



Fernando Paes de Carvalho Filho

**Análise estatística da eficiência exergética sob múltiplos
indicadores de uma biorrefinaria produzindo etanol de
cana-de-açúcar e biodiesel de microalgas no Brasil**

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
Julho de 2025

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter sido minha fonte de força, sabedoria e perseverança ao longo de toda a minha trajetória acadêmica.

Ao meu Orientador, Florian, e ao coorientador Sergio, pela oportunidade realizar este trabalho. Sem o apoio e a orientação de vocês, este projeto não teria sido possível. Agradeço profundamente por todo suporte, paciência e por me introduzirem a um tema novo com tanta dedicação.

Aos meus Pais, Fernando e Claudia, por todos os conselhos, pela confiança e pelo apoio incondicional em cada uma das minhas escolhas. Desde o início da graduação até os desafios finais, foram fundamentais para que eu pudesse alcançar este objetivo.

À minha irmã, Danielle, por estar sempre ao meu lado, por me apoiar em todos os momentos, mesmo morando à distância neste último ano, e por ser uma inspiração na minha vida profissional e pessoal. Saber que posso contar com você sempre me deu força para seguir em frente.

À minha namorada, Maria Eduarda, por ser minha parceira em todas as situações ao longo deste último ano. Obrigado por todo carinho, paciência e incentivo durante esse processo, especialmente nos momentos difíceis.

Aos meus amigos, pelos momentos de descontração e leveza, tão importantes para manter o equilíbrio durante a jornada.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio e a todos os professores que fizeram parte da minha formação. Este trabalho só foi possível graças aos conhecimentos transmitidos por vocês ao longo do curso.

E, por fim, à PUC-Rio, por proporcionar o ambiente, os recursos e as oportunidades necessárias para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

RESUMO

Análise estatística da eficiência exergética sob múltiplos indicadores de uma biorrefinaria produzindo etanol de cana-de-açúcar e biodiesel de microalgas no Brasil.

Este trabalho realiza uma análise exergética abrangente de uma biorrefinaria integrada teórica, que produz etanol a partir da cana-de-açúcar e biodiesel de microalgas no contexto brasileiro. Foram processados os dados simulados em um modelo numérico utilizando o software Aspen Hysys referentes aos balanços de massa e energia, contemplando cinco subsistemas principais (hidrólise enzimática, digestão anaeróbica, planta de etanol, sistema de cogeração e cultivo de microalgas) e o sistema global. A partir da caracterização detalhada das correntes materiais e energéticas de cada subsistema, foram calculados quatro indicadores distintos de eficiência exergética para treze cenários operacionais simulados, com o objetivo de proporcionar interpretações mais amplas e precisas do desempenho termodinâmico da planta. Os dados foram organizados em planilhas para realização de uma análise exergética aprofundada, considerando os fluxos de exergia nas entradas e saídas de cada subsistema. O primeiro indicador de eficiência foi definido como a razão entre a exergia total que sai e a exergia total que entra no volume de controle, sendo esta a forma mais tradicional de avaliação. O segundo indicador manteve no denominador o somatório de exergia que entra no subsistema, porém o numerador passou a descontar as perdas exergéticas do processo, resultando em valores distintos. O terceiro indicador conservou o numerador do segundo, mas, modificou o denominador, considerando apenas as diferenças entre correntes de exergia que atuam como força motriz para o funcionamento do subsistema. Por fim, o quarto indicador utilizou esse mesmo denominador, mas redefiniu o numerador como o somatório das correntes de exergia que representam efetivos ganhos gerados pelo subsistema. Após o cálculo de todas as eficiências, uma análise estatística foi desenvolvida para melhor entendimento. Os resultados evidenciaram que a planta de microalgas apresentou consistentemente os maiores valores médios de eficiência exergética e baixa variabilidade entre os casos simulados, indicando sua robustez operacional. Em contraste, o sistema de cogeração exibiu os menores valores de eficiência, assim como maior dispersão nos indicadores avaliados. A digestão anaeróbica demonstrou queda significativa na eficiência ao considerar irreversibilidades internas, destacando a relevância do 2º e 3º indicador para evitar superestimações. A comparação entre os indicadores revelou visões complementares sobre o desempenho dos subsistemas, evidenciando que abordagens alternativas podem captar nuances não observadas em métodos convencionais.

Palavras-chave: Desempenho, Box-plots, sensibilidade, perda, sustentabilidade

ABSTRACT

Statistical analysis of exergetic efficiency under multiple indicators in a biorefinery producing sugarcane ethanol and microalgae biodiesel in Brazil

This work performs a comprehensive exergetic analysis of a theoretical integrated biorefinery that produces ethanol from sugarcane and biodiesel from microalgae in the Brazilian context. Simulated data from a numerical model were processed using Aspen Hysys software, referring to mass and energy balances, including five main subsystems (enzymatic hydrolysis, anaerobic digestion, ethanol plant, cogeneration system, and microalgae cultivation) and the global system. From the detailed characterization of material and energy streams in each subsystem, four distinct exergetic efficiency indicators were calculated for thirteen simulated operational scenarios, aiming to provide broader and more accurate interpretations of the plant's thermodynamic performance. The data were organized into spreadsheets to conduct an in-depth exergetic analysis, considering the exergy flows at the inputs and outputs of each subsystem. The first efficiency indicator was defined as the ratio between the total exergy leaving and the total exergy entering the control volume, representing the most traditional evaluation approach. The second indicator maintained the sum of input exergy in the denominator but subtracted the process exergy losses in the numerator, resulting in different values. The third indicator kept the numerator from the second but modified the denominator, considering only the differences between exergy streams that act as the driving force for subsystem operation. Finally, the fourth indicator used this same denominator but redefined the numerator as the sum of exergy streams that represent effective gains generated by the subsystem. After calculating all efficiencies, a statistical analysis was developed for better understanding. The results showed that the microalgae plant consistently presented the highest average exergetic efficiency and low variability among the simulated cases, indicating operational robustness. In contrast, the cogeneration system exhibited the lowest efficiency values and the greatest dispersion in the evaluated indicators. Anaerobic digestion demonstrated a significant drop in efficiency when internal irreversibilities were considered, highlighting the relevance of the second and third indicators to avoid overestimations. The comparison among indicators revealed complementary views of subsystem performance, showing that alternative approaches can capture nuances not observed through conventional methods.

Keywords: Performance, Box-plots, Sensitivity, Loss, Sustainability

Sumário

1) Introdução.....	13
1.1 Contextualização.....	13
1.2 Objetivo.....	22
1.3 Estrutura do trabalho.....	22
2) Revisão bibliográfica	24
2.1 Cana-de-açúcar na Matriz Brasileira	24
2.2 Produção de Etanol.....	24
2.2.1 Limpeza da cana-de-açúcar e extração dos açúcares.....	25
2.2.2 Cogeração	26
2.2.3 Tratamento do caldo	27
2.2.4 Concentração, esterilização e resfriamento do caldo	27
2.2.5 Fermentação	28
2.2.6 Destilação e Desidratação.....	28
2.3 Digestão Anaeróbica	30
2.4 Hidrólise Enzimática.....	31
2.5 Microalgas.....	32
2.5.1 Cultivo de Microalgas	33
2.5.2 Rota seca.....	35
2.5.2.1 Desidratação das Microalgas	35
2.5.2.2 Extração de óleo	35
3) Fundamentação Teórica	37
3.1 Balanço de Energia e Exergia	37
3.2 Eficiências Exergéticas	41
4) Cenários Investigados e Metodologia	44
4.1 Fluxograma dos subsistemas analisados	44
4.1.1 Digestão Anaeróbica	46
4.1.2 Hidrólise Enzimática.....	49
4.1.3 Planta de Microalgas.....	51
4.1.4 Planta de Etanol.....	54
4.1.5 Cogeração	58
4.1.6 Sistema Global.....	62
4.2 Casos analisados.....	63
4.3 Análise estatística descritiva	65
5) Resultados.....	67

5.1 Análise por Eficiência	67
5.1.1 Eficiência Exergética Racional	67
5.1.2 Eficiência Exergética Relativa	69
5.1.3 Eficiência Exergética Alternativa	71
5.1.4 Índice Exergético	73
5.1.5 Eficiências globais	75
6) Conclusão	77
7) Referências bibliográficas	79

Lista de Figuras

Figura 1 - Matriz energética brasileira em 2023 (Elaboração própria baseado em dados da EPE 2024).....	14
Figura 2 - Plantas de produção de etanol em 2025 (ANP, 2025)	15
Figura 3 - Plantas de produção de biodiesel em 2025 (ANP, 2025).....	18
Figura 4 – Diagrama de blocos do processo de produção de etanol em uma destilaria autônoma (adaptado de Albarelli et al, 2014)	25
Figura 5 – Configuração convencional de destilaria produzindo etanol hidratado (Dias et al, 2009)	29
Figura 6 - Diagrama simplificado da biorrefinaria analisada	45
Figura 7– Legenda padronizada das correntes nos fluxogramas dos subsistemas da biorrefinaria	46
Figura 8 - Diagrama das correntes de entrada e saída do subsistema de Digestão Anaeróbica	47
Figura 9 - Diagrama das correntes de entrada e saída do subsistema de Hidrólise Enzimática.....	49
Figura 10 - Diagrama das correntes de entrada e saída do subsistema de Planta de Microalgas.....	52
Figura 11 - Diagrama das correntes de entrada e saída do subsistema de Planta de Etanol.....	55
Figura 12 - Diagrama das correntes de entrada e saída do subsistema de Cogeração	59
Figura 13 - Diagrama das correntes de entrada e saída do sistema global	62
Figura 14 – Simulações realizadas para biorefinaria dentro do planejamento de Doehlert (Castiñeiras-Filho, 2024)	64
Figura 15 - Eficiência exergética racional dos cinco subsistemas da biorrefinaria de todos os casos analisados.....	67
Figura 16 - Eficiência exergética relativa dos cinco subsistemas da biorrefinaria de todos os casos analisados.....	69
Figura 17 - Eficiência exergética alternativa dos cinco subsistemas da biorrefinaria de todos os casos analisados.....	71

Figura 18 - índice Exergético dos cinco subsistemas da biorrefinaria de todos os casos analisados	73
Figura 19 - Eficiências Globais da biorrefinaria	75

Lista de tabela

Tabela 1 - Correntes correspondentes ao subsistema de Digestão Anaeróbica.....	48
Tabela 2 - Correntes correspondentes ao subsistema de Hidrólise Enzimática	50
Tabela 3 - Correntes correspondentes ao subsistema da Planta de Microalgas (Parte 1 de 2).....	52
Tabela 4 - Correntes correspondentes ao subsistema da Planta de Microalgas (Parte 2 de 2).....	53
Tabela 5 - Correntes correspondentes ao subsistema da Planta de Etanol (Parte 1 de 2).....	56
Tabela 6 - Correntes correspondentes ao subsistema da Planta de Etanol (Parte 2 de 2).....	57
Tabela 7 - Correntes correspondentes ao subsistema de Cogeração (Parte 1 de 2).....	59
Tabela 8 - Correntes correspondentes ao subsistema de Cogeração (Parte 2 de 2).....	60
Tabela 9 - Configuração dos 13 casos analisados (elaboração própria baseado em dados de Castiñeiras-Filho, 2024)	65
Tabela 10 - Estatísticas descritivas da eficiência exergética racional dos subsistemas da biorrefinaria	68
Tabela 11 - Desvio padrão relativo da eficiência exergética racional nos subsistemas da biorrefinaria	68
Tabela 12 – Estatísticas descritivas da eficiência exergética relativa nos subsistemas da biorrefinaria	70
Tabela 13 – Desvio padrão relativo da eficiência exergética relativa dos subsistemas da biorrefinaria	70
Tabela 14 - Estatísticas descritivas da eficiência exergética alternativa dos subsistemas da biorrefinaria	72
Tabela 15 - Desvio padrão relativo da eficiência exergética alternativa nos subsistemas da biorrefinaria	72
Tabela 16 - Estatísticas descritivas do índice exergético dos subsistemas da biorrefinaria	74

Tabela 17 - Desvio padrão relativo do índice exergético nos subsistemas da biorrefinaria	74
Tabela 18 - Estatísticas descritivas das eficiências globais para cada indicador de eficiência.....	76

Lista de Siglas e Abreviaturas

% m/m – fração em base mássica

% v/v – fração em base volumétrica

B2 – mistura de combustível de diesel com 2% v/v de biodiesel

B15 – mistura de combustível de diesel com 15% v/v de biodiesel

B100 – mistura combustível composta por 100% biodiesel

CNPE – Conselho Nacional de Política Energética

COP21 – 21^a conferência das partes

DPR – Desvio padrão relativo

E1G – Etanol de 1^a geração

E2G – Etanol de 2^a geração

HTST – esterilização High Temperature Short Time

MEE – evaporação de múltiplo efeito

MEG – monoetilenoglicol

PBRs – fotobiorreatores

PNPB – Programa nacional de produção e uso do biodiesel

PS – Peso seco

TAG - triacilglicerídeos

1) INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A crescente conscientização global sobre o impacto das mudanças climáticas, aliada à urgente necessidade de se preservar os recursos naturais finitos, tem impulsionado um movimento em direção à transição energética. Esse processo visa substituir fontes energéticas como petróleo, gás natural e carvão por recursos que sejam mais ambientalmente sustentáveis, tais como energia solar, eólica, hidrogênio e biomassa. Esse movimento foi impulsionado por acordos internacionais, como o Acordo de Paris, que foi um tratado global adotado em dezembro de 2015 durante a 21ª Conferência das Partes (COP21). O objetivo principal do acordo é fortalecer a resposta mundial à ameaça das mudanças climáticas, além de reforçar a capacidade dos países em lidar com os impactos decorrentes dessas transformações. Dentre as metas estabelecidas, destaca-se o compromisso de manter o aumento da temperatura média global “bem abaixo” de 2 °C em relação aos níveis pré-industriais, com esforços para limitar esse aumento a 1,5 °C. O Brasil comprometeu-se a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% em 2025, com uma contribuição indicativa subsequente de redução de 43% em 2030, ambas em relação aos níveis de emissões estimados para 2005 (MCTI, 2021). Apesar dessa forte agenda no cenário energético mundial, as fontes de energia não renováveis ainda dominam a matriz energética global com 80% em 2023; no entanto, estudos preveem que esse percentual em 2050 pode atingir 58% (IEA, 2024). Na última década, houve um aumento de 15% na demanda total de energia, sendo que 40% desse crescimento foi suprido por fontes renováveis (IEA, 2024).

Em contraste com a média global, onde, segundo a IEA (2024), apenas cerca de 13% da matriz energética em 2023 era composta por fontes renováveis, o Brasil se destaca por possuir uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo. De acordo com a EPE (2024), 49,1% da matriz energética nacional é composta por fontes renováveis (Figura 1).

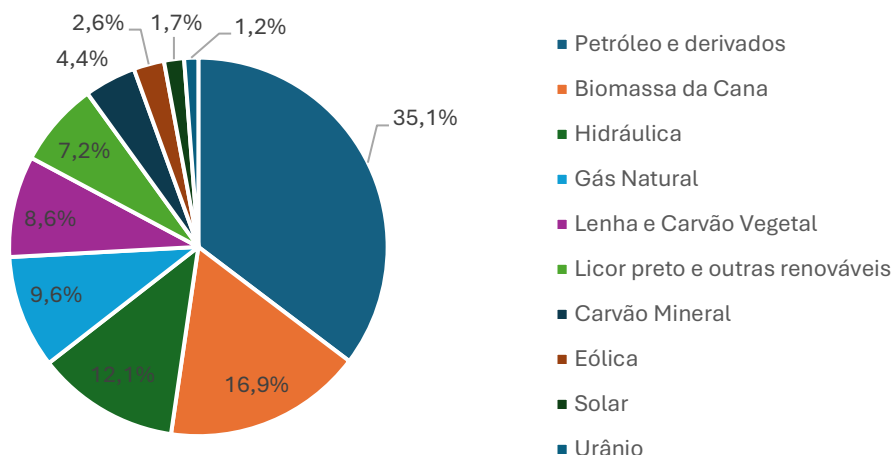


Figura 1 - Matriz energética brasileira em 2023 (Elaboração própria baseado em dados da EPE 2024)

Nesse contexto global, o Brasil destaca-se por apresentar uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo. Assim, a biomassa de cana-de-açúcar ocupa a maior parcela nesse processo, com 16,9%, seguida pela fonte hidráulica, que representa 12,1%, e pela lenha e o carvão vegetal, com 8,6%. Essa expressiva presença de fontes renováveis no cenário brasileiro é fruto de políticas públicas estruturadas, como o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), criado em 1975 como resposta à crise do petróleo. O programa foi crucial para a inspiração de novos projetos e políticas voltadas ao fortalecimento do mercado de biocombustíveis do país, e foi considerado o maior e mais ambicioso programa voltado de produção e uso de combustíveis renováveis (MME, 2024). E mais recentemente em 2017, há o RenovaBio, que é o nome dado à política nacional de biocombustíveis, que visa a redução da intensidade de carbono da matriz de transportes brasileira, promovendo a expansão do uso de biocombustíveis na matriz energética e assegurando previsibilidade para o mercado de combustíveis (ANP, 2024). Tais iniciativas consolidaram o Brasil como um dos líderes mundiais em bioenergia, reforçando seu potencial estratégico na promoção de soluções sustentáveis e integradas para a transição energética.

O setor sucroalcooleiro brasileiro desempenha um papel estratégico na matriz energética do país, sendo responsável por grande parte da produção de açúcar, etanol e da cogeração de energia elétrica a partir da

biomassa da cana-de-açúcar. Trata-se de uma das cadeias produtivas mais consolidadas do setor de biocombustíveis, com forte contribuição para a substituição de combustíveis fósseis, especialmente no transporte veicular. Essa estrutura produtiva alia alta produtividade agrícola, uso eficiente de resíduos como o bagaço e vinhaça, e potencial para expansão sustentável, o que posiciona o Brasil como uma referência mundial na produção de energia renovável a partir da cana e o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido da Índia e da China (FAOSTAT, 2023).

A Cana-de-açúcar é cultivada em 19 dos 26 estados brasileiros, com um total de 360 instalações de produção de etanol, conforme mostra a Figura 2. Apesar dessa ampla distribuição, a produção está fortemente concentrada em São Paulo, responsável por 50,04% da safra 2022/2023. Goiás e Minas Gerais ocupam a segunda e terceira posições, com 11,54% e 10,83% da produção, respectivamente (ÚNICA, 2024).



Figura 2 - Plantas de produção de etanol em 2025 (ANP, 2025)

A mecanização da colheita também evoluiu significativamente, passando de 69,16% para 90,83% em apenas uma década. (ÚNICA 2024). Na safra 2023/2024, o Brasil atingiu um recorde histórico, com produção de 713,2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar — um aumento de 16,8% em relação à safra anterior. Esse crescimento foi impulsionado por condições climáticas favoráveis e novos investimentos no setor. A área colhida foi estimada em 8.334 mil hectares, com rendimento médio de 85.580 kg/ha (CONAB, 2024).

Como reflexo do aumento na produção agrícola, a safra também registrou recordes nos derivados da cana. A produção de açúcar atingiu 45,68 milhões de toneladas. No setor de biocombustíveis, o etanol hidratado teve produção estimada em 17,64 bilhões de litros (59%), enquanto o etanol anidro alcançou 12,05 bilhões de litros (41%) (CONAB, 2024). Além de sua relevância energética, o setor sucroalcooleiro tem papel expressivo na economia nacional. Em 2024, o Brasil exportou cerca de 38 milhões de toneladas de açúcar, com receita de aproximadamente US\$ 18,6 bilhões de dólares, o equivalente a R\$ 100,5 bilhões de reais. Os principais destinos foram países asiáticos, como Indonésia (8,89%), Índia (8,65%) e China (7,56%). No mesmo período, o Brasil exportou aproximadamente 1,9 milhão de m³ de etanol, sendo 1,3 milhões de m³ na forma hidratada e 0,6 milhões de m³ na forma anidra. Essas exportações geraram uma receita de US\$ 1,06 bilhões de dólares, o equivalente a R\$ 5,6 bilhões de reais. O etanol anidro teve como principais mercados de destino os Estados Unidos, enquanto o etanol hidratado foi majoritariamente exportado para a Coreia do Sul (MAPA, 2025).

O biodiesel, embora tenha uma participação menor, é responsável por 1,98% da matriz energética nacional. Ele é um biocombustível para uso no ciclo diesel, derivado de fontes renováveis como óleos vegetais e gorduras animais, e é obtido a partir do processo químico conhecido como transesterificação. O Brasil acompanhando a tendência mundial, desde a década de 90, já tinha destinado pesquisa sobre o tema, no entanto, foi apenas em dezembro de 2004, com o lançamento do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) pelo governo nacional, que o tema começou a ser realmente desenvolvido no país. O objetivo inicialmente foi

introduzir o biodiesel na matriz energética nacional focando na inclusão social e no desenvolvimento regional. Dessa forma, o PNPB institucionalizou a base normativa para a produção e comercialização do biodiesel no país. (MME, 2025)

O Brasil regula a mistura de biodiesel puro (B100) ao diesel fóssil desde 2004, quando o processo teve início em caráter experimental, e que se tornou obrigatório em 2008 com 2% (B2). Desde então, esse valor tem evoluído ao longo dos anos, com previsão de alcançar o valor de 15% (B15) a partir de agosto de 2025. No entanto, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) suspendeu temporariamente esse aumento, mantendo em vigor o percentual de 14% válido em todo território nacional desde março de 2024 (MME, 2025). Essa evolução tem contribuído para harmonização com as normas internacionais e alinhamento de sua qualidade às condições do mercado brasileiro (ANP 2024).

Em 2025, o país conta com 58 plantas autorizadas de produção de biodiesel, como demonstra a Figura 3. Com destaque para região Centro-Oeste com 28 unidades, seguido da região sul com 15 apesar que a maior parte da demanda do combustível fica na região sudeste.



Figura 3 - Plantas de produção de biodiesel em 2025 (ANP, 2025)

No ano de 2024 o parque possuiu a capacidade de produção de cerca de 40 mil m³/dia e produziu um total de 9 milhões m³ de Biodiesel. Nosso parque se destaca por sua diversidade de matérias-primas o óleo de soja liderou como principal fonte do óleo com 72,4%, seguido por outros materiais graxos, gordura bovina, entre outros (ANP, 2024). Essa multiplicidade não apenas amplia a capacidade produtiva do país como também valoriza as cadeias produtivas regionais e estabelece o país como um dos maiores produtores de biodiesel do globo, ao lado de Indonésia e Estados Unidos.

Tanto o biodiesel quanto o etanol se destacam pelo menor impacto ambiental em comparação aos combustíveis fósseis. O biodiesel, apesar de apresentar reduções significativas nas emissões de gases de efeito estufa, mostra maior variabilidade no impacto ambiental dependendo da matéria-prima utilizada. Por outro lado, o etanol apresenta dados mais constantes e sustentáveis, com destaque para etanol produzido a partir do milho com emissões médias estimadas em 72 g CO₂ eq/MJ e

principalmente o da cana-de-açúcar, com média próxima de 63 g CO₂ eq/MJ. Essa matéria-prima, principal fonte do etanol no Brasil, oferece um diferencial ambiental importante: o etanol de primeira geração (E1G) produzido a partir dela emite até 80% menos gases de efeito estufa em comparação à gasolina comum (Jeswani et al., 2023). Esse processo também gera subprodutos, como o bagaço da cana, aproveitado na produção de etanol de segunda geração (E2G), reduzindo as emissões em até 30% em relação ao etanol convencional (E1G).

O processamento da cana de açúcar proporciona outros resíduos, como a vinhaça e a torta de filtro, que podem ser aproveitados para produzir biogás, o qual serve tanto para ser utilizado como combustível quanto para geração de energia elétrica, maximizando o uso sustentável dessa biomassa (Raízen, 2021). Ambos os recursos desempenham um papel relevante no aumento da participação de fontes de energia renováveis na matriz energética brasileira. Em 2023, a produção de biodiesel registrou um crescimento de 20,3% em relação ao ano anterior. Por sua vez, o etanol derivado da cana-de-açúcar, apresentou um aumento de 11,3%, atingindo um total de 31,2 milhões de metros cúbicos (EPE, 2024).

Outra forma de cultivo da biomassa com alta variedade é a produção a partir das microalgas, que são microrganismos fotossintéticos procariontes ou eucariontes que podem se desenvolver rapidamente em quaisquer condições da natureza devido a sua estrutura unicelular ou multicelular simples. Por esse motivo, estão presentes nos ecossistemas de todo o planeta, seja em ambiente aquático ou terrestre (Mata et al, 2010). Elas apresentam vantagens como altas taxas de reprodução, além de não competirem com alimentos por terras aráveis. Dependendo da composição do meio, a biomassa de microalgas pode ser rica em carboidratos (30–60%), lipídios (10–30%) e proteínas (20–70%) (Barros et al, 2022). No entanto, sua produção ainda é um tema muito pouco desenvolvido em todo o mundo. Um dos principais obstáculos que explicam essa situação são os elevados custos de produção da biomassa e as barreiras tecnológicas. Todas as características desejáveis das microalgas, como alta produtividade sob intensa luminosidade, membranas finas, fácil

floculação, rápido crescimento e alto teor lipídico não são encontradas simultaneamente em uma única linhagem ideal (Barros et al, 2022).

Embora o cultivo de microalgas ainda não seja amplamente difundido em escala global, o interesse pela bioenergia derivada desses microrganismos teve início há várias décadas. A primeira iniciativa registrada de cultivo em larga escala ocorreu no Japão, no início da década de 1960, por meio da empresa Nihon Chlorella. Anos mais tarde, em 1978, os Estados Unidos lançaram um programa voltado ao desenvolvimento de fontes alternativas de energia renovável, incluindo o estudo da produção de biodiesel a partir de microalgas. Esses esforços foram motivados, em grande parte, pela primeira crise do petróleo, que despertou o interesse global por alternativas energéticas mais sustentáveis e independentes de recursos fósseis (Mata et al, 2010; Souza et al, 2015).

Luz, água, nutrientes e CO₂ são insumos essenciais para a produção de algas. Devido ao clima favorável, o Brasil tem potencial para se tornar um grande produtor de algas. Além disso, o setor sucroalcooleiro brasileiro é uma excelente fonte de CO₂ concentrado, gerado durante a fermentação do caldo de cana-de-açúcar, juntamente com quantidades substanciais provenientes do sistema de cogeração. Nesse contexto, o uso de fontes alternativas de nutrientes, a reciclagem de efluentes e o uso de sistemas de biorrefinaria são alternativas para reduzir os custos de produção dos biocombustíveis de microalgas (Souza et al, 2015).

As algas têm sido identificadas como uma matéria-prima promissora para a produção de biodiesel, e integrar sua produção a uma usina de etanol de cana pode reduzir custos ao aproveitar sinergias que aumentam substancialmente a eficiência geral do sistema. Por exemplo, as algas precisam de CO₂ puro para o processo de fotossíntese, além de calor e eletricidade, todos produzidos em excesso no processo de etanol de cana-de-açúcar (Souza et al, 2015). Além disso, elas destacam-se pelo cultivo simples, podendo se desenvolver mesmo sem intervenção intensa e utilizando, inclusive, águas impróprias para consumo humano. Diferentes espécies de microalgas podem ser adaptadas a variações ambientais. Isso permite a seleção de espécies mais adequadas a ambientes locais ou características específicas de cultivo, algo que não é possível com outras

matérias-primas atualmente utilizadas na produção de biodiesel, como soja, colza (canola), girassol e óleo de palma (Mata et al, 2010). também podem servir como matéria-prima para diversos tipos de combustíveis renováveis, como biodiesel, metano, hidrogênio e etanol, entre outros. O biodiesel derivado de algas não contém enxofre e apresenta desempenho equivalente ao do diesel de petróleo, ao mesmo tempo em que reduz as emissões de material particulado, monóxido de carbono, hidrocarbonetos e óxidos de enxofre (SOx).

Um dos fatores que contribuem para o seu crescimento é a sua grande diversidade de produtos, mais de cem mil espécies de microalgas podem ser utilizadas como matéria-prima para produção de biodiesel. Algas verdes, diatomáceas e cianobactérias (algas azul-esverdeadas) são as matérias-primas mais promissoras para biocombustíveis.

As microalgas são compostas por ácidos graxos de cadeia longa, proteínas e carboidratos em alta concentração, tornando-as uma fonte rica de ingredientes para produtos farmacêuticos e nutracêuticos (por exemplo, antibióticos, algicidas, vitaminas, alimentos funcionais), além de biodiesel (Souza et al, 2015).

Elas também podem servir como matéria-prima para diversos tipos de combustíveis renováveis, como biodiesel, metano, hidrogênio e etanol, entre outros. O biodiesel derivado de algas não contém enxofre e apresenta desempenho equivalente ao do diesel de petróleo, ao mesmo tempo em que reduz as emissões de material particulado, monóxido de carbono, hidrocarbonetos e óxidos de enxofre (SOx) (Mata et al, 2010).

Devido à variedade de produtos de alto valor, as microalgas podem se tornar um recurso importante para diversas áreas da biotecnologia, incluindo cosméticos, produtos farmacêuticos e aditivos alimentares e nutricionais. O cultivo em larga escala de microalgas como fonte de energia renovável tem ganhado mais atenção por suas vantagens em relação às culturas oleaginosas terrestres, como alta taxa de crescimento, baixa exigência de área, possível alto teor de óleo (30–50% em peso) e a oportunidade de desenvolver um ciclo completamente fechado de algas para biocombustível. Como consequência, houve um ressurgimento

recente do interesse e uma proliferação de projetos de combustível de algas (Xu et al, 2011).

1.2 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo realizar uma avaliação exergética comparativa de uma biorrefinaria hipotética integrada voltada à produção de etanol a partir da cana-de-açúcar e biodiesel de microalgas. A análise é conduzida com base em dados simulados por meio do software Aspen Hysys, os quais foram organizados e processados em uma planilha Excel para o cálculo dos balanços de exergia. Consideram-se cinco subsistemas principais: hidrólise enzimática, digestão anaeróbica, planta de etanol, sistema de cogeração e cultivo de microalgas. Para tal, são definidos e calculados quatro diferentes indicadores de eficiência exergética com o intuito de investigar a sensibilidade dessas métricas frente às variações operacionais simuladas em treze cenários distintos. Busca-se comparar as abordagens adotadas, identificar quais indicadores são mais sensíveis às variações operacionais e fornecer interpretações mais amplas sobre o desempenho termodinâmico da planta.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi dividido em introdução, revisão bibliográfica, fundamentação teórica, cenários investigados e metodologia, resultados e conclusão.

A introdução apresenta o contexto global e nacional da transição energética, destacando o papel estratégico do Brasil na produção de biocombustíveis, com foco na cana-de-açúcar e nas microalgas. Aborda também a evolução de políticas públicas, dados de produção e as vantagens técnicas e ambientais dessas fontes renováveis, o contexto geral do trabalho, sua motivação, justificativa, os objetivos do estudo e a abordagem adotada.

A revisão bibliográfica reúne os conceitos fundamentais relacionados aos processos que integram a biorrefinaria, como a importância da cana-de-açúcar na matriz energética brasileira, a produção

de etanol, a cogeração de energia, a digestão anaeróbica, a hidrólise enzimática e o cultivo e processamento de microalgas.

A Fundamentação Teórica apresenta os fundamentos termodinâmicos que embasam a análise exergética, incluindo os conceitos de exergia, balanços de energia e exergia, e os diferentes indicadores de eficiência exergética utilizados no trabalho.

O tópico dos cenários investigados e metodologia descreve os cinco subsistemas que compõem a biorrefinaria (digestão anaeróbica, hidrólise enzimática, planta de microalgas, planta de etanol e sistema de cogeração), os fluxogramas de entrada e saída, os casos simulados no Aspen Hysys, o processamento dos dados em Excel e a análise estatística descritiva aplicada.

O capítulo de resultados apresenta as eficiências exergéticas obtidas para cada subsistema da biorrefinaria, assim como os resultados das eficiências globais do sistema. São incluídas análises comparativas, gráficos, tabelas e discussão detalhada dos resultados por indicador.

A conclusão sintetiza os principais achados do trabalho, destacando os subsistemas de maior e menor desempenho, as limitações encontradas e sugestões de trabalhos futuro.

2) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cana-de-açúcar na Matriz Brasileira

Segundo o MAPA, a produção total de cana-de-açúcar foi de 712,9 milhões de toneladas na safra 2023/2024, das quais 45,9 milhões de toneladas foram destinadas à produção de açúcar e 35,9 milhões de m³ de etanol. Além de contribuir para a descarbonização do transporte através do etanol, o bagaço da cana foi responsável por 5,1% da oferta interna de energia elétrica no ano de 2023 (EPE, 2024). Esses números ressaltam a importância estratégica da cana no fornecimento de energia renovável e sustentável ao país. Além de seu impacto energético, o setor sucroenergético gera milhões de empregos diretos e indiretos, principalmente em áreas rurais. O Brasil também se destaca na exportação de etanol e açúcar, fortalecendo sua posição no mercado internacional e gerando receitas para o país. Durante a safra 2023/2024, foram exportadas 35 milhões de toneladas de açúcar, totalizando 18,2 bilhões de dólares, enquanto o etanol, no mesmo período, exportou 2,6 milhões de m³ o que resultou em uma receita de 1,53 bilhões de dólares (UNICA, 2024).

2.2 Produção de Etanol

O processo de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar desenvolvido neste trabalho considera a tecnologia de destilaria autônoma (fábrica onde a sacarose é inteiramente utilizada como matéria-prima para a produção do etanol) disponível no Brasil. Os subsistemas e operações englobam a limpeza a seco da cana, a concentração por evaporação de múltiplo efeito, a esterilização do caldo da cana, a etapa de fermentação de açúcares em etanol, a destilação do biocombustível, e sua desidratação para adequar o produto à especificação comercial do etanol anidro no Brasil. A Figura 4 apresenta o diagrama de blocos do processo de produção de etanol em uma destilaria autônoma (Albarelli et al, 2014).

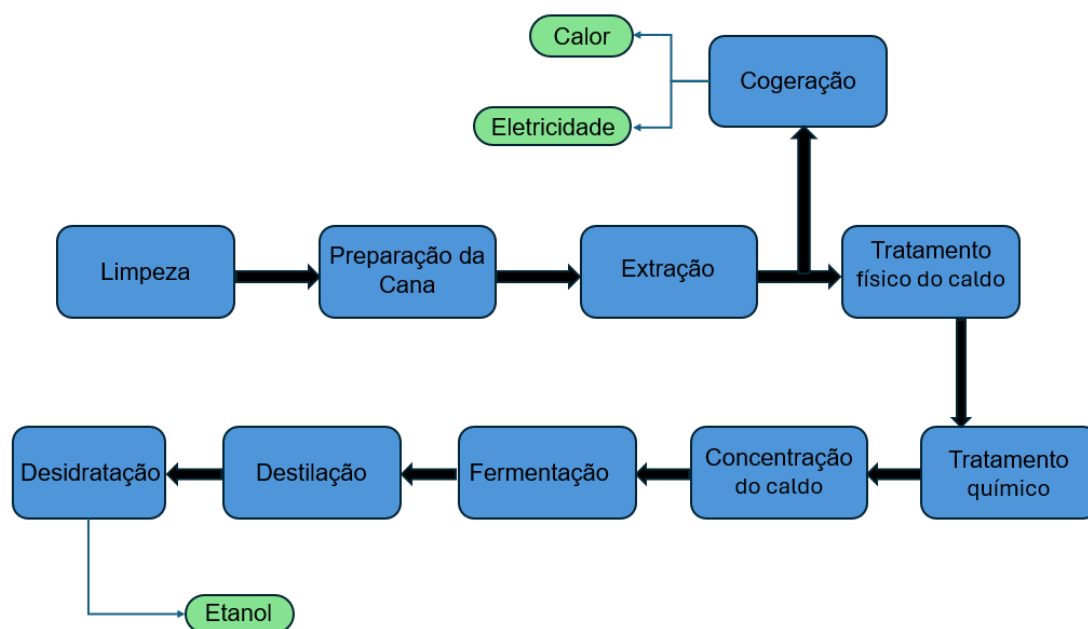


Figura 4 – Diagrama de blocos do processo de produção de etanol em uma destilaria autônoma (adaptado de Albarelli et al, 2014)

2.2.1 Limpeza da cana-de-açúcar e extração dos açúcares

A primeira etapa do processo de etanol ocorre no campo, onde a cana-de-açúcar é colhida. A planta é composta por raízes, colmos, pontas e folhas. Os colmos contêm a maior parte dos açúcares, sendo, portanto, a fração de interesse no processamento industrial. Após a colheita, grande parte das folhas que compõem o chamado “palhiço de cana” são deixados nos campos com o objetivo de aumentar a proteção ao solo e inibir o crescimento de ervas daninhas e outras espécies vegetais (Dias et al, 2009).

Em seguida a matéria-prima é transportada até as usinas e conduzida a uma esteira rolante para lavagem a seco, removendo todos os tipos de impurezas, tanto vegetais quanto mineiras. Em seguida, a cana passa por um eletroímã para a extração de materiais metálicos (NOVACANA). A cana de açúcar passa por uma etapa de limpeza a seco para remover o solo, pedras, detritos e contaminantes trazidos durante a colheita. A matéria-prima é preparada com o uso de facas rotativas, desintegradores e desfibradores, com o objetivo de reduzir o tamanho dos pedaços e romper as células que contém o açúcar. O caldo então é extraído por moendas. A

extração separa o caldo contendo a sacarose do bagaço. O bagaço é utilizado como combustível em um sistema de cogeração enquanto o caldo é enviado para a etapa de tratamento (Ortiz et al, 2020; Palacios-Bereche et al, 2015).

Na etapa de moagem, a cana é triturada, produzindo um líquido chamado melaço, que corresponde a cerca de 70% da matéria original, enquanto os 30% restantes se tornam bagaço (Raízen, 2022). O bagaço além de ser utilizado na produção de bioeletricidade, é também a principal matéria-prima na produção de etanol de segunda geração (E2G). Com o aumento constante da demanda por etanol no Brasil e no mundo, a produção de E2G do bagaço surge como uma alternativa estratégica, pois esse processo aumenta o rendimento de etanol da safra bem como não causa um ampliamiento na área utilizada para plantação de cana-de-açúcar. Sua produção envolve etapas como o pré-tratamento, que separa a lignina da celulose e hemicelulose, seguido da hidrólise enzimática, que quebra as moléculas de celulose e hemicelulose, e por fim, a glicose obtida durante a hidrólise é fermentada e destilada seguindo o processo do etanol de primeira geração (Carpio et al., 2019).

2.2.2 Cogeração

A cogeração possibilita a conversão da energia de maneira mais eficiente quando comparada à geração independente de apenas uma forma de energia. No Brasil, uma planta de cogeração é responsável por atender às necessidades energéticas de uma destilaria autônoma, incluindo às demandas de calor, eletricidade e energia mecânica. Geralmente, como nesse trabalho, são utilizados subprodutos e resíduos vindos de outros subsistemas, tais como o bagaço da planta de etanol, o biogás da digestão anaeróbica, a torta de lignina da hidrólise enzimática, além da palha, que neste caso vem do ambiente externo. Todos esses combustíveis são consumidos pelo sistema com objetivo de reduzir o consumo de combustível ou aumentar a geração de excedentes de energia elétrica (NOVACANA, 2025).

No contexto brasileiro, o sistema de cogeração padrão opera com vapor vivo (estado termodinâmico do vapor superaquecido) a cerca de 65

bar/480°C, apesar que, devido a variação de caldeiras a faixa pode variar desde 21 bar/300°C até 110 bar/530°C (Palacios-Bereche, 2011).

Por exemplo, após a extração do açúcar, o bagaço com cerca de 50% de umidade (base massa) é utilizado como combustível no sistema de cogeração. Nesse caso, considera-se um ciclo a vapor operando com vapor vivo a 753 K (480 °C) e 6,5 MPa, utilizando uma turbina a vapor de contrapressão para geração de eletricidade (Ortiz et al., 2020).

2.2.3 Tratamento do caldo

O caldo proveniente da extração contém uma quantidade significativa de pequenos pedaços de bagaço, material suspenso e impurezas como minerais, sais, ácidos, sujeira e fibra, além de água e açúcares. Dessa forma, para que seja utilizado com eficiência como matéria-prima para a fermentação, ele passa por um tratamento físico composto por filtros e ciclones para remoção de sólidos e contaminantes insolúveis antes de ser introduzido para a etapa de fermentação. Já as impurezas solúveis são removidas na etapa de tratamento químico e aquecimento. Foram adotadas as seguintes etapas: peneiramento, aquecimento, calagem, expansão (flashing) e decantação (Palacios-Bereche et al, 2015).

O caldo passa por um tanque flash e entra no clarificador, onde ocorre uma reação de precipitação. O material precipitado é separado por decantação, filtrado, e o resíduo sólido, conhecido como torta de filtro é descartado ou reaproveitado como um subproduto valioso. A torta de filtro pode ser utilizada na produção de biogás no subsistema da digestão anaeróbica, além de, atualmente, também servir como biofertilizante na lavoura canavieira.

O caldo clarificado segue para o sistema de evaporação. O tratamento de caldo para produção de etanol e açúcar é semelhante, com exceção da adição de enxofre, usada apenas na produção de açúcar (Albarelli et al, 2014).

2.2.4 Concentração, esterilização e resfriamento do caldo

O caldo tratado deve ser concentrado para atingir um teor de açúcares adequada para o processo de fermentação o que contribui para redução o

consumo energético nas etapas de purificação do produto. Essa etapa é normalmente realizada com o uso e é comumente associada às usinas produtoras de açúcar (Dias et al, 2015).

Segundo Palacio-Bereche (2015) e Ortiz (2020) o valor da concentração é de aproximadamente 17% e assim a concentração do caldo ocorre em um sistema de evaporação de múltiplo efeito (MEE), que consiste em cinco estágios com quedas de pressão em cascata. Os vapores extraídos da MEE podem ser utilizados para suprir a demanda de calor de outras partes do processo.

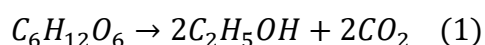
Após o preparo do mosto, ocorre a esterilização e o resfriamento. A esterilização do mosto foi realizada por um tratamento do tipo HTST (High Temperature Short Time), com aquecimento a 130 °C, seguido de resfriamento rápido até a temperatura de fermentação, de 32 °C (Palacios-Bereche et al, 2015).

2.2.5 Fermentação

Nesse estudo, a fermentação foi baseada no processo de Melle-Boinot. Os açúcares presentes no mosto são convertidos em etanol por um processo biológico conduzido por leveduras. A corrente concentrada, contendo leveduras, entra no reator onde os açúcares são convertidos em etanol e subprodutos. Durante essa reação exotérmica, há liberação de dióxido de carbono.

Após a fermentação, o vinho, solução contendo aproximadamente 6% de etanol (base massa), é enviado para o sistema de destilação para remoção da água. O etanol presente no gás de fermentação foi recuperado por uma coluna de absorção e a levedura é reciclada, recompondo os microrganismos da etapa de fermentação.

A reação química global de conversão da sacarose em etanol pode ser representada como:



2.2.6 Destilação e Desidratação

Posteriormente, ocorre a destilação, na qual o vinho fermentado, composto por água, etanol e resíduos da fermentação, é aquecido em

colunas, separando o etanol dos demais compostos devido a diferença de volatilidade. O álcool hidratado obtido possui 96% de teor alcoólico e é utilizado como etanol combustível (Raízen 2022).

O etanol hidratado é normalmente produzido por sistemas complexos de destilação, devido à natureza azeotrópica da solução formada pela água e etanol. Uma configuração convencional é ilustrada na Figura 5:

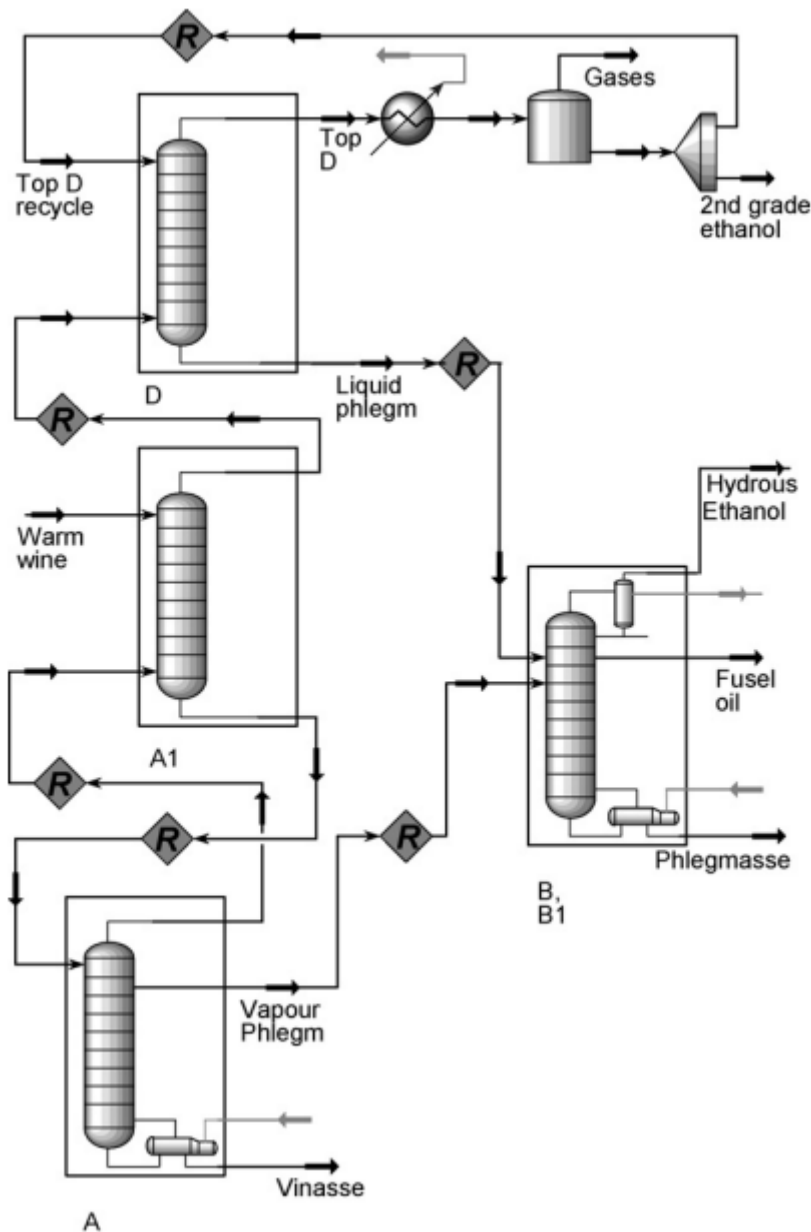


Figura 5 – Configuração convencional de destilaria produzindo etanol hidratado (Dias et al, 2009)

Para que a destilação ocorra, é necessária uma fonte de energia térmica, normalmente fornecida pelo sistema de cogeração, outro subsistema da biorrefinaria analisada.

Inicialmente, o vinho é aquecido a uma temperatura adequada antes de entrar na primeira coluna de destilação. Em seguida, durante as etapas de arraste e retificação, obtém-se o etanol hidratado com cerca de 93,7% em massa de etanol, enquanto a vinhaça, com aproximadamente 0,02% em massa de etanol, é gerada como subproduto que é tratada como efluente (Ortiz et al, 2020; Palacios-Bereche et al, 2013).

A etapa de desidratação é necessária para remover a água remanescente e produzir o etanol anidro, apto para ser misturado com a gasolina no Brasil. Um processo para realizar a desidratação é a destilação extrativa, com monoetilenoglicol (MEG), por exemplo. O MEG é adicionado ao etanol hidratado em uma coluna extrativa, onde interage com a água, modificando a volatilidade relativa da mistura e permitindo a separação. Essa coluna opera à pressão atmosférica e a cerca de 100 °C no fundo. O etanol anidro é obtido no topo da coluna, enquanto a mistura de água e MEG sai pelo fundo.

O MEG é recuperado em uma segunda coluna de destilação, onde a água é removida no topo e o MEG é reciclado no fundo, voltando à coluna extrativa. Essa separação ocorre em torno de 140 °C e pressão atmosférica. O consumo de MEG é relativamente baixo, pois o composto é reciclado continuamente no processo.

Essa tecnologia permite ultrapassar o azeótropo água-etanol, que impossibilita a obtenção de etanol com pureza superior a 96% por destilação simples. A separação com uso de MEG é uma alternativa eficiente à desidratação com peneiras moleculares ou com ciclohexano, sendo largamente adotada na indústria (Dias et al, 2009).

2.3 Digestão Anaeróbica

A digestão anaeróbia é um processo no qual microrganismos decompõem a matéria orgânica na ausência de oxigênio, gerando dois principais produtos: o biogás e os digestatos. Os substratos utilizados nessa etapa são provenientes de diferentes subsistemas da biorrefinaria,

como a vinhaça resfriada e a torta de filtro, oriundas da planta de etanol, além do licor de Pentoses, gerado na hidrólise enzimática e cake das microalgas proveniente da planta de microalgas. Esses resíduos são essenciais para produção dos respectivos digestatos e do biogás.

Os resíduos da planta de etanol, como a vinhaça e a torta de filtro, possuem importantes usos como fertilizantes orgânicos nos campos de cana-de-açúcar para reciclagem de nutrientes. A aplicação da digestão anaeróbica nesse contexto representa uma estratégia promissora, pois permite a valorização desses resíduos. O digestato resultante pode ser utilizado para substituir os fertilizantes minerais nos canaviais, e o biogás produzido pode ser explorado em outras oportunidades (ex: processado em biometano, ou utilizado em cogeração) (Janke et al., 2015).

A utilização do biogás tem ganhado destaque no setor energético nacional. A capacidade instalada de geração elétrica a partir do biogás alcançou 233 MW em 2023, um crescimento expressivo quando comparado aos 70 MW registrados em 2014. Esse avanço evidencia o crescente interesse e investimento nesse tipo de energia renovável. Além disso, a capacidade instalada está mais concentrada em estados com alto potencial de geração de matéria orgânica, especialmente nas regiões Sudeste com destaque para São Paulo e Rio de Janeiro, que possuem maior disponibilidade de resíduos agrícolas, urbanos, industriais e florestais (EPE, 2024).

2.4 Hidrólise Enzimática

A hidrólise enzimática é um processo bioquímico caracterizado pela quebra do material lignocelulósico, convertendo-o em glicose através do processo catalisado por enzimas chamadas genericamente de celulasas. Vários fatores afetam a hidrólise enzimática da celulose entre eles estão a porosidade (área superficial acessível a celulase), a cristalinidade e o grau de polimerização da celulose e o teor de lignina e hemicelulose na biomassa (de Souza et al, 2016).

Na hidrólise enzimática os oligossacarídeos, ou seja, celulose e hemicelulose, são convertidos em açúcares menores, obtendo-se hexoses e pentoses, respectivamente (Castiñeiras-Filho, 2024). As condições de

temperatura, pH, tempo de sacarificação, concentração de enzima e relação sólido-líquido são, em geral, determinadas pelas características dos substratos utilizados (de Souza et al, 2016).

Os resíduos processados nessa etapa são fruto do aproveitamento de subprodutos oriundos de outros sistemas como parte do bagaço proveniente da planta de etanol. A partir desse processamento, são obtidos novos subprodutos, como licor de pentoses (posteriormente utilizado na digestão anaeróbica) e a torta de lignina destinada ao sistema de cogeração.

O aproveitamento do bagaço vindo da planta de etanol como matéria-prima é de extrema importância no processo que irá gerar o etanol de 2ª geração (E2G).

2.5 Microalgas

As microalgas são microrganismos fotossintéticos procariontes (cianobactérias) ou eucariontes (algas verdes, vermelhas e diatomáceas) que podem ser encontrados naturalmente em ecossistemas marinhos e águas doces. Quando comparadas a plantas terrestres, seu mecanismo fotossintético é geralmente mais eficiente na conversão de energia solar em biomassa, pois estão submersas em ecossistemas aquáticos que permitem acesso eficiente à água, CO₂ e outros nutrientes. São facilmente cultivadas devido à sua estrutura celular unicelular ou multicelular simples, com rápido crescimento e capazes de viver em uma ampla variedade de condições ambientais. No entanto, culturas terrestres usam a superfície de suas folhas para receber, refletir e dissipar a luz, enquanto as algas estão limitadas à luz na superfície da água. Por isso, as algas precisam de agitação para garantir o acesso ao CO₂. O metabolismo das algas pode ser fotoautotrófico, foto-heterotrófico, heterotrófico ou mixotrófico, e dependendo das condições ambientais, a mesma espécie pode alternar entre esses processos. Podem ser classificados com base em características como pigmentação, estruturas de armazenamento de produtos, composição de parede celular, ciclo de vida e estrutura celular básica. Para a produção de biodiesel, as algas verdes são as mais

interessantes devido ao seu alto rendimento de ácidos graxos (Aguirre et al., 2013; Souza et al., 2015).

A biomassa de microalgas oferece diversas vantagens estratégicas em relação às matérias-primas convencionais. Entre elas, destacam-se alta produtividade, elevada eficiência na captura de carbono, alto teor de lipídios e amido (essenciais para produção de biodiesel e etanol respectivamente) e a possibilidade de cultivo em água do mar ou em terras não aráveis. Essas características fazem das microalgas uma alternativa com grande potencial sustentabilidade (Brasil et al., 2017). De todo modo, a produção dedicada de biomassa de microalgas tende a ser inviável devido aos dispêndios energéticos para concentrar e processar a biomassa úmida em biocombustíveis, além de limitações de custos e disponibilidade de substratos para o cultivo. Uma integração desta rota produtiva com o setor sucroalcooleiro, o qual é capaz de fornecer energia e emissões de CO₂ biogênico, seria uma forma de se mitigar tais barreiras técnicas e econômicas (Slade e Bauen, 2013; Tercero et al., 2014).

Cultivadas as microalgas, a biomassa (0,05% m/m) deve passar por processos de secagem, previamente ao processamento de seus substratos. Em uma abordagem de secagem extrema (por processos mecânicos e térmicos), a extração de óleo e produção de biodiesel pode ser realizada em analogia à rota de produção de biodiesel de 1^a geração (ex: soja ou sebo bovino), utilizando-se um solvente (hexano) para extrair o conteúdo lipídico, e reagindo os triacilglicerídeos (TAGs) com um álcool reagente (metanol) na reação de transesterificação (ex: proporção molar TAG: metanol de 1:6 sob catálise alcalina) (Souza et al., 2015; Xu et al., 2011). Por fim, a exploração de toda a biomassa é crucial para a viabilidade técnico-econômica da biorefinaria, podendo-se ressaltar o uso de resíduos microalgais para produção de insumos químicos ou energéticos, tal como para a produção de biogás (Xu et al., 2011; Barros et al., 2022).

2.5.1 Cultivo de Microalgas

Os sistemas mais comuns utilizados para cultivo de microalgas são os tanques abertos e fotobiorreatores (PBRs). Ambos necessitam de nutrientes, CO₂ e luz, sendo esse último crucial para o crescimento das

algas ao lado da temperatura. Atualmente, nem os tanques abertos nem os fotobiorreatores fechados são tecnologias maduras para produção de biocombustíveis. Os tanques abertos podem ter formatos de canal, tanques ou lagos circulares, sendo os tanques os mais populares (Souza et al., 2015).

Diversos métodos podem ser usados para colheita e secagem da biomassa. A espécie de microalga, propriedades como tamanho e densidade celular, condições de cultivo e os coprodutos desejados determinarão a técnica de colheita e secagem. Uma vez colhidas do PBR, os lipídios são extraídos. As técnicas incluem extração com solventes convencionais, fluido supercrítico, extração com óleo aquecido, extração mecânica, extração biológica e fracionamento. A escolha depende do pré-tratamento da biomassa algal (que pode gerar concentrado ou pó seco), da espécie e das propriedades físicas de sua parede celular, que também variam com o ciclo de crescimento. Por fim, o óleo da alga é convertido em biodiesel por meio do processo padrão de transesterificação. (Souza et al, 2015)

Para melhorar o balanço energético geral, é necessário reduzir o consumo de energia da desidratação. Isso pode ser alcançado por duas estratégias diferentes: a chamada rota seca, onde o objetivo é melhorar a eficiência da desidratação usando novas técnicas de secagem de baixo consumo energético, e a outra é evitar o processo de secagem aplicando a extração de óleo na fase aquosa, conhecida como rota úmida.

O principal produto-alvo para ambas as rotas é o diesel, que está na forma líquida e pode ser misturado com o diesel fóssil para aplicações de transporte. Atualmente, quase todas as formas de transporte ainda dependem de combustíveis líquidos. Isso fornece um método fácil e justo para comparar o desempenho do combustível de algas com, por exemplo, os biocombustíveis de primeira geração e o diesel fóssil. Tanto o biodiesel (diesel do processo de transesterificação) quanto o diesel verde (diesel do processo de hidrogenação) são altamente comparáveis ao diesel convencional ou derivado do petróleo. (Xu et al, 2011)

2.5.2 Rota seca

A rota seca visa minimizar o consumo de energia no processo de desidratação combinando várias técnicas de desidratação eficazes e complementares. A transesterificação é usada como tecnologia de conversão, pois é comumente utilizada na produção de biocombustíveis de primeira geração. A análise cobre toda a cadeia, desde o cultivo das microalgas até a produção do combustível final. As principais etapas que podem ser distinguidas na cadeia são: cultivo, colheita, desidratação, extração de óleo, conversão do óleo, e reciclagem de nutrientes.

2.5.2.1 Desidratação das Microalgas

Um primeiro passo para engrossar as algas é usar floculação química combinada com centrifugação. Assume-se que é possível obter 16% de peso seco (PS) após a centrifugação das microalgas. Após essa etapa, o lodo de microalgas precisa ser tratado por desidratação mecânica adicional para atingir o PS necessário para o processamento subsequente. Na rota seca, uma etapa de secagem térmica é necessária após a desidratação mecânica para atingir mais de 85% de PS (Xu et al, 2011).

2.5.2.2 Extração de óleo

A microalga é pré-seca até 85% de peso seco (PS) antes do processamento. Esse PS é comparável ao teor de sólidos de, por exemplo, grãos de soja. Isso significa que 95% do óleo pode ser extraído com um consumo de 0,24 MJ de eletricidade, 0,76 MJ de calor e perda de 2,4 g de hexano por quilograma matéria-prima (Xu et al., 2011).

Após a extração, a etapa seguinte é a conversão do óleo em biodiesel, realizada através da reação global de transesterificação, que apresenta um alta eficiência. Ela consiste na conversão de triacilglicerídeos (TAG) presentes no óleo e um álcool reagente (etanol ou metanol) em biodiesel e glicerina (Mata et al., 2010).

Diversos estudos experimentais ao longo dos anos avaliaram o desempenho do biodiesel derivado de microalgas em motores, e constataram que esse biocombustível tem potencial devido à redução das emissões de poluentes atmosféricos. Entretanto, também foi observado

menores índices de potência e eficiência dos motores em comparação aos combustíveis fósseis convencionais. (Castiñeiras-Filho 2024) De maneira geral, o biocombustível derivado das microalgas demonstrou manter um bom desempenho, sendo a mistura B20 *Chlorella protothecoides*, testado em Al-Lwayzy e Yusaf, (2017), o combustível com melhores resultado nos testes.

Assim, o biodiesel de terceira geração produzido a partir de microalgas apresenta grande potencial para aplicação energética, apesar das leves perdas de eficiência e potência observadas em motores (Castiñeiras-Filho, 2024).

3) FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Balanço de Energia e Exergia

A avaliação termodinâmica de sistemas industriais exige o entendimento integrado dos balanços de massa, energia e exergia. O balanço de massa permite avaliar se os fluxos de entrada estão sendo convertidos de forma eficiente em produtos úteis, além de identificar possíveis excessos de rejeitos ou perdas materiais durante o processo. Por outro lado, o balanço de energia permite estimar a quantidade de calor e trabalho necessários para o funcionamento do sistema, sendo útil para identificar demandas energéticas elevadas e propor melhorias no desempenho térmico. No entanto, como a energia é conservada mesmo quando se degrada em qualidade, esse tipo de análise não diferencia entre energia útil e energia dissipada.

Para superar essa limitação, utiliza-se o balanço de exergia, uma ferramenta que abrange tanto a conservação da energia quanto a irreversibilidade dos processos. A exergia mede o potencial real de um fluxo para realizar trabalho útil em relação ao ambiente de referência, permitindo identificar os pontos onde ocorre a maior degradação energética, geralmente relacionada à geração de entropia. A partir dessa abordagem, é possível desenvolver modelos computacionais e simulações que representam com precisão os fluxos físicos e energéticos de cada subsistema. Esses modelos ajudam a estabelecer indicadores de desempenho mais realistas, como as eficiências exergéticas, e permitem analisar o efeito das irreversibilidades sobre o desempenho global do sistema.

Os balanços de massa, energia e entropia estão representados pelas equações 2, 3, 4 e 5 respectivamente.

$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (2)$$

$$\frac{dE}{dt} = \sum \dot{m}_e (Pv + e)_e - \sum \dot{m}_s (Pv + e)_s + \dot{W} + \dot{Q} \quad (3)$$

$$e = u + \frac{v^2}{2} + gh \quad (4)$$

$$\frac{dS}{dt} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s + \int \frac{\delta \dot{Q}}{T_b} + \dot{S}_g \quad (5)$$

Onde:

$\frac{dm}{dt}$ é a taxa de variação de massa dentro do volume de controle $[kg/s]$;

$\sum \dot{m}_e$ representa o somatório das vazões mássicas entram do volume de controle $[kg/s]$;

$\sum \dot{m}_s$ representa o somatório das vazões mássicas saem do volume de controle $[kg/s]$;

$\frac{dE}{dt}$ é a taxa de variação de energia dentro do volume de controle $[kW]$;

$\sum \dot{m}_e(Pv + e)_e$ representa o somatório da energia associada às vazões mássicas de entrada e seus trabalhos de fluxo $[kW]$;

$\sum \dot{m}_s(Pv + e)_s$ representa o somatório da energia associada às vazões mássicas de saída e seus trabalhos de fluxo $[kW]$;

$\dot{W}$ representa a potência líquida fornecida ao volume de controle $[kW]$;

$\dot{Q}$ representa a taxa de transferência de calor líquida fornecida ao volume de controle $[kW]$;

$\frac{v^2}{2}$ representa a energia cinética específica do fluxo material $[kJ/kg]$;

gh representa a energia potencial gravitacional específica do fluxo material $[kJ/kg]$;

$\frac{ds}{dt}$ é a taxa de variação de entropia dentro do volume de controle $[kW/K]$;

$\sum \dot{m}_e s_e$ representa o somatório da entropia associada às vazões mássicas que entram no volume de controle $[kW/K]$;

$\sum \dot{m}_s s_s$ representa o somatório da entropia associada às vazões mássicas que saem no volume de controle $[kW/K]$;

$\int \frac{\delta \dot{Q}}{T_b}$ representa a entropia associada à taxa de transferência de calor líquida que atravessa o volume de controle, em relação à respectiva temperatura da fronteira $[kW/K]$;

$\dot{S}_g$ é a taxa de geração de entropia de entropia devido a irreversibilidades dentro do volume de controle, sendo igual a zero quando o processo é reversível, estritamente positiva quando há irreversibilidades $[kW/K]$.

Em regime permanente, desconsiderando variações cinéticas e potenciais, o balanço de massa garante que a quantidade de material que entra e sai de um volume de controle permanece constante, o que permite rastrear transformações físicas e químicas ao longo do processo. Nesse contexto, as equações previamente apresentadas são simplificadas para equações 6, 7 e 8 a seguir:

$$0 = \sum (\dot{m}_e - \dot{m}_s) \quad (6)$$

$$0 = \sum (\dot{m}_e h_e - \dot{m}_s h_s) + \dot{W} + \dot{Q} \quad (7)$$

$$0 = \sum (\dot{m}_e s_e - \dot{m}_s s_s) + \int \frac{\delta \dot{Q}}{T_b} + \dot{S}_g \quad (8)$$

O balanço de energia, por sua vez, considera as trocas de calor, trabalho e energia relacionadas às correntes de entrada e saída, mas não leva em conta a qualidade da energia. Como a energia é uma grandeza conservativa, esse tipo de análise não diferencia, por exemplo, entre energia térmica de baixa temperatura e energia mecânica de alta utilidade.

É nessa condição que se aplica a análise exergética, fundamentada no conceito de exergia, que representa uma máxima quantidade de trabalho útil que pode ser obtida à medida que o sistema tende ao estado de equilíbrio com o meio ambiente, ou seja, tende ao estado morto. A exergia combina os princípios da Primeira e da Segunda Leis da Termodinâmica, possibilitando a identificação precisa dos locais onde ocorrem perdas devido irreversibilidades internas, como atrito, dissipações de calor ou reações fora do equilíbrio. A equação 9 descreve o balanço exergético, em regime permanente:

$$0 = \sum (\dot{m}_e ex_e - \dot{m}_s ex_s) + \sum \dot{W} + \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \dot{Q} - T_0 \dot{S}_g \quad (9)$$

Onde:

ex_e representa a exergia específica de entrada dos fluxos materiais [kJ/kg]; com vazões mássicas $\dot{m}_e$ [kg/s];

ex_s representa a exergia específica de saída dos fluxos materiais [kJ/kg] com vazões mássicas $\dot{m}_s$ [kg/s];

ΣW é a soma das potências;

$\Sigma \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \dot{Q}$ representa a taxa de exergia relacionados a taxas de transferência de calor, cada um sob sua respectiva temperatura de fronteira (T_b), e em referência ao estado de referência ($T_0 = 298\text{ K}$);

$T_0 \dot{S}_g$ representa a taxa de destruição de exergia, proporcionada por irreversibilidades internas no volume de controle, sendo um termo positivo.

Esse balanço expressa que toda exergia fornecida ao sistema (por meio de fluxos materiais, calor ou trabalho) será convertida em saídas úteis ou destruída em decorrência de irreversibilidades internas, sendo essa destruição proporcional à geração de entropia.

A exergia de um corrente material é composta por diferentes parcelas: física, química, cinética e potencial. Dessas, as componentes cinética e potencial são geralmente desprezadas devido à sua baixa magnitude frente às demais. A taxa de exergia física (equação 10) depende de seu estado termodinâmico (entalpia e entropia) e é calculada pelas suas diferenças em relação ao estado de referência:

$$\dot{E}x_{fis} = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (10)$$

Onde:

$\dot{E}x_{fis}$ representa a taxa de exergia física associado a um fluxo material [kW];

A exergia química (equação 11) representa a quantidade máxima de trabalho que pode ser extraída quando a composição da substância é levada ao equilíbrio com o meio ambiente, sendo expressa por:

$$\dot{E}x_{qui} = \dot{m} \left[\frac{1}{MM} \sum x_i ex_{qui,i}^0 + RT_0 \sum x_i \ln(y_i x_i) \right] \quad (11)$$

Onde:

$\dot{E}x_{qui}$ representa a taxa de exergia química associado a um fluxo material [kW];

MM representa a massa molar da mistura [kg/kmol];

x_i representa a fração molar do componente i ;

$ex_{qui,i}^0$ representa a exergia química padrão molar de um componente i [kJ/kmol];

y_i representa o coeficiente de atividade química do componente i em uma mistura real.

A soma das parcelas física e química compõe a exergia total da corrente material (equação 12):

$$\dot{E}x_M = \dot{E}x_{fis} + \dot{E}x_{qui} \quad (12)$$

Onde:

$\dot{E}x_M$ representa a taxa de exergia total associado a um fluxo material [kW];

A determinação dessas grandezas pode ser simplificada por meio de ferramentas computacionais, como simuladores, que fornecem os valores de entalpia, entropia e composição química das correntes envolvidas. Dessa forma, a aplicação da análise exergética possibilita uma quantificação precisa da utilidade energética de cada corrente, especialmente das perdas associadas ao processo, fornecendo uma base sólida para avaliações exergéticas.

3.2 Eficiências Exergéticas

A maneira mais apropriada de realizar uma análise exergética é por meio da determinação da eficiência exergética, seja para um sistema global ou para seus subsistemas internos. Ela permite avaliar o desempenho de sistemas energéticos não apenas as quantidades de energia envolvida, mas também a sua qualidade. Em biorrefinarias, essa análise é relevante, dada a multiplicidade de produtos e a integração entre os subsistemas.

A definição dessa eficiência pode variar conforme o escopo da análise (Tsatsaronis, 1993). Assim, é relevante explicitar a classificação de fluxos de exergia que permeia um sistema, bem como o equacionamento da eficiência exergética. Neste trabalho, foram definidas quatro eficiências exergéticas.

Cada métrica considera diferentes formas saída e diferentes critérios de referência para entrada de exergia. O modelo mais conhecido para cálculo é a eficiência exergética racional (η) dado pela equação 13 abaixo, que relaciona a soma de toda a exergia que sai (Ex_{sai}), útil ou não, com a soma da exergia que entra (Ex_{ent}) no volume de controle analisado:

$$\eta = \frac{\sum Ex_{sai}}{\sum Ex_{ent}} \quad (13)$$

Essa métrica tende a ser útil como estimativa preliminar de desempenho, e considera que a única forma de ineficiência é a destruição de exergia, devido à geração de entropia. No entanto, pode superestimar a eficiência de sistema que apresentam perdas significativas, pois inclui no numerador correntes rejeitadas ou não aproveitadas.

Para uma avaliação mais realista, utiliza-se a eficiência exergética relativa (η') do sistema, expressa pela equação 14 abaixo:

$$\eta' = \frac{\sum Ex_{sai}^{útil}}{\sum Ex_{ent}} \quad (14)$$

Nessa abordagem, após a identificação de todos os fluxos exergéticos de cada subsistema, apenas as saídas consideradas úteis são incluídas no numerador, desconsiderando rejeitos, perdas térmicas ou materiais sem aproveitamento, enquanto o denominador continua o mesmo da equação 13.

A terceira métrica utilizada é a eficiência exergética alternativa (ψ), que relaciona, assim como a η' , a exergia útil gerada que sai do volume de controle analisado com a soma das forças motrizes que impulsionam o sistema. Essas forças motrizes correspondem a fluxos materiais ou energéticos provenientes de outros subsistemas e/ou do ambiente externo e podem incluir energia térmica, vapor, eletricidade, combustíveis ou insumos específicos diretos do processo como por exemplo vinhaça, torta de lignina, bagaço, entre outros. A equação correspondente é dada por:

$$\psi = \frac{\sum Ex_{sai}^{útil}}{\sum Forças Motrizes} \quad (15)$$

Esse indicador é particularmente relevante em processos complexos, nos quais há múltiplas fontes de energia alimentando os subsistemas sejam vindos de outros subsistemas ou da vizinhança. Ele permite avaliar de forma mais direta o aproveitamento da energia fornecida com propósito funcional, sendo sensível a perdas internas (irreversibilidade) quanto a perdas externas (rejeitos ou exergia não aproveitada). A título de exemplificação, a força motriz ao se considerar uma corrente de vapor saturado que permeia um sistema para fornecer calor, e deixa-o no estado de líquido saturado, é a diferença entre a exergia da corrente que entra em relação a que sai. Ou seja, em relação às definições anteriores, não se tem líquido saturado como um produto útil do sistema (útil pois retorna à cogeração), e sim tem-se a variação da exergia física da corrente sendo contabilizada no denominador.

Por fim, foi adotado o índice exergético (I), o qual tem como objetivo quantificar o retorno energético útil em relação ao conjunto das forças motrizes aplicadas. Esse indicador, apesar de manter o valor no denominador, difere de ψ ao considerar, no numerador, os ganhos totais do processo, o que pode incluir não apenas exergia útil, mas também outros produtos que agregam valor energético à operação, calor recuperado, eletricidade gerada e biocombustíveis produzidos.

A fórmula é expressa como:

$$I = \frac{\sum Ganho}{\sum Forças Motrizes} \quad (16)$$

O uso combinado dessas quatro métricas fornece uma visão detalhada e multifacetada do desempenho exergético dos subsistemas da biorrefinaria, permitindo identificar não apenas o aproveitamento energético direto, mas também o impacto relativo de cada insumo sobre o resultado final.

4) CENÁRIOS INVESTIGADOS E METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados dados da simulação obtidos no software Aspen Hysys, conforme apresentado na tese do Departamento de Engenharia Mecânica conduzida em Castiñeiras Filho (2024). A simulação representa uma planta integrada de processamento de cana de açúcar, incluindo seu sistema de cogeração, a etapa de hidrólise enzimática do bagaço, sistemas de digestão anaeróbica e o cultivo de microalgas. O uso do Hysys teve como objetivo reproduzir de forma consistente os balanços materiais e energéticos do processo produtivo, bem como modelar os equilíbrios termoquímicos entre correntes materiais multicomponentes e multifásicas. Isso permitiu a obtenção das propriedades termodinâmicas necessárias à realização de balanços de entropia e avaliar fluxos exergéticos.

A análise foi conduzida com base cinco subsistemas principais: Digestão Anaeróbica, Hidrólise Enzimática, Planta de Microalgas, Planta de Etanol e Sistema de Cogeração. Para cada um deles, foram examinadas todas as correntes de entrada e saída em seus respectivos volumes de controles, com atenção especial aos fluxos materiais e energéticos de cada elemento. Os dados utilizados foram organizados em uma planilha Excel, a partir de tabelas referentes as correntes de massa e de energia. Após a caracterização completa de cada subsistema, aplicou-se as metodologias de análise exergética e os conceitos de eficiência propostos por Lozano e Valero (2011) e Ortiz et al. (2020) foram aplicadas aos subsistemas e à biorefinaria como um todo.

4.1 Fluxograma dos subsistemas analisados

Com o intuito de realizar uma avaliação exergética detalhada dos processos industriais que compõem a biorrefinaria estudada, os fluxos de massa e energia foram sistematizados por meio da divisão da planta em cinco subsistemas principais. Essa segmentação permitiu a aplicação dos balanços de massa, energia e exergia de forma modular, facilitando a identificação dos pontos de maior impacto termodinâmico e energético.

A Figura 6 apresenta uma visão geral simplificada da biorrefinaria, onde estão destacados os principais fluxos interdependentes entre os

subsistemas, além de correntes que entram e saem através do ambiente externo. As setas indicam as trocas de correntes materiais (como vinhaça, bagaço, licor de pentoses, torta de lignina, biogás, entre outros). Essas correntes foram extraídas de um modelo simulado no software Aspen Hysys e organizadas de forma a refletir os volumes de controle adotados para a análise termodinâmica. Para os subsistemas analisados neste trabalho, foram identificadas um total de 171 correntes.

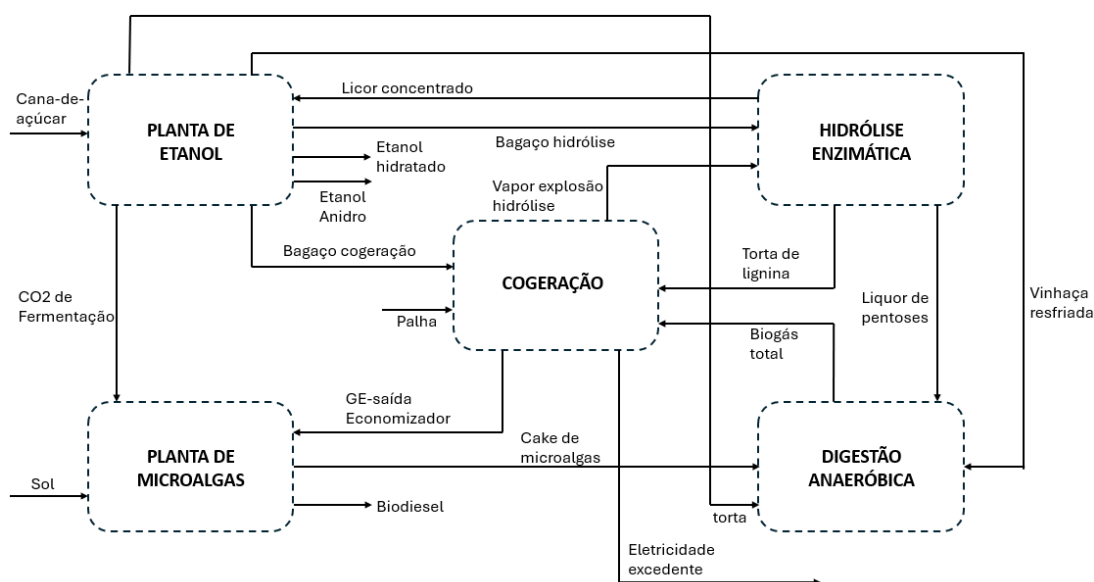


Figura 6 - Diagrama simplificado da biorrefinaria analisada

Essa representação geral permite visualizar de maneira integrada a lógica de funcionamento da biorrefinaria, onde os resíduos de um processo podem atuar como insumos em outro, evidenciando o caráter circular e sinérgico do sistema. Por exemplo, o bagaço oriundo da planta de etanol é direcionado tanto ao sistema de cogeração, onde é utilizado como força motriz para geração de vapor, quanto à unidade de hidrólise, que o utiliza na produção de licor de pentoses. Esse licor, por sua vez, é encaminhado à etapa de digestão anaeróbica, juntamente com outros subprodutos orgânicos, como torta e a vinhaça. Esses resíduos abastecem esse novo subsistema, onde posteriormente será gerado biogás, que contribuirá como suprimento energético da planta.

Com base nessa estrutura interligada e visando a realização da análise exérgica, cada subsistema da biorrefinaria foi tratado

individualmente como um volume de controle. Essa abordagem permitiu identificar, quantificar e qualificar os fluxos de exergia que atravessam seus limites, possibilitando uma avaliação detalhada do desempenho termodinâmico de cada unidade. Nos capítulos seguintes, são apresentadas as especificidades de cada subsistema, incluindo seus fluxogramas, correntes envolvidas e os principais resultados da análise.

A Figura 7 apresenta a legenda adotada de maneira uniforme de todos os fluxogramas correspondentes aos cinco subsistemas que compõem a biorrefinaria. Essa padronização possibilita a representação clara e precisa das correntes que entram e saem dos volumes de controle, proporcionando maior consistência na interpretação dos diagramas. Dessa forma, a legenda constitui um elemento fundamental para a compreensão integrada dos processos envolvidos na análise exergética.



Figura 7– Legenda padronizada das correntes nos fluxogramas dos subsistemas da biorrefinaria

4.1.1 Digestão Anaeróbica

A Figura 8 apresenta o diagrama esquemático adotado para o subsistema da Digestão Anaeróbica, no qual estão representadas as correntes de entrada e saída com setas numeradas, coloridas de acordo com a função que desempenham no processo.

A elaboração desse fluxograma permitiu organizar e rastrear os fluxos simulados, fornecendo a base necessária para os balanços de massa e cálculos exergeticos.



Figura 8 - Diagrama das correntes de entrada e saída do subsistema de Digestão Anaeróbica

Na Tabela 1, cada corrente é descrita correspondente às setas numeradas, conforme extraídas do Aspen Hysys.

Tabela 1 - Correntes correspondentes ao subsistema de Digestão Anaeróbica

Fluxo	Corrente
1	Torta filtro
2	H2O diluição torta filtro biodigestor
3	W-131 (Potência Elétrica)
4	Q-117 (Reação Exotérmica)
5	Digestato de torta filtro
6	Licor de Pentoses
7	Q-118 (Reação Exotérmica)
8	W-132 (Potência Elétrica)
9	Digestato de Pentoses
10	Vinhaça Resfriada
11	Q-115 (Reação Exotérmica)
12	Digestato de Vinhaça
13	H2O diluição Cake microalgas biodigestor
14	Q-121 (Reação Exotérmica)
15	Cake de Microalga
16	W-134 (Potência Elétrica)
17	W-133 (Potência Elétrica)
18	Digestato de Cake microalgas
19	Vazamento biogás
21	W-138 (Potência Elétrica)
22	Biogás total +

Importa destacar que a única corrente material que sai do subsistema de digestão anaeróbica como ganho é a corrente de biogás total (22), a qual será utilizada como força motriz na etapa de cogeração. Com base nessas informações, foram calculadas as exergias das correntes e aplicados os quatro indicadores definidos na Seção 4.2:

- Eficiência exergética racional (η):

$$\eta = \frac{Ex_4 + Ex_5 + Ex_7 + Ex_9 + Ex_{11} + Ex_{12} + Ex_{14} + Ex_{18} + Ex_{19} + Ex_{22}}{Ex_1 + Ex_2 + Ex_3 + Ex_6 + Ex_8 + Ex_{10} + Ex_{13} + Ex_{15} + Ex_{16} + Ex_{17} + Ex_{21}}$$

- Eficiência exergética relativa (η'):

$$\eta' = \frac{Ex_{22}}{Ex_1 + Ex_2 + Ex_3 + Ex_6 + Ex_8 + Ex_{10} + Ex_{13} + Ex_{15} + Ex_{16} + Ex_{17} + Ex_{21}}$$

- Eficiência exergética alternativa (ψ):

$$\psi = \frac{Ex_{22}}{Ex_1 + Ex_3 + Ex_6 + Ex_8 + Ex_{10} + Ex_{15} + Ex_{16} + Ex_{17} + Ex_{21}}$$

- Índice exergético (I):

$$I = \frac{Ex_{22} - (Ex_2 + Ex_{13})}{Ex_1 + Ex_3 + Ex_6 + Ex_8 + Ex_{10} + Ex_{15} + Ex_{16} + Ex_{17} + Ex_{21}}$$

4.1.2 Hidrólise Enzimática

O fluxograma do subsistema da hidrólise enzimática está representado na Figura 9, com as correntes numeradas e ressaltadas conforme de acordo com suas funções específicas no processo. Esse tipo de representação gráfica foi adotado para facilitar a visualização das fronteiras do sistema e para apoiar a análise quantitativa dos fluxos materiais e energéticos.

A identificação das correntes serviu de base para os balanços de massa e energia, fundamentais na determinação das eficiências exergéticas.

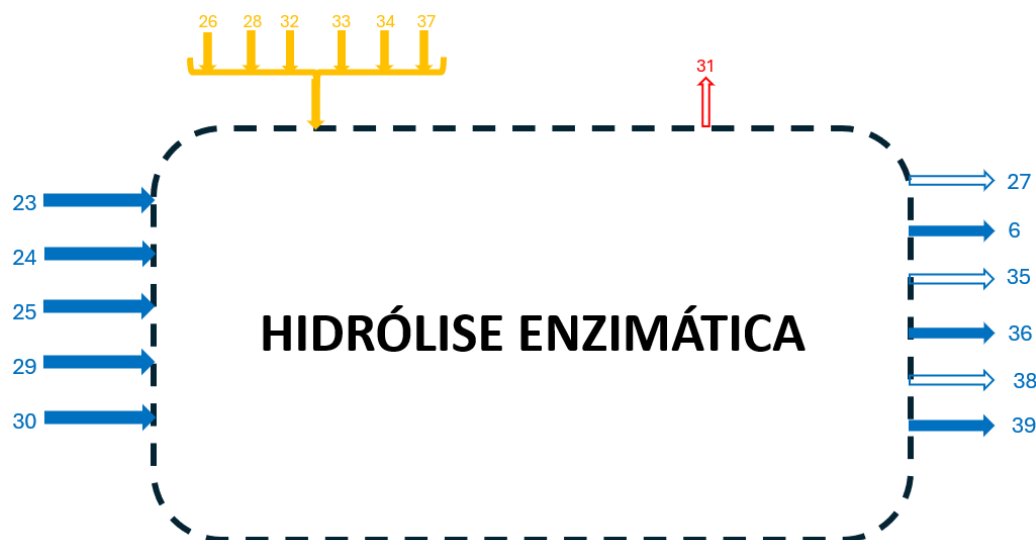


Figura 9 - Diagrama das correntes de entrada e saída do subsistema de Hidrólise Enzimática

A Tabela 2 detalha cada uma dessas correntes:

Tabela 2 - Correntes correspondentes ao subsistema de Hidrólise Enzimática

Fluxo	Corrente
23	Vapor Explosão Hidrólise
24	H2SO4 Pré-tratamento
25	Bagaço Hidrólise
26	W-114 (Potência Elétrica)
27	Vapor Pré-tratamento
6	Licor de Pentoses
28	W-097 (Potência Elétrica)
29	Água lavagem do Pré-tratado
30	Água Ajuste Concentração Sólidos
31	Q-120 (Reação Exotérmica)
32	W-096 (Potência Elétrica)
33	W-095 (Potência Elétrica)
34	W-121 (Potência Elétrica)
35	Água Retirada da Torta
36	Torta de Lignina Desumidificada
37	W-094 (Potência Elétrica)
38	Água Retirada do Licor
39	Licor Concentrado

Com base nessa fundamentação, foram calculados os valores de exergia física e química, possibilitando o fechamento do balanço exergético e a aplicação dos indicadores propostos na Seção 4.2:

- Eficiência exergética racional (η):

$$\eta = \frac{Ex_6 + Ex_{27} + Ex_{31} + Ex_{35} + Ex_{36} + Ex_{38} + Ex_{39}}{Ex_{23} + Ex_{24} + Ex_{25} + Ex_{26} + Ex_{28} + Ex_{29} + Ex_{30} + Ex_{32} + Ex_{33} + Ex_{34} + Ex_{37}}$$

- Eficiência exergética relativa (η'):

$$\eta' = \frac{Ex_6 + Ex_{36} + Ex_{39}}{Ex_{23} + Ex_{24} + Ex_{25} + Ex_{26} + Ex_{28} + Ex_{29} + Ex_{30} + Ex_{32} + Ex_{33} + Ex_{34} + Ex_{37}}$$

- Eficiência exergética alternativa (ψ):

$$\psi = \frac{Ex_6 + Ex_{36} + Ex_{39}}{Ex_{23} + Ex_{25} + Ex_{26} + Ex_{28} + Ex_{32} + Ex_{33} + Ex_{34} + Ex_{37}}$$

- Índice exergético (I):

$$I = \frac{(Ex_6 + Ex_{36} + Ex_{39}) - (Ex_{24} + Ex_{29} + Ex_{30})}{Ex_{23} + Ex_{25} + Ex_{26} + Ex_{28} + Ex_{32} + Ex_{33} + Ex_{34} + Ex_{37}}$$

O subsistema de hidrólise enzimática apresenta uma característica distinta em relação aos demais: as quatro eficiências definidas para este subsistema permanecem constantes entre si nos 13 cenários analisados. Isso ocorre porque as alterações entre os cenários não impactam os parâmetros de entrada e saída desse volume de controle.

4.1.3 Planta de Microalgas

Conforme ilustrado na Figura 10, o subsistema da planta de microalgas foi representado por meio de um fluxograma, no qual as correntes de entrada e saída estão numeradas e coloridas segundo sua função no processo.

Esse mapeamento é essencial para a correta definição dos limites do sistema e para a estruturação dos balanços de massa, que serviram de base para o cálculo das eficiências exergéticas.



Figura 10 - Diagrama das correntes de entrada e saída do subsistema de Planta de Microalgas

Nas Tabela 3 e Tabela 4, cada corrente foi identificada para facilitar o entendimento do papel de cada fluxo no contexto da análise.

Tabela 3 - Correntes correspondentes ao subsistema da Planta de Microalgas (Parte 1 de 2)

Fluxo	Corrente
40	CO2 de Fermentação
41	GE-saída Economizador-
42	Perda de CO2
43	W-091 (Potência Elétrica)
44	Q-131 (Reação Exotérmica)
45	Condensado do CO2
46	Ar diluição CO2
47	NH3 Cultivo
48	H2O Cultivo
49	Q-132 (Sol)
50	Exaustão Fotobiorreator
51	W-090 (Potência Elétrica)
52	H2O Floculação
53	W-093 (Potência Elétrica)
54	H2O Centrifuga
55	W-092 (Potência Elétrica)
56	H2O Prensa Mecânica

Tabela 4 - Correntes correspondentes ao subsistema da Planta de Microalgas (Parte 2 de 2)

Fluxo	Corrente
57	H2O Secagem
58	Vapor p/ Secagem Biomassa 85%w
59	Condensado Biomassa 85%w
60	Q-134 (Reação Exotérmica)
61	W-089 (Potência Elétrica)
15	Cake de Microalga
62	W-148 (Potência Elétrica)
63	Hexano Make-Up
64	Exaustão biogás
65	Exaustão biogás após ceder calor na recuperação solvente
66	Q-128 (Reação Exotérmica)
67	Q-137 (Reação Exotérmica)
68	W-151 (Potência Elétrica)
69	Q-138 (Reação Exotérmica)
70	W-088 (Potência Elétrica)
71	MakeUp Metanol
72	Q-144 (Reação Exotérmica)
73	Vapor 40bar condicionado
74	Condensado 40 bar Glicerina
75	Make-Up Água de Lavagem
76	Purga de Água de Lavagem
77	Glicerina Bruta
78	Vapor para Secagem Biodiesel
79	Condensado Secagem Biodiesel
80	Impureza Vapor Biodiesel
81	W-115 (Potência Elétrica)
82	Q-119 (Reação Exotérmica)
83	Biodiesel final 2
84	Q-139 (Reação Exotérmica)
85	Vapor para Destilação H2O-MeOH
86	Condensado Destilação H2O-MeOH
87	Q-142 (Reação Exotérmica)
88	Q-146 (Reação Exotérmica)

No subsistema da planta de microalgas, é importante destacar que todos os fluxos de calor que entram no sistema estão pareados com fluxos de calor que saem, de modo que os deltas térmicos desses pares atuam como força motriz dentro do volume de controle.

Utilizando os dados provenientes da simulação, foram calculadas as exergias física e química das correntes, realizados os fechamentos dos balanços e aplicados os indicadores especificados na Seção 4.2:

- Eficiência exergética racional (η):

$$\eta = \frac{Ex_{42} + Ex_{44} + Ex_{45} + Ex_{50} + Ex_{52} + Ex_{54} + Ex_{56} + Ex_{57} + Ex_{59} + Ex_{60} + Ex_{65} + Ex_{66} + Ex_{67} + Ex_{69} + Ex_{72} + Ex_{74} + Ex_{15} + Ex_{76} + Ex_{77} + Ex_{79} + Ex_{80} + Ex_{82} + Ex_{83} + Ex_{84} + Ex_{86} + Ex_{87} + Ex_{88}}{Ex_{40} + Ex_{41} + Ex_{43} + Ex_{46} + Ex_{47} + Ex_{48} + Ex_{49} + Ex_{51} + Ex_{53} + Ex_{55} + Ex_{58} + Ex_{61} + Ex_{62} + Ex_{63} + Ex_{64} + Ex_{68} + Ex_{70} + Ex_{71} + Ex_{73} + Ex_{75} + Ex_{78} + Ex_{81} + Ex_{85}}$$

- Eficiência exergética relativa (η'):

$$\eta' = \frac{Ex_{52} + Ex_{54} + Ex_{56} + Ex_{57} + Ex_{59} + Ex_{65} + Ex_{69} + Ex_{74} + Ex_{15} + Ex_{77} + Ex_{79} + Ex_{83} + Ex_{86}}{Ex_{40} + Ex_{41} + Ex_{43} + Ex_{46} + Ex_{47} + Ex_{48} + Ex_{49} + Ex_{51} + Ex_{53} + Ex_{55} + Ex_{58} + Ex_{61} + Ex_{62} + Ex_{63} + Ex_{64} + Ex_{68} + Ex_{70} + Ex_{71} + Ex_{73} + Ex_{75} + Ex_{78} + Ex_{81} + Ex_{85}}$$

- Eficiência exergética alternativa (ψ):

$$\psi = \frac{Ex_{52} + Ex_{54} + Ex_{56} + Ex_{57} + Ex_{69} + Ex_{15} + Ex_{77} + Ex_{83}}{Ex_{40} + Ex_{41} + Ex_{43} + Ex_{46} + Ex_{47} + Ex_{48} + Ex_{49} + Ex_{51} + Ex_{53} + Ex_{55} + (Ex_{58} - Ex_{59}) + Ex_{61} + Ex_{62} + Ex_{63} + (Ex_{64} - Ex_{65}) + Ex_{68} + Ex_{70} + Ex_{71} + (Ex_{73} - Ex_{74}) + Ex_{75} + (Ex_{78} - Ex_{79}) + Ex_{81} + (Ex_{85} - Ex_{86})}$$

- Índice exergético (I):

$$I = \frac{Ex_{52} + Ex_{54} + Ex_{56} + Ex_{57} + Ex_{15} + Ex_{77} + Ex_{83}}{Ex_{40} + Ex_{41} + Ex_{43} + Ex_{46} + Ex_{47} + Ex_{48} + Ex_{49} + Ex_{51} + Ex_{53} + Ex_{55} + (Ex_{58} - Ex_{59}) + Ex_{61} + Ex_{62} + Ex_{63} + (Ex_{64} - Ex_{65}) + Ex_{68} + Ex_{70} + Ex_{71} + (Ex_{73} - Ex_{74}) + Ex_{75} + (Ex_{78} - Ex_{79}) + Ex_{81} + (Ex_{85} - Ex_{86})}$$

4.1.4 Planta de Etanol

A Figura 11 mostra o fluxograma do subsistema da planta de etanol, no qual as correntes de entrada e saída foram numeradas e destacadas de acordo com sua função no processo. Esse esquema facilita a visualização do volume de controle e a compreensão das principais interações do subsistema. A identificação precisa das correntes foi fundamental para os balanços de massa e, em seguida, para os cálculos de eficiência exergética.

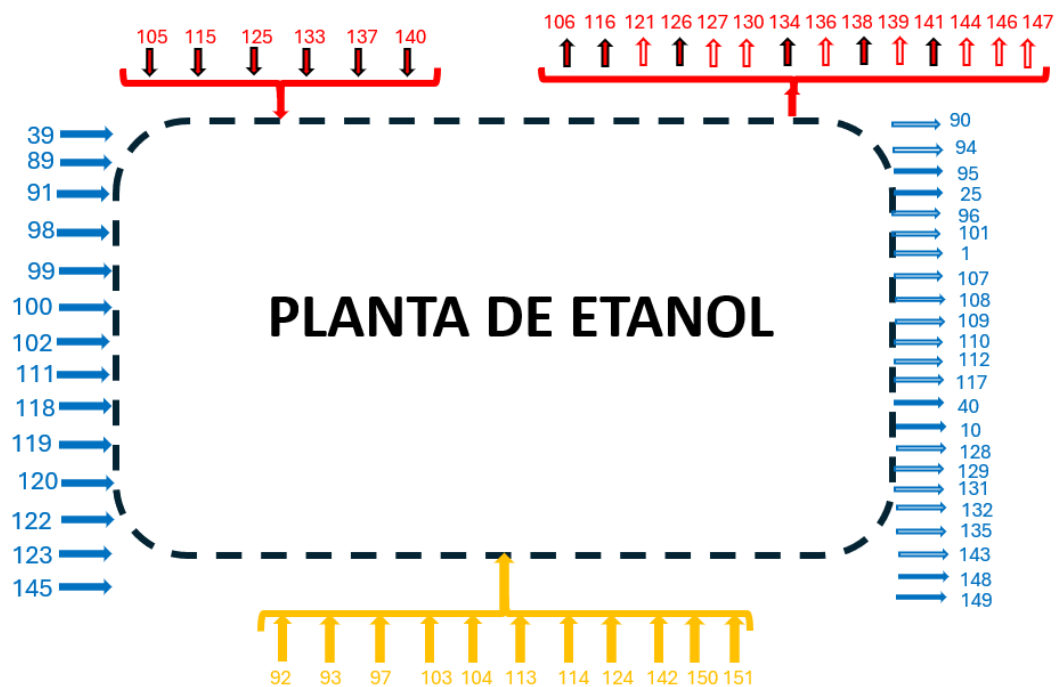


Figura 11 - Diagrama das correntes de entrada e saída do subsistema de Planta de Etanol

Tabela 5 e Tabela 6 apresentam a descrição de cada corrente numerada na Figura 11:

Tabela 5 - Correntes correspondentes ao subsistema da Planta de Etanol
(Parte 1 de 2)

Fluxo	Corrente
89	Cana-de-Açúcar
90	Terra
91	Água de Embebição
92	W-099 (Acionamento direto)
93	W-100 (Potência Elétrica)
94	CV1-CD
95	Bagaço Cogeração
25	Bagaço Hidrólise
96	Perda Desaerador
97	W-101 (Potência Elétrica)
98	H2O-polimeros
99	Ca(OH) ₂ solucao
39	Licor Concentrado
100	Água CB1
101	CD B1
102	Água lavagem torta
1	Torta
103	W-102 (Potência Elétrica)
104	W-103 (Potência Elétrica)
105	Vapor para Concentração Caldo
106	Condensado Concentração Caldo
107	CV1-2_CD
108	CV2_CD
109	CV3_CD
110	CV4_CD
111	Água CB2
112	CD B2
113	W-104 (Potência Elétrica)
114	W-105 (Potência Elétrica)
115	Vapor para Esterilização
116	Condensado Esterilização
117	Purga de Fermento
118	NH ₃ Fermentação
119	Água diluição
120	Ácido
121	Q-103 (Reação Exotérmica)
122	H ₂ O Absorção
40	CO ₂ de Fermentação
123	Água de Lavagem
124	W-106 (Potência Elétrica)
125	Vapor para Destilação A
126	Condensado Destilação A
10	Vinhaça Resfriada

Tabela 6 - Correntes correspondentes ao subsistema da Planta de Etanol
(Parte 2 de 2)

Fluxo	Corrente
127	Q-106 (Reação Exotérmica)
128	Gases D
129	Álcool 2a
130	Q-108 (Reação Exotérmica)
131	Óleo Fusel - 26
132	Óleo Fusel - 4
133	Vapor para Destilação B-B1
134	Condensado Destilação B-B1
135	Flegmassa
136	Q-109 (Reação Exotérmica)
137	Vapor para Extração
138	Condensado Extração
139	Q-110 (Reação Exotérmica)
140	Vapor para Recuperação
141	Condensado Recuperação
142	W-107 (Potência Elétrica)
143	Água Desidratação-2
144	Q-103-2 (Reação Exotérmica)
145	Make-up MEG
146	Q-127 (Reação Exotérmica)
147	Q-124 (Reação Exotérmica)
148	Etanol Hidratado Final
149	Etanol Anidro Final
150	W-110-2 (Potência Elétrica)
151	W-098 (Consumo geral de energia elétrica)

Para este subsistema, é importante destacar a quantidade de fluxo material que sai como irreversibilidade. As poucas correntes que saem como ganho são utilizadas como força motriz em outros subsistemas (bagaço, vinhaça, torta filtro) ou são descarregadas como etanol hidratado ou anidro. Além disso, assim como no subsistema da planta de microalgas, os fluxos de calor que entram no volume de controle formam pares com fluxos de calor que saem, de modo que os “deltas térmicos” desses pares atuam como força motriz sobre o sistema.

Com as informações dos fluxos de entrada e saída do subsistema completas, foram elaborados os balanços de exergia. Para cada corrente, foi calculada a exergia total, dividida entre suas componentes física e química, com base nos dados obtidos da simulação. O somatório dessas

parcelas permitiu determinar a exergia total que entra e sai do sistema, e com isso aplicar os quatro indicadores de eficiência descritos na Seção 4.2:

- Eficiência exergética racional (η):

$$\eta = \frac{Ex_{90} + Ex_{94} + Ex_{95} + Ex_{25} + Ex_{96} + Ex_{101} + Ex_1 + Ex_{106} + Ex_{107} + Ex_{108} + Ex_{109} + Ex_{110} + Ex_{112} + Ex_{116} + Ex_{117} + Ex_{40} + Ex_{10} + Ex_{121} + Ex_{126} + Ex_{127} + Ex_{128} + Ex_{129} + Ex_{130} + Ex_{131} + Ex_{132} + Ex_{134} + Ex_{135} + Ex_{136} + Ex_{138} + Ex_{139} + Ex_{141} + Ex_{143} + Ex_{144} + Ex_{146} + Ex_{147} + Ex_{148} + Ex_{149}}{Ex_{39} + Ex_{89} + Ex_{91} + Ex_{92} + Ex_{93} + Ex_{97} + Ex_{98} + Ex_{99} + Ex_{100} + Ex_{102} + Ex_{103} + Ex_{104} + Ex_{105} + Ex_{111} + Ex_{113} + Ex_{114} + Ex_{115} + Ex_{118} + Ex_{119} + Ex_{120} + Ex_{122} + Ex_{123} + Ex_{124} + Ex_{125} + Ex_{133} + Ex_{137} + Ex_{140} + Ex_{142} + Ex_{145} + Ex_{150} + Ex_{151}}$$

- Eficiência exergética relativa (η'):

$$\eta' = \frac{Ex_{95} + Ex_{25} + Ex_{106} + Ex_{116} + Ex_{40} + Ex_{10} + Ex_{126} + Ex_{134} + Ex_{138} + Ex_{141} + Ex_{148} + Ex_{149}}{Ex_{39} + Ex_{89} + Ex_{91} + Ex_{92} + Ex_{93} + Ex_{97} + Ex_{98} + Ex_{99} + Ex_{100} + Ex_{102} + Ex_{103} + Ex_{104} + Ex_{105} + Ex_{111} + Ex_{113} + Ex_{114} + Ex_{115} + Ex_{118} + Ex_{119} + Ex_{120} + Ex_{122} + Ex_{123} + Ex_{124} + Ex_{125} + Ex_{133} + Ex_{137} + Ex_{140} + Ex_{142} + Ex_{145} + Ex_{150} + Ex_{151}}$$

- Eficiência exergética alternativa (ψ):

$$\psi = \frac{Ex_{95} + Ex_{25} + Ex_{40} + Ex_{10} + Ex_{148} + Ex_{149}}{Ex_{89} + Ex_{92} + Ex_{93} + Ex_{97} + Ex_{39} + Ex_{103} + Ex_{104} + (Ex_{105} - Ex_{106}) + Ex_{113} + Ex_{114} + Ex_{118} + (Ex_{115} - Ex_{116}) + Ex_{124} + (Ex_{125} - Ex_{126}) + (Ex_{133} - Ex_{134}) + (Ex_{137} - Ex_{138}) + (Ex_{140} - Ex_{141}) + Ex_{142} + Ex_{145} + Ex_{150} + Ex_{151}}$$

- Índice exergético (I):

$$I = \frac{Ex_{95} + Ex_{25} + Ex_{40} + Ex_{10} + Ex_{148} + Ex_{149} - (Ex_{91} + Ex_{98} + Ex_{99} + Ex_{100} + Ex_{102} + Ex_{111} + Ex_{119} + Ex_{120} + Ex_{122} + Ex_{123})}{Ex_{89} + Ex_{92} + Ex_{93} + Ex_{97} + Ex_{39} + Ex_{103} + Ex_{104} + (Ex_{105} - Ex_{106}) + Ex_{113} + Ex_{114} + Ex_{118} + (Ex_{115} - Ex_{116}) + Ex_{124} + (Ex_{125} - Ex_{126}) + (Ex_{133} - Ex_{134}) + (Ex_{137} - Ex_{138}) + (Ex_{140} - Ex_{141}) + Ex_{142} + Ex_{145} + Ex_{150} + Ex_{151}}$$

4.1.5 Cogeração

Na Figura 12, observa-se o fluxograma do subsistema de cogeração, com as correntes de entrada e saída representadas por setas numeradas e coloridas de acordo com sua natureza funcional.

Essa organização permite identificar claramente os limites operacionais do sistema e compreender o papel de cada corrente no processo. Essas informações foram cruciais para a formulação dos

balanços de massa e para o cálculo subsequente das eficiências exergéticas.

O subsistema de cogeração apresenta uma particularidade que o diferencia dos demais: as correntes de energia elétrica não entram e saem do volume de controle da mesma forma que nos outros subsistemas. Nesse caso, a energia elétrica está contida dentro do próprio sistema de cogeração, e o que efetivamente sai do volume de controle é o saldo líquido entre a geração e o consumo interno.

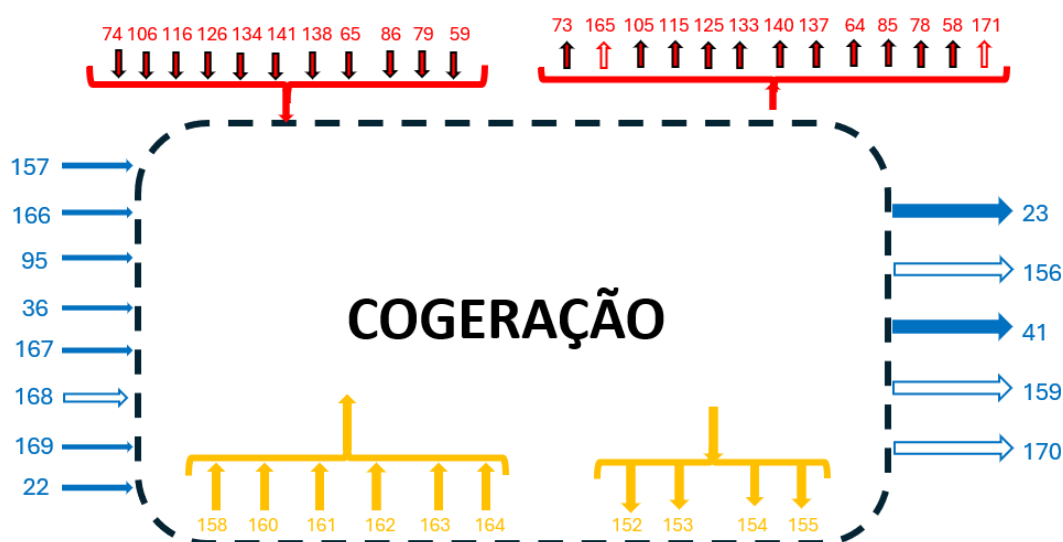


Figura 12 - Diagrama das correntes de entrada e saída do subsistema de Cogeração

As Tabela 7 e Tabela 8 apresentam a legenda correspondente às setas numeradas no fluxograma da Figura 12.

Tabela 7 - Correntes correspondentes ao subsistema de Cogeração
(Parte 1 de 2)

Fluxo	Corrente
152	W-108 (Potência Elétrica)
23	Vapor Explosão Hidrolise
153	W-109 (Potência Elétrica)
154	W-110 (Potência Elétrica)
155	W-111 (Potência Elétrica)
156	Perdas de Vapor
41	GE-saída Economizador-
157	MakeUp Rankine
158	W-136 (Potência Elétrica)

Tabela 8 - Correntes correspondentes ao subsistema de Cogeração
(Parte 2 de 2)

Fluxo	Corrente
159	Vapor Rejeitado
160	W-128 (Potência Elétrica)
161	W-129 (Potência Elétrica)
162	W-130 (Potência Elétrica)
73	Vapor 40bar condicionado
74	Condensado 40 bar Glicerina
163	W-126 (Potência Elétrica)
164	W-147 (Potência Elétrica)
165	Q-116 (Reação Exotérmica)
166	Palha
95	Bagaço Cogeração
36	Torta de Lignina Desumidificada
167	Ar-Combustão frio
168	Cinzas
169	Ar biogás
170	Cinzas biogás
105	Vapor para Conc. Caldo
106	Condensado Conc. Caldo
115	Vapor para Esterilização
116	Condensado Esterilização
125	Vapor para Destilação A
126	Condensado Destilação A
133	Vapor para Destilação B-B1
134	Condensado Destilação B-B1
140	Vapor para Recuperação
141	Condensado Recuperação
137	Vapor para Extração
138	Condensado Extração
64	Exaustão biogás
65	Exaustão biogás após ceder calor na recuperação solvente
85	Vapor p/ Dest. H ₂ O-MeOH
86	Condensado Destilação H ₂ O-MeOH
78	Vapor para Secagem Biodiesel
79	Condensado Secagem Biodiesel
58	Vapor para Secagem Biomassa 85%w
59	Condensado Biomassa 85%w
171	Q-123 (Reação Exotérmica)
22	Biogás total +

Assim como ocorre nos subsistemas das plantas de etanol e microalgas, o subsistema de cogeração também apresenta pares de fluxos de calor que entram e saem do volume de controle. Entretanto,

diferentemente desses subsistemas, os “deltas de calor” no subsistema de cogeração saem do sistema como um ganho.

Com base nisso, calcularam-se as exergias envolvidas, possibilitando o fechamento dos balanços e a aplicação dos indicadores descritos na Seção 4.2:

- Eficiência exergética racional (η):

$$\eta = \frac{Ex_{23} + Ex_{73} + Ex_{156} + Ex_{41} + Ex_{159} + Ex_{165} + Ex_{170} + Ex_{105} + Ex_{115} + Ex_{125} + Ex_{133} + Ex_{140} + Ex_{137} + Ex_{64} + Ex_{85} + Ex_{78} + Ex_{58} + Ex_{171} + (Ex_{152} + Ex_{153} + Ex_{154} + Ex_{155}) - (Ex_{158} + Ex_{160} + Ex_{161} + Ex_{162} + Ex_{163} + Ex_{164})}{Ex_{59} + Ex_{65} + Ex_{74} + Ex_{79} + Ex_{86} + Ex_{106} + Ex_{116} + Ex_{126} + Ex_{134} + Ex_{141} + Ex_{138} + Ex_{157} + Ex_{166} + Ex_{95} + Ex_{36} + Ex_{167} + Ex_{168} + Ex_{169} + Ex_{22}}$$

- Eficiência exergética relativa (η'):

$$\eta' = \frac{Ex_{23} + Ex_{73} + Ex_{41} + Ex_{105} + Ex_{115} + Ex_{125} + Ex_{133} + Ex_{140} + Ex_{137} + Ex_{64} + Ex_{85} + Ex_{78} + Ex_{58} + (Ex_{152} + Ex_{153} + Ex_{154} + Ex_{155}) - (Ex_{158} + Ex_{160} + Ex_{161} + Ex_{162} + Ex_{163} + Ex_{164})}{Ex_{59} + Ex_{65} + Ex_{74} + Ex_{79} + Ex_{86} + Ex_{106} + Ex_{116} + Ex_{126} + Ex_{134} + Ex_{141} + Ex_{138} + Ex_{157} + Ex_{166} + Ex_{95} + Ex_{36} + Ex_{167} + Ex_{168} + Ex_{169} + Ex_{22}}$$

- Eficiência exergética alternativa (ψ):

$$\psi = \frac{Ex_{23} + Ex_{73} + Ex_{41} + Ex_{165} + Ex_{105} + Ex_{115} + Ex_{125} + Ex_{133} + Ex_{140} + Ex_{137} + Ex_{64} + Ex_{85} + Ex_{78} + Ex_{58} + (Ex_{152} + Ex_{153} + Ex_{154} + Ex_{155}) - (Ex_{158} + Ex_{160} + Ex_{161} + Ex_{162} + Ex_{163} + Ex_{164})}{Ex_{157} + Ex_{166} + Ex_{95} + Ex_{36} + Ex_{167} + Ex_{169} + Ex_{22}}$$

- Índice exergético (I):

$$I = \frac{Ex_{23} + Ex_{41} + Ex_{10} + Ex_{148} + Ex_{149} + ((Ex_{152} + Ex_{153} + Ex_{154} + Ex_{155}) - (Ex_{158} + Ex_{160} + Ex_{161} + Ex_{162} + Ex_{163} + Ex_{164})) + (Ex_{105} - Ex_{106}) + (Ex_{115} - Ex_{116}) + (Ex_{125} - Ex_{126}) + (Ex_{133} - Ex_{134}) + (Ex_{140} - Ex_{141}) + (Ex_{137} - Ex_{138}) + (Ex_{64} - Ex_{65}) + (Ex_{85} - Ex_{86}) + (Ex_{78} - Ex_{79}) + (Ex_{58} - Ex_{59})}{Ex_{157} + Ex_{166} + Ex_{95} + Ex_{36} + Ex_{167} + Ex_{169} + Ex_{22}}$$

4.1.6 Sistema Global

O sistema global da biorrefinaria foi analisado a partir da integração dos cinco subsistemas estudados individualmente. A abordagem adotada considerou o conjunto como um sistema interligado, no qual os fluxos de matéria e energia são compartilhados entre as diferentes unidades operacionais.

A Figura 13 apresenta o fluxograma global da biorrefinaria, onde o objetivo é visualizar as correntes que estão vindo do ambiente externo e entrando no volume de controle geral e os fluxos que estão saindo do volume de controle para o ambiente externo.



Figura 13 - Diagrama das correntes de entrada e saída do sistema global

A partir da consolidação dos dados obtidos nas simulações individuais de cada subsistema, foi possível compor um modelo integrado do processo. As exergias física e química das correntes internas e externas ao sistema global foram quantificadas considerando os limites do volume de controle total da biorrefinaria.

Com base nesses balanços, foram calculados os quatro indicadores de desempenho definidos na Seção 3.2, agora aplicados ao sistema como um todo. Essa análise global permite uma avaliação mais realista da eficiência exergética da biorrefinaria, levando em conta as sinergias e interdependências entre os subsistemas. Os resultados obtidos fornecem uma visão abrangente sobre o potencial de aproveitamento energético do processo e servem como base para recomendações de melhorias integradas.

- Eficiência exergética racional (η):

$$\eta = \frac{Ex_{Biodiesel} + Ex_{Etanol\ hidratado} + Ex_{Etanol\ Anidro} + Ex_{Eletricidade\ excedente} + Ex_{saída}^{perdas}}{Ex_{Cana-de-açúcar} + Ex_{Palha} + Ex_{Sol}}$$

- Eficiência exergética relativa (η'):

$$\eta' = \frac{Ex_{Biodiesel} + Ex_{Etanol\ hidratado} + Ex_{Etanol\ Anidro} + Ex_{Eletricidade\ excedente}}{Ex_{Cana-de-açúcar} + Ex_{Palha} + Ex_{Sol}}$$

- Eficiência exergética alternativa (ψ):

$$\psi = \frac{Ex_{Biodiesel} + Ex_{Etanol\ hidratado} + Ex_{Etanol\ Anidro} + Ex_{Eletricidade\ excedente}}{Ex_{Cana-de-açúcar} + Ex_{Palha} + Ex_{Sol}}$$

- Índice exergético (I):

$$I = \frac{Ex_{Biodiesel} + Ex_{Etanol\ hidratado} + Ex_{Etanol\ Anidro} + Ex_{Eletricidade\ excedente}}{Ex_{Cana-de-açúcar} + Ex_{Palha} + Ex_{Sol}}$$

Esses indicadores, assim como os indicadores dos cinco subsistemas apresentados foram aplicados a cada caso simulado (ver Seção 4.2), permitindo comparar o desempenho relativo dos subsistemas sob diferentes condições operacionais e propor recomendações de melhoria tecnológica ou de integração de processos.

4.2 Casos analisados

Com base nas simulações desenvolvidas por Castiñeiras-Filho (2024), este trabalho conduziu uma análise exergética de 13 diferentes casos de operação da biorrefinaria integrada, por meio da aplicação de um planejamento de experimentos do tipo Doehlert. O objetivo foi avaliar o impacto de três variáveis-chave no desempenho global do sistema: (i) a fração de bagaço destinada à hidrólise

enzimática (x_1), (ii) a eficiência de biofixação (x_2) e (iii) o teor de lipídeos da base seca das microalgas (x_3). A organização dos cenários simulados está ilustrada na Figura 14.

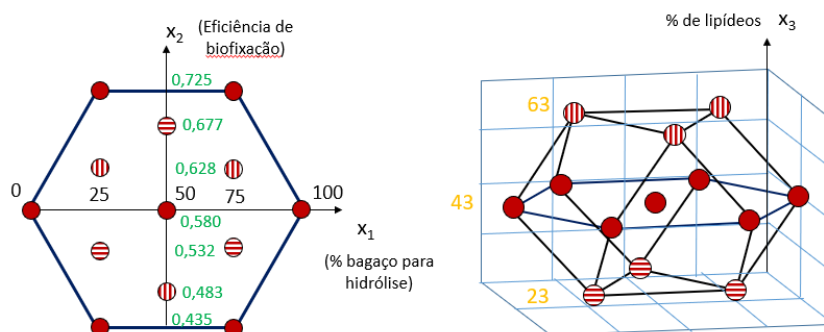


Figura 14 – Simulações realizadas para biorefinaria dentro do planejamento de Doehlert (Castiñeiras-Filho, 2024)

A variável x_1 representa a fração do bagaço destinada à hidrólise enzimática, mantendo-se a abordagem já adotada na análise da biorrefinaria simples, na qual essa variável demonstrou relevância estatística. Foram definidos cinco níveis para x_1 : 0%, 25%, 50%, 75% e 100%.

A variável x_2 refere-se à eficiência em captar CO_2 pelas microalgas, tomando-se como valor de referência o ponto central de 58%. A partir dele, definiram-se sete níveis de planejamento, com variações de $\pm 25\%$, resultando nos seguintes valores para x_2 : 43,5%; 48,3%; 53,2%; 58%; 63,2%; 67,7% e 72,5%.

Por fim, a variável x_3 corresponde ao teor de lipídios nas microalgas, expresso em % m/m. Dado o maior grau de complexidade na representação desse parâmetro no ambiente de simulação, foram definidos três níveis experimentais: 23%, 43% (valor central) e 63% (Castiñeiras-Filho, 2024).

A Tabela 9 apresenta um panorama dos 13 casos analisados, evidenciando a combinação das variáveis experimentais adotadas.

Tabela 9 - Configuração dos 13 casos analisados (elaboração própria baseado em dados de Castiñeiras-Filho, 2024)

Casos	x1	x2	x3
1	50	0,58	43
2	100	0,58	43
3	75	0,725	43
4	25	0,725	43
5	0	0,58	43
6	25	0,435	43
7	75	0,435	43
8	25	0,628	63
9	50	0,483	63
10	75	0,628	63
11	25	0,532	23
12	50	0,677	23
13	75	0,532	23

4.3 Análise estatística descritiva

Com o objetivo de ampliar a compreensão dos resultados obtidos a partir das simulações realizadas, foram aplicadas análises estatísticas sobre os indicadores de desempenho exergético dos cinco subsistemas da biorrefinaria e do sistema global. Essas análises permitiram avaliar a dispersão, a tendência central e confiabilidade dos dados simulados ao longo dos treze cenários estudados.

As métricas estatísticas consideradas foram: valor máximo, valor mínimo, mediana, média aritmética, desvio padrão relativo (DPR) e amplitude relativa. Embora os valores do desvio padrão não tenha sido diretamente apresentados nos resultados, seu cálculo foi necessário como etapa intermediária para a obtenção do DPR. As fórmulas utilizadas para a média, o desvio padrão, o desvio padrão relativo e a amplitude relativa estão representadas pelas equações 17, 18, 19 e 20.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (17)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (18)$$

$$DPR = \frac{s}{\bar{x}} * 100\% \quad (19)$$

$$\left| \frac{x_{m\acute{a}ximo} - x_{m\acute{i}nimo}}{x_{m\acute{e}dia}} \right| * 100\% \quad (20)$$

Além das métricas numéricas, foram elaborados gráficos do tipo boxplot para cada um dos indicadores de desempenho exergético analisados. Esses gráficos permitem uma visualização clara da dispersão dos dados, da mediana e da simetria das distribuições, facilitando a comparação entre os cinco subsistemas e o sistema global ao longo dos treze cenários simulados. Os boxplots também ajudam a identificar valores discrepantes e a avaliar a robustez dos resultados, fornecendo um suporte visual complementar às análises estatísticas descritivas.

5) RESULTADOS

5.1 Análise por Eficiência

Esta seção apresenta os resultados dos quatro indicadores de eficiência considerados no estudo. Foram calculados, ao todo, 260 valores de eficiência referentes aos cinco subsistemas da biorrefinaria, além de 52 eficiências globais, distribuídas ao longo dos treze cenários simulados. Os dados de entrada e saída utilizados nos cálculos foram obtidos a partir das simulações realizadas por Castiñeiras-Filho (2024).

5.1.1 Eficiência Exergética Racional

A Figura 15 apresenta a distribuição da eficiência exergética racional para os cinco subsistemas, ao longo dos 13 casos simulados. O gráfico em formato de boxplot permite visualizar, de forma comparativa, a mediana, os quartis e a dispersão dos dados para cada subsistema.

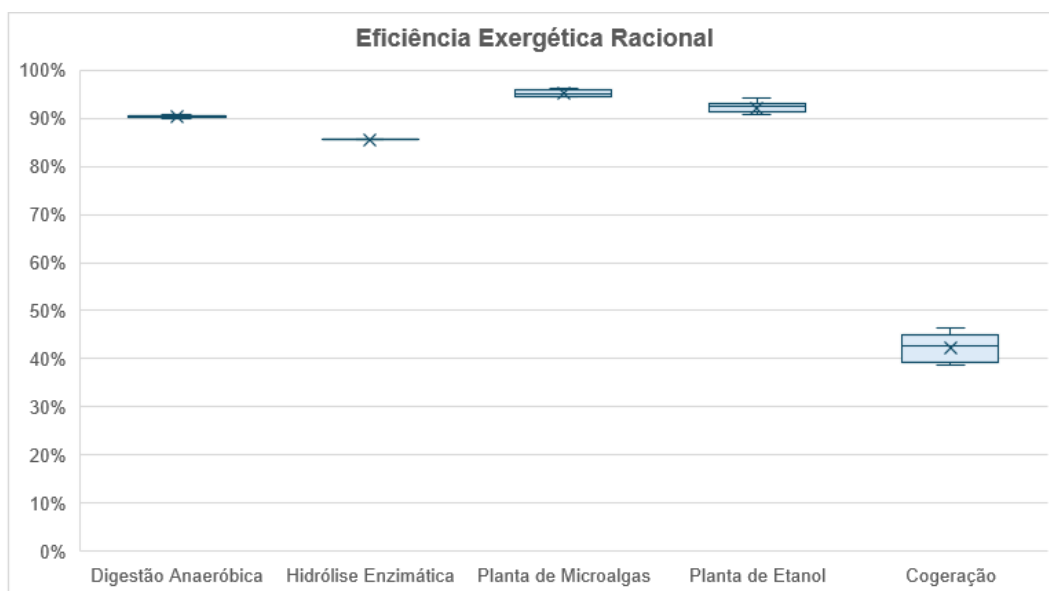


Figura 15 - Eficiência exergética racional dos cinco subsistemas da biorrefinaria de todos os casos analisados

A Tabela 10 e Tabela 11 detalham os principais parâmetros estatísticos de cada subsistema: valor mínimo, máximo, mediano, médio, desvio padrão e amplitude relativa, este último indicando a variação percentual entre o valor máximo e mínimo para cada sistema. Esses

valores complementam a interpretação gráfica, permitindo identificar tendências e variações relevantes.

Tabela 10 - Estatísticas descritivas da eficiência exergética racional dos subsistemas da biorrefinaria

Eficiência Exergética Racional					
Subsistemas	Mínimo	Máximo	Mediana	Média	Amplitude relativa
Digestão Anaeróbica	90,02%	90,66%	90,35%	90,39%	0,71%
Hidrólise Enzimática	85,58%	85,58%	85,58%	85,58%	0,00%
Planta de Microalgas	94,37%	96,30%	95,04%	95,23%	2,03%
Planta de Etanol	90,91%	94,20%	92,39%	92,20%	3,58%
Cogeração	38,64%	46,42%	42,83%	42,33%	18,38%

Tabela 11 - Desvio padrão relativo da eficiência exergética racional nos subsistemas da biorrefinaria

Eficiência Exergética Racional	
Subsistema	Desvio Padrão Relativo
Digestão Anaeróbica	0,22%
Hidrólise Enzimática	0,00%
Planta de Microalgas	0,74%
Planta de Etanol	1,15%
Cogeração	6,42%

A eficiência exergética racional dos subsistemas variou entre 38,64%, registrada no sistema de cogeração (Caso 03), e 96,30%, observada na planta de microalgas (Caso 12). Esta última também apresentou a maior média de eficiência exergética, com 95,23%, evidenciando seu alto desempenho ao longo dos diferentes casos analisados.

De forma geral, os valores de desvio padrão relativo e amplitude relativa para essa eficiência exergética permaneceram abaixo de 5%, indicando uma baixa dispersão dos dados e sugerindo que os subsistemas operam de forma consistente e previsível. A exceção foi o subsistema de cogeração, que apresentou um desvio padrão relativo de 6,42% e uma amplitude relativa de 18,38%, sinalizando uma maior variabilidade no desempenho exergético e sensibilidade às condições operacionais consideradas nos diferentes casos.

Ainda em relação à cogeração, observa-se na Figura 15 que, com exceção desse subsistema, todos os demais apresentaram médias de eficiência exergética superiores a 85%. Destacam-se, além da planta de microalgas, a planta de etanol e o subsistema de digestão anaeróbica, que também mantiveram elevados níveis de desempenho ao longo dos diferentes cenários analisados.

5.1.2 Eficiência Exergética Relativa

A Figura 16 apresenta a distribuição da eficiência exergética relativa para os cinco subsistemas analisados — Planta de Etanol, Cogeração, Hidrólise Enzimática, Digestão Anaeróbica e Cultivo de Microalgas — ao longo dos 13 casos simulados. A utilização dos boxplots facilita a visualização da mediana, amplitude dos quartis e dispersão dos dados em cada sistema.

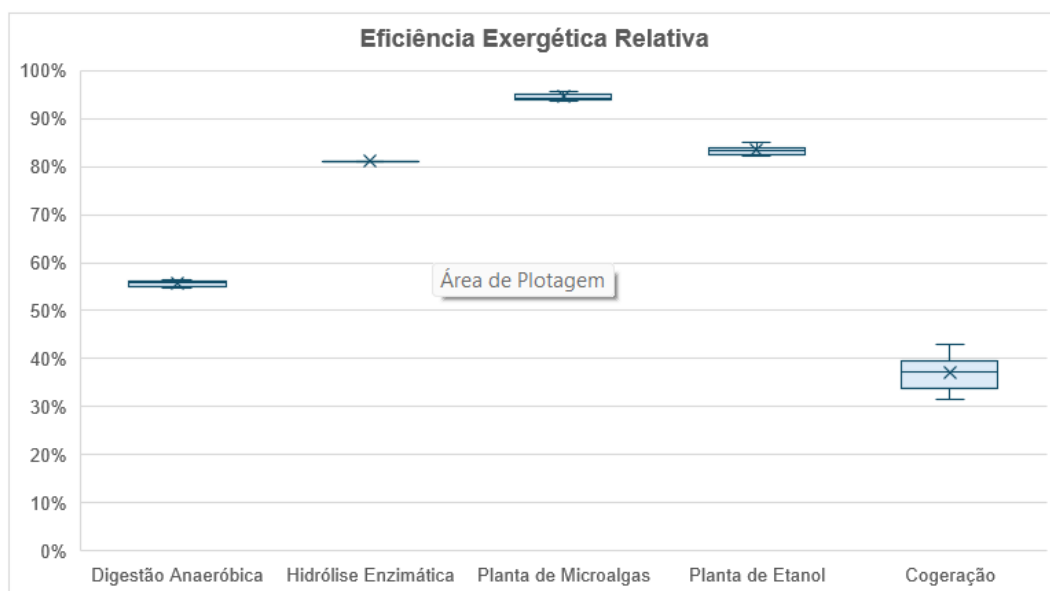


Figura 16 - Eficiência exergética relativa dos cinco subsistemas da biorrefinaria de todos os casos analisados

Já a Tabela 12 e Tabela 13 complementam essa análise visual ao expor estatísticas descritivas como valores mínimo, máximo, mediano, média, desvio padrão e amplitude relativa, possibilitando uma compreensão mais detalhada do comportamento da eficiência exergética em cada subsistema.

Tabela 12 – Estatísticas descritivas da eficiência exergética relativa nos subsistemas da biorrefinaria

Eficiência Exergética relativa					
Subsistemas	Mínimo	Máximo	Mediana	Média	Amplitude relativa
Digestão Anaeróbica	54,74%	56,57%	55,80%	55,70%	3,28%
Hidrólise Enzimática	81,15%	81,15%	81,15%	81,15%	0,00%
Planta de Microalgas	93,64%	95,57%	94,35%	94,52%	2,04%
Planta de Etanol	82,20%	84,99%	83,37%	83,34%	3,36%
Cogeração	31,64%	43,11%	37,31%	36,98%	31,02%

Tabela 13 – Desvio padrão relativo da eficiência exergética relativa dos subsistemas da biorrefinaria

Eficiência Exergética relativa	
Subsistema	Desvio Padrão Relativo
Digestão Anaeróbica	1,10%
Hidrólise Enzimática	0,00%
Planta de Microalgas	0,70%
Planta de Etanol	1,07%
Cogeração	9,24%

Quando consideradas as perdas exergéticas dos processos, a eficiência dos subsistemas segue apresentando uma amplitude significativa, variando de 31,64%, no subsistema de cogeração (Caso 03), até 95,57%, na planta de microalgas (Caso 12). Esta última também obteve a maior média geral, com 94,52%, confirmando sua elevada capacidade de conversão eficiente mesmo sob critérios mais restritivos.

A análise dos indicadores estatísticos mostra que, com exceção da cogeração, todos os subsistemas apresentaram baixa dispersão nos resultados, com valores de desvio padrão relativo e amplitude relativa próximos de zero. Essa baixa variabilidade indica que, de modo geral, os sistemas operaram com consistência nos diferentes cenários simulados.

A cogeração, por outro lado, destacou-se negativamente, com 9,24% de desvio padrão relativo e 31,02% de delta relativo, evidenciando instabilidade no desempenho e maior influência das condições operacionais sobre o resultado.

A principal divergência em relação aos valores apresentados na Seção 6.1.1 ocorreu na eficiência do subsistema de digestão anaeróbica.

Enquanto nessa seção a média da eficiência era de 90,39%, ao ajustar o cálculo para incluir as perdas do processo, essa média caiu para 55,70%. Essa redução expressiva evidencia o impacto significativo das perdas na avaliação exergética do sistema, que no caso da digestão anaeróbia, reside principalmente no rejeito de digestatos.

5.1.3 Eficiência Exergética Alternativa

Na Figura 17, encontram-se os boxplots referentes à eficiência exergética alternativa dos cinco subsistemas ao longo dos 13 casos simulados. Essa representação gráfica destaca as características centrais da distribuição dos dados e revela o grau de variação interna dos sistemas.

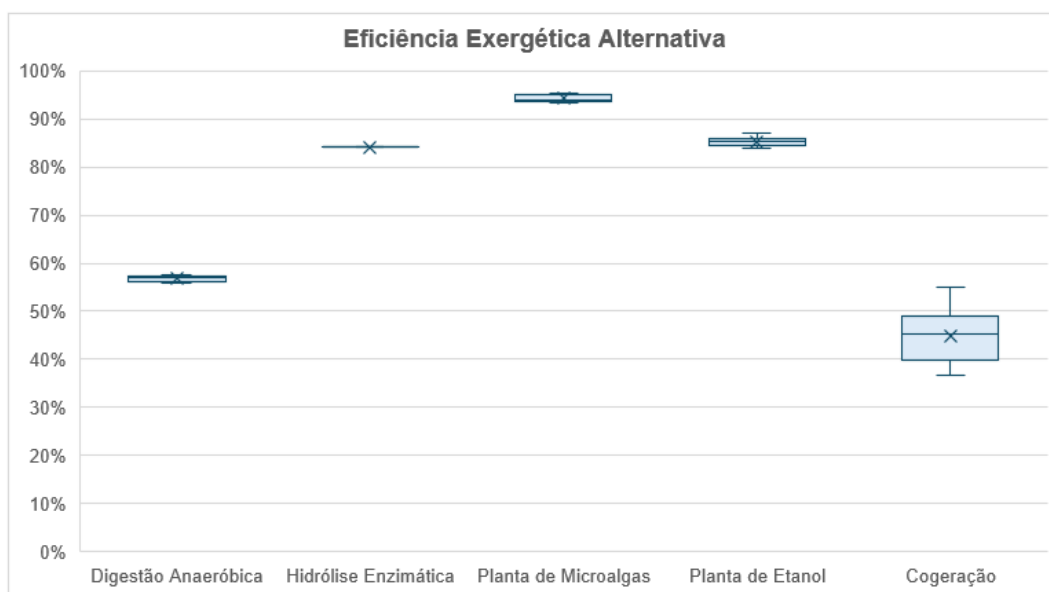


Figura 17 - Eficiência exergética alternativa dos cinco subsistemas da biorrefinaria de todos os casos analisados

A Tabela 14 e Tabela 15 reúnem os principais indicadores estatísticos de cada sistema: valores extremos (mínimo e máximo), média, mediana, desvio padrão relativo e amplitude relativa. Essa análise complementar possibilita uma interpretação mais precisa das tendências e flutuações de desempenho ao longo dos cenários avaliados.

Tabela 14 - Estatísticas descritivas da eficiência exergética alternativa dos subsistemas da biorrefinaria

Eficiência Exergética Alternativa					
Subsistemas	Mínimo	Máximo	Mediana	Média	Amplitude relativa
Digestão Anaeróbica	55,98%	57,67%	57,03%	56,88%	2,98%
Hidrólise Enzimática	84,06%	84,06%	84,06%	84,06%	0,00%
Planta de Microalgas	93,42%	95,24%	94,04%	94,23%	1,93%
Planta de Etanol	83,99%	87,06%	85,32%	85,22%	3,60%
Cogeração	36,83%	55,02%	45,30%	44,91%	40,51%

Tabela 15 - Desvio padrão relativo da eficiência exergética alternativa nos subsistemas da biorrefinaria

Eficiência Exergética Alternativa	
Subsistema	Desvio Padrão Relativo
Digestão Anaeróbica	1,04%
Hidrólise Enzimática	0,00%
Planta de Microalgas	0,71%
Planta de Etanol	1,15%
Cogeração	12,19%

Na avaliação da eficiência exergética alternativa, os valores mantêm a tendência geral observada nas outras abordagens. O maior valor foi de 95,24%, registrado no caso 12 da planta de microalgas, enquanto o menor foi de 36,83%, no caso 03 do subsistema de cogeração. A planta de microalgas também apresentou a maior média de eficiência, com 94,23%.

De forma geral, os subsistemas apresentaram baixa dispersão nos resultados, com valores de desvio padrão relativo e amplitude relativa próximos de zero, indicando estabilidade operacional nas eficiências observadas. A exceção foi novamente o subsistema de cogeração, que exibiu os maiores índices de variabilidade entre todos os indicadores, com desvio padrão relativo de 12,09% e amplitude relativa de 40,51%, evidenciando maior sensibilidade a alterações nas condições operacionais.

Conforme ilustrado na Figura 17 e na Tabela 14, as médias da eficiência exergética alternativa seguem um padrão semelhante ao observado na Seção 6.1.2. No entanto algumas diferenças relevantes devem ser destacadas. A eficiência da planta de microalgas foi a única cujo valor diminuiu, ainda que de forma pouco significativa. Em contrapartida,

os demais subsistemas apresentaram aumento nas eficiências médias, com destaque para o subsistema de cogeração, cuja eficiência passou de 36,98% para 44,91%. Essa variação decorre da substituição do denominador da equação, que passou a considerar valores de força motriz em vez dos fluxos totais de entrada, influenciando diretamente os resultados.

5.1.4 Índice Exergético

Na Figura 18, são mostrados os boxplots do índice exergético nos cinco subsistemas da biorrefinaria para os 13 cenários simulados. Essa visualização gráfica permite comparar a distribuição central e a amplitude dos resultados obtidos para cada sistema.

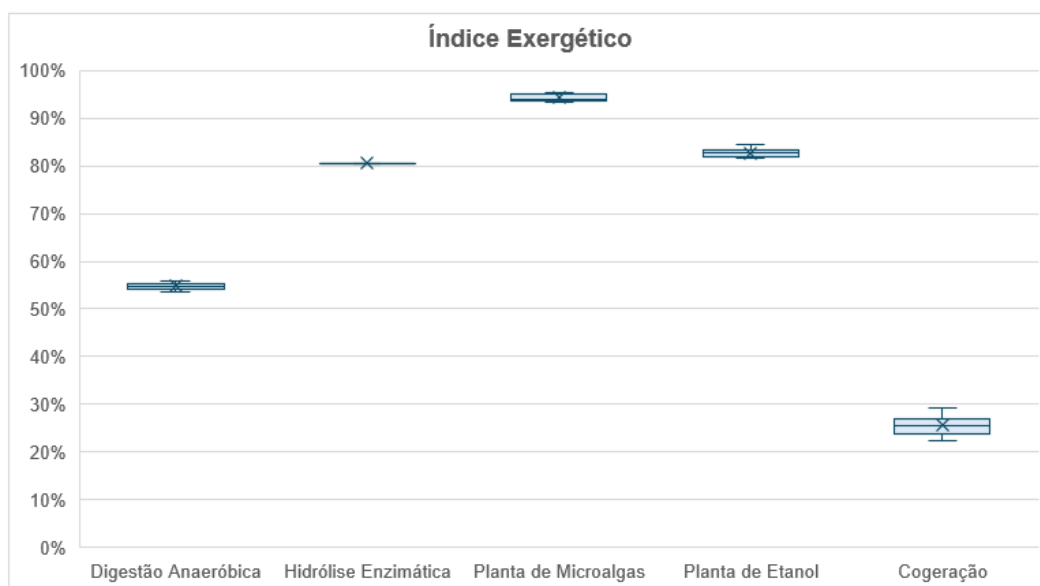


Figura 18 - Índice Exergético dos cinco subsistemas da biorrefinaria de todos os casos analisados

A Tabela 16 e Tabela 17 acompanham essa representação gráfica, fornecendo as estatísticas descritivas de mínimo, máximo, mediana, média, desvio padrão e amplitude relativa, que permitem quantificar a variação e a estabilidade do índice exergético entre os diferentes subsistemas.

Tabela 16 - Estatísticas descritivas do índice exergético dos subsistemas da biorrefinaria

Índice Exergético					
Subsistemas	Mínimo	Máximo	Mediana	Média	Amplitude relativa
Digestão Anaeróbica	53,48%	55,80%	54,82%	54,75%	4,23%
Hidrólise Enzimática	80,48%	80,48%	80,48%	80,48%	0,00%
Planta de Microalgas	93,42%	95,24%	94,04%	94,23%	1,93%
Planta de Etanol	81,57%	84,43%	82,76%	82,73%	3,47%
Cogeração	22,51%	29,16%	25,40%	25,70%	25,88%

Tabela 17 - Desvio padrão relativo do índice exergético nos subsistemas da biorrefinaria

Índice Exergético	
Subsistema	Desvio Padrão Relativo
Digestão Anaeróbica	0,74%
Hidrólise Enzimática	0,00%
Planta de Microalgas	1,48%
Planta de Etanol	1,66%
Cogeração	2,35%

No que diz respeito ao índice exergético, a planta de microalgas se destacou mais uma vez, alcançando não apenas a maior eficiência média entre os subsistemas (94,23%), como também o maior valor pontual (95,24% no caso 12). Enquanto o menor índice segue sendo no subsistema da cogeração, com 22,51% no caso 03, esse sendo o menor entre todos os indicadores.

Um ponto de destaque fica no valor do desvio padrão relativo da cogeração, onde, pela primeira entra vez entre os indicadores analisados, apresentou-se próximo de zero e inferior a 5% como observado nos demais subsistemas. No entanto, a amplitude relativa da cogeração permaneceu elevado, atingindo 25,88%, o que indica uma amplitude alta entre os cenários analisados, mesmo com baixa variabilidade interna.

Por fim, vale ressaltar que o índice exergético foi o indicador que apresentou, de forma geral, as menores médias entre todas as eficiências avaliadas.

5.1.5 Eficiências globais

A Figura 19 reúne os boxplots das quatro eficiências globais avaliadas — eficiência exergética racional, eficiência exergética relativa, eficiência exergética alternativa e índice exergético — para os cinco subsistemas da biorrefinaria (Planta de Etanol, Cogeração, Hidrólise Enzimática, Digestão Anaeróbia e Cultivo de Microalgas) ao longo dos treze casos simulados. Essa apresentação integrada permite comparar visualmente o desempenho e a dispersão das diferentes métricas de eficiência aplicadas a cada sistema.

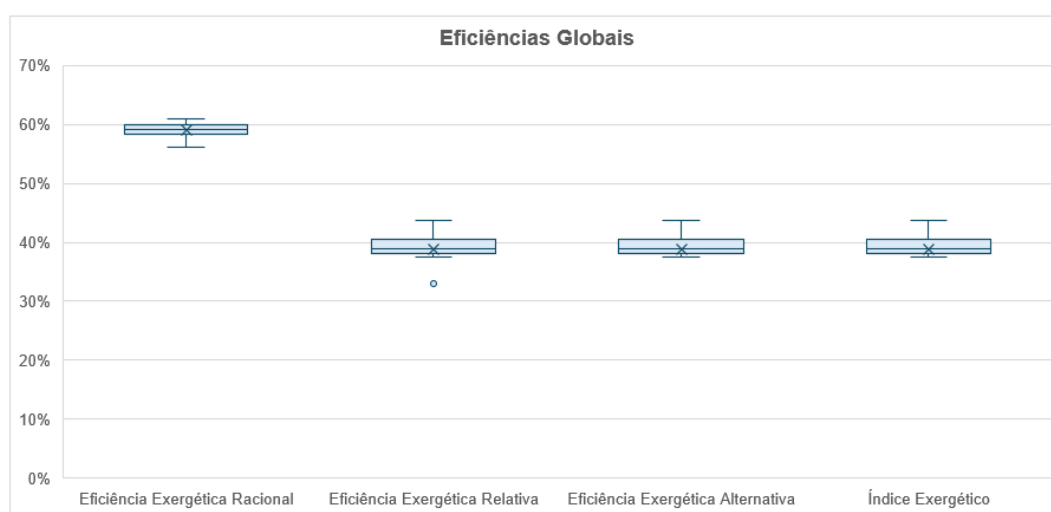


Figura 19 - Eficiências Globais da biorrefinaria

Na Tabela 18, são exibidos os principais indicadores estatísticos para cada eficiência global em cada subsistema, tais como mínimo, máximo, mediana, média, desvio padrão relativo e amplitude relativa. Esses dados complementam a representação visual, oferecendo uma base sólida para compreender as flutuações e a consistência das eficiências globais nos diferentes cenários.

Tabela 18 - Estatísticas descritivas das eficiências globais para cada indicador de eficiência

Eficiências Globais					
Indicador	Mínimo	Máximo	Mediana	Média	Amplitude relativa
Eficiência Exergética Racional	56,19%	60,98%	59,21%	58,98%	8,11%
Eficiência Exergética Relativa	33,02%	43,76%	38,90%	38,82%	27,66%
Eficiência Exergética Alternativa	33,02%	43,76%	38,90%	38,82%	27,66%
Índice Exergético	33,02%	43,76%	38,90%	38,82%	27,66%

As eficiências globais apresentaram variações significativas entre os indicadores analisados. O maior valor registrado foi de 60,98%, referente à eficiência exergética racional no caso 10, que também apresentou a maior média entre os indicadores globais, com 58,98%. Em contraste, o menor valor observado foi de 33,02%, comum às demais três abordagens avaliadas nos casos 12 e 13. Essa coincidência se deve ao fato de que, conforme indicado na seção 4.1.6, as eficiências globais para essas três abordagens são calculadas com base na mesma metodologia, o que resulta em valores idênticos quando os fluxos de exergia são equivalentes entre os cenários.

No que se refere à dispersão dos dados, a eficiência exergética racional novamente se destacou, apresentando a menor amplitude relativa (8,11%), evidenciando maior consistência entre os diferentes casos simulados. As demais abordagens, por outro lado, apresentaram amplitudes relativas mais elevadas, em torno de 27,66%, indicando maior sensibilidade às variações nas condições de operação.

6) CONCLUSÃO

Este trabalho realizou uma avaliação exergética de uma biorrefinaria integrada, composta por cinco subsistemas principais: digestão anaeróbica, hidrólise enzimática, planta de microalgas, planta de etanol e sistema de cogeração. A partir de simulações desenvolvidas no Aspen Hysys por Castiñeiras-Filho (2024) e da caracterização completa das correntes envolvidas, foram aplicados indicadores de desempenho que permitiram comparar o funcionamento isolado e conjunto das unidades.

A análise evidenciou o desempenho consistentemente superior da planta de microalgas, que apresentou os maiores valores médios de eficiência entre todos os indicadores adotados, com destaque para a eficiência exergética de 96,30% no caso 12, considerando o primeiro indicador. Além disso, esse subsistema exibiu baixa variabilidade entre os cenários simulados, com desvio padrão relativo (DPR) variando entre 0,7% e 1,48%, e amplitude relativa entre 1,93% e 2,04%. Esses resultados reforçam sua robustez operacional e sua relevância estratégica em biorrefinarias avançadas. Um dos fatores que contribuem para esse desempenho é o fato de a planta de microalgas gerar exergia química com menor contribuição nas frações consideradas como resíduos.

Por outro lado, o subsistema de cogeração destacou-se negativamente, apresentando os menores índices de eficiência, com 22,51% no caso 03, de acordo com o índice exergético. Também apresentou os maiores níveis de dispersão, com DPR variando entre 2,35% e 12,31%, e amplitude relativa entre 18,38% e 40,51%. Esse desempenho inferior está relacionado, em grande parte, à elevada destruição de exergia química, observada durante o processo, indicando irreversibilidades internas significativas nesse subsistema.

Outro ponto relevante foi a queda expressiva na eficiência da digestão anaeróbica ao se considerarem as perdas de exergia: a eficiência caiu de 90,39% para 55,70% ao se comparar o primeiro indicador com o segundo, evidenciando o impacto das irreversibilidades internas. Isso ressalta a importância de se realizarem avaliações exergéticas detalhadas, a fim de evitar superestimativas do desempenho.

As eficiências globais, por sua vez, apresentaram valores mais modestos em comparação aos subsistemas individuais. A eficiência exergética racional obteve os melhores resultados, com média de 59,98% e amplitude relativa de 8,11%, indicando maior consistência entre os cenários. Já os demais indicadores, apresentaram médias de 38,82% e amplitude relativa de 27,66%, refletindo maior sensibilidade às variações operacionais.

Na comparação entre os diferentes indicadores utilizados, observou-se que a eficiência exergética alternativa e o índice exergético, apesar de apresentarem tendências gerais semelhantes, cada abordagem destacou aspectos distintos do comportamento dos subsistemas — como no caso da cogeração, que apresentou baixa dispersão apenas no índice exergético, embora ainda com alta amplitude de variação. E entre os quatro, a eficiência exergética alternativa (ψ) demonstrou ser a métrica com maior sensibilidade ao comportamento interno dos volumes de controle, pois se baseia diretamente nas forças motrizes reais que alimentam cada subsistema e nas saídas úteis geradas. Essa característica a torna particularmente eficaz para identificar perdas internas e irreversibilidades, permitindo diagnósticos mais precisos e confiáveis em análises de desempenho.

De maneira geral, a aplicação cruzada de diferentes métricas de eficiência permitiu uma caracterização mais completa e precisa dos subsistemas analisados, revelando pontos fortes e oportunidades de melhoria. Como perspectiva futura, destaca-se a importância de incorporar avaliações econômicas e ambientais aos resultados obtidos, inclusive aproveitando a análise exergética, bem como a análise de cenários com maior integração energética e aproveitamento de subprodutos, consolidando a viabilidade técnico-econômica e ambiental da biorrefinaria proposta.

7) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGHBASHLO, M.** et al. Comprehensive exergoeconomic analysis of a municipal solid waste digestion plant equipped with a biogas genset. *Waste Management*, v. 87, p. 485–498, 2019. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.02.029.
- AGUIRRE, A. M.; BASSI, A.; SAXENA, P.** Engineering challenges in biodiesel production from microalgae. *Critical Reviews in Biotechnology*, v. 33, n. 3, p. 293–308, 2013. DOI: 10.3109/07388551.2012.695333.
- ALBARELLI, J. Q.; ENSINAS, A. V.; SILVA, M. A.** A new proposal of cellulosic ethanol to boost sugarcane biorefineries: techno-economic evaluation. *International Journal of Chemical Engineering*, 2014. DOI: 10.1155/2014/537408.
- AL-LWAYZY, S. H.; YUSAF, T.** Diesel engine performance and exhaust gas emissions using Microalgae *Chlorella protothecoides* biodiesel. *Renewable Energy*, v. 101, p. 690–701, 2017. DOI: 10.1016/j.renene.2016.09.035.
- BARROS, R. et al.** Biogas production from microalgal biomass produced in the tertiary treatment of urban wastewater: assessment of season variations. *Energies*, v. 15, p. 5713, 2022. DOI: 10.3390/en15155713.
- BRASIL, B. S. A. F.; SILVA, F. C. P.; SIQUEIRA, F. G.** Microalgae biorefineries: The Brazilian scenario in perspective. *New Biotechnology*, v. 39, p. 90–98, 2017. DOI: 10.1016/j.nbt.2016.04.007.
- BUNGE, F. et al.** Mechanical disruption of *Arthrobacter sp.* DSM 3747 in stirred ball mills for the release of hydantoin-cleaving enzymes. *Chemical Engineering Science*, v. 47, n. 1, 1992. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(92\)80216-Y](https://doi.org/10.1016/0009-2509(92)80216-Y).
- CASTIÑEIRAS FILHO, S. L. P.** Análise 4E de uma biorefinaria produzindo biodiesel de microalgas em sinergia com a indústria sucroalcooleira no Brasil. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.
- CARPIO, L. G. T.; SOUZA, F. S.** Optimal allocation of sugarcane bagasse for producing bioelectricity and second generation ethanol in Brazil: Scenarios of cost reductions. *Renewable Energy*, v. 111, p. 771–780, 2017. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117304007>.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB).** Boletim – Cana-de-açúcar – 4º levantamento – 2023/24. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cana-de-acucar/arquivos-boletins/4o-levantamento-safra-2023-24/boletim-cana-de-acucar-4o-levantamento-2023-24>.
- DIAS, M. O. S. et al.** Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: Integration to conventional bioethanol production process. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 87, n. 9, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2009.06.020>.
- DIAS, M. O. S. et al.** Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil. *Environmental Development*, v. 15, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.03.004>.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE).** Balanço Energético Brasileiro 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados>.

[abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf).

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). BEN Relatório Síntese 2024 – Ano base 2023. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf)

[abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf).

FAOSTAT. Sugar cane production. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat>.

GOV.BR. Ministério da Agricultura e Pecuária. Estatísticas de Comércio Exterior. Disponível em: <https://www.gov.br>.

GOV.BR. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Sobre a RenovaBio. Disponível em: <https://www.gov.br>.

GOV.BR. Ministério de Minas e Energia. Programa Nacional do Alcool completa 49 anos com impactos positivos na economia e no meio ambiente. Disponível em: <https://www.gov.br>.

GOV.BR. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Acordo de Paris. Disponível em: <https://www.gov.br>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). World Energy Outlook 2024. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5e9122fc-9d5b-4f18-8438-dac8b39b702a/WorldEnergyOutlook2024.pdf>.

JANKE, L. et al. Biogas production from sugarcane waste: assessment on kinetic challenges for process designing. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 16, n. 9, p. 20685–20703, 2015. DOI: 10.3390/ijms160920685.

JESWANI, H. K.; CHILVERS, A.; AZAPAGIC, A. Environmental sustainability of biofuels: a review. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 476, n. 2243, 2020. DOI: 10.1098/rspa.2020.0351.

LEE, J. et al. Comparison of several methods for effective lipid extraction from microalgae. *Bioresource Technology*, v. 101, suplemento 1, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.058>.

MATA, T. M.; MARTINS, A. A.; CAETANO, N. S. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, p. 217–232, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>.

NOVACANA. Processo de fabricação do etanol. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/fabricacao>.

NOVACANA. Cogeração: como funciona a produção de energia elétrica numa usina sucroalcooleira. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/cogeracao-como-funciona-producao-energia-eletrica>

ORTIZ, P. A. S.; MARÉCHAL, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, S. Exergy assessment and techno-economic optimization of bioethanol production routes. *Fuel*, v. 279, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118327>.

PALACIOS-BERECHÉ, R. et al. Exergetic analysis of the integrated first- and second-generation ethanol production from sugarcane. *Energy*, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.010>.

PALACIOS-BERECHÉ, R.; ENSINAS, A. V.; MODESTO, M.; NEBRA, S. A. Double-effect distillation and thermal integration applied to the ethanol

production process. *Energy*, v. 82, p. 512–523, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.062>.

RAÍZEN. Biodiesel: Características do Biocombustível. 2023. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/biodiesel>.

RAÍZEN. Cana-de-açúcar: tudo sobre sua importância e versatilidade. 2021. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/cana-de-acucar>.

RAÍZEN. Etanol: o que é e como é usado no Brasil. 2022. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/etanol>.

SLADE, R.; BAUEN, A. Review of the potential of biomass energy in the European Union. *Biomass and Bioenergy*, v. 50, p. 88–95, 2013. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.12.019.

SOUZA, S. P.; GOPAL, A. R.; SEABRA, J. E. A. Life cycle assessment of biofuels from an integrated Brazilian algae-sugarcane biorefinery. *Energy*, v. 81, p. 373–381, 2015. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214014224>.

TERCERO, E. A. R.; DOMENICALI, G.; BERTUCCO, A. Autotrophic production of biodiesel from microalgae: An updated process and economic analysis. *Energy*, v. 76, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.077>.

TSATSARONIS, G. Thermoeconomic analysis and optimization of energy systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 19, n. 3, 1993. DOI: [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(93\)90016-8](https://doi.org/10.1016/0360-1285(93)90016-8).

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). UNICAdata: Observatório da cana e bioenergia. Disponível em: <https://unicadata.com.br/index.php>.

VALERO, A.; LOZANO, M. A.; MUNOZ, M. A. A general theory of exergy saving. I. On the exergetic cost. Zaragoza: Universidad de Zaragoza, [s.d.].

XU, L. et al. Assessment of a dry and a wet route for the production of biofuels from microalgae: Energy balance analysis. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 8, p. 5113–5122, 2011. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852411001386>.

APÊNDICE A – CÁLCULOS DAS EFICIÊNCIAS

Digestão Anaeróbia				
Caso	Eficiência Exergética Racional	Eficiência Exergética Relativa	Eficiência Exergética Alternativa	Índice Exergético
1	90,34%	55,80%	57,03%	54,82%
2	90,34%	55,80%	57,03%	54,82%
3	90,02%	54,76%	56,30%	53,48%
4	90,11%	55,77%	57,26%	54,59%
5	90,35%	56,43%	57,67%	55,48%
6	90,58%	56,57%	57,57%	55,80%
7	90,62%	55,95%	56,90%	55,20%
8	90,33%	54,74%	55,98%	53,72%
9	90,65%	56,09%	56,96%	55,41%
10	90,66%	55,23%	56,09%	54,52%
11	90,36%	54,90%	56,04%	53,97%
12	90,39%	56,21%	57,45%	55,25%
13	90,26%	55,83%	57,20%	54,75%

Hidrólise Enzimática				
Caso	Eficiência Exergética Racional	Eficiência Exergética Relativa	Eficiência Exergética Alternativa	Índice Exergético
1	85,58%	81,15%	84,06%	80,48%
2	85,58%	81,15%	84,06%	80,48%
3	85,58%	81,15%	84,06%	80,48%
4	85,58%	81,15%	84,06%	80,48%
5	85,58%	81,15%	84,06%	80,48%
6	85,58%	81,15%	84,06%	80,48%
7	85,58%	81,15%	84,06%	80,48%
8	85,58%	81,15%	84,06%	80,48%
9	85,58%	81,15%	84,06%	80,48%
10	85,58%	81,15%	84,06%	80,48%
11	85,58%	81,15%	84,06%	80,48%
12	85,58%	81,15%	84,06%	80,48%
13	85,58%	81,15%	84,06%	80,48%

Planta de Microalgas				
Caso	Eficiência Exergética Racional	Eficiência Exergética Relativa	Eficiência Exergética Alternativa	Índice Exergético
1	95,04%	94,35%	94,04%	94,04%
2	95,04%	94,35%	94,04%	94,04%
3	94,86%	94,08%	93,83%	93,83%
4	94,42%	93,76%	93,42%	93,42%
5	94,45%	93,87%	93,47%	93,47%
6	95,24%	94,63%	94,27%	94,27%
7	96,06%	95,31%	95,05%	95,05%
8	95,93%	95,07%	94,87%	94,87%
9	94,61%	93,97%	93,70%	93,70%
10	95,44%	94,68%	94,48%	94,48%
11	94,37%	93,64%	93,43%	93,43%
12	96,30%	95,57%	95,24%	95,24%
13	96,24%	95,46%	95,15%	95,15%

Planta de Etanol				
Caso	Eficiência Exergética Racional	Eficiência Exergética Relativa	Eficiência Exergética Alternativa	Índice Exergético
1	92,39%	83,51%	85,40%	82,91%
2	92,39%	83,51%	85,40%	82,91%
3	94,20%	84,99%	87,06%	84,43%
4	92,39%	83,37%	85,32%	82,76%
5	91,06%	82,36%	84,16%	81,73%
6	91,15%	82,58%	84,33%	81,97%
7	91,42%	82,70%	84,51%	82,09%
8	93,63%	84,58%	86,58%	84,01%
9	91,28%	82,56%	84,37%	81,94%
10	91,94%	83,07%	84,95%	82,46%
11	93,47%	84,42%	86,41%	83,85%
12	90,91%	82,20%	83,99%	81,57%
13	92,39%	83,51%	85,40%	82,91%

Cogeração				
Caso	Eficiência Exergética Racional	Eficiência Exergética Relativa	Eficiência Exergética Alternativa	Índice Exergético
1	45,38%	37,61%	45,30%	26,77%
2	42,15%	36,80%	44,59%	25,34%
3	38,64%	31,64%	36,83%	22,51%
4	41,68%	35,17%	42,39%	23,73%
5	45,36%	40,57%	51,08%	26,91%
6	46,42%	43,11%	55,02%	29,16%
7	42,93%	38,95%	47,67%	27,25%
8	38,74%	32,79%	38,22%	23,77%
9	42,92%	38,93%	47,62%	27,26%
10	39,76%	34,95%	41,22%	25,40%
11	38,70%	32,75%	38,15%	23,77%
12	44,71%	40,12%	50,17%	26,94%
13	42,83%	37,31%	45,57%	25,32%

Global				
Caso	Eficiência Exergética Racional	Eficiência Exergética Relativa	Eficiência Exergética Alternativa	Índice Exergético
1	60,30%	38,90%	38,90%	38,90%
2	58,92%	38,90%	38,90%	38,90%
3	58,63%	39,54%	39,54%	39,54%
4	59,21%	39,68%	39,68%	39,68%
5	59,55%	39,19%	39,19%	39,19%
6	59,54%	38,52%	38,52%	38,52%
7	58,34%	37,57%	37,57%	37,57%
8	58,27%	38,58%	38,58%	38,58%
9	60,94%	42,65%	42,65%	42,65%
10	59,68%	41,33%	41,33%	41,33%
11	60,98%	43,76%	43,76%	43,76%
12	56,19%	33,02%	33,02%	33,02%
13	56,19%	33,02%	33,02%	33,02%

APÊNDICE B – GRÁFICOS BOXPLOTS POR SUBSISTEMA

