrado foi o mais baixo dentre todos os cenários, resultado de uma eletricidade excedente baixa e um déficit térmico significativo.

Tabela 31 - Dados de emissões de CO₂ e impacto líquido para o cenário 5

Emissões de CO₂ e impacto líquido	
Emissões de CO₂ Total (kg CO₂)	74.672
Emissões equivalentes de Gás Natural (kg CO₂)	365
Emissões líquidas biogênicas antes da substituição (kg CO₂/ton cana)	55
Emissões líquidas fósseis antes da substituição (kg CO₂/ton cana)	93
Emissões líquidas biogênica depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	55
Emissões líquidas fósseis depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	92
Impacto Líquido (kg CO₂/MJ Eth)	0,134

As emissões totais, em comparação com o caso base, apresentaram resultados satisfatórios quando analisadas globalmente. No entanto, ao observar separadamente as emissões totais de CO₂ de origem fóssil e as emissões totais biogênicas de CO₂, torna-se evidente uma discrepância significativa nas emissões de origem fóssil. Ao comparar esses resultados com o cenário 4, nota-se um aumento de cerca de 30% nas emissões totais. A disparidade entre o cenário 5 e esses outros dois cenários, é atribuída ao considerável volume de gás natural utilizado para suprir o déficit térmico, contribuindo significativamente para o aumento das emissões de origem fóssil.

As emissões líquidas biogênicas nesse cenário são consideravelmente inferiores devido à baixa produção de biogás, quando comparadas aos outros cenários. Nos cálculos das emissões líquidas após a substituição, os resultados praticamente não se alteram, o que é resultado direto da baixa produção de

eletricidade excedente e, conseqüentemente, das baixas emissões equivalentes de gás natural.

Para o impacto líquido, o valor apresenta um bom resultado se comparado aos cenários que utilizam o bagaço, porém um resultado bem mais elevado que o cenário 4, que também utiliza a palha como biomassa principal. Resultado de uma maior emissão de CO₂ total para uma produção de etanol equivalente ao cenário 4.

4.7. Cenário 6:

Tabela 32 - Rendimentos dos produtos e subprodutos do cenário 6

Produtos e subprodutos do cenário 3	
Palha total (kg)	35.000
Vinhaça (m³)	516
Torta Filtro (kg)	16.035
Torta de lignina (kg)	14.700
Licor de pentoses (m³)	350
Etanol anidro (kg)	17.725
Etanol hidratado (kg)	16.755
Etanol 2^a geração (kg)	3.495
Biometano (m³)	28.542

Esse último cenário estudado, utilizou a palha da cana de açúcar como matéria-prima para os sistemas de hidrólise enzimática. Assim como o cenário 3, há a produção de licor de pentoses, torta de lignina e etanol de 2^a geração, resultando em uma maior produção de vinhaça. A torta filtro e vinhaça, continuam sendo utilizadas para produção de biogás. A Tabela 32 a seguir apresenta os subprodutos e rendimentos do cenário 6

Tabela 33 - Dados Energéticos para cálculo do NER do cenário 6

Balanco Energético	
Energia elétrica gerada total (MJ)	220.770
Energia elétrica consumida total (MJ)	213.625
Elettricidade Excedente (MJ)	7.145
Déficit Térmico (MJ)	-120.528
Consumo de diesel para coleta da cana (MJ)	6.757
Consumo de diesel para coleta da palha (MJ)	6.969
Conteúdo Energético da cana de açúcar (MJ)	1.465.000
Conteúdo Energético do etanol (MJ)	942.209
NER	0,655

A produção total de eletricidade, em comparação com o caso base, revela uma diferença significativamente positiva, especialmente quando contrastada com os outros cenários que empregam a palha como a principal biomassa. No entanto, o cenário 6 enfrenta desafios substanciais devido aos elevados consumos elétricos resultantes da operação simultânea dos sistemas de hidrólise e biodigestão. Isso culmina em uma produção de eletricidade excedente muito reduzida, próxima à obtida no cenário 5. Além disso, a demanda térmica não é completamente atendida, exigindo a importação de gás natural para ser queimado nos sistemas de cogeração.

Considerando todos esses fatores, o NER apresenta um valor ligeiramente superior ao do caso 4, porém substancialmente inferior ao caso base. Essa disparidade é resultado da baixa produção de energia elétrica excedente, do déficit térmico significativo e do consumo adicional de diesel para as operações de coleta e preparo da palha.

Tabela 34 - Dados de emissões de CO₂ e impacto líquido para o cenário 6

Emissões de CO₂ e impacto líquido	
Emissões de CO₂ Total (kg CO₂)	131.607
Emissões equivalentes de Gás Natural (kg CO₂)	401

Emissões líquidas biogênicas antes da substituição (kg CO₂/ton cana)	215
Emissões líquidas fósseis antes da substituição (kg CO₂/ton cana)	48
Emissões líquidas biogênica depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	215
Emissões líquidas fósseis depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	47
Impacto Líquido (kg CO₂/MJ Eth)	0,153

No que se refere às emissões totais de CO₂, foi identificado um valor ligeiramente inferior em comparação com o caso base. Apesar da necessidade de recorrer ao gás natural para atender às demandas térmicas da usina e das emissões simultâneas dos sistemas de cogeração, hidrólise e biodigestão, as emissões permanecem mais baixas em relação a outros cenários. A principal razão para essa diferença entre o caso base e o cenário em questão reside nas emissões de um volume mássico significativo de bagaço, em comparação com um volume de palha consideravelmente inferior, gerando uma quantidade proporcionalmente menor de subprodutos e, conseqüentemente, emitindo menos CO₂. Comparando com o cenário 3, o menor volume de palha em comparação com o volume de bagaço, resultou em um volume mássico bastante reduzido de torta de lignina, queimando menos material nos sistemas de cogeração e, por conseguinte, emite menos CO₂.

As emissões líquidas antes e depois do método de substituição, praticamente não se alteram devido às emissões equivalentes de gás natural serem extremamente baixas quando comparadas com as emissões totais. Assim, as emissões líquidas fósseis após a substituição, não são abatidas, resultando em um cenário que não consegue compensar suas emissões fósseis.

4.8. Visão Geral

Para auxílio da conclusão sobre os cenários mais vantajosos e comparação das melhores configurações, diferentes gráficos foram gerados contendo a apresentando de todos os cenários de forma conjunta.

4.8.1. Balanço energético e oferta térmica

O primeiro gráfico apresentado, na Figura 16, é perceptível uma discrepância do cenário 3 em comparação a todos os outros. Sua energia gerada total é resultado de uma combinação eficiente de usos de seus subprodutos em cada sistema da usina. Apresentou a segunda maior energia consumida, ficando atrás somente do cenário 6, e o motivo desse parâmetro elevado é que, em ambos os cenários, todos os subsistemas da usina, sistema de hidrólise enzimática e biodigestão, são operados simultaneamente. Apesar de apresentar o segundo maior consumo, tem a maior eletricidade excedente dentre todos os sistemas.

O cenário 1, embora não apresente uma energia gerada total tão elevada quanto ao cenário comentado acima, apresentou um valor de eletricidade excedente muito vantajoso devido ao seu baixo consumo elétrico total.

Os cenários que envolvem o uso da palha, devido aos gastos elétricos envolvidos na coleta de preparo do material, e uma menor disponibilidade de biomassa, não apresentaram nenhum resultado relevante para a discussão.

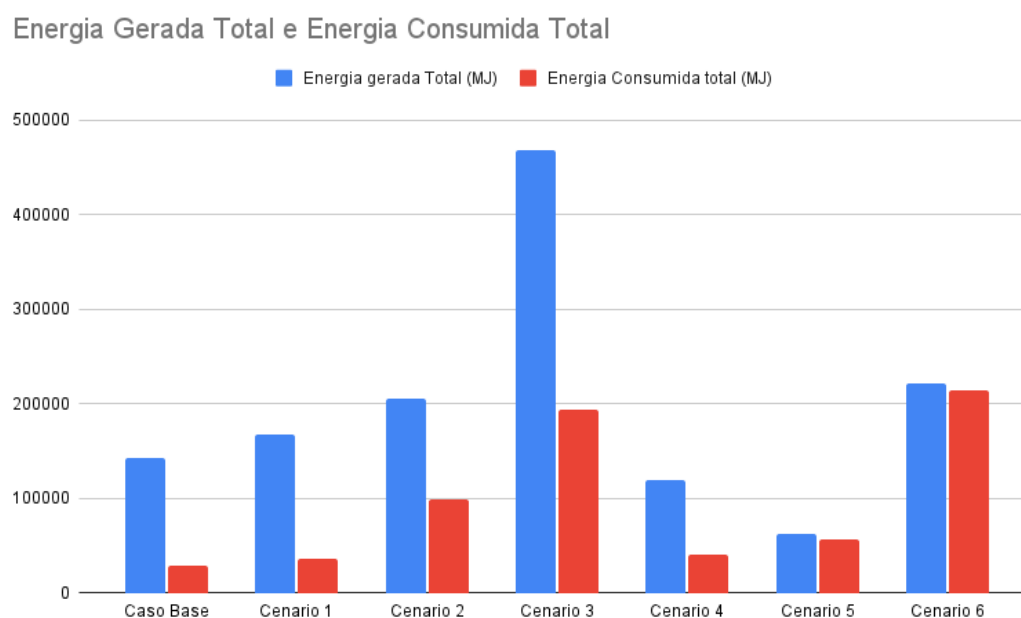


Figura 16 – Energia Gerada Total e Energia Consumida Total de todos os cenários e caso base

Dois gráficos que apresentam informações interessantes para a visualização conjunta dos cenários, são as Figura 17 e Figura 18.

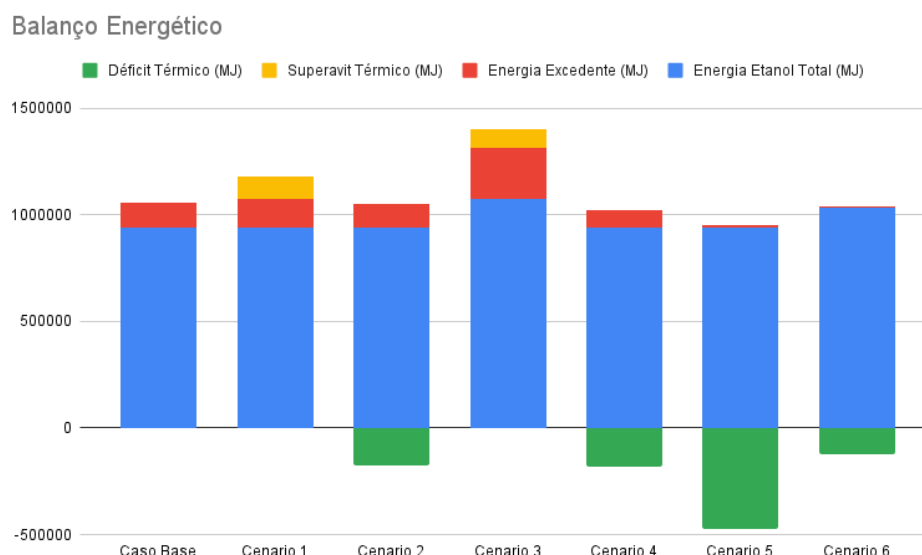


Figura 17 – Balanço Energético Total de todos os cenários e caso base

É possível averiguar que todos os cenários que utilizam a palha como principal biomassa apresentam um déficit térmico demonstrado por suas pequenas razões de ofertas e demandas térmicas, o que, quando comparado com os cenários que utilizam o bagaço, inviabiliza um cenário competitivo para o balanço energético.

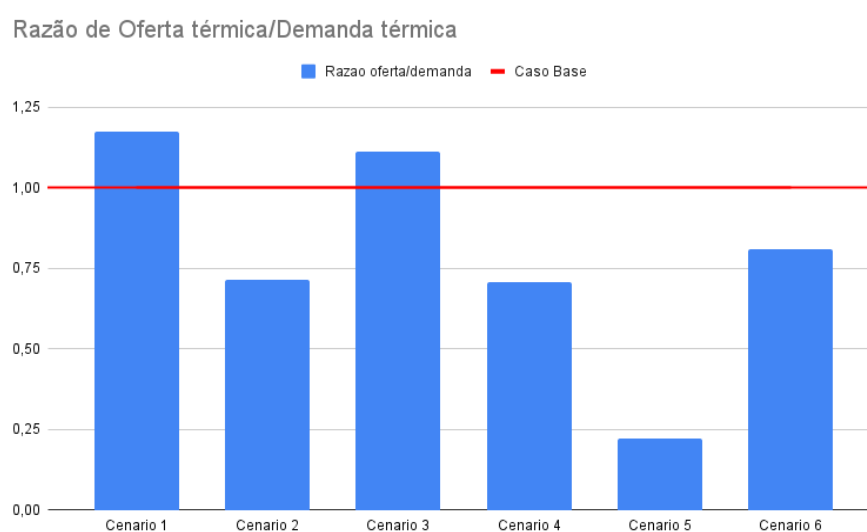


Figura 18 – Razão de oferta e demanda térmica de todos os cenários em comparação com caso base

Novamente, os cenários 1 e 3 se destacam, ambos apresentam superavit térmico em suas operações, com uma razão oferta e demanda térmica acima do caso base. Em especial, o primeiro cenário apresenta uma razão de oferta e demanda térmica superior ao cenário 3, devido a não utilizar o sistema de hidrólise enzimática, que consome quantidades significativas de vapor em sua fase de pré-tratamento. Um destaque maior ao cenário 3, que apresenta uma maior parcela de energia referente ao etanol, devido à produção de etanol de 2ª geração, e também a maior parcela de energia excedente dentre todos os demais cenários.

O cenário 5 se destaca negativamente devido a um grande déficit térmico causado pela falta de oferta térmica gerado pela queima do biogás produzido. Nesse caso, a palha utilizada nos sistemas de biodigestão, não gera quantidades substanciais de energia, tanto elétrica quanto térmica, resultando em uma eletricidade excedente insignificante e uma razão de oferta e demanda térmica extremamente inferior quando comparado aos demais cenários.

4.8.2. Resultados NER

Analisando a Figura 19, como o NER é diretamente influenciado pelos parâmetros acima discutidos, como oferta e demanda térmica, produção de etanol e energia excedente, os mesmos resultados se repetem.

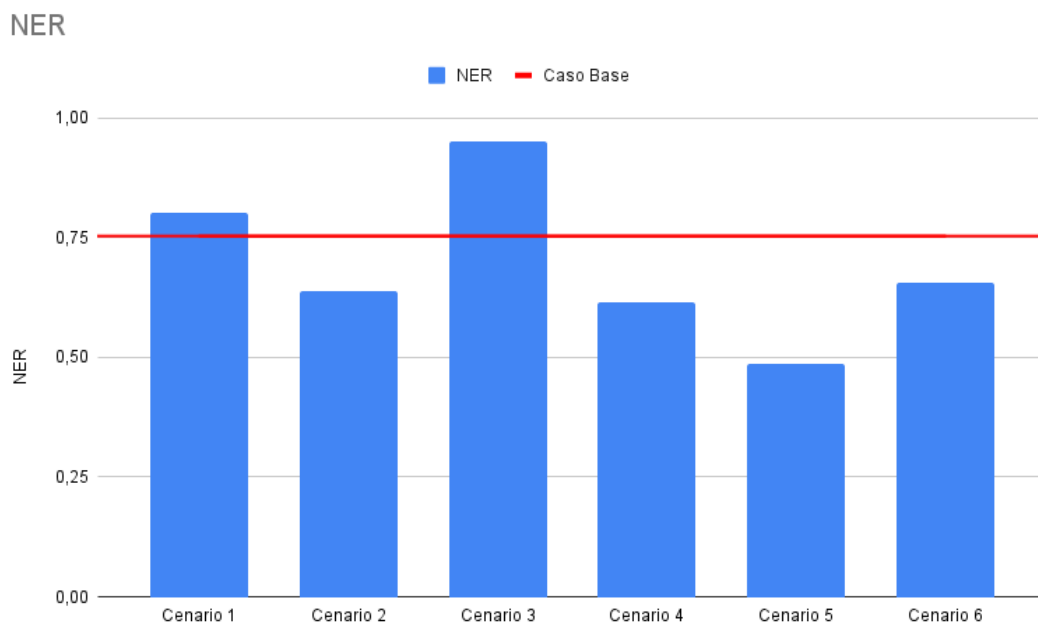


Figura 19 – Comparação do parâmetro NER de todos os cenários com o caso base

Os cenários 1 e 3 são os únicos que apresentam uma vantagem competitiva, em termos de uma análise energética, em comparação com o caso base. Os cenários 4, 5 e 6 apresentam valores inferiores ao caso base, principalmente devido as baixas ofertas de energia elétrica e térmica e a presença de consumos energéticos adicionais referentes ao manejo da palha. O cenário 2, é o único dentre os que utilizam o bagaço, que apresenta um déficit térmico, o que influencia negativamente no seu valor de NER, deixando em uma posição inferior ao caso base.

4.8.3. Emissões totais de CO₂ e impacto líquido

Os próximos gráficos apresentam a comparação dos valores de emissão total e específicas de todos os cenários em comparação ao caso base. Na Figura 20, como já era esperado dos sistemas que apresentam os melhores resultados em termos energéticos, o cenário 1 e 3, demonstraram as maiores emissões totais de CO₂ dentre todos os casos.

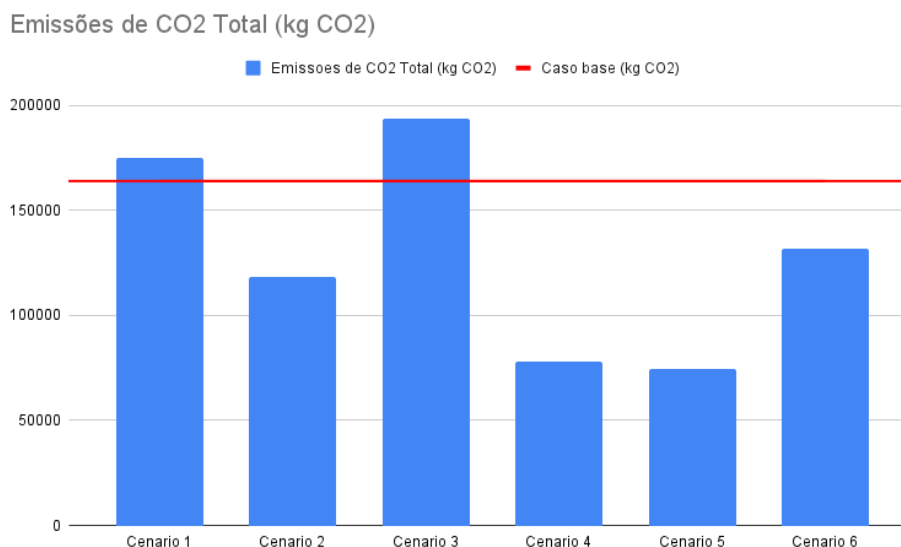


Figura 20 – Comparações das emissões de CO₂ total dentre os cenários e o caso base

Olhando somente para esse fator, pode parecer um ponto negativo, porém, se analisada a Figura 21, que apresenta o impacto líquido dos cenários, podemos ver que, para o cenário 3, as emissões de CO₂ em comparação com a quantidade de etanol produzida em MJ de etanol, temos um valor inferior ao caso base. Para o cenário 1, seu valor de impacto líquido continua elevado, devido a sua produção reduzida, em comparação ao cenário 3, de etanol total.

Devido à baixa oferta de palha e por consequência baixa emissão de CO₂, os cenários 4,5 e 6, apresentam resultados competitivos, ficando abaixo dos valores de emissão do caso base em todos os três cenários. Quando analisamos seus impactos líquidos, o cenário 4 apresenta o menor valor dentre eles, devido a sua baixa emissão total e produção de etanol equivalente aos demais cenários que não possuem produção de etanol de 2ª geração.

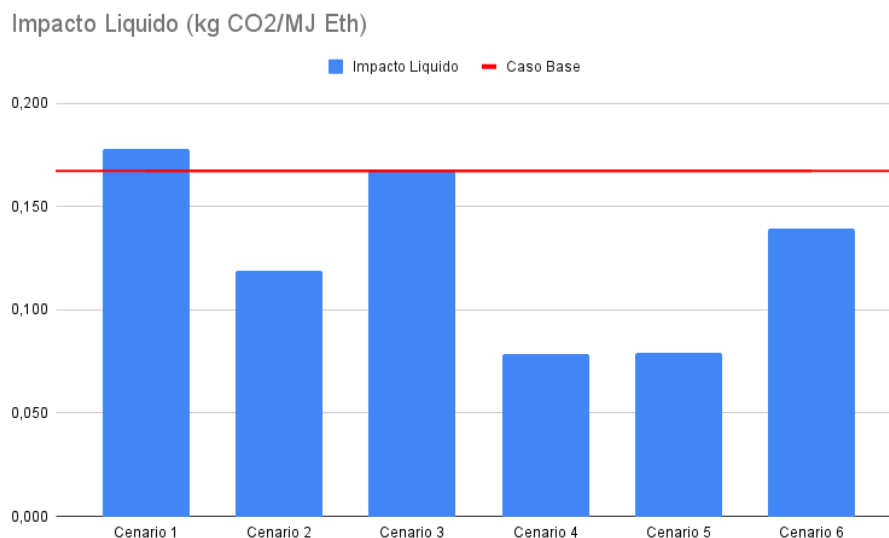


Figura 21 – Impacto Líquido em kg de CO₂ por MJ de etanol produzido

4.8.4. Emissões líquidas de CO₂ antes e depois de aplicado o método de substituição

Os dois melhores cenários, ao se analisar a Figura 22, para o parâmetro de emissões líquidas de CO₂ em toneladas de cana, são os cenários 1 e 3.

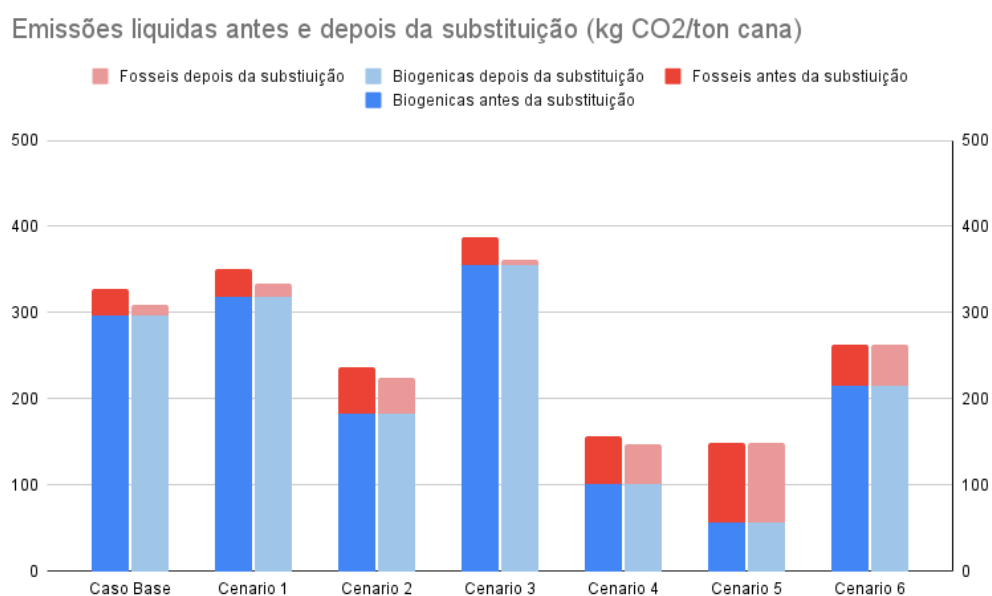


Figura 22 – Emissões específicas antes e depois de aplicar o método de substituição por emissões equivalentes de gás natural

Ambos apresentam uma redução considerável nas emissões fosseis após aplicar o método de substituição, embora não tenham sido eliminadas. O ideal seria a ocorrência do efeito de sumidouro, contribuindo para a absorção líquida de CO₂ do ambiente, onde, após aplicado o método de substituição, é possível averiguar que além de abater a contribuição referente as energias fosseis utilizadas, ainda abate uma parcela de emissões biogênicas do sistema. Essa característica é extremamente positiva, destacando o potencial desses cenários em mitigar as emissões de gases de efeito estufa e reforçando sua relevância no contexto de práticas ambientalmente sustentáveis.

Como é de se esperar, cenários com uma menor energia excedente ou maior consumo de fontes de energia fóssil, não apresentaram bons resultados para o parâmetro de emissões líquidas por tonelada de cana.

5. Conclusão:

Depois de analisados todos os parâmetros de balanço energético, NER, emissões totais de CO₂, emissões líquidas por tonelada de cana e impacto líquido por MJ de etanol produzido, podemos chegar à conclusão de que os cenários mais vantajosos são o 1 e 3.

O cenário 1, que utiliza todo o bagaço para alimentar os sistemas de cogeração, se destaca devido à sua configuração menos complexa em comparação com o cenário 3, resultando em bons indicadores para o balanço energético (130.690 MJ) e NER (0,801) quando comparado aos demais cenários. Entretanto, sua elevada emissão total de CO₂ e impacto líquido significativo são impulsionados pelas emissões biogênicas provenientes da queima do bagaço no sistema de cogeração.

O destaque recai sobre o cenário 3 (que utiliza todo o bagaço nos sistemas de hidrólise enzimática), que exibe os maiores valores de NER (0,951), a maior produção de eletricidade excedente (234.012 MJ) e superavit térmico (89.918 MJ). Além disso, destaca-se por um impacto líquido inferior em comparação ao caso base e uma emissão líquida de CO₂, após a aplicação do método de substituição, que praticamente elimina as contribuições fósseis. Esses resultados positivos são potencializados pela operação simultânea dos sistemas de hidrólise enzimática para a produção de etanol de 2ª geração e o sistema de biodigestão. A presença da queima, no sistema de cogeração, do biogás produzido por três fontes distintas (torta filtro, vinhaça e licor de pentoses), a queima da torta de lignina e o aumento da produção de etanol contribuem para eleger esse cenário como o caso ótimo de configuração de uma usina de produção de etanol.

No geral, os resultados obtidos para os cenários que utilizam a palha como principal biomassa não foram considerados satisfatórios. No entanto, destaca-se o Cenário 4 (utiliza toda a palha gerada nos sistemas de cogeração) dentre os três, que demonstrou uma produção de eletricidade excedente superior, um valor para o NER (0,615) relativamente próximo ao do Cenário 6 (que obteve o maior valor de NER entre os três cenários, 0,655) e, ao mesmo tempo, apresentou o menor impacto líquido (0,078 kg CO₂/MJ Eth) e as menores emissões totais de CO₂ dentre todas as configurações analisadas (78.234 kg CO₂).

Como uma possível continuação desta pesquisa, sugere-se o estudo de cenários que envolvam o uso simultâneo da palha e do bagaço, analisando a

otimização do uso de cada subproduto em diferentes sistemas. Isso poderia envolver uma análise mais aprofundada das quantidades ideais a serem utilizadas em cada sistema, visando maximizar os benefícios ambientais e energéticos de uma usina de produção de etanol.

6. Referências:

Abdala, T.O.; Análise comparativa dos processos de produção de etanol anidro. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia. 2017.

Agarwal, N.K. et al., Anaerobic digestion of sugarcane bagasse for biogas production and digestate valorization, *Chemosphere*, 295, 133893. 2022

Aguiar, A. et al., Sugarcane straw as a potential second generation feedstock for biorefinery and white biotechnology applications, *Biomass and Bioenergy*, 144, 105896. 2021.

Alves, D.R. et al., APLICAÇÃO DA TORTA DE FILTRO COMO ADUBO EM CANAVIAIS. I ENCONTRO DE DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AGROINDUSTRIAIS. Uberaba: Universidade de Uberaba. 2017.

Alves, M. et al., Surplus electricity production in sugarcane mills using residual bagasse and straw as fuel, *Energy*, 91, 751-757. 2015.

Amato Neto, J.; A indústria de máquinas agrícolas no Brasil - origens e evolução. *Revista de administração de empresas*. 25,3. 1985

ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE SÃO PAULO, LEI Nº 11.241, DE 19 DE SETEMBRO DE 2002. Acessado em 10 Ago 2023

BNDES et al., 2018. BIOGÁS DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS: PANORAMA E PERSPECTIVAS. *Biogás | BNDES Setorial* 47. 2018.

Bonomi et al., The Virtual Sugarcane Biorefinery (VSB), Technological Assessment Program (PAT). Campinas: Brazilian Center for Research in Energy and Materials (CNPEM), Brazilian Bioethanol Science and Technology Laboratory (CTBE). 2012.

Borschiver, S.; Silva, A.L.R.DA.; MAPEAMENTO TECNOLÓGICO PARA PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS E SEU APROVEITAMENTO: PANORAMA MUNDIAL E INICIATIVAS NACIONAIS. Rio de Janeiro: UFRJ. 2014

Canilha, L. et al., Bioconversion of Sugarcane Biomass into Ethanol: An Overview about Composition, Pretreatment Methods, Detoxification of Hydrolysates, Enzymatic Saccharification, and Ethanol Fermentation, *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 2012. 2012.

Cardoso, T.F. et al., Technical and economic assessment of trash recovery in the sugarcane bioenergy production system. *Sci. agric*. 70, 5. 2013

Carpanez, T.G. et al.; Integrated membrane-based processes to obtain organo-mineral fertilizer, water, and energy from sugarcane vinasse, *Separation and Purification Technology*, 302, 122181. 2022.

Carpio, L.G.T et al., Optimal allocation of sugarcane bagasse for producing bioelectricity and second generation ethanol in Brazil: Scenarios of cost reductions, *Renewable Energy*, 111, 771-780. 2017.

Carvalho, D.J. et al. Analysis of energy consumption in three systems for collecting sugarcane straw for use in power generation. *Energy* 119, 178-187. 2017

Carvalho, D.J. et al., Assessment of the self-sustained energy generation of an integrated first and second generation ethanol production from sugarcane through the characterization of the hydrolysis process residues, *Energy Conversion and Management*, 203, 112267. 2020.

Carvalho, J.L.N. et al.; Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review, *GCB Bioenergy*, 9, 1181-1195. 2017.

Castiñeiras-Filho, S.L.; Potencial de integração da produção de biodiesel derivado de microalgas à indústria sucroalcooleira no Brasil - análise termodinâmica e ambiental. Rio de Janeiro, 2020. Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

Castineiras-Filho, S.L.; Pradelle, F.; Modeling of microalgal biodiesel production integrated to a sugarcane ethanol plant: Energy and exergy efficiencies and environmental impacts due to trade-offs in the usage of bagasse in the Brazilian context. *Journal of Cleaner Production*, 395, 136461. 2023

CEPEA – ESALQ/USP. Mercado de trabalho do agronegócio. 2022a. Acessado em 28 Mai 2023

CEPEA – ESALQ/USP. PIB do agronegócio brasileiro. 2022b. Acessado em 28 Mai 2023

Cerri, C.C. et al., Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbonstocks in Brazil: an examination of existing data. *European Journal of Soil Science*, 62, 23-28, 2011.

Chandel, A.K. et al., Comparative analysis of key technologies for cellulosic ethanol production from Brazilian sugarcane bagasse at a commercial scale. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13, 851-1132. 2019

Chiappini, Resíduo do etanol, vinhaça pode virar hidrogênio verde, Epbr. 2022. Acessado em 16 Set 2023

Christofoletti, C.A. et al., Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. *Waste Management*, 33, 2752-2761. 2013.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira. 4º levantamento safra 2022/2023. 2023.

CPEM, Resíduo da colheita de cana, palha protege o solo e tem alto potencial gerador de bioenergia. 2017. Acessado em 16 Set 2023

CTC – Centro de Tecnologia Canavieira. Biomassa da Palha de Cana. 2015. Acessado em 24 Jul 2023

Da Costa, G.C. et al., Mapping and energy analysis of Brazilian bioenergy power potential for three agricultural biomass byproducts. *Journal of Cleaner Production*, 349, 131466. 2022.

De Abreu, D.M. et al., A produção da cana-de-açúcar no Brasil e a saúde do trabalhador rural. *Revista Brasileira de Medicina do Trabalho*, 9, 49-61. 2011.

De Carvalho, C.H.R et al., EMISSÕES RELATIVAS DE POLUENTES DO TRANSPORTE MOTORIZADO DE PASSAGEIROS NOS GRANDES CENTROS URBANOS BRASILEIROS. INEP. 2011

De Godoi, L.A.G. et al., Seasonal variation of the organic and inorganic composition of sugarcane vinasse: main implications for its environmental uses. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 26, 29267–29282. 2019.

De Paoli, F. et al.; Utilization of by-products from ethanol production as substrate for biogas production, *Bioresource Technology*, 102, 6621-6624. 2011.

De Souza, R.B.A; ESTUDO DO PRÉ-TRATAMENTO HIDROTÉRMICO E HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DA PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR. São Carlos – SP, 2016, Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Dias M.O.S. et al.; Integrated versus stand-alone second-generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash, *Bioresource Technology*, 103, 152-161. 2012.

Dias, M.O.S et al.; Improving bioethanol production from sugarcane: evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems, thermal integration and cogeneration systems, *Energy*, 36, 3691-3703. 2011.

Dias, M.O.S. et al., Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil, *Environmental Development* 15, 35-51. 2015.

Díaz, M.A.D.; Análise do Ciclo de Vida do Etanol Brasileiro Visando à Certificação Ambiental. Rio de Janeiro, 2011. Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

Ember, Yearly electricity data, 2023

EMBRAPA. Ciência e tecnologia tornaram o Brasil um dos maiores produtores mundiais de alimentos. 2022. Acessado em 28 Mai 2023

EPE, Balanço Energético Nacional 2023. 2023

FAOSTAT. Sugar cane production, 1961 to 2021. 2023. Acessado em 28 Mai 2023

Ferreira, Bagaço de cana: saiba como reaproveitar a palha, Blog Syngenta digital. Acessado em 16 Set 2023

Ferreira, F.S. et al., DESEMPENHO DE PENEIRA MOLECULAR NA DESIDRATAÇÃO DE ÁLCOOL ETÍLICO. Uberaba: Universidade de Uberaba. 2016

Fertilizer-machinery, Filter Press Mud and Molasses Compost Fertilizer Making Process. Acessado em 16 Set 2023

Furtado, L. A. Análise técnica, econômica e ambiental de usinas termelétricas alimentadas por biomassa residual operando com ciclos combinados híbridos. Rio de Janeiro, 2023. Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica pelo Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

Gas Encyclopedia, Carbon dioxide.

Gonçalves, C.A. et al.; Chemical and technological attributes of sugarcane as functions of organomineral fertilizer based on filter cake or sewage sludge as organic matter sources, *PLOS ONE* 16. 2021.

Gov. SP, Protocolo Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro Paulista: ações visando à preservação ambiental. Análises e Indicadores do Agronegócio, 7. 2012.

GOV.BR. Anuário fatores de conversão, FATORES DE CONVERSÃO, DENSIDADES E PODERES CALORÍFICOS INFERIORES. 2020

GOV.BR. Ministério da Agricultura e Pecuária. Exportações do agronegócio fecham 2022 com US\$ 159 bilhões em vendas. 2023. Acessado em 28 Mai 2023

Grasel, F.S. et al., Inovação em Biorrefinarias I. Produção de Etanol de Segunda Geração a partir de Capim-Elefante (*Pennisetum purpureum*) e Bagaço de Cana-de-Açúcar (*Saccharum officinarum*). Revista Virtual de Química, 9, 4-14. 2017.

Harding et al., The end to cheap oil: a threat to food security and incentive to reduce fossil fuels in agriculture. Environmental Development, 3. 2012.

IFOPE Educacional. Amostragem de solo: o que é, benefícios e como realizar. 2021. Acessado em 26 Jul 2023

Jacto, Como foi a evolução dos implementos agrícolas no Brasil? 2023. Acessado em 10 Ago 2023

Janke, L. et al., Biogas Production from Sugarcane Waste: Assessment on Kinetic Challenges for Process Designing. Int. J. Mol. Sci., 16, 20685-20703. 2015.

Janke, L. et al., Pre-treatment of filter cake for anaerobic digestion in sugarcane biorefineries: Assessment of batch versus semi-continuous experiments, Renewable Energy, 143, 1416-1426. 2019.

Janke, L. et al.: Improving anaerobic digestion of sugarcane straw for methane production: Combined benefits of mechanical and sodium hydroxide pretreatment for process designing, Energy Conversion and Management, 141, 378-389. 2017.

Lima, B.V.M, Produção de Biogás a Partir de Vinhaça de 1º e 2º Geração e Licor de Pentoses em Sistemas de 1 e 2 Fases. Campinas, 2020. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos. Universidade Estadual de Campinas.

Longati, A.A. et al., Biogas Production from Anaerobic Digestion of Vinasse in Sugarcane Biorefinery: A Techno-economic and Environmental Analysis. Waste and Biomass Valorization, 11, 4573–4591. 2020.

Looking forward. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 40, 571-582. 2014

Lopes et al., Produção de etanol a partir da cana de açúcar. São Carlos: UFSCAR. 2011

Magalhaes, Máquinas e implementos, EMBRAPA, 2022

Manochio, C. et al., Ethanol from biomass: A comparative overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 80, 743-755. 2017

Marafon, C.; Análise Quantitativa de Crescimento em Cana-de-açúcar: uma Introdução ao Procedimento Prático. Documentos 168. Aracaju: EMBRAPA. 2012.

Mariano, A.P. et al., Utilization of pentoses from sugarcane biomass: Techno-economics of biogas vs. butanol production. *Bioresource Technology* 142, 390-399. 2013.

Marques, S.S.I. et al., Growth of *Chlorella vulgaris* on Sugarcane Vinasse: The Effect of Anaerobic Digestion Pretreatment, *Appl Biochem Biotechnol*, 171, 1933–1943. 2013.

Menandro, L.M.S. et al., CARACTERIZAÇÃO E APROVEITAMENTO AGRONÔMICO E INDUSTRIAL DE PONTEIROS E FOLHAS SECAS DA CANA-DE-AÇÚCAR. Dissertação submetida como requisito para obtenção do grau de Mestre em Agricultura Tropical e Subtropical, Área de Concentração Gestão de Recursos Agroambientais. Campinas, SP, 2016.

Mesa, L. et al., Desirability function for optimization of Dilute Acid pretreatment of sugarcane straw for ethanol production and preliminary economic analysis based in three fermentation configurations. *Applied Energy* 198, 299-311. 2017.

Moraes, B.S et al.; Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense?, *Applied Energy*, 113, 825-835. 2014.

Moraes, B.S. et al., Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 888-903. 2015.

Nguyen, L.N. et al., Biomethane production from anaerobic co-digestion at wastewater treatment plants: A critical review on development and innovations in biogas upgrading techniques, *Science of The Total Environment*, 765, 142753. 2021.

Nieder-Heitmann, M. et al., Economic evaluation and comparison of succinic acid and electricity co-production from sugarcane bagasse and trash lignocelluloses in a biorefinery, using different pretreatment methods: dilute acid (H₂SO₄), alkaline (NaOH), organosolv, ammonia fibre expansion (AFEX™), steam explosion (STEX), and wet oxidation, *Biofuels, Bioprod. Bioref.*, 14, 55-77. 2020.

NOVACANA. Uso da vinhaça na cultura da cana-de-açúcar. Acessado em 31 Mai 2023

Novaes, R.M.L. et al., Brazil's agricultural land, cropping frequency and second crop area: FAOSTAT statistics and new estimates. 2022.

OECD, Driving Performance at Brazil's Electricity Regulatory Agency. The Governance of Regulators, Paris: OECD Publishing. 2021.

Oliveira, M.W. et al., Degradação da palhada de cana-de-açúcar. Sci. agric. 56, 4. 1999

Organização das Nações Unidas (ONU). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 2023. Acessado em 23 Jun 2023

Palacios-Bereche, R. et al., Enzymatic Hydrolysis of Sugarcane Biomass and Heat Integration as Enhancers of Ethanol Production. Journal of Renewable Materials. 2017.

Palacios-Bereche, R. et al., Exergetic analysis of the integrated first- and second-generation ethanol production from sugarcane. Energy 62, 46-61. 2013.

Pan, S. et al., Techno-economic and life cycle assessments for bioenergy recovery from acid-hydrolyzed residues of sugarcane bagasse in the biobased xylose production platform. Journal of Cleaner Production, 400, 136718. 2023.

Parsaee, M. et al., A review of biogas production from sugarcane vinasse, Biomass and Bioenergy, 122, 117-125. 2019.

Pazuch, F.A. et al., Economic evaluation of the replacement of sugar cane bagasse by vinasse, as a source of energy in a power plant in the state of Paraná, Brazil. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 76, 34-42. 2017.

Ponce, G. et al.; ESTUDO COMPARATIVO DO PROCESSO DE DESTILAÇÃO EXTRATIVA COM UTILIZAÇÃO DO MONOETILEGLICOL E 1-METILIMIDAZÓLIO CLORETO PARA DESIDRATAÇÃO DO ETANOL. 2014

Procknor, Cogeração nas usinas com biogás. 2021. Acessado em 29 Nov 2023

Purwanta et al., Techno-economic analysis of reactor types and biogas utilization schemes in thermophilic anaerobic digestion of sugarcane vinasse. Renewable Energy, 201, 864-875. 2022.

Quinelato, C.; Métodos de Extração da Lignina do Bagaço da Cana-de-Açúcar do Noroeste do Estado de São Paulo. São Jose do Rio Preto, 2016. Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de

Mestre em Química, junto ao Programa de Pós-graduação em Química, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio Preto.

Rabelo et al., Sugarcane Agricultural Production, Bioenergy and Ethanol. Sugarcane 2015. 2015.

Raízen, Biocombustíveis: afinal, quais são as suas vantagens?, 2021. Acessado em 10 Nov 2023

REVISTA PESQUISA FAPESP. Propriedades do bagaço da cana-de-açúcar. 1998. Acessado em 31 Mai 2023

Ronquin, C.C.: Queimada na colheita da cana-de-açúcar: impactos ambientais, sociais e econômicos. Documentos 77. Campinas: Embrapa. 2010

Rossetto, R. et al., Cana de açúcar – Cultivo com Sustentabilidade. Informações Agronômicas N°142, 2013.

Rossetto, R.; Santiago, A.D.; Cana-Plantio, EMBRAPA. 2022. Acessado em 26 Jul 2023

Salomon, K.R et al., Cost calculations for biogas from vinasse biodigestion and its energy utilization. Sugar Industry 136, No. 4, 217–223. 2011

Salomon, K.R. et al., Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil, Biomass and Bioenergy, 33, 1101-1107. 2009.

Sampaio, I.L.M. et al., Electricity Production from Sugarcane Straw Recovered Through Bale System: Assessment of Retrofit Projects. Bioenerg. Res.,12, 865–877. 2019.

Santos, F.A et al., Otimização do pré-tratamento hidrotérmico da palha de cana-de-açúcar visando à produção de etanol celulósico. Quim. Nova, Vol. 37, 1. 2013.

Santos, F.A et al., Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. Quim. Nova, Vol. 35, 5, 2012.

Silva, J.P.N; Silva, M.R.N.; Noções da Cultura da Cana-de-Açúcar. Inhumas: IFG; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

Suarez, J.A. et al., Thermochemical Properties of Cuban Biomass. Energy Sources, 22, 851-857. 2010.

The Engineering Toolbox, Fuels - Higher and Lower Calorific Values. Acessado em 26.Set.2023

Torres, M.A. et al., Vinasse as a substrate for inoculant culture and soil fertigation: Advancing the circular and green economy. *Science of the Total Environment*, 887, 164014. 2023.

Turdera, M.V. et al., Bioelectricity's Potential Availability from Last Brazilian Sugarcane Harvest. *Low Carbon Transition- Technical, Economic and Policy Assessment*. InTech. 2018

Ungureanu, N. et al., Sustainable Valorization of Sugarcane Waste from Sugarcane Processing. *Encyclopedia. Sustainability*, 14, 11089. 2022.

UNICA. Cartilha da bioeletricidade, 2020.

Wang, L. et al., Economic and GHG emissions analyses for sugarcane ethanol in Brazil:

7. Apêndice de contas

Cenário 0 (Caso Base)	
Produtos e subprodutos	
Bagaço total (kg)	132175
Geração de etanol anidro 1ª geração (kg)	17725
Geração de etanol hidratado 1ª geração (kg)	16755
Geração de etanol anidro 1ª geração (m³)	22
Geração de etanol hidratado 1ª geração (m³)	21
Balanco Energético	
Geração elétrica W-108 (MJ)	76922
Geração elétrica W-110 (MJ)	44292
Geração elétrica W-111 (MJ)	20896
Energia gerada Total (MJ)	142109
Energia Consumida total (MJ)	28800
Energia Excedente (MJ)	113309
Vapor Excedente Bagaço (kg)	24206
Calor latente de vapor saturado (MJ/kg)	2,18
NER	0,7530552488
Emissões de CO₂	
Contribuições do campo (kg CO ₂ eq)	15900
Emissões de CO ₂ do processo cogen (kg CO ₂)	147993
Emissões de CO ₂ Total (kg CO ₂)	163893,05
Emissões específicas (kg CO ₂ /MWh)	559
Emissões Biogênicas (Kg CO ₂)	147993
Emissões Fosseis (kg CO ₂)	15900
Emissões específicas biogênicas antes da substituição (kg CO ₂ /ton cana)	295,9861
Emissões específicas fosseis antes da substituição (kg CO ₂ /ton cana)	31,8
Emissões específicas biogênica depois da substituição (kg CO ₂ /ton cana)	295,9861
Emissões específicas fosseis depois da substituição (kg CO ₂ /ton cana)	12,71585056
Parcela Energia Excedente (%)	0,107
Parcela Etanol (%)	0,893
Impacto Energia Excedente (kg CO ₂ /MWh)	60
Impacto Etanol (kg CO ₂ /MWh)	499
Emissões específicas da queima do Gas Natural (kg CO ₂ /MWh)	202
Emissões equivalentes de Gas Natural (kg CO ₂)	6358
Impacto Líquido (kg CO ₂ /MJ Eth)	0,167

Cenário 1	
Produtos e subprodutos	
Bagaço total (kg)	132175
Vinhaça (m³)	477
Torta Filtro (kg)	16035
Geração de etanol anidro 1ª geração (kg)	17725
Geração de etanol hidratado 1ª geração (kg)	16755
Geração de etanol anidro 1ª geração (m³)	22
Geração de etanol hidratado 1ª geração (m³)	21
Balanco Energético	
Geração de biometano da vinhaça (m³)	2863
Geração de biometano da torta filtro (m³)	779
Geração de energia elétrica do biometano (MJ)	25061
Geração elétrica W-108 (MJ)	76922
Geração elétrica W-110 (MJ)	44292
Geração elétrica W-111 (MJ)	20896
Energia gerada Total (MJ)	167170
Consumo elétrico prod. biometano da torta filtro (MJ)	7601
Consumo elétrico prod. biometano da vinhaça (MJ)	79
Energia Consumida total (MJ)	36480
Eletricidade Excedente (MJ)	130690
Vapor Excedente Bagaço (kg)	24206
Vapor Excedente Biogas (kg)	24416
Vapor Excedente Total (kg)	48623
Calor latente de vapor saturado (MJ/kg)	2,18
Oferta Térmica (MJ)	714109,6674
Demanda Térmica (MJ)	608058,4349
Superavit térmico (MJ)	106051,2325
Razão oferta/demanda	1,174409607
NER	0,8010495866
Emissões de CO₂	
Contribuições do campo (kg CO ₂ _eq)	15900
Emissões de CO ₂ do processo biogas (kg CO ₂)	11165
Emissões de CO ₂ do processo cogen (kg CO ₂)	147993
Emissões de CO ₂ Total (kg CO ₂)	175058
Emissões específicas (kg CO ₂ /MWh)	587
Emissões Biogênicas (kg CO ₂)	159158
Emissões Fosseis (kg CO ₂)	15900
Emissões específicas biogênicas antes da substituição (kg CO ₂ /ton cana)	318,3152123
Emissões específicas fosseis antes da substituição (kg CO ₂ /ton cana)	31,8
Emissões específicas biogênica depois da substituição (kg CO ₂ /ton cana)	318,3152123

Emissões específicas fosseis depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	14,68821519
Parcela Energia Excedente (%)	0,122
Parcela Etanol (%)	0,878
Impacto Energia Excedente (kg CO₂/MWh)	72
Impacto Etanol (kg CO₂/MWh)	516
Emissões específicas da queima do Gas Natural (kg CO₂/MWh)	202
Emissões equivalentes de Gas Natural (kg CO₂)	7344
Impacto Líquido (kg CO₂/MJ Eth)	0,178

Cenário 2	
Produtos e subprodutos	
Bagaço total (kg)	132175
Vinhaça (m³)	477
Torta Filtro (kg)	16035
Geração de etanol anidro 1ª geração (kg)	17725
Geração de etanol hidratado 1ª geração (kg)	16755
Geração de etanol anidro 1ª geração (m³)	22
Geração de etanol hidratado 1ª geração (m³)	21
Balanco Energético	
Geração de biometano da vinhaça (m³)	2863
Geração de biometano da torta filtro (m³)	779
Geração de biometano do bagaço (m³)	26105
Geração de energia elétrica do biometano (MJ)	204661
Energia gerada Total (MJ)	204661
Consumo elétrico prod. biometano da torta filtro (MJ)	7601
Consumo elétrico prod. biometano da vinhaça (MJ)	79
Consumo elétrico prod. biometano do bagaço (MJ)	62653
Energia Consumida total (MJ)	99132
Eletricidade Excedente (MJ)	105528
Vapor excedente do biometano (kg)	199396
Calor latente de vapor saturado (MJ/kg)	2,181105
Oferta Térmica (MJ)	434904,5841
Demanda Térmica (MJ)	608058,4349
Superavit térmico (MJ)	-173153,8508
Razão oferta/demanda	0,7152348511
NER	0,6369571866
Emissões de CO₂	
Contribuições do campo (kg CO ₂ _eq)	15900
Emissões de CO ₂ do gás natural para suprir o déficit térmico (kg CO ₂)	11057
Emissões de CO ₂ do processo biogas (kg CO ₂)	91175
Emissões de CO ₂ Total (kg CO ₂)	118133
Emissões específicas (kg CO ₂ /MWh)	406
Emissões Biogênicas (kg CO ₂)	91175
Emissões Fosseis (kg CO ₂)	26957
Emissões específicas biogênicas antes da substituição (kg CO ₂ /ton cana)	182,3505541
Emissões específicas fosseis antes da substituição (kg CO ₂ /ton cana)	53,91445975
Emissões específicas totais depois da substituição (kg CO ₂ /ton cana)	224,404689
Emissões específicas biogênica depois da substituição (kg CO ₂ /ton cana)	182,3505541
Emissões específicas fosseis depois da substituição (kg CO ₂ /ton cana)	42,05413493

Parcela Energia Excedente (%)	0,101
Parcela Etanol (%)	0,899
Impacto Energia Excedente (kg CO₂/MWh)	41
Impacto Etanol (kg CO₂/MWh)	365
Emissões específicas da queima do Gas Natural (kg CO₂/MWh)	202
Emissões equivalentes de Gas Natural (kg CO₂)	5930,16
Impacto Líquido (kg CO₂/MJ Eth)	0,119

Cenário 3	
Produtos e subprodutos	
Bagaço total (kg)	132175
Vinhaça (m³)	543
Torta Filtro (kg)	16035
Geração de etanol anidro 1ª geração (kg)	17725
Geração de etanol hidratado 1ª geração (kg)	16755
Geração de etanol de 2ª geração (kg)	4763
Geração de etanol anidro 1ª geração (m³)	22
Geração de etanol hidratado 1ª geração (m³)	21
Geração de etanol de 2ª geração (m³)	6
Torta de Lignina (kg)	79993
Licor de pentoses (m³)	289
Balanco Energético	
Geração de biometano da vinhaça (m³)	3259
Geração de biometano da torta filtro (m³)	779
Geração de biometano do licor de pentoses (m³)	20383
Geração elétrica W-108 (MJ)	98718
Geração elétrica W-110 (MJ)	47733
Geração elétrica W-111 (MJ)	20889
Geração de energia elétrica da torta de lignina para cogen. (MJ)	132789
Geração de energia elétrica do biogas (MJ)	168014
Energia gerada Total (MJ)	468144
Consumo elétrico prod. biometano da torta filtro (MJ)	7601
Consumo elétrico prod. biometano da vinhaça (MJ)	90
Consumo elétrico prod. biometano do licor de pentoses (MJ)	141270
Consumo de energia na hidrolise (MJ)	16371
Energia Consumida total (MJ)	194132
Eletricidade Excedente (MJ)	234012
Vapor excedente da hidrolise (kg)	250
Vapor excedente do biometano (kg)	163692,2667
Vapor excedente da cogen (kg)	243525,879
Vapor Excedente Total (kg)	407468
Calor latente de vapor saturado (MJ/kg)	2,181105
Oferta Térmica (MJ)	888.731
Demanda Térmica (MJ)	798.813
Superavit térmico (MJ)	89.918
Razão oferta/demanda	1,112564407
NER	0,9516778547
Emissões de CO₂	
Contribuições do campo (kg CO ₂ _eq)	15900
Emissões de CO ₂ do processo biogas (kg CO ₂)	74849

Emissões de CO₂ do processo de cogen (kg CO₂)	89566
Emissões de CO₂ do processo hidrolise (kg CO₂)	13482
Emissões de CO₂ Total (kg CO₂)	193797
Emissões específicas (kg CO₂/MWh)	532
Emissões Biogênicas (kg CO₂)	177897
Emissões Fosseis (kg CO₂)	15900
Emissões específicas biogênicas antes da substituição (kg CO₂/ton cana)	355,7948886
Emissões específicas fosseis antes da substituição (kg CO₂/ton cana)	31,8
Emissões específicas totais depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	361,2943168
Emissões específicas biogênicas depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	355,7948886
Emissões específicas fosseis depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	5,499428212
Parcela Energia Excedente (%)	0,179
Parcela Etanol (%)	0,821
Impacto Energia Excedente (kg CO₂/MWh)	95
Impacto Etanol (kg CO₂/MWh)	437
Emissões específicas da queima do Gas Natural (kg CO₂/MWh)	202
Emissões equivalentes de Gas Natural (kg CO₂)	13150
Impacto Líquido (kg CO₂/MJ Eth)	0,168

Cenário 4	
Produtos e subprodutos	
Palha Total (kg)	35000
Vinhaça (m³)	477
Torta Filtro (kg)	16035
Geração de etanol anidro 1 geração (kg)	17725
Geração de etanol hidratado 1 geração (kg)	16755
Geração de etanol anidro 1 geração (m³)	22
Geração de etanol hidratado 1 geração (m³)	21
Balanco Energético	
Geração de biometano da vinhaça (m³)	2863
Geração de biometano da torta filtro (m³)	779
Geração de energia elétrica do biometano (MJ)	25061
Geração de energia elétrica da palha para cogen. (MJ)	93800
Energia gerada Total (MJ)	118861
Consumo elétrico prod. biometano da torta filtro (MJ)	7601
Consumo elétrico prod. biometano da vinhaça (MJ)	79
Consumo para tirar a palha do campo (MJ)	3150
Energia Consumida total (MJ)	39630
Eletricidade Excedente (MJ)	79231
Vapor excedente do biometano (kg)	24416
Vapor excedente da cogen (kg)	172023
Vapor excedente (kg)	196439
Calor latente de vapor saturado (MJ/kg)	2,181105
Oferta Térmica (MJ)	428.455
Demanda Térmica (MJ)	608058,4349
Superavit térmico (MJ)	-179.604
Razão oferta/demanda	0,7046275921
Consumo de diesel para coleta da palha (MJ)	6969
NER	0,6159453212
Emissões de CO₂	
Contribuições do campo (kg CO ₂ _eq)	15900
Emissões de CO ₂ do gás natural para suprir o déficit térmico (kg CO ₂)	11469
Emissões de CO ₂ da coleta da palha (kg CO ₂)	511,42
Emissões de CO ₂ do processo biogas (kg CO ₂)	11165
Emissões de CO ₂ do processo de cogen (kg CO ₂)	39189
Emissões de CO ₂ Total (kg CO ₂)	78234
Emissões específicas (kg CO ₂ /MWh)	276
Emissões Biogênicas (kg CO ₂)	50353
Emissões Fosseis (kg CO ₂)	27881
Emissões específicas biogênicas antes da substituição (kg CO ₂ /ton cana)	100,706134

Emissões específicas fosseis antes da substituição (kg CO₂/ton cana)	55,76104452
Emissões específicas totais depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	147,5623905
Emissões específicas biogênica depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	100,706134
Emissões específicas fosseis depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	46,85625643
Parcela Energia Excedente (%)	0,078
Parcela Etanol (%)	0,922
Impacto Energia Excedente (kg CO₂/MWh)	21
Impacto Etanol (kg CO₂/MWh)	254
Emissões específicas da queima do Gas Natural (kg CO₂/MWh)	202
Emissões equivalentes de Gas Natural (kg CO₂)	4452
Impacto Líquido (kg CO₂/MJ Eth)	0,078

Cenário 5	
Produtos e subprodutos	
Palha Total (kg)	35000
Vinhaça (m³)	477
Torta Filtro (kg)	16035
Geração de etanol anidro 1ª geração (kg)	17725
Geração de etanol hidratado 1ª geração (kg)	16755
Geração de etanol anidro 1ª geração (m³)	22
Geração de etanol hidratado 1ª geração (m³)	21
Balanco Energético	
Geração de biometano da vinhaça (M³)	2863
Geração de biometano da torta filtro (M³)	779
Geração de biometano da palha (M³)	5474
Geração de energia elétrica do biometano (MJ)	62724
Energia gerada Total (MJ)	62724
Consumo elétrico prod. biometano da torta filtro (MJ)	7601
Consumo elétrico prod. biometano da vinhaça (MJ)	79
Consumo elétrico prod. biometano da palha (MJ)	16590
Consumo para tirar a palha do campo (MJ)	3150
Energia Consumida total (MJ)	56220
Eletricidade Excedente (MJ)	6504
Vapor excedente do biometano (kg)	61110
Calor latente de vapor saturado (MJ/kg)	2,181105
Oferta Térmica (MJ)	133288,2127
Demanda Térmica (MJ)	608058,4349
Superavit térmico (MJ)	-474770,2222
Razão oferta/demanda	0,2192029665
Consumo de diesel para coleta da palha (MJ)	6969,3
NER	0,4856487228
Emissões de CO2	
Contribuições do campo (kg CO ₂ _eq)	15900
Emissões de CO ₂ do gás natural para suprir o déficit térmico (kg CO ₂)	30318
Emissões de CO ₂ da coleta da palha (kg CO ₂)	511,42
Emissões de CO ₂ do processo do biogas (kg CO ₂)	27943
Emissões de CO ₂ Total (kg CO ₂)	74672
Emissões específicas (kg CO ₂ /MWh)	283
Emissões Biogênicas (kg CO ₂)	27943
Emissões Fosseis (kg CO ₂)	46729
Emissões específicas biogênicas antes da substituição (kg CO ₂ /ton cana)	55,8862342
Emissões específicas fosseis antes da substituição (kg CO ₂ /ton cana)	93,45843616
Emissões específicas totais depois da substituição (kg CO ₂ /ton cana)	148,6137234

Emissões específicas biogênica depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	55,8862342
Emissões específicas fosseis depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	92,72748924
Parcela Energia Excedente (%)	0,007
Parcela Etanol (%)	0,993
Impacto Energia Excedente (kg CO₂/MWh)	2
Impacto Etanol (kg CO₂/MWh)	281
Emissões específicas da queima do Gas Natural (kg CO₂/MWh)	202
Emissões equivalentes de Gas Natural (kg CO₂)	365
Impacto Líquido (kg CO₂/MJ Eth)	0,079

Cenário 6	
Produtos e subprodutos	
Palha Total (kg)	35000
Vinhaça (m³)	516
Torta Filtro (kg)	16035
Geração de etanol anidro 1ª geração (kg)	17725
Geração de etanol hidratado 1ª geração (kg)	16755
Geração de etanol anidro 1ª geração (m³)	22
Geração de etanol hidratado 1ª geração (m³)	21
Torta de Lignina (kg)	14700
Licor de pentoses (m³)	350
Balanço Energético	
Geração de biometano da vinhaça (m³)	3096
Geração de biometano da torta filtro (m³)	779
Geração de etanol de 2 gen. (kg)	3495
Geração de biometano licor de pentose (m³)	24667
Geração de energia elétrica da torta de lignina para cogen. (MJ)	24402
Geração de energia elétrica do biogas (MJ)	196368
Energia gerada Total (MJ)	220770
Consumo elétrico prod. biometano da torta filtro (MJ)	7601
Consumo elétrico prod. biometano da vinhaça (MJ)	85
Consumo elétrico prod. biometano do licor de pentoses (MJ)	170962
Consumo para tirar a palha do campo (MJ)	3150
Consumo de energia na hidrolise (MJ)	3026
Energia Consumida total (MJ)	213625
Eletricidade Excedente (MJ)	7145
Vapor excedente do biometano (kg)	191316,6431
Vapor excedente da cogen (kg)	44751,62819
Vapor excedente Total (kg)	236068
Calor latente de vapor saturado (MJ/kg)	2,181105
Oferta Térmica (MJ)	514889,6869
Demanda Térmica (MJ)	635417,9953
Superavit térmico (MJ)	-120528,3084
Razão oferta/demanda	0,8103165014
Consumo de diesel para coleta da palha (MJ)	6969
NER	0,655334199
Emissões de CO₂	
Contribuições do campo (kg CO ₂ eq)	15900
Emissões de CO ₂ do gás natural para suprir o déficit térmico (kg CO ₂)	7685
Emissões de CO ₂ da coleta da palha (kg CO ₂)	511
Emissões de CO ₂ do processo do biogas (kg CO ₂)	87481

Emissões de CO₂ do processo de cogen (kg CO₂)	16459
Emissões de CO₂ do processo hidrolise (kg CO₂)	3570
Emissões de CO₂ Total (kg CO₂)	131607
Emissões específicas (kg CO₂/MWh)	461
Emissões Biogênicas (kg CO₂)	107510
Emissões Fosseis (kg CO₂)	24097
Emissões específicas biogênicas antes da substituição (kg CO₂/ton cana)	215,0198225
Emissões específicas fosseis antes da substituição (kg CO₂/ton cana)	48,19336593
Emissões específicas totais depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	262,4113286
Emissões específicas biogênica depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	215,0198225
Emissões específicas fosseis depois da substituição (kg CO₂/ton cana)	47,39150611
Parcela Energia Excedente (%)	0,007
Parcela Etanol (%)	0,993
Impacto Energia Excedente (kg CO₂/MWh)	3
Impacto Etanol (kg CO₂/MWh)	458
Emissões específicas da queima do Gas Natural (kg CO₂/MWh)	202
Emissões equivalentes de Gas Natural (kg CO₂)	401
Impacto Líquido (kg CO₂/MJ Eth)	0,139