

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Beatriz dos Santos Matias



ANÁLISE DE CICLO DE VIDA APLICADO AO PROJETO DE
UMA PLANTA DE DESIDRATAÇÃO DE ETANOL

RIO DE JANEIRO

2023

Beatriz dos Santos Matias

ANÁLISE DE CICLO DE VIDA APLICADO AO PROJETO DE UMA
PLANTA DE DESIDRATAÇÃO DE ETANOL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientador(es): Prof. Argimiro Resende Secchi, D.Sc.
Simone de Carvalho Miyoshi, D.Sc.

Rio de Janeiro

2023

CIP - Catalogação na Publicação

d433a dos Santos Matias, Beatriz
ANÁLISE DE CICLO DE VIDA APLICADO AO PROJETO DE
UMA PLANTA DE DESIDRATAÇÃO DE ETANOL / Beatriz dos
Santos Matias. -- Rio de Janeiro, 2023.
62 f.

Orientador: Argimiro Resende Secchi.
Coorientadora: Simone Carvalho Miyoshi.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
Química, Bacharel em Engenharia Química, 2023.

1. Análise de Ciclo de Vida. 2. BMSO. 3.
Biorrefinaria. I. Resende Secchi, Argimiro, orient.
II. Carvalho Miyoshi, Simone, coorient. III. Título.

Beatriz dos Santos Matias

ANÁLISE DE CICLO DE VIDA APLICADO AO PROJETO DE UMA
PLANTA DE DESIDRATAÇÃO DE ETANOL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Química da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de Engenheiro
Químico.

Aprovado em: 09 de janeiro de 2023.

Argimiro Resende Secchi, D.Sc. PEQ/COPPE/UFRJ

Simone de Carvalho Miyoshi, D.Sc COPPE/UFRJ

Heloísa Lajas Sanches Fernandes, D.Sc, UFRJ

Felipe Fernando Furlan, D.Sc, UFSCAR

Rio de Janeiro
2023

Dedico este trabalho à minha mãe e minha avó.

AGRADECIMENTOS

Foram longos 6 anos de dedicação à faculdade e em meio a tantas turbulências só foi possível chegar até aqui graças às pessoas que me ajudaram nesse caminho.

Primeiramente, quero agradecer à minha família por ter sempre acreditado em mim e ter me dado suporte, principalmente minha tia Katia por ter me acolhido quando eu mais precisei. Mas, em especial minha mãe que me apoiou, me ajudou e sempre esteve ao meu lado. Se hoje estou conquistando isso tudo é graças à ela.

Agradecer também as pessoas que não estão mais presentes na minha vida, ressaltando minha vó Cy e meu vô Zé.

Aos meus amigos da faculdade, porque sem eles teria sido muito mais difícil, ao: Isaque, Allana, Giovana e Daniel, minha muito obrigada.

À minha amiga Alyce, que esteve comigo em todos os momentos e sempre acreditou em mim, celebrou todas as minhas conquistas e acolheu todas as minhas angústias.

E a todos aqueles que estiveram comigo desde o meu processo de entrada na faculdade e tiveram influência na minha vida: Dayane, Debora, Thayane, Lucas, Nayanne, Cristiane, Maya.

Ao meu orientador, Argimiro, por toda a ajuda, orientação, sugestões e ensinamentos.

À minha co-orientadora, Simone, pela dedicação. Agradeço por sua disponibilidade e paciência, por sua confiança, pelo apoio e compreensão, por ter caminhado comigo e não ter me deixado desistir sempre me incentivando e acreditando em mim.

RESUMO

MATIAS, Beatriz dos Santos. **Análise de Ciclo de Vida Aplicado ao Projeto de uma Planta de Desidratação de Etanol**. Rio de Janeiro, 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Com a alta emissão de gases de efeito estufa e, conseqüentemente, da alteração do clima mundial, mudanças tecnológicas e comportamentais devem ser introduzidas a fim de mitigar tais mudanças climáticas. Investir em produção de energia limpa, aumentando a renovabilidade da matriz energética e atingindo ganhos de eficiência energética, é um dos meios para alcançar uma sociedade de baixo consumo de carbono. A cana-de-açúcar é a principal fonte de energia renovável do Brasil desde 2007, sendo o Brasil o maior produtor e exportador mundial de açúcar. O projeto de equipamentos na indústria da cana-de-açúcar pode vir a colaborar na redução das emissões ambientais, contribuindo assim para a eficiência do processo. Dessa forma, foi avaliado o redimensionamento da seção de desidratação de uma planta de produção de etanol 1G-2G, analisando sua influência na produção do etanol, bioeletricidade e nas emissões durante o ciclo de vida. Como resultados, observou-se que os cenários dos números de estágios das três colunas de destilação 26/47/8, 27/47/6, 27/47/7 e 27/47/7 apresentaram menor consumo de vapor e maior produção de etanol 2G. Enquanto os outros cenários apresentaram maior consumo de vapor e produção de bioeletricidade. Os resultados da análise de ciclo de vida do etanol não apresentaram diferenças significativas entre os cenários estudados. Contudo, estudos anteriores na literatura mostram que a produção de bioeletricidade pode ser favorecida em relação à produção de etanol 2G em relação ao desempenho econômico. Dessa forma, é possível que o cenário 25/47/6 apresente melhor retorno econômico, pois apresenta colunas com menor tamanho, maior produção de bioeletricidade e com a mesma intensidade de carbono em termos de emissão de CO₂ equivalente dos demais cenários.

Palavras-chave: Ciclo de vida. Desidratação de etanol. Etanol 1G-2G.

ABSTRACT

MATIAS, Beatriz dos Santos. **Life Cycle Analysis Applied to the Design of an Ethanol Dehydration Plant.** Rio de Janeiro, 2022. Completion of course work (Graduation in Chemical Engineering) - School of Chemistry, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

With the high emission of greenhouse gases and consequently carbon emissions, technological and behavioral changes must be introduced in order to mitigate global climate change. Investing in clean energy production, increasing the renewability of the energy matrix and achieving energy efficiency gains, is one of the means to achieve a low carbon consumption society. Sugarcane has been the main source of renewable energy in Brazil since 2007. As Brazil is the world's largest producer and exporter of sugar, the sugarcane industry is expanding the production of renewable plastics. The design of equipment in the production of sugarcane can collaborate in the reduction of environmental emissions, thus contributing to the efficiency of the process. Thus, the resizing of the dehydration section of a 1G-2G ethanol production plant was evaluated, analyzing its influence on ethanol production, bioelectricity and emissions during the life cycle. As a result, it was observed that the scenarios 26/47/8, 27/47/6, 27/47/7 and 27/47/7 had lower steam consumption and higher 2G ethanol production. While the other scenarios showed higher steam consumption and bioelectricity production. The results of the ethanol life cycle analysis did not show significant differences between the studied scenarios. However, as previous studies in the literature demonstrate that the production of bioelectricity can be favored in relation to the production of 2G ethanol in relation to economic performance. Thus, it is possible that the 25/47/6 scenario presents a better economic return, as it presents smaller columns, greater bioelectricity production and with the same carbon intensity in terms of CO₂ emissions equivalent to the other scenarios.

Keywords: Life cycle. Ethanol dehydration. Ethanol 1G-2G

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Exemplo de malha de inspeção	18
Figura 2.2 – Exemplo de tabela de inspeção para o caso bidimensional.....	19
Figura 2.3 – Diagrama de blocos para o processo 1G.....	20
Figura 2.4 – Diagrama de blocos para o processo 2G.....	23
Figura 2.5 – Fluxograma em EMSO das etapas de pré-tratamento e hidrólise.....	23
Figura 2.6 – Diagrama esquemático do funcionamento da ferramenta EMSO_OLCA.....	27
Figura 3.1 – Fluxograma no ASPEN de desidratação do etanol.	29
Figura 3.2 – Especificações de projeto da coluna AA1.....	29
Figura 3.3 – Especificações de projeto da coluna B1.....	30
Figura 3.4 – Análise de sensibilidade – variação da temperatura de entrada.....	31
Figura 3.5 – Análise de sensibilidade – variação da quantidade de etanol de entrada.	31
Figura 4.1 – Malha de inspeção.....	40
Figura 4.2 – Carga térmica do refeedor na coluna AA1 variando número de pratos.....	43
Figura 4.3 – Carga térmica do refeedor na coluna B1 variando número de pratos.....	44
Figura 4.4 – Carga térmica do condensador na coluna B1 variando número de pratos.	45
Figura 4.5 – Carga térmica do condensador na coluna D variando número de pratos.	45
Figura 4.6 – Quantidade de bagaço queimado variando número de pratos.....	46
Figura 4.7 – Quantidade de efluente 2G variando número de pratos.....	47
Figura 4.8 – Gráfico de relação efluente 2G x etanol total.....	48
Figura 4.9 – Quantidade de energia gerada variando número de pratos.	49
Figura 4.10 – Emissão de CO ₂ biogênico.....	51
Figura 4.11 – Emissão de CO ₂ no fator de aquecimento global.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Os 10 problemas propostos por CUTLIP et al. (1998).....	14
Tabela 2.2 – Reações consideradas na etapa de fermentação.	21
Tabela 2.3 – Reações de combustão consideradas na caldeira.....	21
Tabela 2.4 – Descrição dos fatores de caracterização	26
Tabela 3.1 – Índices de variação de número de pratos.....	32
Tabela 3.2 – Insumos da Produção de 1 ton de cana-de-açúcar.....	33
Tabela 3.3 – Inventário das Emissões da Produção de 1 ton de Cana de Açúcar	35
Tabela 3.4 – Insumos da produção de etanol	38
Tabela 3.5 – Emissão referente à queima do bagaço e da palha	38
Tabela 3.6 – Fluxos elementares das emissões	39
Tabela 4.1 – Vazão e composição de etanol de cada corrente com a variação de pratos.....	41
Tabela 4.2 – Análise dos fatores de caracterização da cana-de-açúcar.....	50
Tabela 4.3 – Emissão de CO ₂ pelos fatores de caracterização.....	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVO.....	13
1.2	ORGANIZAÇÃO.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	EMSO.....	14
2.2	INTERPOLADOR	17
2.3	BIORREFINARIA 1G-2G.....	19
2.4	DESIDRATAÇÃO DO ETANOL	24
2.5	ANÁLISE DE CICLO DE VIDA - ACV	25
	2.5.1 Metodologia CML Para ACV	26
	2.5.2 EMSO_OLCA	27
3	METODOLOGIA	28
3.1	CONSTRUÇÃO DO INTERPOLADOR	28
3.2	ANÁLISE DO CICLO DE VIDA.....	32
	3.2.1 Análise de Ciclo de Vida da etapa Agrícola	33
	3.2.2 Análise de Ciclo de Vida do Etanol	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	RESULTADOS DO INTERPOLADOR E ANÁLISE DO PROCESSO	40
4.2	RESULTADOS DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA.	49
5	CONCLUSÃO	56
6	TRABALHOS FUTURO	57
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1 INTRODUÇÃO

Com a alta emissão de gases de efeito estufa e, conseqüentemente, da alteração do clima mundial, mudanças tecnológicas e comportamentais devem ser introduzidas a fim de mitigar tais mudanças climáticas. Deve-se investir na produção de energia limpa aumentando a renovabilidade de matriz energética e, também, atingir ganhos de eficiência energética e ampliar o conhecimento do uso racional de recursos naturais.

Contudo, ainda há o aumento da demanda de energia para atender o consumo do mundo moderno e ao mesmo tempo lidar com as conseqüências da crise climática causada também pela falta de produção de energia limpa. Concomitantemente, o aumento da temperatura média global causa aumento da seca, da frequência e intensidade de eventos extremos, aumentando a vulnerabilidade de ecossistemas e comunidades (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2014).

O acordo de Paris foi estabelecido com a intenção de aumentar esforços globais para limitar o aumento da temperatura global. Tal acordo estima a criação de mecanismos para diminuição de impacto e substituir as fontes causadoras da emissão dos gases do efeito estufa com o contexto do desenvolvimento sustentável.

Como conseqüência, o Brasil elaborou uma política de Estado chamada Renovabio (GRASSI e PEREIRA, 2019), que os produtores de biocombustíveis passam a emitir créditos de carbono que pode ser comercializado na bolsa de valores. Essa política estimula a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis gerando uma redução na quantidade de emissões durante todo o ciclo de vida do combustível.

A cana-de-açúcar é a principal fonte de energia renovável do Brasil desde 2007, que reflete 18,2% da energia total do país. Sendo o Brasil o maior produtor e exportador mundial de açúcar, a indústria da cana está expandindo a produção de plásticos renováveis (que usam açúcar ou álcool como fonte de carbono) e combustíveis (SEABRA et al., 2016). Sendo assim, parte dos produtos derivados da cana-de-açúcar pode passar por um estudo de avaliação de ciclo de vida para investigação dos impactos ambientais.

Um projeto mais adequado de equipamentos na produção de etanol 2G oriundo da cana-de-açúcar pode vir a colaborar na redução das emissões ambientais, contribuindo assim para a eficiência do processo e para a produção de energia mais limpa.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como principal objetivo avaliar o ciclo de vida e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) relacionadas à cana-de-açúcar e ao etanol, considerando a eletricidade como coproduto. Pretende-se ainda realizar uma análise de sensibilidade do redimensionamento da seção de desidratação de uma planta de produção de etanol 1G-2G, analisando sua influência na produção do etanol, bioeletricidade e nas emissões durante o ciclo de vida.

1.2 ORGANIZAÇÃO

O presente trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos:

Capítulo 1: Introdução, que contém a motivação e os objetivos.

Capítulo 2: Revisão bibliográfica, que aborda os conceitos sobre o processo de produção de etanol 1G-2G e o processo de análise de ciclo de vida.

Capítulo 3: Metodologia, que detalha os métodos utilizados para realização do projeto.

Capítulo 4: Resultados e Discussões, contém os resultados obtidos na simulação da biorrefinaria integrada, interpolação e análise do ciclo de vida, assim como a discussão e análise desses resultados.

Capítulo 5: Conclusão, apresenta as principais conclusões do projeto e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EMSO

O EMSO é um simulador de processos através de modelos matemáticos, capaz de trabalhar tanto em regime estacionário como transiente. Como descrito em SOARES E SECCHI (2003) “o EMSO faz uso extensivo do paradigma orientado a objetos que, combinado com ferramentas de diferenciação automática e simbólica e redução de índice, formam um ambiente de desenvolvimento visando o aumento da produtividade e do analista”.

Com o software é possível organizar os problemas de forma estruturada e de fácil manipulação. Tem como sua proposta também ser uma alternativa para resolução de problemas de engenharia química, principalmente em sala de aula (RODRIGUES et al., 2008), tais como os problemas propostos por CUTLIP et al. (1998), como mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Os 10 problemas propostos por CUTLIP et al. (1998).

Problema	Caracterização matemática	Assunto relacionado
1. Volume molar e fator de compressibilidade Uso da equação de van der Waals para cálculo do volume molar e fator de compressibilidade para uma determinada espécie gasosa	Equação algébrica não-linear única	Introdução à Engenharia Química e Termodinâmica
2. Balanço material estacionário de um sistema de separação Sistema de separação sem reciclos envolvendo balanços de massa em regime estacionário	Sistema de equações algébricas lineares	Introdução à Engenharia Química

Problema	Caracterização matemática	Assunto relacionado
3. Representação de dados de pressão Modelos de pressão de vapor dados por uma expressão polinomial e pelas equações de Antoine e de Clausius-Clapeyron modificada.	Ajuste polinomial e regressão linear e não-linear	Métodos Numéricos e Termodinâmica
4. Equilíbrio químico de múltiplas reações Múltiplas reações químicas em equilíbrio num reator batelada em fase gasosa a volume constante.	Sistema de equações algébricas não-lineares	Termodinâmica, e Cinética e Cálculo de Reatores Químicos
5. Velocidade terminal de partículas em queda Velocidade terminal de partículas sólidas em queda em fluidos sob ação da força da gravidade.	Equação algébrica não-linear única	Mecânica dos Fluidos
6. Troca de calor transiente em uma série de tanques agitados Dinâmica de um conjunto de tanques agitados e aquecidos ligados em séries.	Sistema de EDOs de 1ª ordem	Transferência de Calor
7. Difusão com reação química em uma placa unidimensional Difusão e reação química irreversível de 1ª ordem ocorrendo simultaneamente em uma única fase.	Sistema de EDOs de 2ª ordem	Transferência de Massa, e Cinética e Cálculo de Reatores Químicos
8. Destilação binária em batelada Destilação em batelada de uma mistura binária ideal	EDO única e um sistema de equações algébricas não-lineares	Processos de Separação

Problema	Caracterização matemática	Assunto relacionado
9. Reação reversível exotérmica em fase gasosa em um reator catalítico	Sistema de EDOs e de equações algébricas não-lineares	Cinética e Cálculo de Reatores Químicos
Reator catalítico em fase gasosa com reação elementar reversível de 1ª ordem. Há troca de calor com uma camisa e perda de carga ao longo do comprimento do reator		
10. Dinâmica de um tanque aquecido com controle PI de temperatura	Sistema rígido de EDOs	Controle de Processos
Dinâmica de um sistema formado por um tanque agitado, um trocador de calor e um controlador PI de temperatura		

Fonte: RODRIGUES et al. (2008).

A partir da resolução dos problemas citados na Tabela 1, RODRIGUES et al. (2008) sugerem que o EMSO seja uma ferramenta de engenharia completa e ideal, pois, permite aprendizagem dos conceitos com flexibilidade. O EMSO possui alto grau de adaptação dos problemas para novas situações e facilidade na análise de sensibilidade, além da visualização dos resultados obtidos.

O EMSO também pode ser usado como uma ferramenta de simulação de processos, como levantado no trabalho desenvolvido por BICCA et al. (2006), que tem como objetivo “o desenvolvimento de procedimentos hierárquicos de cálculo para os parâmetros de avaliação de trocadores de calor tipo casco e tubos com precisão adequada e baixo custo computacional, facilitando a simulação e otimização de processos”. Em STAUDT et al. (2007), um modelo dinâmico foi construído e aplicado no simulador EMSO, para realizar a simulação de uma destilação reativa, considerando desde o início a existência de fase líquida e vapor.

O simulador vem sendo considerado para resolução de diversos tipos de problema, sendo citado na literatura em trabalhos como: Avaliação técnico- econômica (CARPIO et al.,

2022); Desenvolvimento de modelos híbridos de redes neurais e fenomenológicos (CARRANZA-ABAID et al., 2022), como no monitoramento preditivo de emissões (ANDRADE et al., 2022); Controle avançado aplicado a um sistema de compressão de gás de uma plataforma offshore (GESSER et al., 2022) e para análise de ciclo de vida (CARPIO et al., 2022).

Embora apresente uma ampla aplicabilidade de simulações de sistemas de Engenharia Química, por ser um simulador orientado por equações, o EMSO apresenta uma dificuldade na convergência em simulações de colunas de destilação, principalmente quando não há uma boa estimativa inicial. Sua arquitetura modular simultânea dificulta a implementação de estratégias específicas para contornar problemas de convergência de colunas de destilação (FURLAN et al., 2016). A próxima seção apresenta uma alternativa baseada em interpolação multivariada para tratar desse tipo de dificuldade.

2.2 INTERPOLADOR

FURLAN et al. (2016) apresentam uma alternativa baseada no uso de tabela de pesquisa para interpolar os resultados de simulações para *“modelos cuja não-linearidade impede a convergência das simulações da planta industrial”*. A solução apresentada por FURLAN et al. (2016) utiliza tabelas de pesquisa baseadas em grade para interpolar os resultados das simulações realizadas *offline*, para os modelos de unidade de processo cuja não linearidade impede a convergência das simulações da planta industrial como um todo. Esse tipo de solução é particularmente interessante para simuladores orientado a equações como o EMSO. FURLAN et al. (2016) desenvolveram uma biblioteca compartilhada para integrar o uso de interpoladores no ambiente EMSO. Capaz de ler malhas de inspeção, conforme ilustra a Figura 2.1, realiza os cálculos de interpolação segundo a metodologia de NELLES (2001).

Figura 2.1 - Exemplo de malha de inspeção

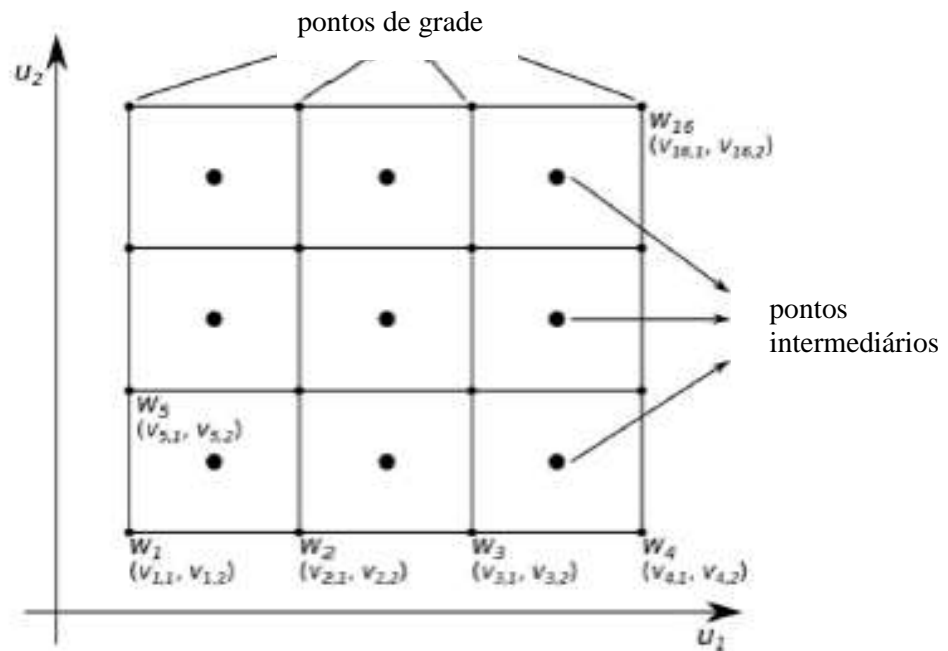
```
Nofinputs: 4  
Lowerbounds: 25 6 348.15 0.065  
Increments: 1 1 2.5 0.0025  
Nofpoints: 4 3 9 17  
InputUnits: , , K,  
Nofoutputs: 15  
OutputUnits: kW*h/kg, kW*h/kg, kW*h/kg, kW*h/kg, , kmol/kg, kmol/kg, kmol/kg, kmol/kg.
```

Fonte: Elaboração própria.

Através da criação de uma tabela de inspeção, conforme ilustra a Figura 2.2 para o caso bidimensional, é possível a realização desses cálculos, informando o número de variáveis de entrada, seus valores mínimos, incrementos, número de pontos e unidades. Além do número de variáveis de saída, seus valores e unidades.

As tabelas de inspeção multidimensionais têm grande aplicação industrial devido à baixa demanda computacional comparada a outras para resolução de sistemas algébricos não lineares. Segundo LINO (2018), “a dimensão da tabela cresce significativamente à medida que variáveis de entrada são adicionadas à tabela. Por esta razão, na prática não se recomenda a utilização superior a cinco variáveis de entrada para compor a tabela”.

Figura 2.2- Exemplo de tabela de inspeção para o caso bidimensional.



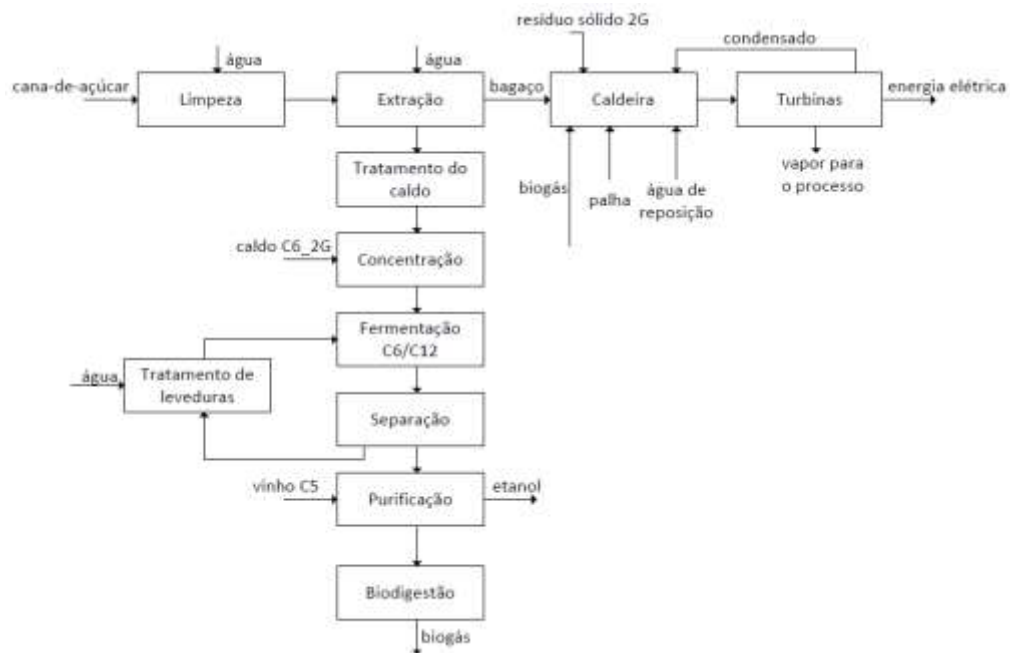
Fonte: Adaptado de FURLAN et al. (2016).

2.3 BIORREFINARIA 1G-2G

A biorrefinaria foi desenvolvida para produção de etanol 1G e 2G e para produção de bioeletricidade pelo grupo de pesquisa do Laboratório Kyatera da UFSCar coordenado pelos professores Roberto Giordano e Felipe Furlan, e está disponível na nova versão 0.10.11 do EMSO. Os modelos da biorrefinaria se encontram implementados no EMSO.

A biorrefinaria tem a capacidade de moagem de 833,33 toneladas por hora de cana-de-açúcar. O bagaço produzido é queimado na caldeira para garantir a independência energética da planta, sendo que o bagaço excedente se dirige a produção do etanol 2G. A palha proveniente do campo também alimenta a caldeira para o aumento de produção do etanol 2G. O biogás obtido no processo de biodigestão da vinhaça e/ou xilose, também pode ser utilizado como fonte de combustível para a operação da caldeira. A fração de C5 é fermentada separadamente das frações C12 e C6 que são cofermentadas. As Figuras 2.3 e 2.4 apresentam respectivamente, o processo de produção de etanol 1G e 2G.

Figura 2.3- Diagrama de blocos para o processo 1G.



Fonte: LINO (2018).

LINO (2018) afirma que, como mostra a Figura 3, a cana-de-açúcar e a palha empacotada passam por um processo de limpeza a seco, esta é enviada à caldeira enquanto a cana-de-açúcar passa por um processo de extração. Para tornar o processo mais rentável, a água de absorção é adicionada na última etapa de extração. 5% do bagaço é enviado para uma reserva de segurança, enquanto o restante é destinado para caldeira e pré-tratamento.

Ácido fosfórico e cal são adicionados no tratamento do caldo no tanque de calagem, para onde o caldo aquecido é enviado. Essa mistura é enviada para o segundo aquecedor e posteriormente para o flash. Antes da etapa de decantação, é adicionado polímeros no caldo na proporção de 6ppm em relação à vazão do caldo.

Como produto do decantador, o cloro clarificado passa por uma bomba para ser misturado ao licor de hexoses do processo de hidrólise. O Caldo C6 é concentrado e o vapor gerado é usado como fonte de energia para o refeedor da coluna AA1 (primeira coluna do trem de destilação). O restante é usado como fonte de aquecimento para os aquecedores da etapa de extração e tratamento. No modelo do processo, o trocador de calor realiza o cálculo da demanda de calor do processo para simplificar a integração de vapor e energética para ser integrada aos outros equipamentos.

Após a concentração do caldo, ele é enviado para resfriamento e misturado a uma solução de amônia e reciclo de leveduras, e posteriormente é enviado para o fermentador. As reações envolvidas são apresentadas na Tabela 2.2. A solução de amônia foi adicionada ao processo para que fosse possível caracterizar o crescimento celular.

Tabela 2.2- Reações consideradas na etapa de fermentação.

Reação	Conversão (%)
$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \rightarrow 2C_6H_{12}O_6$	100,00
$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_6O + 2CO_2$	90,48
$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2C_2H_4O + 2CO_2 + 4H_2$	1,19
$C_6H_{12}O_6 + H_2 \rightarrow 2C_3H_8O_3$	2,67
$0,174C_6H_{12}O_6 + 0,12NH_3 \rightarrow CH_{1,74}O_{0,6}N_{0,12}$	1,37

Fonte: DIAS (2008).

Três fontes podem ser utilizadas como fonte de combustível para operação da caldeira: bagaço, palha e biogás. É considerado que ocorra reação de combustão na utilização de qualquer uma das fontes, visto que em todas dióxido de carbono e água são obtidos. Na Tabela 2.3, são mostradas as opções de reações de combustão que podem ser especificadas pelo usuário e os valores de variação de entalpia para cada reação.

Tabela 2.3- Reações de combustão consideradas na caldeira.

Reação	ΔH_r (kJ/kg)	ΔH_r (kJ/mol)
$C_6H_{10}O_5 + 6O_2 \rightarrow 5H_2O + 6CO_2$	-17299,1	-2804,2
$C_5H_8O_4 + 5O_2 \rightarrow 4H_2O + 5CO_2$	-16446,0	-2170,9
$C_{10}H_{11,6}O_{3,9} + 10,95O_2 \rightarrow 5,8H_2O + 10CO_2$	-27000,0	-5243,4

Fonte: DIAS (2011).

No caso da cogeração sem turbina de condensação, o objetivo da planta é a máxima produção de etanol, seja hidratado ou não. Já no caso da cogeração com turbina de condensação, o objetivo da planta é aumentar o excesso de energia elétrica, logo a turbina de condensação se torna substancial. Levando em conta o processo de cogeração sem turbina de condensação, o vapor gerado é enviado para três turbinas de contrapressão, para que o vapor produzido em uma das turbinas seja para a etapa de pré-tratamento, em outra turbina o vapor gerado a uma pressão

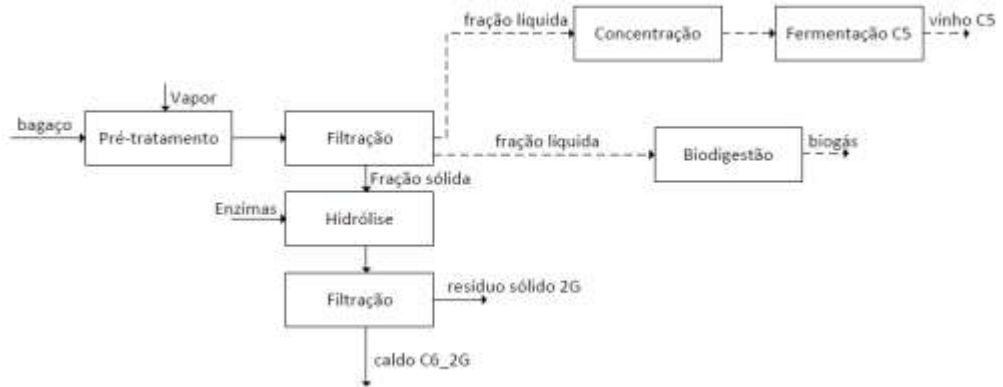
menor é usado como fonte de calor para as colunas de desidratação, na terceira turbina é produzido vapor para o resto do processo.

No processo de produção de etanol 2G, como mostra a Figura 5, o excedente do bagaço vai para uma etapa de pré-tratamento da celulose e da hemicelulose. A etapa de pré-tratamento altera a estrutura dos materiais lignocelulósicos que promove o aumento da área superficial e porosidade da biomassa, essa etapa representa um dos principais estágios do processo de produção de etanol 2G (SANTOS-ROCHA et al., 2017). A estrutura da lignina é quebrada parcialmente e ocorre o rompimento da cristalinidade da celulose. Tais processos são importantes para que os ácidos e enzimas tenham facilidade para acessar a celulose e assim o polímero ser hidrolisado a monômeros.

O pré-tratamento pode ocorrer por diversos métodos, dentre eles, o método físico que através da moagem, por exemplo, aumenta a área superficial e a porosidade da biomassa; por métodos químicos que, com o uso de ácidos e bases, promove a remoção da lignina e/ou hemicelulose. O pré-tratamento biológico está associado com a ação de fungos capazes de produzir enzimas para degradar a lignina e a hemicelulose. Esses métodos combinados podem afetar as propriedades físicas e químicas da biomassa, dependendo das circunstâncias do processo.

Como alternativa, há o pré-tratamento que inclui o hidrotérmico e a explosão à vapor (BEHERA et al., 2014). O hidrotérmico apresenta uma tecnologia com altos rendimentos e baixa geração de subprodutos. Neste, a pressão aplicada (1 – 3,5 MPa) mantém a água no estado líquido em alta temperatura (150-240 °C) (SANTOS-ROCHA et al., 2017). Após a etapa de pré-tratamento é obtida uma fração sólida, rica em celulose e lignina e outra líquida, com alto nível de açúcares de hemicelulose. A fração sólida passa pela fase de hidrólise enzimática, obtendo lignina e mistura de celulose não reagida que podem ser enviadas para o sistema de cogeração.

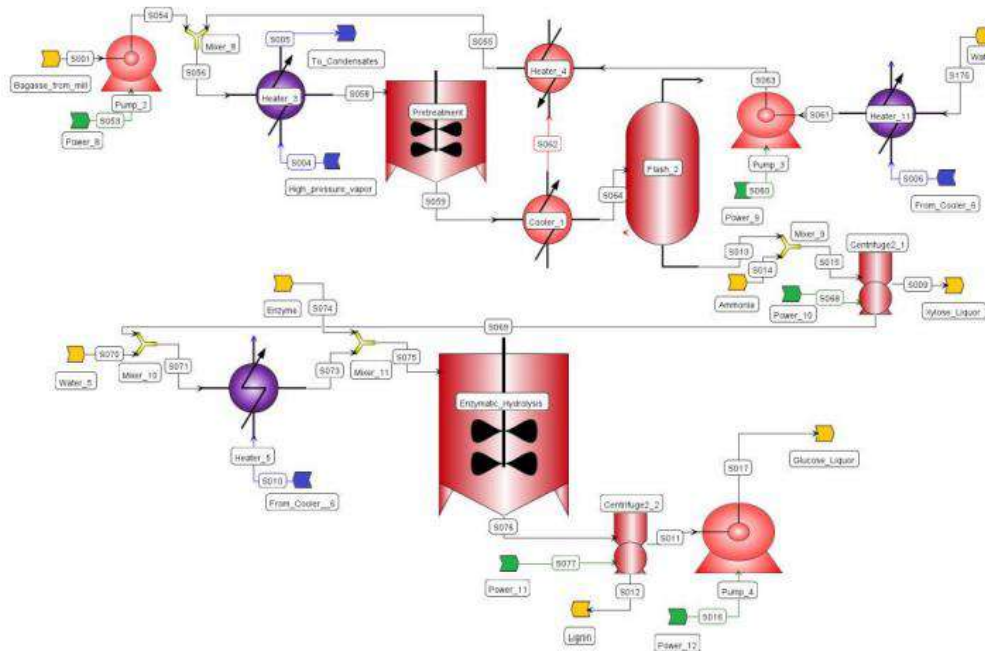
Figura 2.4 - Diagrama de blocos para o processo 2G.



Fonte: LINO (2018).

Subsequente ao pré-tratamento, a etapa de hidrólise, que pode ocorrer através do uso de ácidos ou enzimas, com o intuito de converter os polissacarídeos em açúcares fermentescíveis, gerando um caldo de C6 que é fermentado juntamente com o caldo de C6/C12 (sacarose, glicose e frutose) do etanol 1G, conforme é ilustrado na Figura 2.5.

Figura 2.5- Fluxograma em EMSO das etapas de pré-tratamento e hidrólise.



Fonte: CARPIO (2019).

Já a fração líquida do pré-tratamento, com alto nível de açúcares de hemicelulose, é concentrada e vai para a fermentação dos açúcares C5, que é realizada separadamente da fermentação dos açúcares C6. O vinho resultante da fermentação dos açúcares C5 é misturado ao vinho produzido dos açúcares C6 e é enviado para um conjunto de colunas de destilação.

2.4 DESIDRATAÇÃO DO ETANOL

Como explicado por LONGATI (2018), nesta parte do processo ocorre a separação dos componentes do vinho, gerando correntes de água, etanol, etanóis superiores, ácido acético e aldeído devido aos seus diferentes pontos de ebulição. O etanol anidro deve apresentar pureza superior a 99% e o etanol hidratado de 92,5% até 95,4% segundo a especificação de teor pela resolução ANP 907, de 18 de novembro de 2022. Para isso o etanol hidratado deve passar por uma etapa de desidratação.

A corrente de etanol hidratado segue para o processo de produção de etanol anidro. Este processo pode ser feito por destilação extrativa ou azeotrópica ou por peneiras moleculares. O vapor requerido para as colunas de desidratação do etanol é proveniente do sistema de cogeração no qual o bagaço, palha e resíduos de bagaço do processo 2G são queimados em caldeiras gerando vapores de alta, média e baixa pressão e bioeletricidade.

Na destilação azeotrópica, é adicionado um terceiro componente a fim de formar um azeótropo heterogêneo para a formação de duas fases líquidas. Assim, a mistura do novo azeótropo pode ser obtida no topo ou no fundo da coluna, dependendo do seu ponto de ebulição, enquanto o componente de interesse é obtido de forma pura. Para a recuperação do componente de arraste utiliza-se uma segunda coluna de destilação (DIAS, 2008).

Em relação à destilação extrativa, é utilizado um extrator miscível com a capacidade de alterar a volatilidade relativa dos componentes presentes na mistura a ser separada. Tal extrator é capaz de mudar o grau de separação quando em um processo de destilação. Contudo, esse extrator tem que ter baixa volatilidade, alto ponto de ebulição, ser completamente miscível com a mistura original e não formar novos azeótropos (GARCÍA-HERREROS et al., 2011).

Já para a separação através de peneiras moleculares, um leito de zeólitas é usado para adsorver a água que está presente no etanol hidratado. É recomendado usar o vapor de álcool hidratado diretamente junto com um condensador parcial na coluna B1. Três leitos costumam ser utilizados periodicamente, com um deles sempre em regeneração através da aplicação de vácuo no leito para a retirada da água acumulada.

2.5 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA - ACV

A análise de ciclo de vida é uma das técnicas com o propósito de compreender e diminuir os impactos de produtos e matérias-primas consumidos. A norma ISO 14.040 da ABNT foi desenvolvida para a divulgação e padronização dos estudos de análise de ciclo de vida. Essa técnica avalia os impactos ambientais mediante um inventário de entradas, saídas e fluxos elementares, que podem ser emissões, uso de recursos naturais e geração de resíduos. Posteriormente é realizada a avaliação dos impactos ambientais dessas entradas e saídas e a interpretação dos resultados.

A ACV pode estudar os impactos ambientais ao longo da vida de um produto, chamado de “berço ao túmulo”. Essa abordagem considera todo o processo de aquisição de um produto, desde a matéria-prima, produção até seu uso e descarte. Pode-se também limitar a abordagem da análise de ciclo de vida até os limites da planta, denominando-se de “berço ao portão”. Como impacto ambiental entende-se o uso de recursos naturais, impacto à saúde humana e consequências ecológicas.

Com a ACV, é possível identificar oportunidades de melhoria de aspectos ambientais, ajudar no processo de tomada de decisão a fim de comparar rotas químicas e projetos de processos químicos.

SEABRA et al. (2011) avaliaram o ciclo de vida do uso de energia e emissões de efeito estufa relacionado à cana-de-açúcar e ao etanol no Brasil, também considerando os excedentes de bagaço e eletricidade como produtos. Foi usada a análise de Monte Carlo com base em curvas de probabilidade com a intenção de avaliar a incerteza das emissões do ciclo de vida do etanol. A emissão de gases de efeito estufa na produção de açúcar foram estimadas em 234 g CO₂ eq./kg. Já para o etanol anidro, as emissões de ciclo de vida foram avaliadas em 21,3 g CO₂ eq./MJ, o que leva a uma mitigação de emissão de 80% em relação à gasolina convencional, considerando o uso do etanol em mistura com a gasolina.

PEREIRA et al. (2019) mostram a importância da harmonização de ferramentas para diminuição da emissão de gases de efeito estufa, no trabalho de comparação de ferramentas de avaliação de emissões de GEE do ciclo de vida do biocombustível. As diferentes ferramentas de avaliação das emissões: GREET, GHGenius e BioGrace se alinham com regulamentos definidos por governos, mesmo que variando e tendo requisitos diferentes. Contudo, a diferença

nos resultados dos modelos usados mostra que as ferramentas devem fornecer fontes de dados transparentes para facilitar a compreensão dos resultados em questão geográfica.

2.5.1 Metodologia CML Para ACV

A CML-IA (Centro de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden na Holanda) (GUINÉE et al., 2002) é uma metodologia de avaliação de impacto de ciclo de vida criada em 2001 por um grupo de cientistas, da Universidade de Leiden, que propuseram um conjunto de categorias de impacto e métodos de caracterização para a etapa de avaliação de impacto. Tendo como as principais categorias descritas na Tabela 2.4:

Tabela 2.4 - Descrição dos fatores de caracterização

Categorias	Descrição
Depleção de Recursos Abióticos	Relacionada à extração de minerais e combustíveis fósseis com base na concentração de reservas e na taxa de depleção.
Mudança Climática	Relacionado com as emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera como Potencial de Aquecimento Global.
Depleção de Ozônio Estratosférico	Define o potencial de depleção da camada de ozônio de diferentes gases.
Toxicidade Humana	Impactos na saúde humana de substâncias presentes no ambiente, descrevendo destino, exposição e efeitos de substâncias tóxicas.
Ecotoxicidade	Impacto nos ecossistemas de água doce, nos ecossistemas marinhos e terrestres.
Formação foto-oxidantes	Formação de compostos químicos reativos, pela ação de luz solar sobre poluentes presentes que podem ser prejudiciais a saúde humana e ao ecossistema.
Acidificação	Substâncias que causam impactos no solo, água subterrâneas e superficiais, organismos, ecossistemas e edifícios.
Eutrofização	Impactos devido a níveis acessíveis de macronutrientes, como nitrogênio, fósforo e carbono, no meio ambiente causado por emissões para o ar, água e solo.

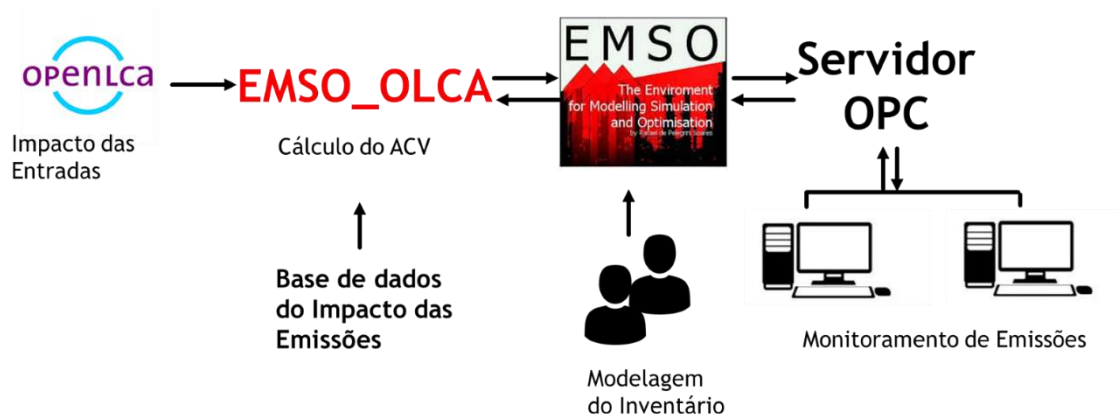
Fonte: GUINÉE et al. (2002)

2.5.2 EMSO_OLCA

MIYOSHI E SECCHI (2022) desenvolveram a ferramenta EMSO_OLCA em C++ em sistema operacional Windows e segue os princípios de Análise de Ciclo de Vida da ISO14.040. A plataforma desenvolvida integra um banco de dados de metodologias de avaliação de impacto ambiental do software OpenLCA, (OplenLCA Nexus, 2006). Além da metodologia do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) (MYHRE et al., 2013), que avalia o Potencial de Aquecimento Global em um horizonte de 100 anos, a ferramenta EMSO_OLCA também dispõe de outras 98 metodologias, totalizando-se 1479 categorias de impacto.

Conforme mostra a Figura 2.6, a ferramenta se comunica com a base de dados das metodologias do OpenLCA, com impacto das entradas e o inventário da análise de ciclo de vida informado pelo usuário. O inventário da análise de ciclo de vida contempla as entradas e os fluxos elementares de emissões, de recursos naturais e de resíduos, e é fornecido pelo usuário no EMSO. O EMSO_OLCA então efetua o cálculo da análise de ciclo de vida, que pode ser monitorada de forma *on-line* através de comunicação OPC (Plataforma de comunicação aberta) ou Python através do EMSO.

Figura 2.6- Diagrama esquemático do funcionamento da ferramenta EMSO_OLCA



Fonte: adaptado de MIYOSHI E SECCHI (2022).

3 METODOLOGIA

O presente trabalho tem como objetivo o dimensionamento e análise de ciclo de vida da produção de etanol 1G-2G, a da cana-de-açúcar foi obtida através de banco de dados. Tomando como ponto de partida a entrada de vinho de 2000 kg/h no trem de destilação, foi realizado o redimensionamento da unidade de desidratação da planta de produção de etanol 2G, partindo da análise de ciclo de vida, para analisar o impacto do dimensionamento da unidade de desidratação no ciclo de vida do etanol de 1G-2G. Para tal, este trabalho foi desenvolvido nas seguintes etapas:

- 1) Construção de um interpolador para representar a seção de desidratação e a análise de ciclo de vida em si;
- 2) Análise de ciclo de vida.

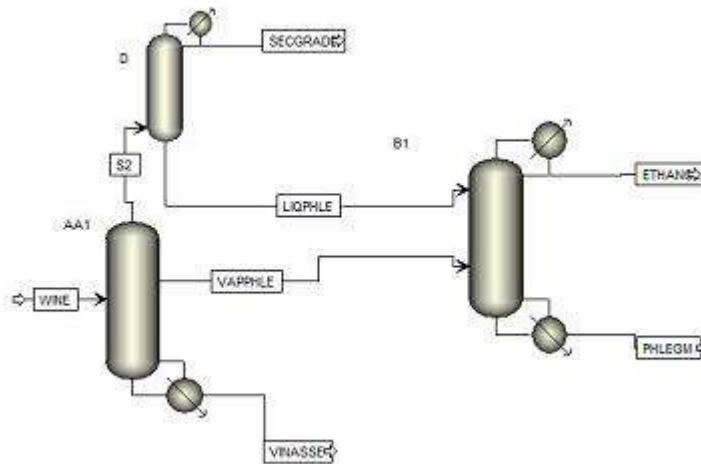
3.1 CONSTRUÇÃO DO INTERPOLADOR

Para realização dessa etapa, foi realizada uma simulação de uma planta de desidratação de etanol, produzindo etanol hidratado, em uma biorrefinarias de etanol 1G-2G. A simulação da biorrefinaria se encontra no EMSO (LINO, 2018). Tendo em vista que o EMSO é um simulador orientado a equações, a convergência de colunas pode ser dificultada também dada a formação de azeótropos de etanol e água. Para contornar essa limitação, se faz necessário o uso de interpoladores para a simulação da seção de desidratação do etanol hidratado.

Os interpoladores foram construídos através da realização de uma tabela de inspeção com dados de simulação utilizando-se a biblioteca compartilhada que interpola os dados simulados no ambiente EMSO desenvolvida por FURLAN et al. (2016).

As simulações da planta de desidratação foram realizadas no Aspen-Plus (ASPEN TECH, 1981), conforme ilustra a Figura 3.1, a corrente de vinho (mistura entre os produtos da fermentação dos açúcares C5 e C6) entra na coluna AA1. Nesta coluna, ocorre o processo de separação da água e etanol, resultando em três correntes de saída, na VINASSE que é composta maioritariamente pela água sendo as outras duas correntes formada por aproximadamente 50% de etanol. A corrente S2 é enviada para a coluna D, gerando uma corrente de etanol de segunda com a vazão bem baixa, já na LIQPHLE, a corrente que vai para a coluna B1, que é responsável pela geração do etanol hidratado no teor especificado pela norma da ANP. Sendo a corrente PHLEGM composta em mais de 90% de água.

Figura 3.1 - Fluxograma no ASPEN de desidratação do etanol.



Fonte: Elaboração própria.

Quanto às especificações do conjunto de colunas, na coluna AA1, é requerido que o etanol tenha pelo menos 76% de recuperação etanol na corrente VAPPHLE em relação à quantidade de etanol na alimentação e que fração de etanol na corrente VINASSE seja 0,02%, ajustando-se a carga térmica do refeedor e a vazão mássica da corrente lateral de vapor VAPPHLE, conforme mostra a Figura 3.2.

Figura 3.2- Especificações de projeto da coluna AA1.

Additional specifications									
ID	Active	Description	Type	Units	Target Value	Calculated Value	Error	Status	
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Mass recovery, 0.76	Mass recovery		0.76	0.76	7.8375e-09		
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Mass purity, 0.0002, PRODUCT	Mass purity		0.0002	0.0002	0		

Adjusted variables									
ID	Active	Description	Type	Units	Lower Bound	Upper Bound	Calculated Value	Status	
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Vapor sidestream rate, 10, 40, 1	Vap Prod Rate - Stg 10	kg/hr	40	700	300.174		
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Reboiler duty, 20000, 70000	Reboiler Duty	cal/sec	20000	70000	48088,6		

Fonte: Elaboração própria.

Já na coluna B1, a fração de etanol foi especificada em 93,5% na corrente ETHANOL enquanto na corrente PHLEGM 0,02%. Na Figura 10, mostram-se as variações da vazão da corrente lateral e do refeedor para chegar nas especificações citadas. As composições das saídas estão amarradas independentes do número de estágios, conforme mostra a Figura 3.3.

Figura 3.3- Especificações de projeto da coluna B1.

The screenshot displays two tables from the Aspen Plus software interface. The first table, 'Additional specifications', lists two mass purity requirements for the product. The second table, 'Adjusted variables', lists two variables: 'Reflux ratio, 1., 15., 0.1' and 'Reboiler duty, 1000., 100000.', with their respective units, bounds, and calculated values.

Additional specifications									
ID	Active	Description	Type	Units	Target Value	Calculated Value	Error	Status	
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Mass purity, 0.935, PRODUCT	Mass purity		0,935	0,935	0		
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Mass purity, 0.0002, PRODUCT	Mass purity		0,0002	0,0002	0		

Adjusted variables									
ID	Active	Description	Type	Units	Lower Bound	Upper Bound	Calculated Value	Status	
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Reflux ratio, 1., 15., 0.1	Mass Reflux Ratio		1	15	5,83355		
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Reboiler duty, 1000., 100000.	Reboiler Duty	cal/sec	1000	100000	65163,7		

Fonte: Elaboração própria.

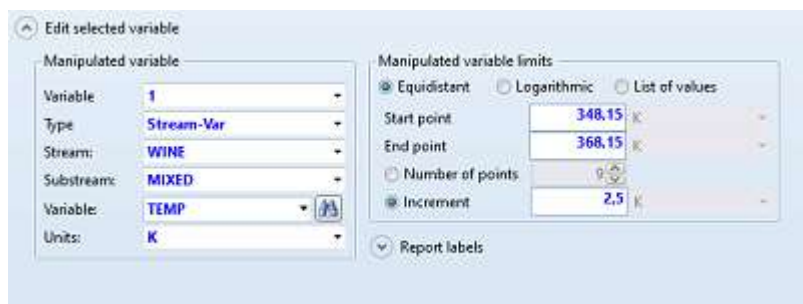
Para gerar o conjunto de dados da tabela de inspeção do interpolador, variou-se a temperatura e a quantidade de etanol na carga e o número de pratos das colunas AA1 e D, gerando 1836 pontos para cada fase (vapor e líquido). Na coluna AA1, variou-se o número de pratos de 25 até 28. Já na coluna D, variou-se o número de pratos de 6 até 8 pratos.

Foi utilizada para tal a ferramenta de análise de sensibilidade do Aspen para cada configuração de pratos da coluna AA1 e D, variando-se a temperatura do vinho e a concentração de etanol do vinho conforme ilustram as Figuras 3.4 e 3.5.

As variáveis de saída da simulação foram:

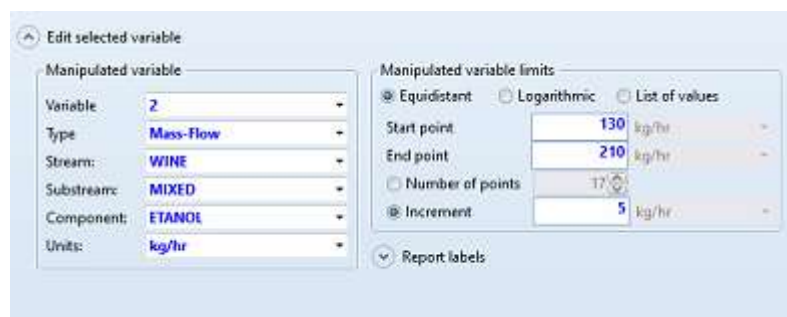
- QAA1: Calor trocado no refeedor da coluna AA1;
- QBB1: Calor trocado no refeedor da coluna B1;
- CD: Calor trocado no condensador da coluna D;
- CBB1: Calor trocado no condensador da coluna B1;
- SecGradz: Fração molar de etanol na corrente de etanol de segundo grau;
- Vinf: Vazão molar da vinhaça considerando apenas etanol e água;
- Secf: Vazão molar do etanol de segunda considerando apenas etanol e água;
- Phlegm: Vazão de fleuma de saída;
- HydrEth: Vazão mássica de etanol hidratado.

Figura 3.4- Análise de sensibilidade – variação da temperatura de entrada



Fonte: Elaboração própria.

Figura 3.5- Análise de sensibilidade – variação da quantidade de etanol de entrada.



Fonte: Elaboração própria.

Após as simulações da análise de sensibilidade, os resultados foram organizados em uma tabela de inspeção de forma a construir o arquivo de configurações da biblioteca compartilhada do interpolador.

Os resultados obtidos pelas simulações foram interpretados para entender o comportamento do sistema para cada variação do número de pratos da coluna AA1 e da coluna D quanto à carga térmica das colunas AA1, B1 e D e quanto às vazões das correntes VAPPHE, S2, LIQPPHE, SECGRAD, VINASSE e PHLEGM.

Como forma de facilitar o entendimento e avaliar o impacto da variação do número de pratos no resultado, foi criado um índice que consta os três valores dos números de pratos utilizados como pode ser visto na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Índices de variação de número de pratos.

Índice	A	B	D
25/47/6	25	47	6
25/47/7	25	47	7
25/47/8	25	47	8
26/47/6	26	47	6
26/47/7	26	47	7
26/47/8	26	47	8
27/47/6	27	47	6
27/47/7	27	47	7
27/47/8	27	47	8
28/47/6	28	47	6
28/47/7	28	47	7
28/47/8	28	47	8

Fonte: Elaboração própria.

3.2 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

Neste trabalho, foi realizada a análise de ciclo de vida da produção de cana-de-açúcar e de etanol 1G-2G. As premissas da análise de ciclo de vida foram:

- Metodologia Atribucional;
- Metodologia de Avaliação de Impacto: CML-Baseline;
- Escopo: de berço ao portão;
- Inventário das entradas: para a cana foi baseada em dados da literatura e para a produção de etanol 1G-2G baseou-se na simulação;
- Base de Dados de Fatores de Caracterização: EcoInvent 3.8 utilizando o openLCA e o EMSO_OLCA;
- A produção de Resíduos como bagaço e cana foi considerado de emissão igual a zero;
- Método de alocação: baseado em energia.

A análise de ciclo de vida foi realizada em duas etapas: análise de ciclo de vida da etapa agrícola e análise de ciclo de vida da produção de etanol 1G-2G. A metodologia atribucional é uma estrutura de modelagem que contabiliza os fluxos de entrada e saída de todos os processos. Já o método de alocação tem como objetivo particionar os fluxos de multiprodutos (ILCD, 2010). Neste caso, foi baseado no conteúdo energético dos produtos.

3.2.1 Análise de Ciclo de Vida da etapa Agrícola

O inventário das entradas de cana-de-açúcar foi baseado no trabalho de SEABRA et al. (2011), as entradas referentes às operações agrícolas de baseiam no EcoInvent 3.8. Já o inventário de emissões foi baseado no IPCC (2006), Agri-footprint 5.0 e STRUIJS et al. (2010). Sendo a EcoInvent 3.8 e Agri-footprint 5.0 Base de dados do OpenLCA, cuja licença foi adquirida pela COPPE/UFRJ. Considerou-se que a terra já se encontrava em cultivo, portanto não houve emissões devido às mudanças no uso da terra. Nesses casos, de acordo com o IPCC (2006) o impacto do uso da terra é zero para a categoria de mudanças climáticas. Os inventários das entradas da produção de cana-de-açúcar estão presentes na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Insumos da Produção de 1 ton de cana-de-açúcar

Componentes	Quantidade	Unidade
2,4-diclorofenol	0,00159	kg
Amônia anidra	0,132267571	kg
Nitrato de amônio	0,821452075	kg
Cinzas, provenientes da combustão do bagaço da cana-de-açúcar	14	kg
Diesel	2,44	kg
Éster metílico de ácido graxo	0,22	kg
Adubação, por plataforma de adubo, cana-de-açúcar	0,009984	ha
Adubação, por separador de fezes, cana-de-açúcar	0,00309	ha
Nivelamento de campo, cana-de-açúcar	0,002496	ha
Torta de filtro, da filtração do caldo de cana	31	kg
Cobertura de sulcos, cana-de-açúcar	0,0008911	ha
Sulcador, cana-de-açúcar	0,0008911	ha
Glifosato	0,00739	kg
Fertilizante de fósforo inorgânico, como P2O5	0,22659	kg

Componentes	Quantidade	Unidade
Fertilizante inorgânico de potássio, como K ₂ O	0,98	kg
Cal	5,183	kg
Aplicação de calcário e gesso, por espalhador	0,011534025	ha
Fosfato monoamoniaco	0,063811112	kg
Pesticida, não especificado	0,0391	kg
Lavoura, gradagem, por grade de disco offset	0,002496	ha
Lavoura, gradagem, por nivelamento offset grade de disco	0,002496	ha
Lavoura, subsolagem, por arado subsolador	0,002496	ha
Uréia	0,799749663	kg
Vinhaça, da fermentação da cana-de-açúcar	570	kg

Fonte: SEABRA et al. (2011), EcoInvent 3.8.

Os fluxos elementares são definidos como recursos naturais, emissões ou resíduos. Podem ser configurados conforme seus tipos (emissão para o ar, água, solo ou recurso) e conforme o local, como disponível em sua descrição no OpenLCA.

No caso da produção de cana-de-açúcar, foram estimadas as seguintes emissões de acordo com a metodologia definida pelo Agri-footprint 5.0, como a seguir:

- Emissão de óxido nitroso (N₂O): no caso do cultivo da cana-de-açúcar, as emissões são subdivididas em emissões diretas e indiretas devido ao uso de nitrogênio dos fertilizantes sintéticos, fertilizantes orgânicos e dos resíduos agrícolas deixados no campo após a colheita da cana-de-açúcar. No caso das emissões diretas, estima-se que uma fração do nitrogênio das entradas e dos resíduos agrícolas é convertida a N₂O. No caso das emissões indiretas o nitrogênio é convertido em compostos intermediários e depois é parcialmente convertido a N₂O. As quantidades emitidas direta e indiretamente são estimadas de acordo com o nível 1 do IPCC (2006).
- Emissão de amônia e nitrato. Considera-se que todo nitrogênio que volatiliza se converte para amônia e todo nitrogênio oriundo de lixiviação é emitido como nitrato, conforme as orientações em nível 1 do IPCC (2006).
- Emissão de CO₂ da calagem e ureia: os fatores de emissão estão em consonância com os definidos em nível 1 pelo IPCC (2006).
- Emissões referentes ao uso de diesel nas operações agrícolas. Estão em consonância os

valores definidos pela base de dados Agri-footprint 5.0.

- Emissões referentes de fósforo ao solo estão de acordo com o Agri-footprint 5.0, que é baseado em STRUIJS et al. (2010).

A Tabela 3.3 apresenta o inventário de emissões estimadas.

Tabela 3.3 – Inventário das Emissões da Produção de 1 ton de Cana de Açúcar

Emissões	Qde (kg)	Fluxo Elementar	Descrição	Fonte
Emissão para a terra				
Emissões diretas de N₂O	0.01221	Fluxos elementares/Emissão para o ar/não especificado	de fertilizante sintético	IPCC(2006)
N₂O indireto	0.00396825	Fluxos elementares/Emissão para o ar/não especificado	de fertilizante sintético	IPCC(2006)
Amônia	0.09435	Fluxos elementares/Emissão para o ar/não especificado	de fertilizante sintético	IPCC(2006)
CO₂	2.554024	Fluxos elementares/Emissão para o ar/não especificado	de fertilizante sintético	IPCC(2006)
Emissões diretas de N₂O	0.007621429	Fluxos elementares/Emissão para o ar/não especificado	de fertilizante sintético	IPCC(2006)
N₂O indireto	0.003239107	Fluxos elementares/Emissão para o ar/não especificado	de fertilizante sintético	IPCC(2006)
Amônia	0.117785714	Fluxos elementares/Emissão para o ar/não especificado	de fertilizante sintético	IPCC(2006)
Emissões diretas de N₂O	0.003771429	Fluxos elementares/Emissão para o ar/não especificado	de fertilizante sintético	IPCC(2006)

Emissões	Qde (kg)	Fluxo Elementar	Descrição	Fonte
N₂O indireto	0.000848571	Fluxos elementares/Emissão para o ar/não especificado	de resíduos de colheita	IPCC(2006)
Amônia	2.43756E-05	Fluxos elementares/Emissão para o ar/não especificado	da queima de diesel de máquinas	Agri-footprint 5.0
CO₂	7.7411684	Fluxos elementares/Emissão para o ar/não especificado	da queima de diesel de máquinas	Agri-footprint 5.0
CO	0.011956	Fluxos elementares/Emissão para o ar/não especificado	da queima de diesel de máquinas	Agri-footprint 5.0
CH₄	0.00027084	Fluxos elementares/Emissão para o ar/não especificado	da queima de diesel de máquinas	Agri-footprint 5.0
NO₂	0.073078	Fluxos elementares/Emissão para o ar/não especificado	da queima de diesel de máquinas	Agri-footprint 5.0
N₂O	0.000062464	Fluxos elementares/Emissão para o ar/não especificado	da queima de diesel de máquinas	Agri-footprint 5.0
NMVOC, compostos orgânicos não metano	0.0068076	Fluxos elementares/Emissão para o ar/não especificado	da queima de diesel de máquinas	Agri-footprint 5.0

Emissões	Qde (kg)	Fluxo Elementar	Descrição	Fonte
Partículas, < 2.5 um	0.0034648	Fluxos elementares/Emissão para o ar/não especificado	da queima de diesel de máquinas	Agri-footprint 5.0
Partículas, > 2.5 um, e < 10um	0.000183	Fluxos elementares/Emissão para o ar/não especificado	da queima de diesel de máquinas	Agri-footprint 5.0
Emissão para o solo				
Fosforo	0.002879722	Fluxos elementares/Emissão para o solo/não especificado	de fertilizantes fosfatados	Struijs, Beusen, Zwart, & Huijbregts (2010)
Emissão para a água				
NO₃	1.0323	Fluxos elementares/Emissão para a água/não especificado	de fertilizante sintético	IPCC(2006)
NO₃	0.644357143	Fluxos elementares/Emissão para a água/não especificado	de fertilizante orgânico	IPCC(2006)
NO₃	0.318857143	Fluxos elementares/Emissão para a água/não especificado	de resíduos de colheita	IPCC(2006)

3.2.2 Análise de Ciclo de Vida do Etanol

Os insumos da produção de etanol consideradas na análise de ciclo de vida estão apresentadas na Tabela 3.4. As quantidades de cada matéria-prima foram referenciadas às quantidades utilizadas no processo de produção de etanol 1G-2G.

Tabela 3.4 – Insumos da produção de etanol

Componentes
Cana-de-açúcar
Água
Cal
Ácido Clorídrico
Ácido Sulfúrico
Ácido Fosfórico
Floculante
Amônia
Etileno Glicol
Hidróxido de Sódio
Enzima
Levedura

Dentre os fluxos elementares, foram consideradas na produção de etanol a produção de CO₂ biogênico produzido nas etapas de fermentação de C6 e C5 e da emissão de compostos oriundo da queima de bagaço de cana-de-açúcar, palha e resíduo sólido do etanol 2G na etapa de cogeração de energia.

Em relação à queima de bagaço, GREET (2020) dispõe de valores de referência para a queima de biomassa em caldeiras, os valores de emissões para a queima de palha e bagaço de cana-de-açúcar são apresentados na Tabela 3.5. Todos os valores foram utilizados no cálculo de emissões com exceção do CO₂ que foi baseado em dados de simulação.

Tabela 3.5 – Emissão referente à queima do bagaço e da palha

Emissões	kg/ton palha	kg/ton bagaço
VOC	8,274E-03	7,615E-03
CO	1,312E-01	1,207E-01
NOx	8,639E-01	7,951E-01
PM10	1,930E-02	1,776E-02
PM2.5	1,705E-02	1,569E-02
SOx	7,928E-01	7,296E-01

Emissões	kg/ton palha	kg/ton bagaço
BC	2,353E-03	2,165E-03
OC	5,558E-03	5,115E-03
CH₄	1,327E-01	1,221E-01
N₂O	8,216E-02	7,562E-02

Fonte: GREET (2020)

Dessa forma os fluxos elementares referentes às emissões estão apresentados na Tabela 3.6, sendo consideradas as emissões de CO₂ biogênico referentes às etapas de fermentação e a queima de palha, bagaço e resíduo sólido do etanol 2G.

Tabela 3.6 – Fluxos elementares das emissões

ElementaryFlows	ElementaryFlowPath1	ElementaryFlowPath2
Compostos orgânicos voláteis não metânicos	Emission para o ar	baixa densidade populacional
Monóxido de carbono, biogênico	Emission para o ar	baixa densidade populacional
Óxidos de nitrogênio	Emission para o ar	baixa densidade populacional
Partículas, < 10 um	Emission para o ar	baixa densidade populacional
Partículas, < 2,5 um	Emission para o ar	baixa densidade populacional
Dióxido de enxofre	Emission para o ar	baixa densidade populacional
Carbono negro	Emission para o ar	baixa densidade populacional
Carbono organico	Emission para o ar	baixa densidade populacional
Metano	Emission para o ar	baixa densidade populacional
monóxido de dinitrogênio	Emission para o ar	baixa densidade populacional
Dióxido de carbono	Emission para o ar	baixa densidade populacional

Fonte: OPEN_LCA

As quantidades de cada emissão estão referenciadas às correntes da simulação e variam de acordo com o cenário de simulação estudado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS DO INTERPOLADOR E ANÁLISE DO PROCESSO

Primeiramente, foram obtidos os resultados da variação do número de pratos da coluna AA1 e coluna D conforme os índices apontados na Tabela 3.1. Além disso, também se variou a temperatura e a concentração de carga. Foram gerados 1.836 pontos, que pela Figura 4.1 é possível visualizar a malha de inspeção gerada pelo ASPEN com alguns dos resultados e utilizada para o cálculo da interpolação.

Figura 4.1- Malha de inspeção

```
Nofinputs: 4
Lowerbounds: 25 6 348.15 0.065
Increments: 1 1 2.5 0.0025
Nofpoints: 4 3 9 17
InputUnits: , , K,
Nofoutputs: 15
OutputUnits: kW*h/kg, kW*h/kg, kW*h/kg, kW*h/kg, , kmol/kg, kmol/kg, kmol/kg, kmol/kg.

Output:
9.83E-02      2.88E-02      -1.32E-02      -6.99E-02      8.06E-01      4.84E-01
9.94E-02      3.05E-02      -1.35E-02      -7.25E-02      8.06E-01      4.83E-01
1.00E-01      3.23E-02      -1.38E-02      -7.52E-02      8.06E-01      4.81E-01
1.02E-01      3.40E-02      -1.41E-02      -7.78E-02      8.06E-01      4.79E-01
1.03E-01      3.58E-02      -1.44E-02      -8.04E-02      8.06E-01      4.77E-01
1.04E-01      3.76E-02      -1.47E-02      -8.31E-02      8.07E-01      4.75E-01
1.05E-01      3.94E-02      -1.49E-02      -8.57E-02      8.07E-01      4.73E-01
1.06E-01      4.12E-02      -1.52E-02      -8.83E-02      8.07E-01      4.71E-01
1.07E-01      4.30E-02      -1.55E-02      -9.10E-02      8.07E-01      4.70E-01
```

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados foram organizados em um arquivo de configuração do interpolador de forma que o mesmo se comunique com a biblioteca compartilhada do EMSO. Em seguida, foram analisados o comportamento do sistema para cada configuração estudada, conforme Tabela 4.1. Foi analisado o comportamento da vazão mássica e composição das correntes VAPPHE, S2, LIQPPHE, SECGRAD, VINASSE e PHLEGM, para cada cenário estudado conforme Tabela 11.

Tabela 4.1– Vazão e composição de etanol de cada corrente com a variação de pratos

Nº de pratos	VAPPHLE		S2		LIQPPHLE		SECGRAD		VINASSE		PHLEGM	
	kg/h	% et.	kg/h	% et.	kg/h	% et.	kg/h	% et.	kg/h	% et.	kg/h	% et.
26/47/7	303,2917	52,6226	92,67665	54,0365	91,23014	53,4569	1,446506	90,5914	1604,032	0,02	171,7042	0,02
26/47/8	303,2917	52,6226	92,67665	54,0365	91,20783	53,4316	1,468823	91,5973	1604,032	0,02	171,7194	0,02
27/47/7	299,7422	53,2458	92,67399	54,0373	91,22759	53,4578	1,446444	90,5824	1607,584	0,02	168,1519	0,02
27/47/8	299,7422	53,2458	92,67399	54,0373	91,20528	53,4324	1,468714	91,5964	1607,584	0,02	168,1672	0,02
28/47/7	297,5138	53,6446	92,67235	54,0378	91,22594	53,4584	1,446355	90,5819	1609,814	0,02	165,9218	0,02
28/47/8	297,5137	53,6446	92,67235	54,0378	91,20364	53,4329	1,468655	91,5976	1609,814	0,02	165,9378	0,02

Fonte: Elaboração própria.

Pela Tabela 4.1, com o aumento do número de pratos da coluna AA1, verifica-se aumento da vazão de VINASSE, mantendo-se a sua composição. Isso ocorre porque aumentando-se o número de pratos ocorre maior retirada de água pelo fundo da coluna, mantendo-se a fração de etanol constante conforme especificação de projeto. Já a corrente de retirada lateral VAPPHILE reduz a sua vazão mássica e aumenta a sua concentração de etanol, mantendo-se a quantidade recuperada de etanol constante em relação à carga conforme especificação de projeto. Isso pode ser explicado pelo aumento da retirada de água na coluna pela corrente VINASSE, já que a corrente S2 se mantém com vazão mássica e composição constante.

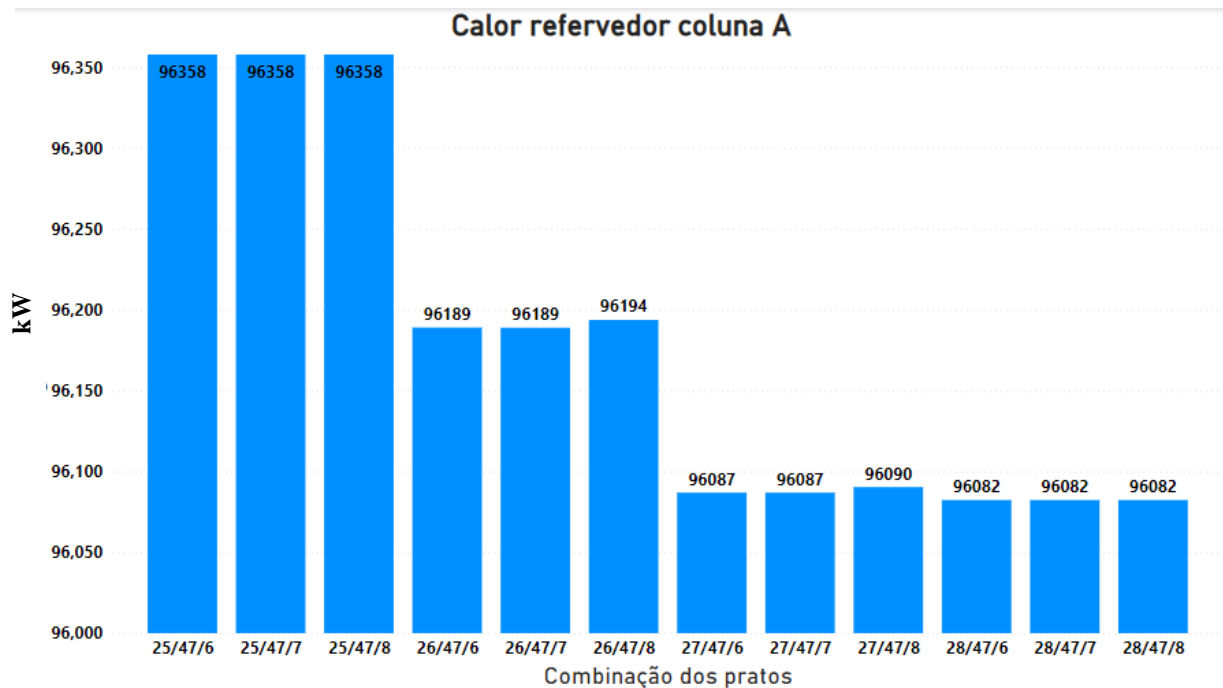
Em relação ao efeito do aumento de número de pratos da coluna AA1 na coluna B1, a alimentação da coluna B1 apresenta uma mesma quantidade de etanol, porém com menor quantidade de água. Isso reduz a vazão mássica de PHLEGM no fundo da coluna B1.

Já o aumento de número de pratos da coluna D, aumenta a composição de etanol e a vazão mássica da corrente SECGRAD e reduz ligeiramente a vazão mássica de LIQPPHLE mantendo-se a sua composição. Isso também impacta ligeiramente a vazão mássica de PHLEGM.

Em relação às cargas térmicas das colunas, foram analisados os comportamentos da carga térmica do refeedor da coluna AA1, carga térmica do refeedor da coluna B1, carga térmica do condensador da coluna B1 e da carga térmica do condensador da coluna D em relação aos cenários estudados.

Como pode ser visto nas Figuras 4.2 e 4.3, o calor do refeedor da coluna AA1 e B são inversamente proporcionais em relação à variação do número de pratos na coluna AA1, em relação à variação do número de pratos da coluna D os calores se mostraram constantes. Ou seja, o número de pratos da D, responsável pela geração de etanol de segunda, não tem relação direta com o consumo de calor do refeedor na coluna AA1 e B1.

Figura 4.2– Carga térmica do refeedor na coluna AA1 variando número de pratos

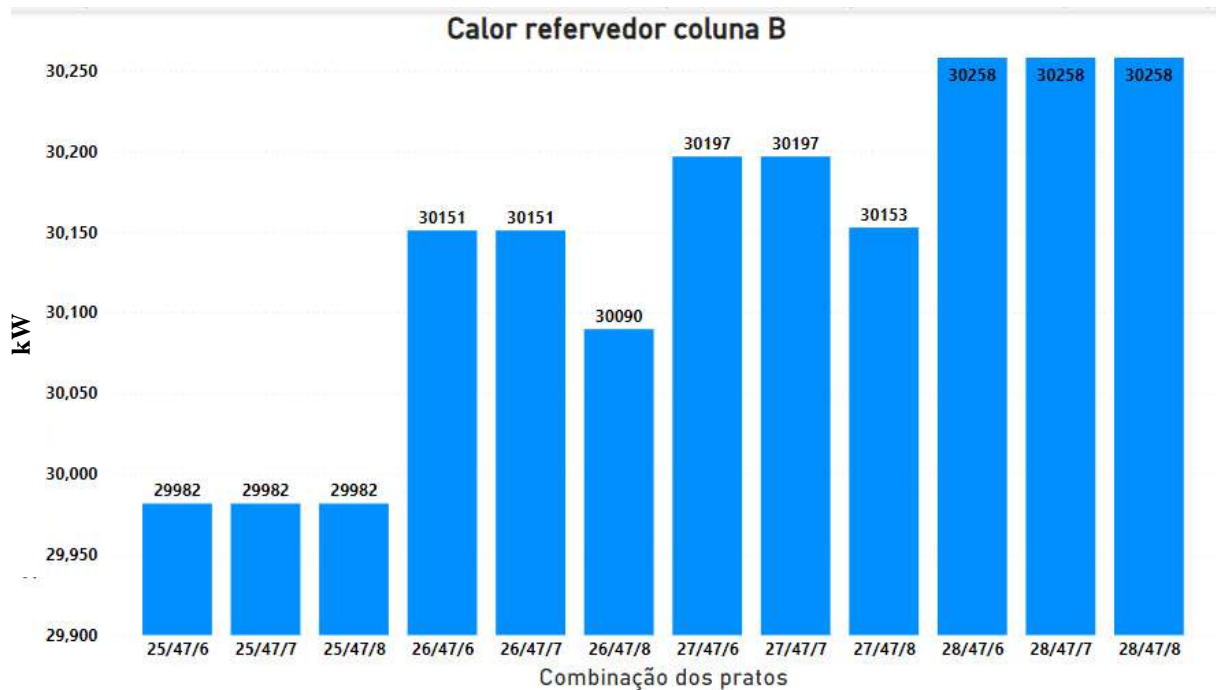


Fonte: Elaboração própria.

Quando se aumenta o número de pratos na coluna D, a vazão da LIQPHLE diminui, como mostra a Tabela 4.1, conseqüentemente, diminui a carga térmica da B1. Já quando se aumenta o número de pratos da coluna AA1, a separação do sistema água etanol é facilitada reduzindo-se a carga térmica da coluna AA1.

Em relação ao refeedor da coluna B1, conforme aumenta o número de pratos de AA1, aumenta a concentração de etanol na corrente de VAPPHLE e, conseqüentemente, requer um aumento de carga térmica do refeedor da coluna B1 para atender as especificações da concentração de etanol no fundo de 0,02%, conforme mostra a Figura 4.3.

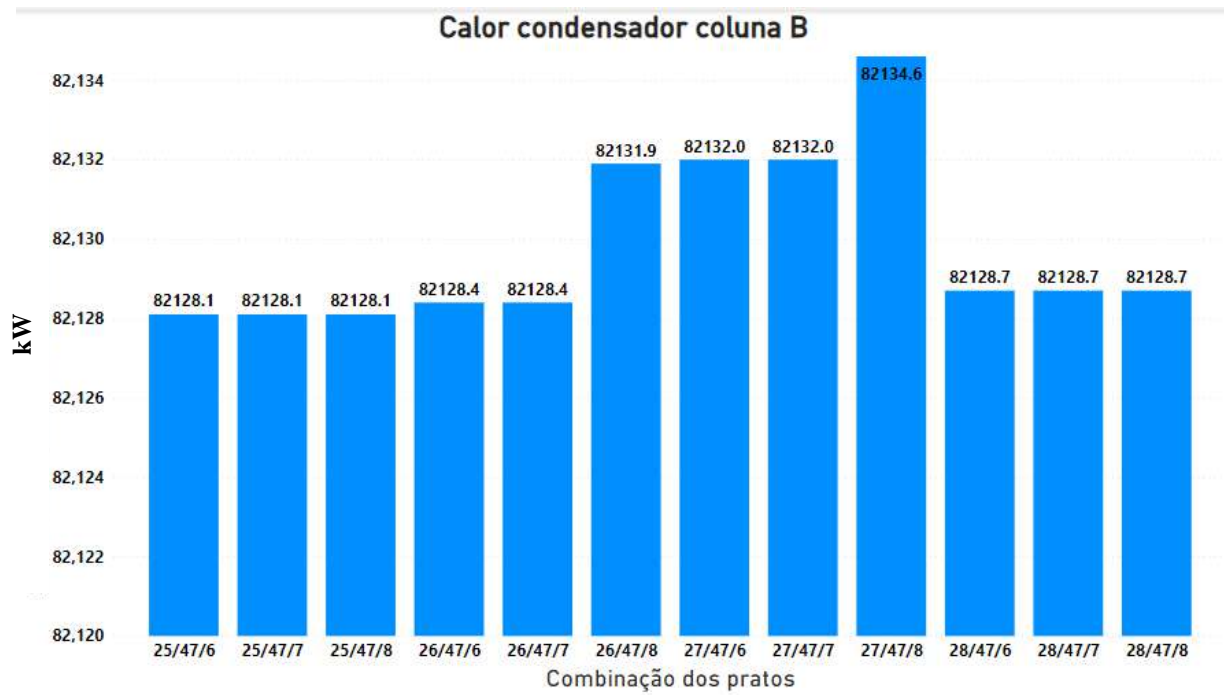
Figura 4.3-Carga térmica do refervedor na coluna B1 variando número de pratos.



Fonte: Elaboração própria.

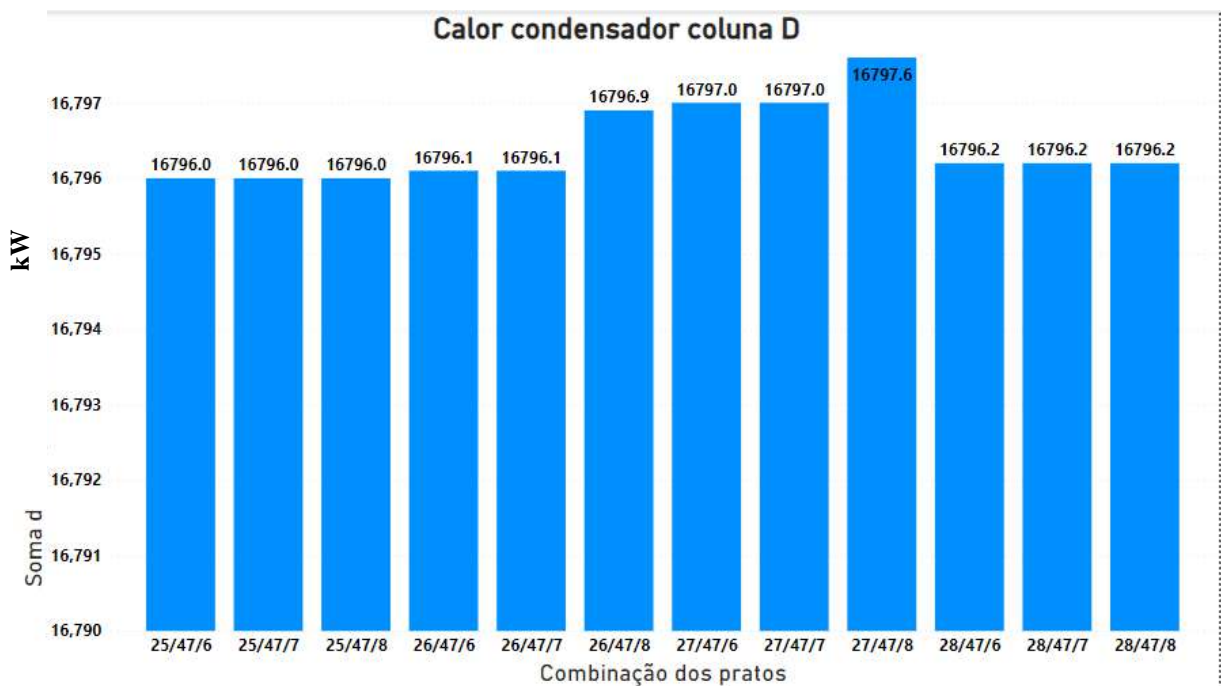
Contudo, as cargas térmicas dos condensadores das colunas B e D para as configurações 26/47/8, 27/47/6, 27/47/7 e 27/47/8 são maiores do que as dos demais cenários estudados, sendo que a configuração 27/47/8 apresenta o maior consumo de todos. Ao aumentar a carga térmica no refervedor, aumentou-se a vazão interna de vapor na coluna B1, requerendo maior carga térmica no condensador para condensar essa maior vazão, conforme ilustram as Figuras 4.4 e 4.5.

Figura 4.4– Carga térmica do condensador na coluna B1 variando número de pratos.



Fonte: Elaboração própria.

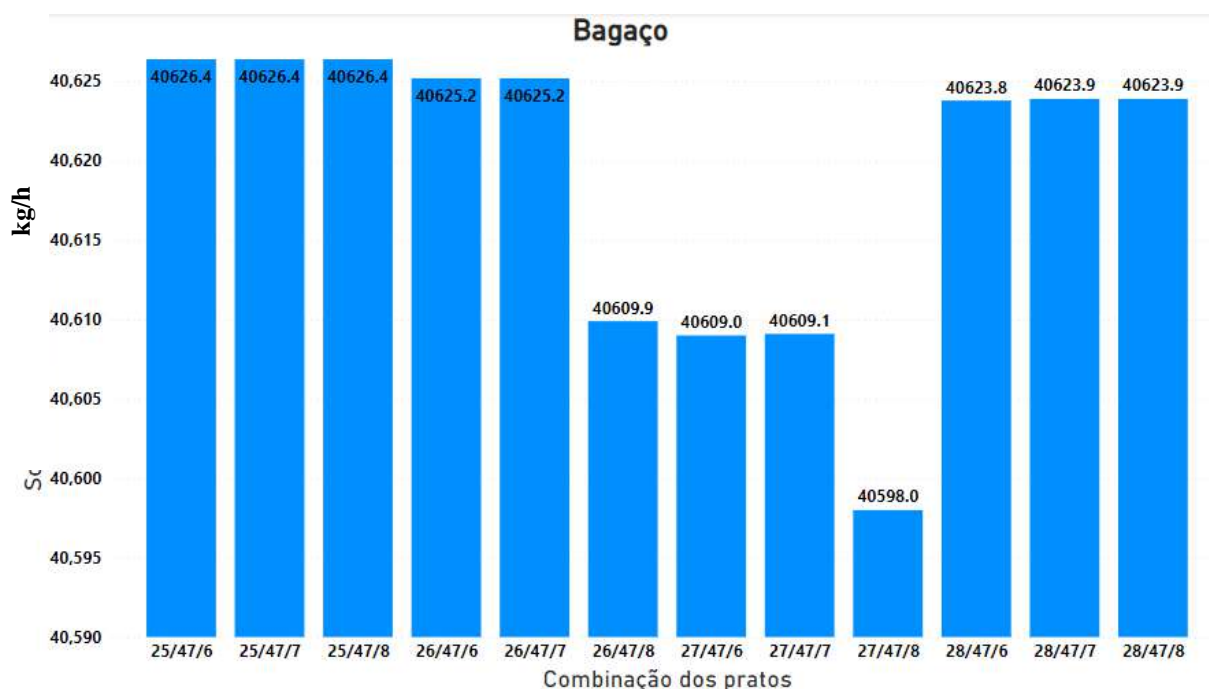
Figura 4.5– Carga térmica do condensador na coluna D variando número de pratos.



Fonte: Elaboração própria.

Como explicado, o bagaço oriundo da produção de etanol 1G é usado como matéria-prima para a produção de etanol 2G e para produção de bioeletricidade. Ou seja, quanto menor o consumo de vapor da planta, maior é a quantidade de bagaço excedente está sendo destinada a produção de etanol 2G e, conseqüentemente, maior será o efluente 2G. A Figura 4.6 apresenta a quantidade de bagaço de cana-de-açúcar queimado na seção de cogeração de energia.

Figura 4.6- Quantidade de bagaço queimado variando número de pratos.



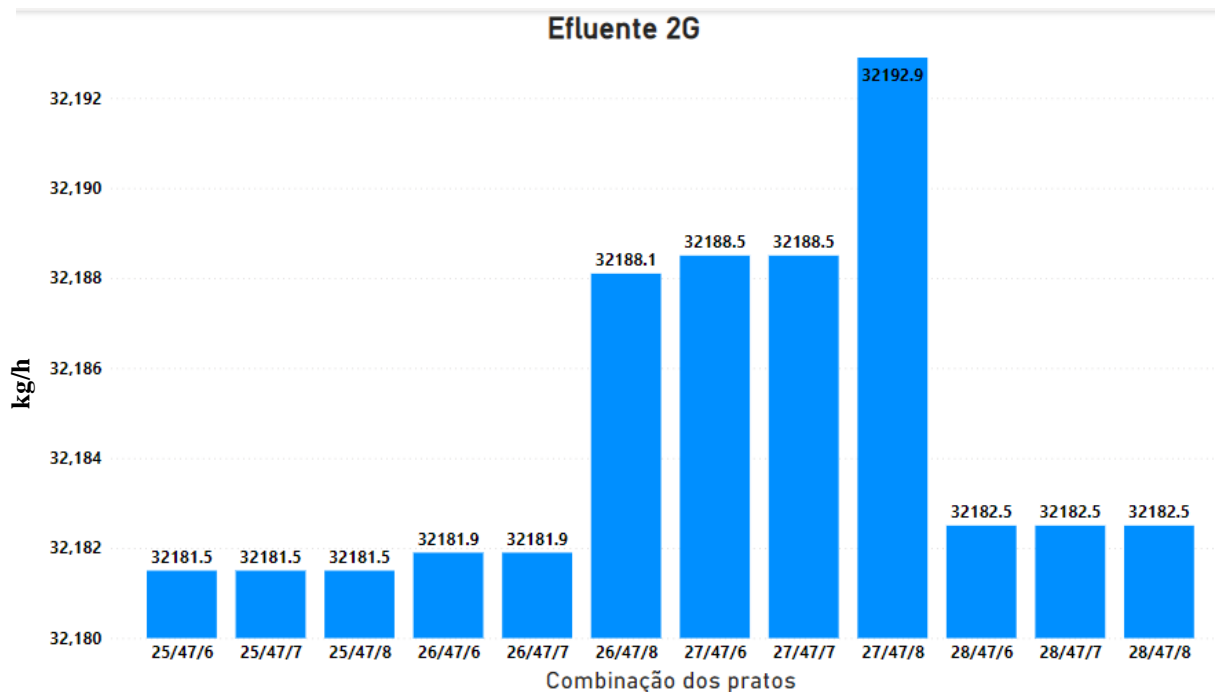
Fonte: Elaboração própria.

Pela Figura 4.6, verifica-se que os cenários com 25 e pratos e 28 pratos na coluna AA1 apresentam maiores consumos de bagaço. Isso pode ser explicado pelo maior consumo de vapor no refervedor na coluna AA1 com a configuração de 25 pratos e maior consumo de vapor na coluna B1 com a configuração de 28 pratos na coluna AA1. Nas configurações com 26/47/8, 27/47/7 e 27/47/8, o consumo de vapor e, conseqüentemente, de bagaço nas seções de cogeração foram reduzidas e disponibilizando-se uma quantidade de bagaço maior para a produção de etanol 2G, em especial a configuração 27/47/8, contudo, essa variação é de menos de 0,07%.

Dessa forma, quando comparamos o impacto da variação do número de pratos nas colunas AA1 e D na produção de etanol 2G, é possível ver que a coluna AA1 com 27 pratos e a D com 8 produz uma maior quantidade de efluente de bagaço 2G, pois possui menor carga

térmica como é possível verificar na Figura 19.

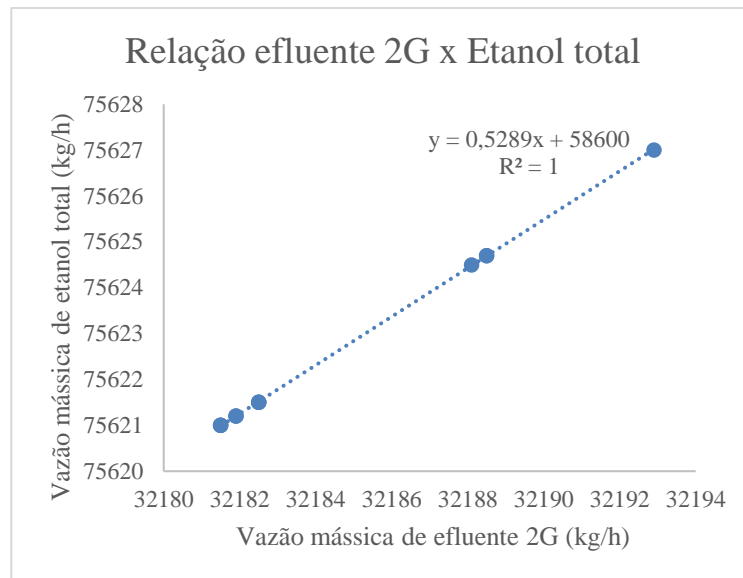
Figura 4.7– Quantidade de efluente 2G variando número de pratos.



Fonte: Elaboração própria.

Na produção de etanol 2G, parte do etanol é produzido de açúcares C5 e parte é produzido de açúcares C6. Como a fermentação dos açúcares C6 ocorre conjuntamente com o etanol de 1ª geração, a quantidade de etanol de segunda geração produzida não é obtida diretamente. Contudo, é possível verificar a quantidade etanol 2G produzido fazendo uma relação do etanol total e efluente 2G com os valores obtidos com a variação dos números de pratos.

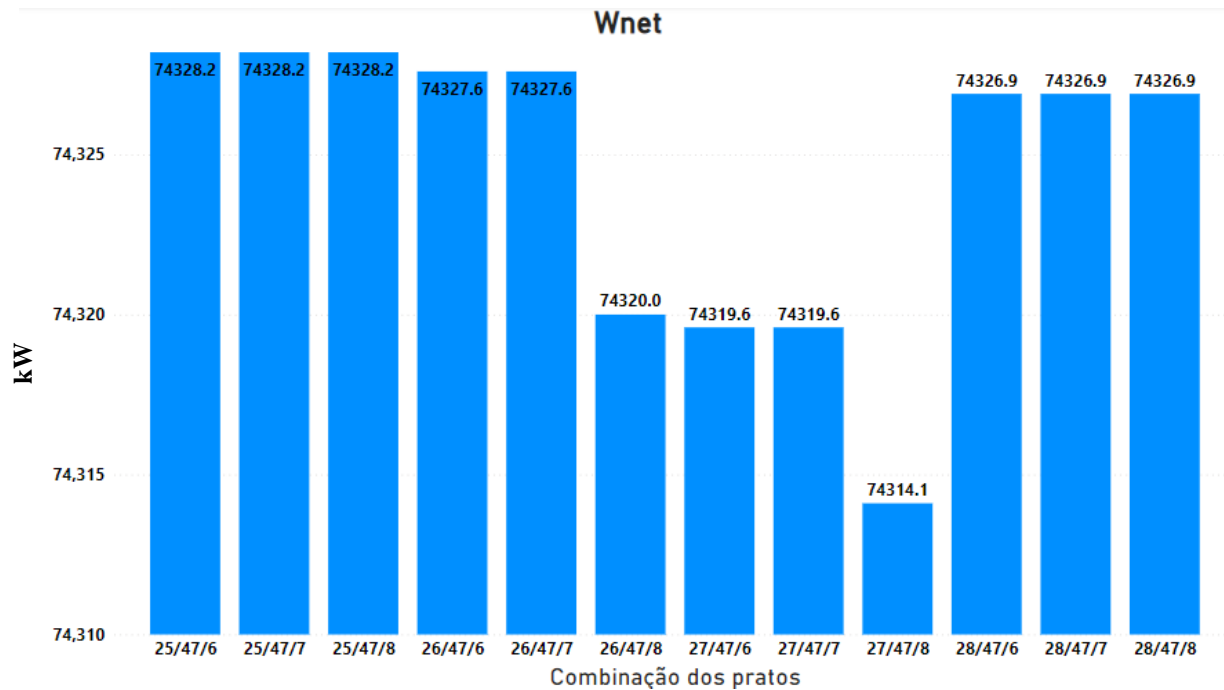
Figura 4.8- Gráfico de relação efluente 2G x etanol total.



Fonte: Elaboração própria.

A regressão obtida através dos dados da Figura 4.8, considerando o valor de efluente 2G igual a zero, é possível estimar que a produção de etanol 1G é de 58600 kg/h. Em relação ao excedente de produção de energia, os cenários com maior consumo de vapor e maior queima o bagaço apresentam maior produção de bioeletricidade. Consequentemente, cenários com menor consumo de vapor, maior produção de etanol 2G e maior quantidade de efluente 2G geram menor quantidade de bioeletricidade como mostra a Figura 4.9.

Figura 4.9– Quantidade de energia gerada variando número de pratos.



Fonte: Elaboração própria.

A seguir apresentam-se os resultados da análise de ciclo de vida para os cenários estudados.

4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA.

Primeiramente, foi realizada a análise de ciclo de vida da cana-de-açúcar. Os resultados da análise de ciclo de vida são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Análise dos fatores de caracterização da cana-de-açúcar.

Fator	Quantidade	Unidade
Ecotoxicidade terrestre	1,66E-06	kg 1,4-DB eq.
Depleção abiótica	8,84E+09	kg Sb eq. per kg
Eutrofização	0,000302727	kg PO 4 eq. per kg
Acidificação	0,000384033	kg SO 2 eq. per kg
Ecotox aquático de água doce.	0,000330245	kg 1,4-DB eq.
Ecotoxicidade aquática marinha	0,483217283	kg 1,4-DB eq. per kg
Oxidação fotoquímica	5,61E-07	kg C2H4 eq. per kg
Toxicidade humana	0,000681121	kg 1,4-DB eq. per kg
Depleção abiótica (combustíveis fósseis)	0,016241074	MJ per kg
Aquecimento global (GWP100a)	0,019905346	kg CO ₂ eq. per kg
Destrução da camada de ozônio	5,57E-11	kg CFC-11 eq. per kg

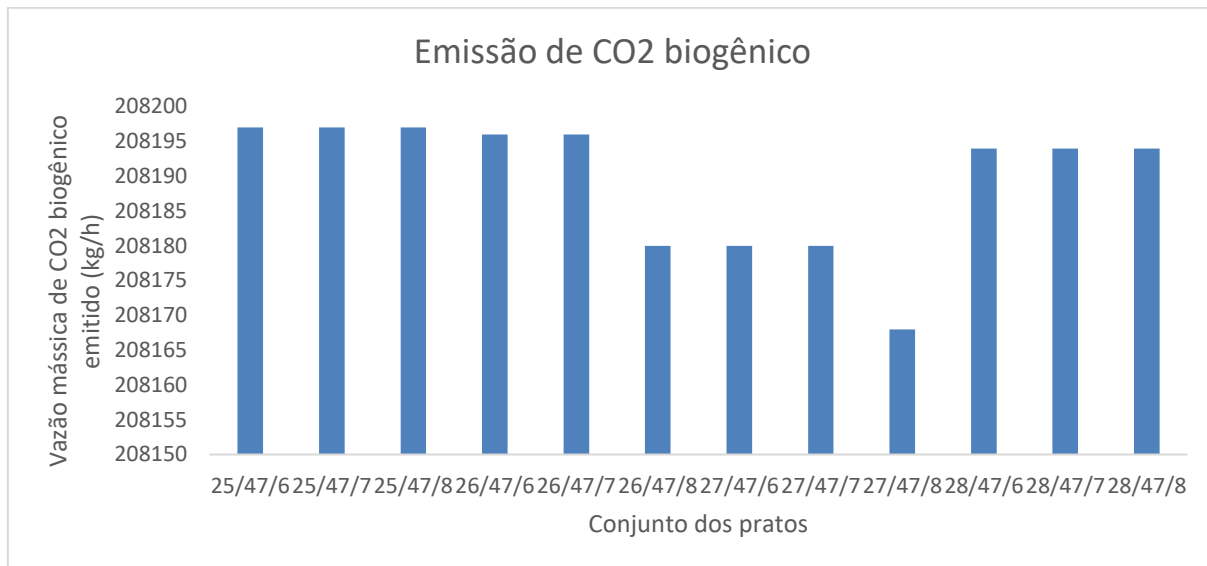
Os resultados da análise de ciclo de vida para a cana-de-açúcar foram de 0,0199 kg de CO₂ equivalente por quilo de cana, enquanto SEABRA et al. (2011) consideraram 15g CO₂ equivalente por MJ de etanol, o que equivale a 0,027 kg de CO₂ equivalente por quilo de cana se desconsiderar a queima de emissões no campo. Em seus estudos, SEABRA et al. (2011) consideram para o cálculo de emissão da cana-de-açúcar: emissões devido ao uso de insumos agrícolas, transporte da cana, uso de maquinários agrícolas e emissões do solo devido à aplicação de fertilizantes, resíduos e calcário. PEREIRA et al. (2019) estimaram cerca de 10-15g CO₂ equivalente por MJ de etanol, o que equivale a 0,018-0,027 kg de CO₂ equivalente por quilo de cana. Verifica-se, portanto, que os valores encontrados para a emissão da produção da cana estão consistentes com dados da literatura.

Vale lembrar, contudo, que na análise de ciclo de vida da cana-de-açúcar não está sendo considerada a quantidade de CO₂ absorvida pela cana-de-açúcar da atmosfera. Dessa forma, as emissões de CO₂, oriundas de fontes biogênicas, apresentam impacto zero quando originadas da queima da cana-de-açúcar e do etanol.

Na produção de etanol de 1G-2G, foram avaliadas as emissões biogênicas, que estão relacionadas ao ciclo natural do carbono que pode ter origem na queima do bagaço e nas etapas

de fermentação de C6 e C5, conforme ilustra a Figura 4.10.

Figura 4.10– Emissão de CO₂ biogênico

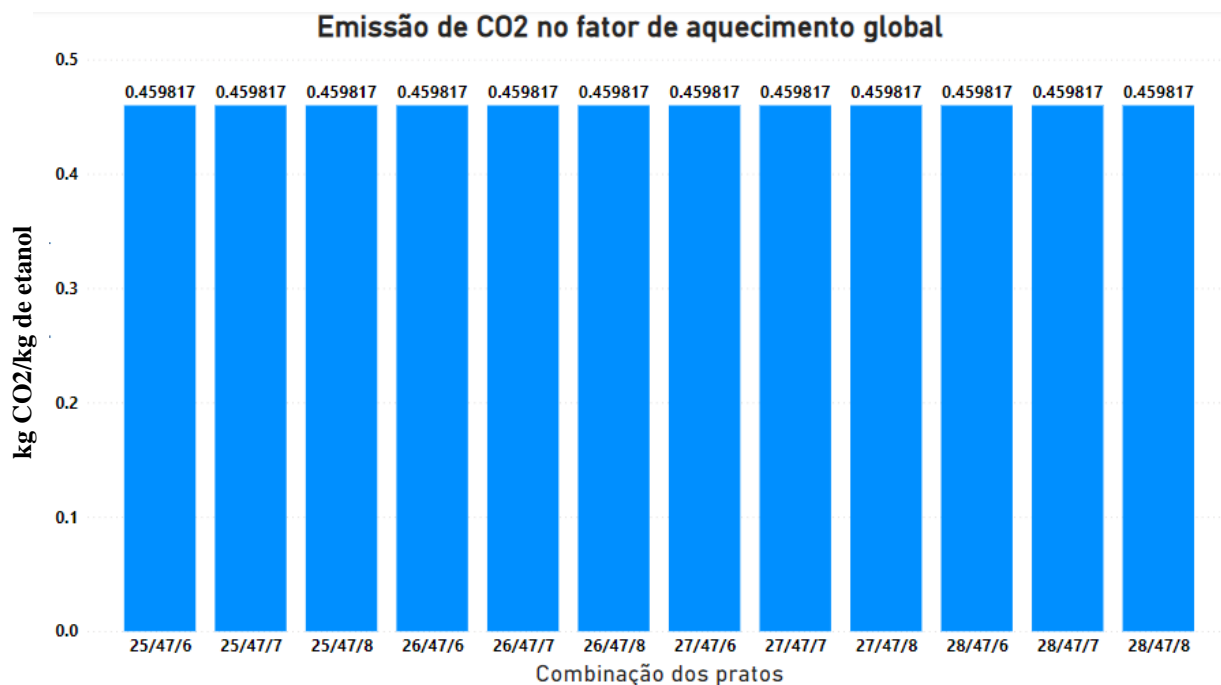


Fonte: Elaboração própria.

Apesar dos cenários, 26/47/8, 27/47/6, 27/47/7 e 27/47/8 apresentarem menor emissão de CO₂ biogênico, o CO₂ biogênico possui impacto zero na análise de ciclo de vida. Contudo, a menor produção de CO₂ biogênico nos cenários 26/47/8, 27/47/6, 27/47/7 e 27/47/8 da planta pode ser compensada futuramente com a queima do etanol nas etapas de consumo.

A Figura 4.10 apresenta os resultados da análise de ciclo de vida em kg de CO₂ equivalente por quilo de etanol para os cenários avaliados.

Figura 4.11- Emissão de CO₂ no fator de aquecimento global



Fonte: Elaboração própria.

Pela Figura 4.11, verifica-se que em termos de intensidade de carbono a variação do número de pratos na coluna AA1 e na coluna D não apresentou impacto significativo devido à emissão de CO₂ equivalente. Isso ocorre porque a intensidade de carbono vai considerar o total de emissões alocadas energeticamente.

Quando analisado os outros fatores de caracterização do conjunto de pratos, todos se mantiveram constantes, independentemente do número de pratos, como mostra a Tabela 13. Os valores de “r” correspondem aos resultados dos fatores de caracterização seguindo a ordem:

1. Aquecimento global (GWP100a); kg CO₂ eq. por kg de etanol
2. Oxidação fotoquímica; em kg C₂H₄ eq. por kg de etanol
3. Toxicidade humana; em kg 1,4-DB eq. por kg de etanol
4. Depleção abiótica; em kg Sb eq. por kg de etanol
5. Eutrofização; em kg PO₄ eq. por kg de etanol
6. Depleção abiótica (combustíveis fósseis); em MJ por kg de etanol
7. Ecotoxicidade aquática marinha; em kg 1,4-DB eq. por kg de etanol
8. Destruição da camada de ozônio (ODP); em kg CFC-11 eq. por kg de etanol

9. Ecotoxicidade terrestre; em kg 1,4-DB eq.
10. Acidificação; em kg SO₂ eq. por kg de etanol
11. Ecotox aquático de água doce; em kg 1,4-DB eq.

Tabela 4.3 - Emissão de CO₂ pelos fatores de caracterização.

Pratos	r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	r8	r9	r10	r11
	kg CO2 eq. per kg	kg C2H4 eq. per kg	kg 1,4-DB eq. per kg	kg Sb eq. per kg	kg PO4 eq. per kg	MJ per kg	kg 1,4-DB eq. per kg	kg CFC-11 eq. per kg	kg CFC-11 eq. per kg	kg SO2 eq. per kg	kg 1,4-DB eq.
25/47/6	4,598170E- 01	8,799550E- 05	3,170870E- 01	7,521620E- 06	4,060510E- 03	2,343090E+00	5,003740E+02	1,974790E- 08	2,047640E- 03	6,616240E- 03	2,703230E- 01
25/47/7	4,598170E- 01	8,799550E- 05	3,170870E- 01	7,521620E- 06	4,060510E- 03	2,343090E+00	5,003740E+02	1,974790E- 08	2,047640E- 03	6,616240E- 03	2,703230E- 01
25/47/8	4,598170E- 01	8,799550E- 05	3,170870E- 01	7,521620E- 06	4,060510E- 03	2,343090E+00	5,003740E+02	1,974790E- 08	2,047640E- 03	6,616240E- 03	2,703230E- 01
26/47/6	4,598170E- 01	8,799550E- 05	3,170880E- 01	7,521620E- 06	4,060500E- 03	2,343100E+00	5,003750E+02	1,974790E- 08	2,047660E- 03	6,616230E- 03	2,703240E- 01
26/47/7	4,598170E- 01	8,799550E- 05	3,170870E- 01	7,521620E- 06	4,060510E- 03	2,343090E+00	5,003740E+02	1,974790E- 08	2,047640E- 03	6,616240E- 03	2,703230E- 01
26/47/8	4,598170E- 01	8,799550E- 05	3,170870E- 01	7,521620E- 06	4,060510E- 03	2,343090E+00	5,003740E+02	1,974790E- 08	2,047640E- 03	6,616240E- 03	2,703230E- 01
27/47/6	4,598170E- 01	8,799550E- 05	3,170870E- 01	7,521620E- 06	4,060510E- 03	2,343090E+00	5,003740E+02	1,974790E- 08	2,047640E- 03	6,616240E- 03	2,703230E- 01
27/47/7	4,598170E- 01	8,799550E- 05	3,170880E- 01	7,521620E- 06	4,060500E- 03	2,343100E+00	5,003750E+02	1,974790E- 08	2,047660E- 03	6,616230E- 03	2,703240E- 01
27/47/8	4,598170E- 01	8,799550E- 05	3,170870E- 01	7,521620E- 06	4,060510E- 03	2,343090E+00	5,003740E+02	1,974790E- 08	2,047640E- 03	6,616240E- 03	2,703230E- 01
28/47/6	4,598170E- 01	8,799550E- 05	3,170870E- 01	7,521620E- 06	4,060510E- 03	2,343090E+00	5,003740E+02	1,974790E- 08	2,047640E- 03	6,616240E- 03	2,703230E- 01
28/47/7	4,598170E- 01	8,799550E- 05	3,170870E- 01	7,521620E- 06	4,060510E- 03	2,343090E+00	5,003740E+02	1,974790E- 08	2,047640E- 03	6,616240E- 03	2,703230E- 01

Como a maior parte das emissões de CO₂ equivalente é de origem biogênica e possui impacto zero, as variações no consumo de vapor e produção de bioeletricidade vão impactar pouco na avaliação de ciclo de vida, pois, o aumento de emissão ocasionado pelas emissões de metano e monóxido de dinitrogênio, na queima do bagaço, palha e resíduo do etanol 2G, são compensados pelo aumento do conteúdo energético dos produtos etanol e bioeletricidade.

No presente trabalho a análise de ciclo de vida do etanol anidro para o fator de caracterização de mudanças climáticas foi avaliada em 16,2704 g CO₂ eq/MJ para o etanol 1G-2G. Enquanto as emissões de GEE estimadas em SEABRA et al. (2011) para o etanol anidro é de 21,3 g CO₂ eq/MJ de etanol 1G. E entre 21.9-22.5 para o etanol 1G-2G (CARPIO et al., 2021).

Dessa forma, o projeto do número de pratos das colunas AA1 e D possui uma consequência interessante em relação à engenharia de processos. As configurações 26/47/8, 27/47/6, 27/47/7 e 27/47/7 apresentam menor produção de bioeletricidade, contudo maior produção de etanol 2G e menor emissão de CO₂ biogênico. As demais apresentam maior produção de bioeletricidade e menor produção de etanol 2G e maiores emissões de CO₂ biogênico. Contudo, a intensidade de carbono emitido durante o ciclo de vida não obteve uma diferença significativa entre a maior produção de bioeletricidade e a produção de etanol. Dessa forma, uma posterior análise econômica pode trazer mais informações em termos financeiros quanto à melhor configuração.

Contudo, CARPIO et al. (2021) mostraram que os cenários de produção de maior bioeletricidade apresentavam maior retorno econômico do que os cenários de produção de etanol 2G. Dessa forma, é possível que o cenário 25/47/6 apresente melhor retorno econômico, pois apresenta colunas com menor tamanho, maior produção de bioeletricidade e com a mesma intensidade de carbono em termos de emissão de CO₂ equivalente dos demais cenários.

5 CONCLUSÃO

Foi realizado um estudo do impacto do dimensionamento das colunas de destilação da seção de produção de etanol hidratado 1G-2G no consumo de bagaço, vapor e geração de etanol 2G. Como resultados, verificou-se que os cenários dos números de pratos das três colunas de destilação 26/47/8, 27/47/6, 27/47/7 e 27/47/7 apresentaram menor consumo de vapor, de bagaço e maiores produções de etanol 2G. Já os outros cenários apresentaram maior consumo de vapor, de bagaço e menores produções de etanol 2G. Verifica-se um dualismo entre maiores produções de bioeletricidade e maiores produções de etanol 2G.

Foi realizada uma análise de ciclo de vida da produção de cana-de-açúcar para a categoria CML-Baseline encontrando na categoria de aquecimento global 19,9 g de CO₂ equivalente por kg de cana produzida. Já a produção de etanol integrado 1G-2G, encontrou-se 16,2704 g CO₂ equivalente por MJ de energia produzida.

Foi realizada uma análise de ciclo de vida dos cenários estudados. Não foi identificada no ciclo de vida variações significativas em relação à emissão dos cenários estudados. Contudo, foi possível verificar menor emissão de CO₂ biogênico nos cenários 26/47/8, 27/47/6, 27/47/7 e 27/47/8, justamente os cenários que apresentam maiores produções de etanol 2G.

Após as discussões acima, é possível chegar a conclusão que para a determinação do número de pratos ideal é necessário levar em consideração o produto de maior relevância para o processo em questão. Segundo CARPIO et al. (2021) a produção de bioeletricidade na biorefinaria 1G-2G leva a melhor desempenho econômico. Dessa forma, é possível inferir que o cenário 25/47/6 apresente melhor retorno econômico, pois apresenta colunas com menor tamanho, maior produção de bioeletricidade e com a mesma intensidade de carbono em termos de emissão de CO₂ equivalente dos demais cenários.

6 TRABALHOS FUTURO

Realizar uma análise econômica para validar a suposição de que o cenário com 25/47/6 pratos tenha melhor retorno econômico;

Avaliar o prato ótimo de entrada das correntes na Coluna B1;

Entender mais afundo os impactos do CO₂ biogênico;

Trabalhar com uma variação maior de número de pratos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE NETO, Ataíde S.; SECCHI, Argimiro Resende; CAPRON, Bruno D.O.; ROCHA, Antônio; LOUREIRO, Luciana N.; VENTURA, Patricia R. **Development of a predictive emissions monitoring system using hybrid models with industrial data.** Computer Aided Chemical Engineering. Volume 51, Pages 1387-1392, 2022.

BEHERA, Shuvashish; ARORA, Richa; NANDHAGOPAL, N.; KUMAR, Sachin. **Importance of chemical pretreatment for bioconversion of lignocellulosic biomass.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 36, p. 91-106, 2014.

BICCA, Gerson Balbueno.; SECCHI, Argimiro Resende.; WADA, Keiko. **Modelagem estruturada de trocadores de calor casco e tubos.** In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA. Santos, 2006.

BONOMI, Antonio.; MARIANO, Adriano Pinto.; JESUS, Charles Dayan Farias de.; FRANCO, Henrique Coutinho Junqueira.; CUNHA, Marcelo Pereira.; DIAS, Marina Oliveira de Souza.; CHAGAS, Mateus Ferreira.; CAVALETT, Otávio.; MANTELATTO, Paulo Eduardo.; MACIEL FILHO; Rubens., JUNQUEIRA; Tássia Lopes, CARDOSO, Terezinha de Fátima. **The Virtual Sugarcane Biorefinery (VSB): 2011 Report.** Brazilian Bioethanol Science and Technology Laboratory (CTBE), Technological Assessment Program (PAT), Internal Report. Campinas, 2012.

CARPIO, R.R., SECCHI, S.G., BARROS, R.O., (...), BON, E.P.S., SECCHI, A.R. **Techno-economic evaluation of second-generation ethanol from sugarcane bagasse: Commercial versus on-site produced enzymes and use of the xylose liquor.** Journal of Cleaner Production. Volume 369, 1 October 2022.

CARPIO, Roymel Rodríguez. **Otimização do processo de produção de etanol de segunda geração em um sistema integrado à primeira geração.** 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

CARPIO, Roymel Rodríguez; MIYOSHI, Simone de Carvalho; ELIAS, Andrew Milli;

FURLAN, Felipe Fernando; GIORDANO, Roberto de Campos; SECCHI, Argimiro Resende. **Multi-objective optimization of a 1G-2G biorefinery: A tool toward economic and environmental viability.** Journal of Cleaner Production. v. 284, 2021.

CARRANZA-ABAID, A., Jakobsen, J.P. **Neural network programming: Integrating first principles into machine learning models.** Computers and Chemical Engineering. Volume 163, July 2022.

CUTLIP, Michael.; HWALEK, John.; NUTTALL, Eric.; SHACHAM, Mordechai.; BRULE, Joseph.; WIDMANN, John.; HAN, Tae.; FINLAYSON, Bruce.; ROSEN, Edward.; TAYLOR, Ross. **A collection of 10 numerical problems in Chemical Engineering solved by various mathematical software packages.** Computer Applications in Engineering Education. v.6, p.169-180, 1998.

DIAS, Marina Oliveira de Souza. **Desenvolvimento e otimização de processos de produção de etanol de primeira e segunda geração e eletricidade a partir da cana-de-açúcar.** Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2011.

DIAS, Marina Oliveira de Souza. **Simulação do processo de produção de etanol a partir do açúcar e do bagaço, visando a integração do processo e a maximização da produção de energia e excedentes do bagaço.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2008.

DOS SANTOS ROCHA, Martha Suzana R.; ALMEIDA, Renata Maria R. G.; CRUZ, Antonio José Gonçalves. **Evaluation of energy potential of the agroindustrial residue from different Brazilian regions.** Engevista. v. 19, p. 217-235, 2017.

DOS SANTOS ROCHA, Martha Suzana R.; Pratto, Bruna; JÚNIOR, Ruy de Sousa; ALMEIDA, Renata Maria Rosas Garcia; CRUZ, Antonio José Gonçalves da. **A kinetic model for hydrothermal pretreatment of sugarcane straw.** Bioresource Technology, v. 228, p. 176–185, 2017.

EGGLESTON, Simon; BUENDIA, Leandro; MIWA, Kyoko; NGARA, Todd; TANABE, Kiyoto. 2006. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Institute for Global Environmental Strategies (IGES). Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol1.html/>. Acesso em: 09/10/2022.

FURLAN, Felipe F; FILHO, Renato Tonon; PINTO, Fabio HPB; COSTA, Caliane BB; CRUZ, Antonio JG; GIORDANO, Raquel LC; GIORDANO, Roberto C. **Bioelectricity versus bioethanol from sugarcane bagasse: is it worth being flexible?** *Biotechnology for Biofuels* v. 6, p. 142, 2013.

FURLAN, Felipe Fernando. **Desenvolvimento de Ambiente integrado para simulação e otimização estática da produção de etanol a partir de bagaço de cana-de-açúcar por rota bioquímica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, 2012.

FURLAN, Felipe Fernando.; COSTA, Caliane Bastos Borba.; FONSECA, Gabriel de Castro.; SOARES, Rafael de Pelegrini.; SECCHI, Argimiro Resende.; CRUZ, Antonio José Gonçalves.; GIORDANO, Roberto de Campos. **Assessing the production of first and second generation bioethanol from sugarcane through the integration of global optimization and process detailed modeling**. *Computers & Chemical Engineering*. v.43, p.1–9, 2012.

FURLAN, Felipe Fernando.; LINO, Anderson Rodrigo de Andrade.; MATUGI, Karina.; CRUZ, Antonio José Gonçalves.; SECCHI, Argimiro Resende.; GIORDANO, Roberto de Campos. **A simple approach to improve the robustness of equation-oriented simulators: Multilinear look-up table interpolators**. *Computers & Chemical Engineering*, v. 86, p. 1-4, 2016.

GESSER., Rodrigo S; SARTORI, Rafael; DAMO, Thaise P.; VETTORAZZO, Carolina M.; BECKER, Leandro B.; LIMA, Daniel M.; LIMA, Marcelo L. de; RIBEIRO, Leonardo D.; CAMPOS, Mario C.M.M.; NORMEY-RICO, Julio E. **Advanced control applied to a gas compression system of an offshore platform: From modeling to related system infrastructure**. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. Volume 208, Part B, January 2022.

GRASSI, M. C. B.; PEREIRA, G. A. G. **Energy-cane and RenovaBio: Brazilian vectors to boost the development of Biofuels**. *Industrial crops and products*, v. 129, p. 201-205, 2019.

GUINÉE, J.B.; GORRÉE, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; KONING, A. DE; OERS, L. VAN; WEGENER SLEESWIJK, A.; SUH, S.; UDO DE HAES, H.A.; BRUIJN, H. DE; DUIN, R. VAN; HUIJBREGTS, M.A.J. **Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards**. I: LCA in perspective. Iia: Guide. Iib: Operational annex. III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 692 p. 1-692, 2002.

LINO, Anderson Rodrigo de Andrade. **Interpoladores multilíneares como metamodelos: Integração à simulação de biorrefinarias no ambiente EMSO**. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

LONGATI, Andreza Aparecida. **Implementação de unidade de processo para geração de energia empregando vinhaça e integração na biorrefinaria de produção de etanol**. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

MITTAL, Ashutosh; CHATTERJEE, Siddharth G.; SCOTT, Gary M.; AMIDON, Thomas E. **Modeling xylan solubilization during autohydrolysis of sugar maple wood meal: Reaction kinetics**. *Holzforschung*, v. 63, p. 307-314, 2009.

MIYOSHI, Simone; SECCHI, Argimiro. **Relatório Final – Bolsista Pós-doutorado Ferramenta on-line para Monitoramento de Emissões dos Gases de Efeito Estufa e de Cálculo de Crédito de Carbono** - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

MYHRE, G., SHINDELL, D., BRÉON, F.-M., COLLINS, W., FUGLESTVEDT, J., HUANG, D., KOCH, J., LAMARQUE, F., LEE, D., MENDOZA, B., NAKAJIMA, T., ROBOCK, A., STEPHENS, G., TAKEMURA, T., ZHANG, H., 2013: **Anthropogenic and Natural**

Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf. Acesso em: 10/10/2022.

MOSIER, Nathan.; WYMAN, Charles.; DALE, Bruce.; ELANDER, Richard.; LEE, Yoon.Y.; HOLTZAPPLE, Mark.; LADISCH, Michael. **Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass**. *Bioresource Technology*. v. 96, p. 673-686, 2005.

MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS NO ESTADO DE SÃO PAULO. 2014. Governo Do Estado De São Paulo Secretaria Do Meio Ambiente. 2ª Edição. <https://smastr16.blob.core.windows.net/cea/2014/11/15-mudancas-climaticas1.pdf>. Acesso em: nov. 2022.

NELLES, Oliver. **Linear, polynomial, and look-up table models**. *Nonlinear System Identification*. Springer Berlin Heidelberg. p. 209-238, 2001.

OpenLCA Nexus, your source for LCA and sustainability data. Berlin, Alemanha. Disponível em: <https://nexus.openlca.org/about>. Acesso em: nov. 2022.

PEREIRA, Lucas Rodrigues.; CAVALETT, Otávio.; BONOMIA, Antonio Maria Francisco Luiz Jose.; ZHANG, Yimin.; WARNERD, Ethan; CHUM, Helena Li. **Comparison of biofuel life-cycle GHG emissions assessment tools: The case studies of ethanol produced from sugarcane, corn, and wheat**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 110, p. 1-12, 2019.

PITARELO, Ana Paula. **Produção de etanol celulósico a partir do bagaço de cana prétratado por explosão a vapor**. Tese (Doutorado em Química Orgânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

ROCHA, George Jackson de Moraes.; GONÇALVES, Adilson Roberto.; OLIVEIRA, B. R.;

OLIVARES, E. G.; ROSSELL, Carlos Eduardo Vaz. **Steam explosion pretreatment reproduction and alkaline delignification reactions performed on a pilot scale with sugarcane bagasse for bioethanol production.** *Industrial Crops and Products*, v. 35, p. 274-279, 2012.

RODRIGUES, Rodolfo.; SOARES, Rafael de Pelegrini.; SECCHI, Argimiro Resende. **Coleção de 10 problemas numéricos típicos em engenharia química resolvidos com o simulador EMSO.** In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA. Recife, 2008.

SEABRA, Joaquim E. A.; MACEDO, Isaias C.; CHUM, Helena L.; FARONI, Carlos E.; SARTO, Celso A. **Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy.** *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. v. 5, p. 519-532, 2011.

SOARES, Rafael de Pelegrini.; SECCHI, Argimiro Resende. **EMSO: A New Environment for Modelling, Simulation and Optimisation.** *Computer Aided Chemical Engineering*. v. 14, p. 947-952, 2003.

STAUDT, Paulo Bettio; SOARES, Rafael de Pelegrini.; SECCHI, Argimiro Resende. **Dynamic simulation of reactive distillation processes to predict start-up behavior.** In: 8th IFAC SYMPOSIUM ON DYNAMICS AND CONTROL OF PROCESS SYSTEMS. v. 40, p. 285-290. Cancún, 2007.

STRUIJS, Jaap; DE ZWART, Dick; BEUSEN, Arthur; HUIJBREGTS, Mark. **Characterization factors for inland water eutrophication at the damage level in life cycle impact assessment.** *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2010.