

**SIMULAÇÃO DE UM PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA
GERAÇÃO A PARTIR DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR DE EL SALVADOR**

PABLO ANTONIO ALVARENGA VÁSQUEZ

Foz do Iguaçu
2026

**SIMULAÇÃO DE UM PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA
GERAÇÃO A PARTIR DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR DE EL SALVADOR**

PABLO ANTONIO ALVARENGA VÁSQUEZ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. César Adolfo Rodríguez Sotomonte

Foz do Iguaçu
2026

PABLO ANTONIO ALVARENGA VÁSQUEZ

**SIMULAÇÃO DE UM PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA
GERAÇÃO A PARTIR DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR DE EL SALVADOR:**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. César Adolfo Rodríguez Sotomonte
UNILA

Prof. Dr^a. Andréia Cristina Furtado
UNILA

Prof. Dr^a. Laís Gimenes Vernasqui
UNILA

Foz do Iguaçu, 8 de julho de 2026

Dedico este trabalho a minha mãe, Julia del Carmen Vásquez Mendoza, meu irmão, Roberto Carlos Alvarenga Vásquez, e minha amada Família Vásquez Mendoza.

O fracasso é uma informação. Nós o rotulamos de fracasso, mas é mais como: “isso não funcionou, e eu sou um solucionador de problemas, então vou tentar outra coisa”.

Carol S. Dweck

RESUMO

O aumento da demanda energética mundial e a necessidade de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis têm impulsionado o desenvolvimento de fontes alternativas e renováveis de energia, entre elas os biocombustíveis. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo estudar a capacidade teórica de produção de etanol de segunda geração em El Salvador a partir do bagaço de cana-de-açúcar gerado pela indústria açucareira local. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre a produção açucareira salvadorenha, os processos convencionais de obtenção de etanol e as principais tecnologias empregadas na conversão de biomassa lignocelulósica em bioetanol. A metodologia adotada baseou-se na modelagem e simulação de uma planta integrada de produção de etanol de primeira e segunda geração utilizando o software Aspen Plus® V14. O processo considerou etapas de pré-tratamento por explosão a vapor, hidrólise enzimática do bagaço, fermentação alcoólica e destilação do etanol, utilizando o modelo termodinâmico *Non-Random Two-Liquid* (NRTL) associado à equação de estado *Soave-Redlich-Kwong* (SRK). A simulação foi desenvolvida com dados médios da produção açucareira de El Salvador, especificamente da central Chaparrastique, considerando a integração do hidrolisado de glicose ao processo convencional de fermentação. Os resultados obtidos mostraram a viabilidade teórica da incorporação do etanol 2G na cadeia produtiva da indústria açucareira salvadorenha, permitindo o aproveitamento do bagaço da cana-de-açúcar como matéria-prima para obtenção de açúcares fermentescíveis e posterior produção de etanol. Além disso, a modelagem permitiu representar adequadamente as principais operações unitárias do processo industrial, bem como estimar parâmetros operacionais coerentes com os valores encontrados na literatura. O estudo contribui como referência teórica para futuras pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de biocombustíveis e aproveitamento de biomassa, assim como uma proposta à diversificação da matriz energética em El Salvador.

Palavras-chave: etanol 2G; bagaço de cana-de-açúcar; Aspen Plus®; biomassa lignocelulósica; bioetanol; indústria açucareira salvadorenha.

RESUMEN

El aumento de la demanda energética mundial y la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles han impulsado el desarrollo de fuentes alternativas y renovables de energía, entre ellas los biocombustibles. En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo estudiar la capacidad teórica de producción de etanol de segunda generación en El Salvador a partir del bagazo de caña de azúcar generado por la industria azucarera local. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica sobre la producción azucarera salvadoreña, los procesos convencionales de obtención de etanol y las principales tecnologías empleadas en la conversión de biomasa lignocelulósica en bioetanol. La metodología adoptada se basó en la modelación y simulación de una planta integrada de producción de etanol de primera y segunda generación utilizando el software Aspen Plus® V14. El proceso consideró etapas de pretratamiento por explosión de vapor, hidrólisis enzimática del bagazo, fermentación alcohólica y destilación del etanol, utilizando el modelo termodinámico Non-Random Two-Liquid (NRTL) asociado a la ecuación de estado Soave-Redlich-Kwong (SRK). La simulación fue desarrollada con datos promedio de producción de la industria azucarera salvadoreña, específicamente del ingenio Chaparrastique, considerando la integración del hidrolizado de glucosa al proceso convencional de fermentación. Los resultados obtenidos mostraron la viabilidad teórica de incorporar el etanol 2G en la cadena productiva de la industria azucarera salvadoreña, permitiendo el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar como materia prima para la obtención de azúcares fermentables y posterior producción de etanol. Además, la modelación permitió representar adecuadamente las principales operaciones unitarias del proceso industrial, así como estimar parámetros operacionales coherentes con los valores reportados en la literatura. El estudio contribuye como referencia teórica para futuras investigaciones relacionadas con el desarrollo de biocombustibles y el aprovechamiento de la biomasa, así como una propuesta para la diversificación de la matriz energética en El Salvador.

Palabras clave: etanol 2G; bagazo de caña de azúcar; Aspen Plus®; biomasa lignocelulósica; bioetanol; industria azucarera salvadoreña.

ABSTRACT

The increasing global energy demand and the need to reduce dependence on fossil fuels have encouraged the development of alternative and renewable energy sources, among which biofuels stand out. In this context, the present study aimed to investigate the theoretical capacity for second-generation ethanol production in El Salvador using sugarcane bagasse generated by the local sugar industry. For this purpose, a bibliographic review was conducted regarding the Salvadoran sugar industry, conventional ethanol production processes, and the main technologies employed in the conversion of lignocellulosic biomass into bioethanol. The adopted methodology was based on the modeling and simulation of an integrated first- and second-generation ethanol production plant using Aspen Plus® V14 software. The process considered steam explosion pretreatment, enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse, alcoholic fermentation, and ethanol distillation stages, using the Non-Random Two-Liquid (NRTL) thermodynamic model associated with the Soave-Redlich-Kwong (SRK) equation of state. The simulation was developed using average production data from the Salvadoran sugar industry, specifically from the Chaparrastique sugar mill, considering the integration of glucose hydrolysate into the conventional fermentation process. The obtained results demonstrated the theoretical feasibility of incorporating second-generation ethanol into the production chain of the Salvadoran sugar industry, allowing the utilization of sugarcane bagasse as a feedstock for obtaining fermentable sugars and subsequent ethanol production. Furthermore, the modeling adequately represented the main unit operations of the industrial process and enabled the estimation of operational parameters consistent with values reported in the literature. The study serves as a theoretical reference for future research related to the development of biofuels and biomass utilization, as well as a proposal for diversifying the energy matrix in El Salvador.

Keywords: 2G ethanol; sugarcane bagasse; Aspen Plus®; lignocellulosic biomass; bioethanol; Salvadoran sugar industry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Diagrama de produção de Etanol 1G a partir da cana-de-açúcar	20
Figura 2. Diagrama da produção de etanol a partir de biomassa lignocelulósica.....	21
Figura 3 - Participação dos Ingenios na produção açucareira de El Salvador. Período de Safra 2023/2024	25
Figura 4 - Cana-de-Açúcar moída no período da safra 2023/2024	26
Figura 5. Fluxograma de produção de etanol incorporando o processo de hidrólise ao processo convencional	33
Figura 6. Esquema montado no Aspen Plus® para a produção de etanol 2G a partir da cana-de-açúcar	42
Figura 7. Esquema no Aspen Plus® da etapa de pré-tratamento da cana-de-açúcar	44
Figura 8. Esquema no Aspen Plus® da etapa de hidrólise do bagaço da cana-de-açúcar.....	46
Figura 9. Esquema no Aspen Plus® do tratamento do caldo da cana.	48
Figura 10. Esquema do primeiro estágio do evaporador de múltiplo efeito em Aspen Plus®.....	49
Figura 11. Esquema no Aspen Plus® para a concentração do caldo	51
Figura 12. Esquema no Aspen Plus® da etapa de fermentação do caldo	53
Figura 13. Desenho no Aspen Plus® da etapa de destilação e recuperação.....	55
Figura A. 1: Diagrama de blocos do processo de produção de etanol anidro a partir do caldo e do bagaço da cana-de-açúcar.	66
Figura B. 1: Fluxograma da simulação completa do processo convencional de produção de etanol anidro.....	68
Figura B. 2: Fluxograma da simulação completa do processo de hidrólise do bagaço da cana-de-açúcar	69
Figura B. 3: Fluxograma do processo de hidrólise enzimática com pré-tratamento por explosão a vapor no Aspen Plus	70
Figura B. 4: Fluxograma do processo de fermentação em Aspen Plus®	71
Figura B. 5: Fluxograma do processo de hidrólise enzimática integrado ao sistema de cogeração em Aspen Plus®	72
Figura B. 6: Fluxograma do sistema de concentração de licor de glicose em Aspen Plus	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição básica da cana-de-açúcar.....	19
Tabela 2. Composição média dos caldos de cana-de-açúcar	19
Tabela 3. Composição média do bagaço em base seca	20
Tabela 4. Reações químicas principais na fermentação alcoólica da sacarose	23
Tabela 5. Subprodutos no processo de fermentação alcoólica	24
Tabela 6 - Distribuição da produção açucareira das principais usina do país. Período de Safra 2023/2024	25
Tabela 7 - Distribuição do bagaço produzido nos principais Ingenios de El Salvador. Período de Safra 2023/2024.....	27
Tabela 8. Componentes definidos no simulador Aspen Plus ®.	34
Tabela 9. Composição da cana-de-açúcar adotada no Aspen Plus ®.....	35
Tabela 10. Reações químicas e conversões adotadas no reator de pré-tratamento.	36
Tabela 11. Conversões no reator de hidrólise do material lignocelulósico para 5% de sólidos solúveis no reator.	37
Tabela 12. Resultados do Pré-tratamento da cana-de-açúcar	43
Tabela 13. Resultados dos principais parâmetros na etapa de hidrólise do bagaço da cana-de-açúcar.....	45
Tabela 14. Resultados dos principais parâmetros na etapa de tratamento do caldo.	48
Tabela 15. Resultados na etapa de concentração do caldo da cana	50
Tabela 16. Resultados dos principais parâmetros na etapa de Fermentação.	52
Tabela 17. Resumo dos principais parâmetros na destilação e concentração	55
Tabela 18. Consumo operacional de água nas etapas de produção	56
Tabela 19. Comparação entre resultados da literatura e da simulação para a produção de etanol 2G.	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEAC — Álcool Etílico Anidro Carburante
AEHC — Álcool Etílico Hidratado Carburante
AEH — Álcool Etílico Hidratado
ANP — Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASPEN — Advanced System for Process Engineering
BNDES — Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CAS — Chemical Abstracts Service
CGEE — Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CONAB — Companhia Nacional de Abastecimento
CONSAA — Consejo Salvadoreño de la Agroindustria Azucarera
EPE — Empresa de Pesquisa Energética
FUSADES — Fundación Salvadoreña para el Desarrollo Económico y Social
GEE — Gases de Efeito Estufa
GL — Grau Gay-Lussac
NRTL — Non-Random Two-Liquid
OLADE — Organização Latino-Americana de Energia
SI — Sistema Internacional de Unidades
SRK — Soave-Redlich-Kwong
UNCA — União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia
VLE — Vapor-Liquid Equilibrium (Equilíbrio Líquido-Vapor)
2G — Segunda Geração
°INPM — grau INPM, sigla para Instituto Nacional de Pesos e Medidas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. JUSTIFICATIVA	14
3. OBJETIVOS	16
3.1. Principal	16
3.2. Específicos	16
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1. Produção de Bioetanol	17
4.2. Cana-de-Açúcar como Fonte de Matéria-Prima na Sínteses de Etanol	18
4.2.1. Pré-Tratamento do Material Lignocelulósico	21
4.2.2. Fermentação Alcoólica	22
4.3. Software De Modelagem e Simulação: Aspen Plus®	24
4.4. Produção Açucareira em El Salvador	24
4.5. Panorama da Produção de Cana-De-Açúcar e Etanol no Brasil	27
5. METODOLOGIA	30
5.1. Simulação do Aspen Plus®	30
5.2. Definição de uma Rota de Sínteses	31
5.3. Definição dos Componentes no Simulador	33
5.4. Etapas Envolvidas	35
5.4.1. Recepção, Limpeza, Preparo e Sistema de Extração/Moenda	35
5.4.2. Tratamento do Bagaço da Cana-de-Açúcar (Hidrólise do Bagaço)	36
5.4.3. Tratamento do Caldo	37
5.4.4. Concentração do Caldo, Preparo do Mosto e Esterilização	38
5.4.5. Fermentação dos Açúcares	38
5.4.6. Destilação, Retificação e Desidratação	39
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
6.1. Análise de Resultados	41
6.1.1. Resultados do Pré-Tratamento da Cana-de-açúcar	43
6.1.2. Resultados do Processo de Hidrólise do Bagaço da Cana-de-Açúcar	44
6.1.3. Resultados do Processo de Tratamento e Concentração do Caldo	47
6.1.4. Resultados do Processo de Fermentação	52
6.1.5. Resultados do Processo de Destilação	54

6.1.6. Consumo de Água na Simulação	55
6.2. Análise Comparativa dos Resultados da Literatura com a Simulação.....	56
7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
REFERÊNCIAS.....	61
ANEXOS	64
Anexo A – Diagrama de Blocos do Processo de Produção de Etanol Anidro a Partir do Caldo e do Bagaço da Cana-de-Açúcar.....	65
ANEXO B – Fluxogramas dos Processos de Produção de Etanol a Partir da Cana e do Bagaço da Cana-de-Açúcar no Aspen Plus.....	67

1. INTRODUÇÃO

A nível global há uma grande demanda de combustíveis fósseis como fonte de energia e os derivados do petróleo continuam formando até agora uma parte importante da matriz energética de muitos países. Só na América Latina, o balanço energético do ano de 2022 mostrou que, na região, são consumidas toneladas consideráveis de petróleo e que os principais setores produtivos ainda são direta ou indiretamente dependentes deste recurso, chegando a representar mais do 50% no consumo final da matriz energética. Ainda segundo o informe, o setor de transporte é o setor que mais consome (39% do total) seguido pela indústria (28%) (OLADE, 2024).

Vários fatores têm motivado os governos locais e diversos organismos internacionais (Organização dos Estados Americanos, Organização das Nações Unidas, União Europeia, por mencionar alguns) a investirem em alternativas de fontes de energia para substituir a dependência com os combustíveis fósseis, sendo de interesse particular o desenvolvimento em fontes de energia renováveis. Entre estes fatores, destacam-se a alta demanda de energia combinada à grande dependência do petróleo, o aumento dos preços no mercado internacional, as previsões de escassez no futuro, e os impactos negativos ao meio ambiente pelas emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE) (PÉREZ; MEJÍA, 2008; BORGHI, 2014).

Uma alternativa interessante para reduzir a dependência dos combustíveis fósseis e seus derivados está na produção e desenvolvimento de biocombustíveis. E, um exemplo que está cada vez mais presente no Brasil e na América Latina trata, da produção de etanol por meio da cana-de-açúcar. A nível regional, o Brasil encontra-se em uma posição de destaque pelas amplas pesquisas relacionadas a produção de etanol ou bioetanol como fonte de energia renovável, essa vantagem competitiva deriva-se dos grandes investimentos em tecnologia que empresas do setor açucareiro e sucroalcooleira vêm realizando ao longo do tempo.

A produção do bioetanol pode se dar por meio da fermentação dos açúcares presentes na cana-de-açúcar (etanol de primeira geração) ou pela utilização dos resíduos lignocelulósicos gerados da cana-de-açúcar (etanol de segunda geração) (PACHECO, 2011). A produção do álcool de segunda geração resulta ser mais custoso em comparação com a produção de primeira geração, sendo necessário incentivar mais estudos sobre viabilidade econômica e estudar o potencial de geração de energia utilizando este biocombustível.

Atualmente resulta interessante o aproveitamento da biomassa vegetal na obtenção de biocombustíveis de segunda geração. Elas são antigas fontes de energia renováveis e o reaproveitamento desses rejeitos tem se tornado cada vez mais importante no estudo e desenvolvimento de tecnologias de biocombustíveis, visando a produção de energia e redução da poluição. A produção de biocombustíveis líquidos a partir da biomassa lignocelulósica pode reduzir de forma significativa a dependência dos combustíveis fósseis além de reduzir a emissão dos GEE (GRASEL et al.2016). O etanol já era produzido desde tempos antigo pela fermentação dos açúcares de materiais vegetais e até agora a produção industrial de etanol de segunda geração pode ser desenvolvida seguindo os mesmos princípios de fermentação (ARAÚJO et. al., 2014).

2. JUSTIFICATIVA

No Brasil existem estudos envolvendo fontes de energias renováveis e a produção de bioetanol (ARAÚJO MARTINS et. al., 2014; BORGHI PELÁ, 2014; DIAS, 2008; SANTOS et. al., 2024), o que têm ajudado o país a diversificar sua matriz energética e a se posicionar na frente das demais nações da região em relação à área de biocombustíveis. Diferentemente, países menores vêm avançando de forma lenta no objetivo de mudar as fontes de energia renováveis.

Em El Salvador, a indústria açucareira representa um pilar fundamental da economia agrícola nacional. Conforme o reportado pelo informe de Fundação Salvadorenha para o Desenvolvimento Econômico e Social (FUSADES, 2024), além de conseguir cobrir a demanda interna, a indústria exporta para grandes mercados consumidores como Estados Unidos, Canadá, China, Coreia do Sul, entre outros. Dessa forma, a indústria açucareira mantém uma ampla participação no comércio local e na geração de empregos em diversas regiões do país. O setor também vem se reinventando com novas práticas sustentáveis a fim de diminuir seu impacto ambiental a partir da minimização da emissão de carbono e aumentar sua competitividade no mercado global (FUSADES, 2024).

Incorporar a geração de etanol de segunda geração na cadeia produtiva permitiria aumentar a competitividade da indústria local de El Salvador, além de criar mais produtos com maior valor agregado e incorporar novas fontes de energia no sistema nacional. De acordo com o informe mais recente da OLADE (2024), El Salvador é altamente dependente de fontes não renováveis, apesar do país estar incorporando cada vez mais fontes de energias limpas e renováveis na sua matriz energética, continua importando grandes quantidades de petróleo e seus derivados, de forma que este tipo de fonte representa 78% do consumo final. Ainda de acordo com o informe, entre os principais consumidores estão o setor de transporte, seguido pela indústria e setor residencial.

O pesquisador Cordero Diaz (2019) estudou a viabilidade da produção do bioetanol ou biodiesel a partir da cana-de-açúcar em El Salvador, mas pouco fala sobre o aproveitamento do bagaço como uma fonte alternativa, sendo tratado mais como um resíduo da indústria que é descartado ou utilizado em caldeiras para aproveitar o calor gerado nos processos de aquecimento ou geração de energia da indústria (CORDERO DIAZ et. al., 2019).

Cordero Diaz (2019) apontou em sua proposta técnica que é possível ter um cenário combinado de matérias primas (bioetanol a partir da cana-de-açúcar e gasolina) substituindo o 10,16% da demanda interna de El Salvador pela mistura bioetanol-gasolina em uma relação de 20/80 recomendada pelo autor, sem incrementar a área total de cultivo. Isto considerando apenas um cenário de produção do álcool a partir do caldo da cana-de-açúcar.

Desde que começaram a ser implementados as primeiras políticas e marcos regulatórios para indústria de biocombustíveis, El Salvador tem investido pouco em pesquisas e estudos científicos que buscam estudar a viabilidade da produção de biocombustíveis. As experiências são poucas comparado com os recursos que tem a disposição para realizar experimentos, desenvolverem plantas pilotos ou iniciativas que busquem o melhor reaproveitamento dos recursos naturais. O país apresenta limitações geográficas e territoriais para produzir matérias primas, mas que se forem bem gerenciados poderiam ajudar o país a diminuir sua dependência às importações do petróleo e seus derivados, bem como se proteger das flutuações do preço no mercado internacional.

Desta forma, o presente trabalho pretende estudar a capacidade teórica para a produção de etanol de segunda geração de El Salvador, tomando como base os dados disponíveis do bagaço da cana-de-açúcar gerado pela indústria açucareira local. É importante ressaltar que o país centro-americano é um dos mais vulneráveis às mudanças climáticas, pelo que diversificar sua matriz energética torna-se importante para a sustentabilidade e a redução das emissões dos GEE, uma vez que o método pode reduzir significativamente a prática da queima do bagaço pelos agricultores locais, além de adicionar mais valor agregado a um material que na prática não é explorado.

3. OBJETIVOS

3.1. Principal

Estudar a capacidade teórica de produção de bioetanol (ou etanol de segunda geração) de El Salvador a partir do bagaço de cana-de-açúcar produzido pela indústria açucareira local.

3.2. Específicos

- Definir uma rota de síntese para produzir etanol do bagaço da cana-de-açúcar de modo a ser implementado em um software de simulação.
- Simular com um software a planta de produção de etanol de segunda geração a partir do bagaço de cana-de-açúcar utilizando dados locais.
- Proporcionar uma referência teórica que sirva de consulta para futuros estudos que envolvam a produção de biocombustíveis em El Salvador.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Produção de Bioetanol

O Bioetanol é um biocombustível líquido produzido a partir de qualquer biomassa que contenha quantidades significativas de amido ou açúcares que possam submeter-se a processos de fermentação, geralmente catalizados por leveduras. Na sequência, o produto fermentado passa por processos de destilação e purificado para a separação do álcool etílico (BNDES; CGEE, 2008). Trata-se de um combustível renovável que pode ser empregado puro ou misturado à gasolina, apresentando menor intensidade de carbono quando comparado a outros tipos de combustíveis convencionais como a gasolina ou o diesel

Na indústria da cana-de-açúcar, o caldo que é extraído da cana é fermentado para produzir etanol, enquanto o restante do material (a palha e o bagaço da cana-de-açúcar) geralmente é queimado em caldeiras para produção de energia ou “eliminar resíduos”, uma prática muito frequente em diversos países da região. Enquanto no Brasil, Borghi Pelá (2014) explica que a indústria tem mudado ao longo dos anos, incrementando de forma eficiente a produção de etanol e o bagaço que antes era rejeitado agora é reaproveitado em biorrefinarias para produzir o etanol de segunda geração. Embora o processo seja novo, o autor reforça que é um processo vantajoso pois não demanda aumentar a área plantada comprometendo a produção da safra.

A diferença entre o etanol de primeira e segunda geração está na forma de produção e na matéria-prima utilizada. Enquanto o etanol comum (de primeira geração) emprega a sacarose do caldo extraído da cana-de-açúcar, por exemplo, o etanol de segunda geração utiliza biomassa vegetal com alto teor de lignocelulosa que são encontradas nos resíduos vegetais como no bagaço ou palha de cana (PACHECO, 2011)

Araújo et al (2014) resume o processo de obtenção de etanol de segunda geração através da biomassa em 4 etapas, independentemente do tipo de matéria-prima. O primeiro passo é submeter a biomassa a um pré-tratamento, que pode ser químico, físico ou biológico, com objetivo do acondicionamento da matéria-prima e separação da hemicelulose. A segunda etapa consiste na hidrólise da celulose ou sacarificação, etapa fundamental para obter açúcares fermentescíveis. Atualmente

são descritas três técnicas para a hidrólise de materiais lignocelulósicos: hidrólise com ácido concentrado, hidrólise com ácido diluído e hidrólise enzimática. A terceira etapa consiste na fermentação da glicose resultante da etapa anterior para preparar o etanol de segunda geração. Por fim, a última etapa consiste na destilação para separação do álcool produzido e o acondicionamento do produto.

Desta forma, ao utilizar os açúcares fermentáveis presentes na matéria-prima (a sacarose presente na cana-de-açúcar) para a obtenção do etanol, o álcool obtido denomina-se como etanol de primeira geração e sua produção envolve processos convencionais de moagem, extração e fermentação dos açúcares (PACHECO, 2011). Por outro lado, quando o etanol é produzido a partir da fração lignocelulósica ou celulósica da biomassa (como é o caso do bagaço e a palha da cana-de-açúcar), denomina-se etanol de segunda geração ou Etanol 2G. Geralmente a produção envolve várias etapas, passando pelo pré-tratamento da matéria-prima, conversão da celulose e hemicelulose em açúcares fermentescíveis e posterior fermentação desses açúcares, podendo também empregar rotas como gaseificação seguida de síntese química/biológica (PACHECO, 2011; BNDES, 2008).

Ao comparar o processo de produção de etanol de primeira geração com o de segunda geração, pode-se observar que as etapas são as mesmas, diferenciando-se apenas pela adição da etapa de pré-tratamento e hidrólise do material lignocelulósico; este aumento na cadeia de produção faz com que a obtenção de etanol de segunda geração (produzido pelo bagaço da cana-de-açúcar) tenha um custo maior se comparada com a produção do etanol convencional (produzido diretamente pelo caldo da cana).

4.2. Cana-de-Açúcar como Fonte de Matéria-Prima na Sínteses de Etanol

A cana-de-açúcar é uma planta semiperene do gênero *Saccharum*, da família das gramíneas, oriunda de regiões com climas tropicais da Ásia, a parte aérea da planta é composta pelos colmos, nos quais se concentra a sacarose, e pelas pontas e folhas, que constituem a palha da cana. O ciclo de produção da planta requer de estações de climas quentes, para proporcionar a germinação, e fria e secas para promover a maturação e acúmulo de sacarose nos colmos (BNDS; CGEE, 2008).

A sacarose é o açúcar predominante na cana-de-açúcar, formado pelos monossacarídeos glicose e frutose que constituem seus açúcares redutores. Na

indústria açucareira, da cana-de-açúcar é extraído o caldo pela moagem da planta, a proporção de extração varia de 50-100% do peso da cana, isto é, uma tonelada de cana-de-açúcar produz de 500-1.000L de caldo onde o principal produto presente é a sacarose (LIMA et al., 2001). As seguintes Tabela 1 e a Tabela 2 simplificam a composição geral esperada para a cana-de-açúcar e do caldo de cana, respectivamente.

Tabela 1. Composição básica da cana-de-açúcar

Componente	Teor (% em massa)
Água	65-75
Fibra	8-14
Açúcares	~14
- Sacarose	~12,5
- Dextrose	~0,9
- Frutose	~0,6

Fonte: BNDES, 2008; LIMA et al., 2001.

Tabela 2. Composição média dos caldos de cana-de-açúcar

Componente	Teor (% em massa)
Água	78-86
Sacarose	10-21
Açúcares redutores	0,1-2,5
Cinzas	0,3-0,5
Compostos nitrogenados	0,5-1,0
Sólidos totais (brix)	12-23

Fonte: DIAS, 2008; LIMA et al., 2001.

Por outro lado, a biomassa lignocelulósica é composta por unidades de polissacarídeos (como celulose e hemicelulose) e pela lignina, um polímero complexo presente nas paredes das células vegetais. A hidrólise da parte celulósica gera o açúcar glicose, cuja fermentação pode ser feita com a enzimas. A hemicelulose é mais fácil de hidrolisar em seus constituintes xilose, manose, arabinose, entre outros. porém, a fermentação dessas pentoses ainda não é bem desenvolvida quanto os processos que envolvem a glicose (LIMA et al., 2001; BNDES, 2008).

A composição do bagaço da cana-de-açúcar depende de vários fatores, desde a natureza e a espécie de cana, o tipo de solo, nutrientes presentes, entre outros. A seguir, a Tabela 3 apresenta a composição média dos principais componentes considerada por Dias em seus estudos (2008).

Tabela 3. Composição média do bagaço em base seca

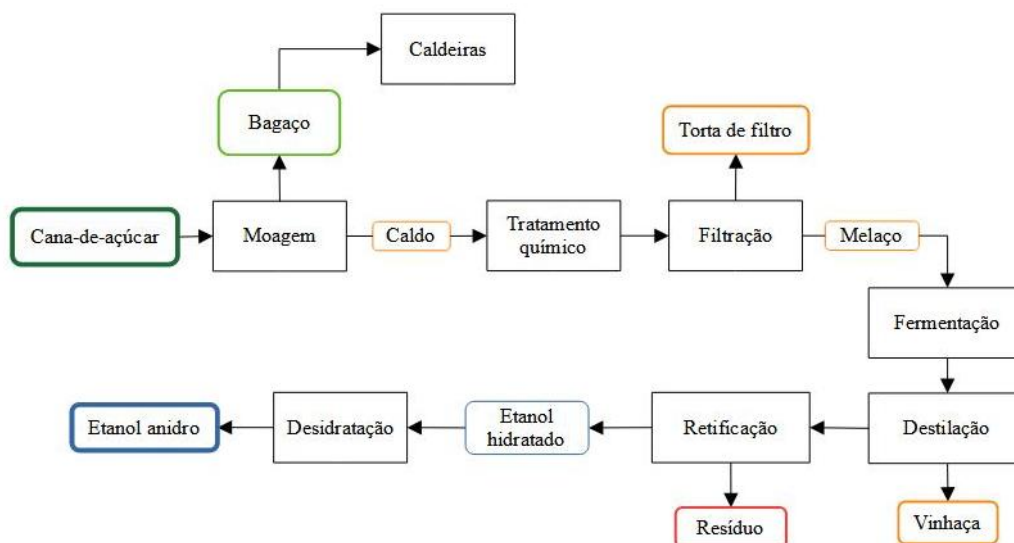
Componente	% em massa
Celulose	40-50
Hemicelulose	25-35
Lignina	22
Cinzas	2

Fonte: Dias, 2008.

A palha da cana-de-açúcar representa cerca de 15% do peso dos colmos da cana madura, ou 12 % quando seca. Este material é constituído principalmente de celulose (40%), hemicelulose (30%), e lignina (25%). O bagaço, derivado da cana-de-açúcar, apresenta os mesmos componentes da palha, com uma composição de 32% em celulose, 19% em hemicelulose, e 23% em lignina (Santos et. al., 2012).

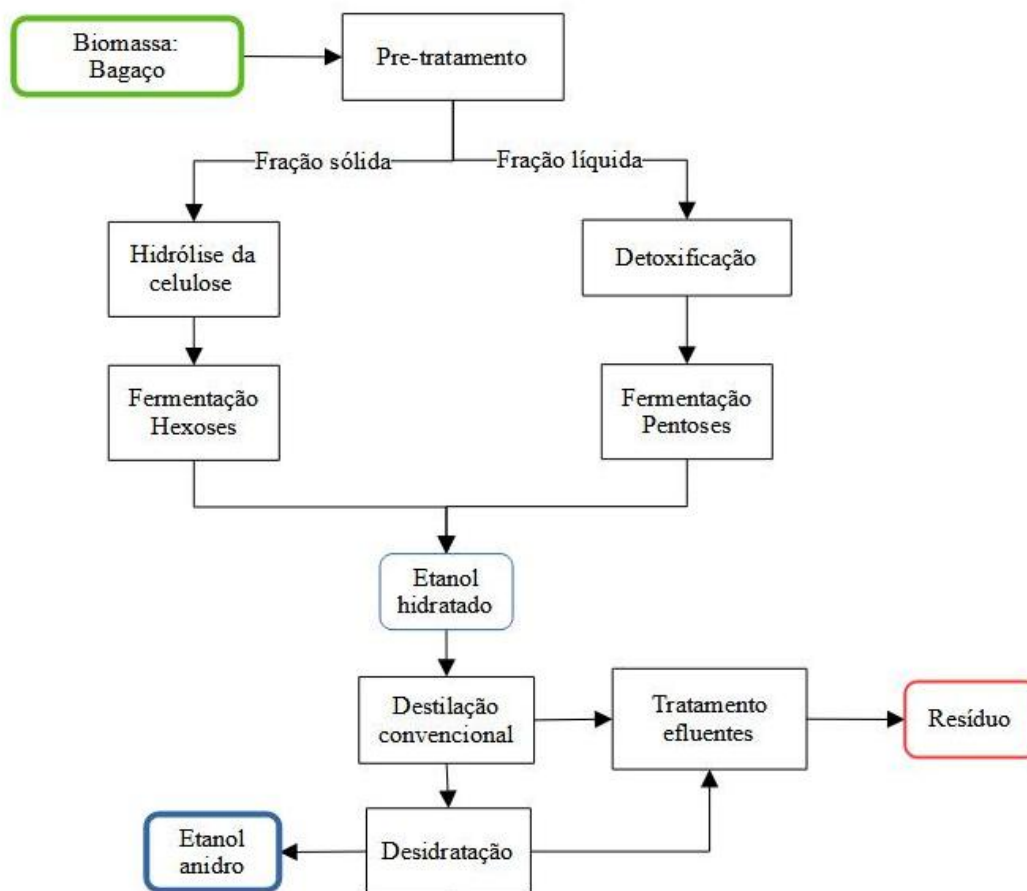
Como foi abordado anteriormente na seção 4.1, o Etanol 2G se diferencia do etanol de primeira geração por usar resíduos e fibras vegetais e por precisar de processos específicos para quebrar a estrutura lignocelulósica, sendo esta rota de sínteses de interesse no estudo para a conversão da biomassa de bagaço de cana-de-açúcar em álcool. A Figura 1 exemplifica um processo geral de obtenção de Etanol de primeira geração partindo da cana-de-açúcar como matéria-prima, baseado e adaptado das informações encontradas do BNDES (2008); enquanto a Figura 2 representa um processo de obtenção de Etanol de segunda geração a partir da cana-de-açúcar e do bagaço gerado como matéria-prima, adaptado das observações encontradas na pesquisa de Palacios Bereche (2011).

Figura 1. Diagrama de produção de Etanol 1G a partir da cana-de-açúcar



Fonte: Autor, 2026.

Figura 2. Diagrama da produção de etanol a partir de biomassa lignocelulósica



Fonte: Autor, 2026.

4.2.1. Pré-tratamento do Material Lignocelulósico

O processo de obtenção de Etanol 2G a partir do bagaço da cana-de-açúcar envolve a hidrólise dos polissacarídeos da biomassa em açúcares fermentescíveis. As principais rotas seguem tecnologias de tratamento ácidas e/ou enzimáticas para a separação dos açúcares e remoção da lignina que é ligada à celulose e à hemicelulose.

Os processos de hidrólise adotados podem definir a viabilidade do processo de produção de bioetanol. A hidrólise enzimática da celulose é amplamente utilizada em reatores por apresentar condições de trabalho moderadas (de 40-50°C) à pressão atmosférica, chegando a ter rendimentos de 0,85 g de glicose fermentado por grama de celulose, porém o elevado tempo de reação (48-72h), elevado custo das enzimas, possíveis ataques de inibidores, entre outros, são desafios que comprometem a viabilidade técnica e econômica do processo. Uma alternativa consiste na hidrólise ácida, que costuma apresentar altos rendimentos já que o íon

hidrônio ataca diretamente o oxigênio que faz ligação entre os monômeros dos açúcares da celulose para formar glicose, embora os desafios para sua projeção a grande escala estão no fato de envolver reações complexas e heterogêneas, entre fatores físicos e químicos (GRASEL et. al., 2016). Apesar da diferença notável nos rendimentos, os custos operacionais e a complexidade nas condições de reação da hidrólise ácida ainda são um desafio para sua implementação industrial, desta forma, a hidrólise enzimática continua sendo amplamente escolhida para o tratamento da celulose da biomassa.

Esta etapa busca facilitar o acesso das enzimas à celulose, removendo ou alterando a lignina e/ou hemicelulose, permitindo uma maior conversão enzimática da glicose. Nesta discussão, os autores Sun e Cheng (2002) fazem uma abordagem dos principais mecanismos utilizados para o pré-tratamento da hidrólise dos materiais lignocelulósicos, dentre os que se encontram:

- **Pré-tratamentos Físicos:** Cominuição mecânica ou moagem fina da matéria; pirólise leve, tratando a biomassa em temperaturas acima dos 300°C.

- **Pré-tratamento Físico-químicos:** Explosão a vapor (steam Explosion) saturado em alta pressão; AFEX (*Ammonia Fiber Explosion*) usando amônia líquida sob temperatura e pressão seguidas de descompressão rápida; Explosão com CO₂ em alta pressão.

- **Pré-tratamento Químicos:** Hidrólise ácida diluída, solubilizando e convertendo os xilanos de hemicelulose a monossacarídeos; hidrólise alcalina com NaOH, NH₃ ou peróxidos, promovem a delignificação, o tratamento com H₂O₂ promove a solubilização de lignina e hemicelulose; Ozonólise, empregando azônio para degradar a lignina e hemicelulose; Processo Organosolv, envolvendo solventes orgânicos com ou sem catalizadores ácido, solubilizando lignina e hemicelulose.

- **Pré-tratamento Biológicos:** empregam-se mecanismos microbianos ou fúngicos para degradar a lignina em condições leves e de baixo consumo energético, sem a necessidade de agentes químicos agressivos.

4.2.2. Fermentação Alcoólica

A fermentação dos açúcares redutores consiste em uma série de reações química catalisadas por microrganismos, é comum o uso comercial da levedura *Saccharomyces Cerevisiae* por ser amplamente usada na produção

industrial de etanol. Durante o processo, os açúcares do mosto da cana-de-açúcar são convertidos em etanol, emitindo CO_2 em reação exotérmica, além de outros produtos secundários, entre eles o glicerol e ácidos orgânicos, como o ácido acético, succínico, entre outros nestas reações (LIMA, 2001).

Como descreve Lima (2001), a fermentação alcoólica se dá em condições anaeróbicas, na ausência total do oxigênio. A sequência de reações que descrevem a fermentação da sacarose ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$) presente na cana pode ser resumida na Tabela 4. Inicialmente, a sacarose presente no caldo é invertida em glicose e frutose de mesma fórmula química ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), promovida por processos enzimáticos, na sequência a frutose é invertida a glicose e, finalmente, a conversão dessas hexoses produz o etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$).

Tabela 4. Reações químicas principais na fermentação alcoólica da sacarose

Equação Química	Produto principal	Conversão (%)
$\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	Hexoses (Glicose e Frutose)	100
$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 2\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 2\text{CO}_2$	Etanol	90,48

Fonte: Lima, 2001; Dias, 2008.

O rendimento da reação na produção de etanol costuma ser de 0,511 g para cada grama de glicose consumida, porém, parte dos açúcares no meio é consumido em reações paralelas. Durante a reação, outros subprodutos podem ser formados como glicerol, ácidos orgânicos (acético, succínico) além de outros álcoois e crescimento de leveduras. Por esse motivo, costuma-se observar rendimentos de fermentação na indústria na ordem de 90% (Dias, 2008).

A Tabela 5 apresenta as reações para a formação dos principais subprodutos de fermentação, os valores de conversão correspondem às consideradas por Dias (2008) para as reações no reator de fermentados. Os autores (Dias, 2008; Palacio Bereche, 2011) consideram a composição química da levedura como $\text{CH}_{1,8}\text{O}_{0,9}\text{N}_{0,145}$, e que todo o nitrogênio utilizado está presente no mosto na forma de amônio contido nas impurezas.

Tabela 5. Subprodutos no processo de fermentação alcoólica

Equação Química	Produto principal	Conversão (%)
$C_6H_{12}O_6 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2C_3H_8O_3$	Glicerol	2,67
$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow C_4H_6O_4 + 2CO_2 + 10H^+ + 10e^-$	Ácido Succínico	0,29
$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2C_2H_4O_2 + 2CO_2 + 8H^+ + 8e^-$	Ácido Acético	1,19
$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 0,795C_5H_{12}O + 2,025CO_2 + 1,155H_2O + 0,15H^+ + 0,15e^-$	Álcool isoamílico	$3,1 \times 10^{-4}$
$C_6H_{12}O_6 + 0,145NH_4^+ + 0,1087CO_2 \rightarrow CH_{1,8}O_{0,9}N_{0,145} + 0,2087H_2O + 0,145H^+$	Levedura	1,37

Fonte: Dias, 2008; Palacios Bereche, 2011.

4.3. Software de Modelagem e Simulação: Aspen Plus®

O software Aspen Plus® é um programa que permite criar modelos de processos químicos, tanto contínuos quanto em batelada, incluindo operações com sólidos, biomassa, captura de carbono, eletrólise de hidrogênio, biorreatores e polímeros. Consolida-se como uma ferramenta líder na indústria química, utilizada para melhorar eficiências, segurança, sustentabilidade e reduzir o tempo de desenvolvimento de modelos que requerem a implementação de modelos sofisticados e de inúmeros processos iterativos. Entre as diversas funcionalidades estão a possibilidade de dimensionar e avaliar equipamentos utilizados na indústria (colunas de destilação, decantadores, trocadores de calor etc.), oferece uma ampla base de dados de propriedades termodinâmicas de diferentes substâncias, além de auxiliar no estudo de viabilidade técnica e econômica de projetos (ASPENTECH, 2025).

4.4. Produção Açucareira em El Salvador

Em El Salvador, os agricultores individuais e as cooperativas agrícolas são os responsáveis pelo cultivo da cana-de-açúcar destinada ao processamento nas centrais açucareiras. De acordo com informações do Conselho Salvadorenho da Agroindústria Açucareira (CONSAA, 2024), o país conta com 6 principais centrais açucareiras, também conhecidas como ingenios: El Ángel, Chaparrastique, La Cabaña, Injiboa, La Magdalena, e Izalco. Segundo os informes Semanais de Produção do próprio conselho, para o período de safra 2023/2024, foram moídas mais de 6,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, produzindo mais de 750.000 toneladas de açúcar, entre crua e refinada, para uma média de 148 dias de safra

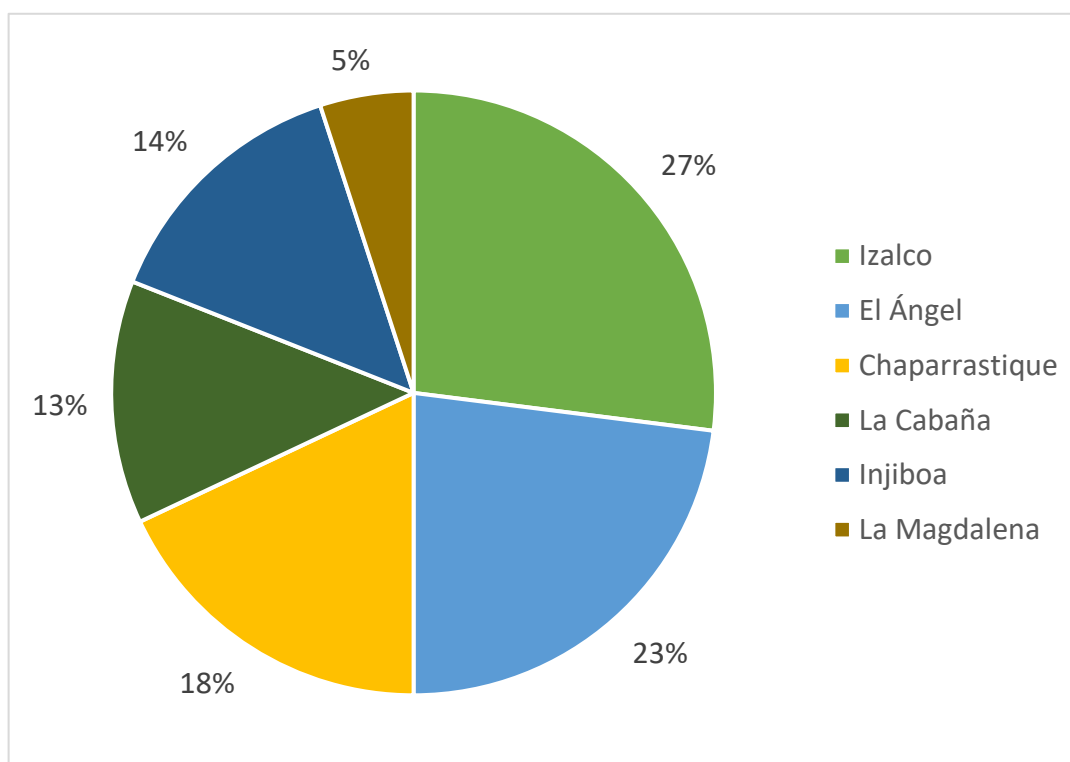
(Tabela 6). Apenas o Ingenio El Ángel e Ingenio Izalco concentram a metade da produção total (Figura 3).

Tabela 6 - Distribuição da produção açucareira das principais usina do país. Período de Safra 2023/2024

CENTRAL AÇUCAREIRA	CANA MOIDA (t)	ÁREA SEMEADA (ha)	PRODUÇÃO DE AÇUCAR (toneladas)		
			CRUA	REFINADA	TOTAL
IZALCO	1.763.197,75	19.678,43	129.366,93	66.861,70	196.228,62
EL ANGEL	1.477.739,00	17.350,75	111.171,33	63.738,66	174.909,99
CHAPARRASTIQUE	1.174.631,93	13.441,19	52.024,91	79.982,55	132.007,47
LA CABAÑA	857.630,99	9.887,76	52.141,33	45.449,02	97.590,35
INJIBOA	929.953,58	11.593,95	54.712,33	54.983,52	109.695,85
LA MAGDALENA	351.674,52	4.831,92	33.617,84	9.917,84	43.535,68
TOTAL	6.554.827,76	76.784,00	433.034,67	320.933,28	753.967,95

. Fonte: CONSAA, 2024. O período de Safra geralmente começa no início do mês de novembro e termina na última semana de abril ou primeira semana de maio

Figura 3 - Participação dos Ingenios na produção açucareira de El Salvador. Período de Safra 2023/2024

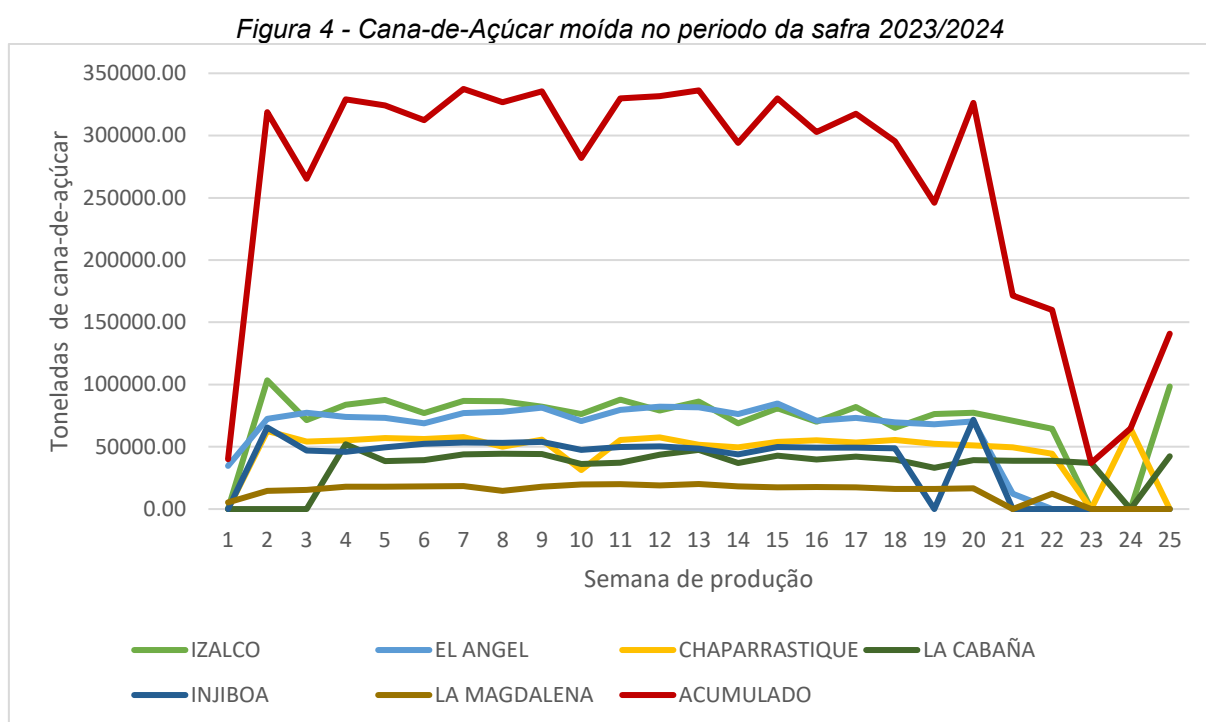


Fonte: Elaboração com base nos informes do CONSAA, 2024

Nos *Ingenios* é feita a captação e processamento da cana-de-açúcar cultivada tanto pelos agricultores locais por aqueles independentes. Os locais são os responsáveis pela moagem da cana-de-açúcar para a extração do suco, que logo é

convertido em açúcar bruto, refinado (branca, morena, entre outros) e derivados, entre eles o melaço e o bagaço da cana. O informe feito pela FUSADES (2024), relata que o bagaço da cana-de-açúcar geralmente é utilizado como biomassa para gerar energia elétrica, enquanto o melaço pode ser destinado para a produção de álcool.

O processamento da cana não é uniforme durante o período da safra, havendo semanas em que os *ingenios* captam poucas ou muitas toneladas de cana-de-açúcar dos agricultores, variando consideravelmente de *ingenio* para *ingenio*. Especialmente durante as primeiras e últimas semanas da safra, não se registram processamento da cana em várias centrais, porém, a produção mantém-se relativamente constante no período central da safra (Figura 4).



Fonte: Elaboração com base nos informes do CONSAA, 2024.

Em uma pesquisa realizada por Cordero Dias et. al. (2019), entre 65 e 76% da cana-de-açúcar que chega nas centrais açucareiras é convertida em caldo que é destinado para a produção de açúcares, o restante constitui o bagaço da cana com umidade perto dos 50%. Com base nessa observação feita pelo autor, um cálculo simples permite estimar que apenas na safra do período 2023/2024 foram geradas entre 2,2 e 1,5 milhões de toneladas em bagaço. Desta quantidade, a maior parte foi destinada à geração de energia pela combustão em turbinas. A Tabela 7 apresenta a distribuição do bagaço produzido nas diferentes centrais açucareiras.

Tabela 7 - Distribuição do bagaço produzido nos principais Ingenios de El Salvador. Período de Safra 2023/2024

CENTRAL AÇUCAREIRA	Bagaço Produzido (toneladas)		
	Mínimo estimado	Máximo estimado	Média
IZALCO	617.119,21	423.167,46	520.143,34
EL ANGEL	517.208,65	354.657,36	435.933,00
CHAPARRASTIQUE	411.121,18	281.911,66	346.516,42
LA CABAÑA	300.170,85	205.831,44	253.001,14
INJIBOA	325.483,75	223.188,86	274.336,31
LA MAGDALENA	123.086,08	84.401,88	103.743,98
TOTAL	2.294.189,72	1.573.158,66	1.933.674,19

Fonte: CONSAA, 2024

Os números anteriores, obtidos com base nas informações dos relatórios do CONSAA, acompanham as observações feitas na reportagem de Guzmán (2018). A autora observou que, durante o período da safra, toneladas do bagaço são produzidos como subproduto que depois são logo transportados para plantas termoelétricas onde são queimados em caldeiras a altas temperaturas. Este processo permite que as centrais açucareiras gerem energia para abastecerem as próprias plantas, sendo que o excedente gerado é injetado na rede. O procedimento é realizado apenas no período de safra, que costuma terminar em maio e só volta a reiniciar apenas na próxima colheita.

4.5. Panorama da Produção de Cana-de-açúcar e Etanol no Brasil

A nível mundial, o Brasil ocupa uma posição de destaque na produção de biocombustíveis, sendo um dos maiores produtores de etanol e referência na utilização da cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de combustíveis renováveis. Além disso, o país destaca-se por ser um dos maiores produtores mundiais de cana-de-açúcar. Essa posição é produto de diversos fatores como a elevada produtividade agrícola, as condições climáticas favoráveis e da ampla capacidade industrial instalada, consolidando o setor sucroenergético como um dos principais segmentos do agronegócio nacional (CONAB, 2025).

Apesar das variações climáticas observadas nas diferentes regiões do país, a produção brasileira de cana-de-açúcar continua-se mantendo em níveis elevados. Segundo a CONAB (2025), a matéria-prima é destinada de acordo com as condições de mercado, permitindo que usinas ajustem o direcionamento da cana para a produção de açúcar ou etanol conforme a demanda e a rentabilidade de cada

produto. O desenvolvimento do setor sucroenergético brasileiro ao longo das últimas décadas consolida uma cadeia produtiva altamente integrada, capaz de produzir simultaneamente açúcar, etanol e bioeletricidade, contribuindo significativamente para a segurança energética e para a redução das emissões de GEE (CONAB, 2025).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), no seu balanço energético para o ano base de 2024, o Brasil produziu 685,6 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, concentrado principalmente na Região Centro-Sul, responsável pela maior parte da produção nacional, destacando o estado de São Paulo, seguido por Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Paraná (CONAB, 2025). Parte do material produzido destinou-se à geração de etanol, resultando na produção de 30,6 milhões de m³ do álcool. Deste valor, 20,5 milhões de m³ correspondem ao etanol hidratado e 10,1 milhões de m³ ao etanol anidro. Ainda segundo a pesquisa, caso fosse considerado o etanol gerado a partir do milho e outras biomassas, a produção nacional de bioetanol estaria alcançando os 38,15 milhões de m³, representando crescimento de 2,8% em relação ao ano anterior. Estes resultados evidenciam a importância crescente dos biocombustíveis na matriz energética nacional e os produtos derivados da cana-de-açúcar continuam desempenhando papel estratégico na matriz energética brasileira devido a sua alta participação como fontes renováveis no país (EPE, 2025).

Os dados disponibilizados pela União Da Indústria de Cana-De-Açúcar e Bioenergia (ÚNICA) demonstram que a produção brasileira de etanol apresenta tendência de crescimento ao longo das últimas safras, impulsionada tanto pela elevada demanda por combustíveis renováveis quanto pelos incentivos relacionados à descarbonização da matriz energética nacional. Além do aumento da produção, observa-se a expansão da capacidade industrial das usinas e melhoria contínua dos indicadores de produtividade (UNICA, 2026).

Nos últimos anos, empresas brasileiras começaram a operar unidades industriais de produção de etanol a partir de resíduos celulósicos, demonstrando que essa tecnologia está deixando de ser exclusivamente experimental e passa a integrar o setor sucroenergético nacional. Entretanto, sua expansão continua enfrentando importantes desafios tecnológicos e econômicos, dentre os quais destacam-se os elevados custos associados ao pré-tratamento da biomassa, à hidrólise enzimática, ao consumo de enzimas, à fermentação eficiente dos açúcares provenientes da hemicelulose e à integração energética do processo industrial (CASTIÑEIRAS FILHO; PRADELLE, 2020).

Apesar do aparente cenário favorável, a produção de etanol 2G ainda representa uma parcela reduzida da produção nacional. Diferente do etanol convencional 1G, produzido a partir dos açúcares fermentescíveis presentes no caldo da cana, o etanol 2G é obtido por meio da conversão da fração lignocelulósica da biomassa, principalmente do bagaço e da palha da cana-de-açúcar, essa rota tecnológica possibilita ampliar a produção de etanol sem necessidade de expansão da área agrícola, aumentando o aproveitamento da biomassa já disponível nas usinas (DIAS, 2008; SANTOS et al., 2012).

5. METODOLOGIA

5.1. Simulação no Aspen Plus®

O trabalho baseou-se na modelagem implementada previamente pelos autores Palacios Bereche (2011) e Dias (2008), onde simularam usinas de produção de etanol por fermentação dos açúcares da cana-de-açúcar. Para a simulação escolheu-se o software Aspen Plus® V14, pelas suas inúmeras aplicações para representar processos industriais e por ser amplamente utilizado em sistemas que envolvem operações de destilação e equilíbrio de fases.

O modelo base para simular a produção de etanol tomou-se do trabalho de Dias (2008), também se considerou o sistema de pré-tratamento e hidrólise implementada por Palacios Bereche (2011) para o acondicionamento do material lignocelulósico (bagaço da cana-de-açúcar), onde é aplicado o tratamento por explosão de vapor (*Steam Explosion*). Tomou-se de referência os resultados obtidos no modelo desenvolvido por Dias (2008) para desenhar os processos de esterilização e destilação. Nas etapas intermediárias e complementares, ambos autores seguem uma sequência similar que tenta ser replicada na simulação. Optou-se pelo estudo de Palacios Bereche (2011) para implementar a etapa de pré-tratamento por considerá-lo mais descritivo e completo nas variáveis termodinâmicas e na definição dos componentes. Na etapa de destilação foi adaptado o modelo *corn stover to ethanol model* (modelo da palha de milho para etanol, na tradução livre) disponível na biblioteca de planilhas do Aspen, onde os parâmetros da etapa de conversão da biomassa lignocelulósica para etanol (*Lignocellulosic biomass to ethanol*) foram ajustados conforme as necessidades do trabalho. Os fluxogramas dos processos e os diagramas estudados para esta modelagem são apresentados no final do trabalho (observar na seção dos Anexos).

Seguindo as abordagens propostas, optou-se pelo modelo termodinâmico *Non-Random Two-Liquid* (NRTL) para descrever o equilíbrio de fases líquido-vapor (VLE) e as interações moleculares nas etapas de fermentação, concentração e destilação, uma vez que esse modelo tem apresentado boa capacidade para representar o comportamento não ideal de misturas polares, especialmente para o sistema etanol-água, sendo amplamente empregado na simulação de processos de produção de etanol, conforme as experiências relatadas

pelos autores (DIAS, 2008; PALACIOS BERECHÉ, 2011), além de utilizá-lo em conjunto com as equações de estado *Soave-Redlich-Kwong* (SRK) para garantir uma maior consistência na descrição das propriedades termodinâmicas de sistemas que envolvem a fase vapor (DIAS, 2008).

Na modelagem foram definidos componentes convencionais (etanol, água, glicose, xilose, sacarose) e não convencionais (biomassa lignocelulósica e frações sólidas), sendo todos disponibilizados dentro da biblioteca de componentes do simulador. Diferentemente do realizado pelos autores (Dias, 2008; Palacios Bereche, 2011), não foi necessário a definição de componentes hipotéticos (principalmente a enzima, hemicelulose, celulose e lignina).

As etapas de conversão bioquímica (hidrólise e fermentação), foram representadas por meio de reatores estequiométricos ou de conversão, com base em rendimentos reportados na literatura. As operações de separação, especialmente as colunas de destilação, foram modeladas com o uso de blocos rigorosos (RadFrac), permitindo a adequada descrição do equilíbrio entre fases.

Parâmetros operacionais como temperatura, pressões, taxas de conversão, e condições de alimentação, foram definidos com base nos dados e experiências reportadas por Dias (2008) e Palacios Bereche (2011), com valores encontrados na literatura, adaptando as variáveis a fim de manter consistência nos resultados esperados e garantir uma maior representatividade do modelo desenvolvido no Aspen Plus[®].

5.2. Definição de uma Rota de Sínteses

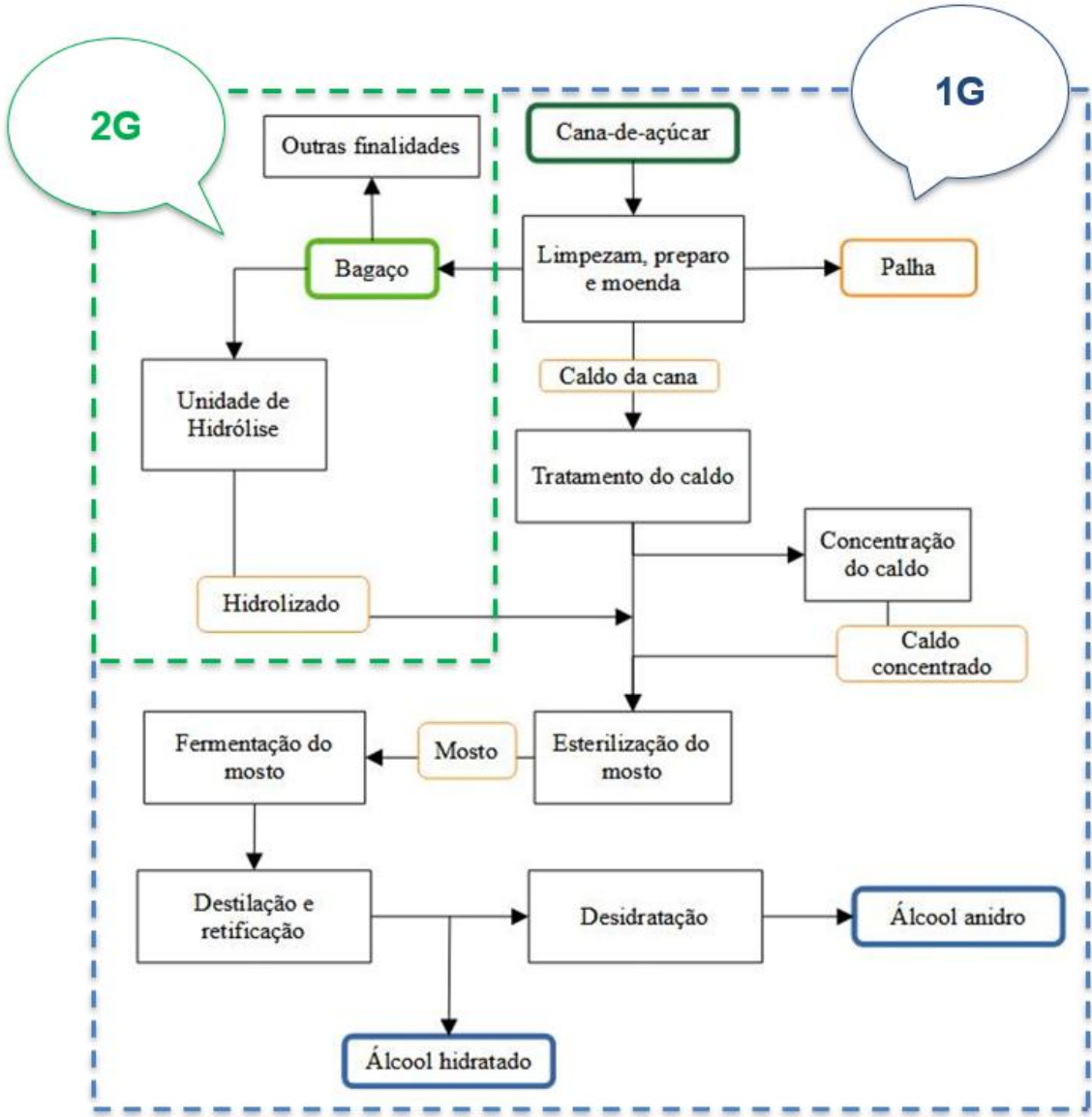
Escolheu-se os dados médios de produção da central açucareira Chaparrastique para definir a quantidade de matéria-prima alimentada na simulação, por ser uma unidade que mantém níveis de produção constante durante o maior período da safra e por apresentar uma participação intermédia na produção nacional (A usina produz 18% do açúcar nacional) conforme foi mostrado na seção 4.3 com os dados do relatório anual da safra 2023/2024 do CONSAA (2024). Desta forma, trabalhou-se com uma produção média diária de 7.387,62 toneladas de cana-de-açúcar processadas, o equivalente a 923.452,78 kg/h, tomando por base uma jornada padrão de 8h de trabalho.

Para a modelagem e simulação do processo de produção de Etanol 2G, Dias (2008) e Palacios Bereche (2011) abordam a produção do álcool como um complemento ou extensão ao processo de primeira geração, tomando parte do açúcar produzido na indústria. Geralmente, consideram-se sistemas onde parte do bagaço gerado na moenda é utilizado e incorporado na cadeia de produção de etanol, como matéria-prima na etapa de hidrólise do material lignocelulósico para a obtenção dos açúcares redutores que serão adicionados ao caldo extraído da cana na moenda, enquanto a outra parte remanescente é incorporado em sistemas de cogeração para abastecer a planta de produção principal de etanol da destilaria (DIAS, 2008; PALACIOS BERECHÉ, 2011).

A Figura 5 apresenta o fluxograma do processo implementado na simulação com o Aspen Plus® para modelar uma usina que produz etanol 2G (seção delimitada com a linha tracejada verde) incorporado ao processo convencional de etanol 1G (etapas delimitadas com a linha tracejada azul). A sequência segue o mesmo raciocínio estudado até agora: a matéria-prima (a cana-de-açúcar) passa por um primeiro estágio de limpeza, preparo e moenda para separar os açúcares solúveis dos sólidos (constituídos pela palha e pelo bagaço), logo o caldo obtido passa por etapas de tratamento e concentração para aumentar o teor dos açúcares solúveis; em paralelo, uma parte do bagaço gerado é separada e destinada para outras finalidades da usina, enquanto a outra passa pela unidade de hidrólise para obter um hidrolisado com concentração de açúcares que possam ser incorporados na solução do caldo antes de ser concentrado e passar pela esterilização (nas usinas, é feito para acondicionar seu armazenamento); o mosto produzido passa pela fermentação enzimática, e depois o produto segue para uma unidade de destilação para separação e obtenção do etanol hidratado; um último estágio pode ser implementado para aumentar o teor do álcool em solução, podendo produzir o etanol anidro.

Neste trabalho são desconsiderados sistemas de cogeração, implementados por Palacios Bereche (2011), sendo apenas de interesse a produção do etanol a partir da matéria-prima: cana-de-açúcar e o bagaço.

Figura 5. Fluxograma de produção de etanol incorporando o processo de hidrólise ao processo convencional



Fonte: Autor (2026)

5.3. Definição dos Componentes no Simulador

A Tabela 8 apresenta os componentes definidos no simulador do Aspen Plus®, incluem-se substâncias convencionais, componentes lignocelulósicos e compostos auxiliares utilizados na modelagem.

Tabela 8. Componentes definidos no simulador Aspen Plus ®.

Componente	Fórmula	MM (g/mol)	Tipo de componente	Número CAS
Ácido Acético	C ₂ H ₄ O ₂	60,05	Convencional	64-19-7
Ácido Succínico	C ₄ H ₆ O ₄	118,09	Convencional	110-15-6
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	98,08	Convencional	7664-93-9
Água	H ₂ O	18,00	Convencional	7732-18-5
Álcool Isoamílico	C ₅ H ₁₂ O	88,15	Convencional	123-51-3
Amônia	NH ₃	17,03	Convencional	7664-41-7
Celulose	C ₆ H ₁₀ O ₅	162,14	Sólido	-
Dióxido de carbono	CO ₂	44,01	Gás	124-38-9
Enzima Celulase	BSA	-	Biocomponente	-
Etanol	C ₂ H ₅ OH	46,07	Convencional	64-17-5
Glicerol	C ₃ H ₈ O ₃	92,09	Convencional	56-81-5
Glicose	C ₆ H ₁₂ O ₆	180,14	Convencional	50-99-7
Hemicelulose	C ₅ H ₈ O ₄	132,12	Sólido	-
Hidrogênio	H ⁺	2,02	Convencional	-
Hidróxido de calcio	Ca(OH) ₂	74,10	Convencional	1305-62-0
Impurezas	KCl	74,55	Sólido	7447-40-7
Levedura	SCEREVISIAE	-	Biocomponente	-
Lignina	C ₂₀ H ₂₂ O ₁₀	422,4	Sólido	-
Minerais	K ₂ O	94,20	Sólido	-
Sacarose	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	342,28	Sólido	57-50-1
Sais orgânicos	C ₆ H ₆ O ₆	174,10	Convencional	4023-65-8
Terra	SiO ₂	60,06	Sólido	14808-60-7
Xilose	C ₅ H ₁₀ O ₅	150,13	Convencional	58-86-6

Fonte: Dias, 2008.; Palacios Bereche, 2011.

Os componentes C₃H₈O₃, C₂H₄O₂, C₄H₆O₄ e C₅H₁₂O são produtos do processo de fermentação. Os componentes lignocelulósicos da cana-de-açúcar (celulose, hemicelulose, lignina) e a enzima, foram obtidos da biblioteca de componentes disponível no ambiente do simulador. Considerou-se que as impurezas são constituídas de sais e ácidos, sendo o mais representativo os sais de potássio, desta forma, as propriedades foram baseadas no sal de cloreto de potássio (KCl). Para representar os sais orgânicos escolheu-se o ácido aconítico (C₆H₆O₆) como uma representação e aproximação das propriedades. Os minerais presentes na cana são representados pelo óxido de potássio (K₂O) por estar em maior quantidade dentre todos. A terra é composta por diversos óxidos de silício, na simulação escolheu-se o composto SiO₂ para aproximação das propriedades. Finalmente, considerou-se que as fibras presentes na cana têm composição igual à do bagaço em base seca (DIAS, 2008). A Tabela 9 apresenta a composição da cana-de-açúcar utilizada na simulação.

Tabela 9. Composição da cana-de-açúcar adotada no Aspen Plus ®

Componente	Fórmula	Cana-de-açúcar % em massa
Celulose	$C_6H_{10}O_5$	5,26
Hemicelulose	$C_5H_8O_4$	5,00
Lignina	$C_{7,3}H_{13,9}O_{1,3}$	2,89
Sacarose	$C_{12}H_{22}O_{11}$	13,85
Glicose	$C_6H_{12}O_6$	0,59
Minerais	K_2O	0,20
Impurezas	KCl	1,17
Sais orgânicos	$C_6H_6O_6$	0,61
Água	H_2O	69,35
Terra	SiO_2	1,07
Total		100

Fonte: Baseado nos dados de Palacios Bereche (2011).

5.4. Etapas Envolvidas

5.4.1. Recepção, Limpeza, Preparo e Sistema de Extração/Moenda

Nas usinas, a cana-de-açúcar passa por uma etapa de lavagem e limpeza antes de ser transportada aos equipamentos de preparo para facilitar o subsequente processo de extração dos açúcares que é realizado tradicionalmente nas moendas. O caldo extraído é enviado para o processo de tratamento enquanto o bagaço produzido segue para sistemas de cogeração, sendo incinerado, ou podendo ser reaproveitado como adubo, fertilizando ou tratado para aumentar a eficiência na produção de etanol. O processo utiliza um sistema de limpeza a seco e um sistema de extração de caldo por moenda.

Para a simulação, blocos unitários do tipo separadores (*Separator*) representam as peneiras encontradas nas moendas e que separam o bagacilho do caldo cru. Na moenda, é utilizada 30 kg de água por cada quilograma de cana-de-açúcar que entra na moenda. Além disso, destaca-se uma eficiência na remoção de impurezas minerais (terra e impurezas) de 70%, perdas na ordem de 0,5%, assim como 50% de umidade no bagaço, 70% de umidade no bagacilho (resíduo sólido que resulta do peneiramento do caldo de cana extraído na moenda) e 96,2% de eficiência na extração de açúcares na moenda.

5.4.2. Tratamento do Bagaço da Cana-de-Açúcar (Hidrólise do Bagaço)

O processo de hidrólise enzimática do material lignocelulósico segue duas etapas realizadas em sequência: a primeira consiste no pré-tratamento para solubilizar a hemicelulose e liberação da lignina, enquanto a segunda etapa consiste na hidrólise da celulose. Implementou-se o sistema de pré-tratamento por explosão a vapor (*steam explosion*), também implementado no trabalho de Palacios Bereche (2011). Na simulação, utilizou-se a enzima celulase como principal agente no processo de hidrólise da celulase. No estudo é adotado uma pressão de 12,5 bar no reator de pré-tratamento. Considera-se a formação de xilose ($C_5H_{10}O_5$), ácido acético ($C_2H_4O_2$), furfural ($C_5H_4O_2$) e glicose ($C_6H_{12}O_6$), segundo as reações indicadas na Tabela 10. Os valores de conversões correspondem às condições de 190°C e 10min de tempo de residência. Para garantir níveis altos de remoção de hemicelulose e lignina, é destacado a adição de catalisadores ácidos como o SO_2 ao 2% em massa, porém não foi levando em consideração nesta simulação. Neste estudo, foi considerado um consumo de 0,55kg de vapor por kg de bagaço ingressado no pré-tratamento.

Tabela 10. Reações químicas e conversões adotadas no reator de pré-tratamento

Equação Química	Produto principal	Conversão (%)
$C_5H_8O_4 + H_2O \rightarrow C_5H_{10}O_5$	Xilose	61,4
$C_5H_8O_4 + H_2O \rightarrow 2,5 C_2H_4O_2$	Ácido acético	9,2
$C_5H_{10}O_5 \rightarrow C_5H_4O_2 + 3H_2O$	Furfural	5,1
$C_6H_{10}O_5 + H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6$	Glicose	4,1

Fonte: Palacios Bereche, 2011.

Após o processo por explosão a vapor, segue a lavagem do material pré-tratado para remoção das xiloses e outros componentes inibitórios da fermentação, para isso, considerou-se o uso de 15 litros de água por quilograma de bagaço seco tratado. Na simulação adotou-se uma remoção de sólidos em solução de 90%, enquanto a perda de lignina solúvel foi considerada em 6,3%. Considera-se um conteúdo de umidade na fração sólida de 60%.

Na sequência, o processo continua no reator de hidrólise enzimática. São adicionadas as enzimas *celulase* necessárias para catalizar as reações de hidrólise com o material pré-tratado previamente misturado com água (para garantir uma concentração apropriada de sólidos não solúveis). A temperatura específica no reator é de 50°C e a quantidade de enzima adicionada é de 0,114g por cada grama

de polpa pré-tratada, também se considerou que a água utilizada na hidrólise é aquecida até 50°C. Na prática, considera-se uma agitação robusta no reator o suficiente para manter a temperatura de operação (PALACIOS BERECHÉ, 2011). No reator de hidrólise acontece a conversão de celulose em glicose, segundo as reações apresentadas na Tabela 11. Processos de hidrólise enzimáticas são realizados a baixas concentrações de sólidos, desta forma, baixas concentrações de glicose são produzidos, os quais são sucessivamente concentradas.

Tabela 11. Conversões no reator de hidrólise do material lignocelulósico para 5% de sólidos solúveis no reator.

Equação Química	Produto principal	Conversão (%)
$C_6H_{10}O_5 + H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6$	Glicose	69,2
$C_5H_8O_4 + H_2O \rightarrow C_5H_{10}O_5$	Xilose	46,9

Fonte: Palacios Bereche, 2011.

Para a simulação considerou-se 5% de sólidos insolúveis em água por ter mostrado maior conversão em glicose e xilose (PALACIOS BERECHÉ, 2011). O hidrolisado resultante é filtrado para separar a torta de lignina da solução de glicose. Considera-se uma fração sólida com umidade de 70%. A fim de incorporar na produção de etanol no processo convencional, é necessário concentrar o licor de glicose obtido até uma concentração apropriada para o processo de fermentação.

5.4.3. Tratamento do Caldo

Nesta etapa são removidas as impurezas visando uma melhor qualidade nas próximas fases. O tratamento adotado emprega operações de aquecimento (Bloco *HeatX* no Aspen Plus®), uma separação flash, decantação (Bloco tipo *Separator*), adição de polímero floculante (340mg/s de poliacrilamida) no decantador e adição de cal no tanque de lodo, seguido de filtração e recirculação do filtrado. Na saída do decantador, tem-se o caldo clarificado e o lodo que é enviado para o tanque de lodo, onde é tratado adicionando o cal. Na sequência é comum a mistura com o bagacilho e a filtração para reaproveitamento e recuperação dos açúcares (PALACIOS BERECHÉ, 2011) o que, para fins do estudo, não foi considerado durante a simulação. Nas usinas, a filtração é realizada por meio de um filtro rotativo a vácuo, no simulador utilizou-se um bloco tipo *Separator* para representar a operação unitária.

5.4.4. Concentração do Caldo, Preparo do Mosto e Esterilização

O caldo clarificado obtido no decantador é concentrado em um sistema de evaporação removendo parte da água até atingir uma concentração de sólidos solúveis de 15-19 Brix (DIAS, 2008) apropriada para o processo de fermentação. Em usinas, a etapa geralmente é realizada em sistemas de evaporação de 5 estágio. Tanto Dias (2008) como Palacios Bereche (2011) consideram evaporadores de múltiplo efeito para a concentração do caldo, permitindo uma economia no consumo de vapor de escape. Nesta configuração, parte do caldo é concentrada até 65 Brix. Em seguida, a solução conhecida como xarope, é misturada com o restante do caldo para obter um mosto com o teor de açúcares requerido.

No simulador Aspen Plus ® foram adotadas duas operações em sequência para representar um estágio de evaporação: utilizaram-se blocos unitários tipo aquecedor e separador flash colocados em configuração em série. Depois da etapa de concentração, o caldo passa a ser esterilizado antes de ser resfriado até temperaturas na faixa de 32-34°C. Na simulação, a esterilização é realizada elevando a temperatura até 130°C usando vapor a 6 bar. Na sequência, o resfriamento é realizado em um trocador de calor até a temperatura de 32°C. Os parâmetros adotados nos blocos seguem os mesmos que os utilizados pelo autor Palacios Bereche (2011). Após o resfriamento o caldo é enviado ao processo de fermentação.

5.4.5. Fermentação dos Açúcares

Na simulação, considerou-se que dentro do reator, os açúcares da sacarose são hidrolisados para glicose e frutose que logo são convertidos em etanol. Este processo se dá seguindo as reações apresentadas na seção 4.2.2, considerando a formação dos produtos secundários. À diferença dos autores Dias (2008) e Palacios Bereche (2011), não foi feita a simplificação dos íons H^+ e NH_4^+ pelos componentes H_2 e NH_3 , uma vez que o programa disponibiliza na biblioteca de propriedades esses compostos iônicos, usando-os diretamente ao definir as equações químicas nos reatores. Também, não foram considerados componentes nitrogenados na cana e a composição da corrente de nutrientes que permite a formação da levedura é considerada como sendo amônia, ponderando que a concentração do NH_3 é zero na saída do reator onde ocorre a fermentação.

Na simulação com o Aspen Plus ® é feita uma aproximação em regime permanente. Foi utilizado um único reator para representar as dornas de fermentação, definido como um reator estequiométrico. No bloco é adicionado o mosto final e a levedura tratada (pé-de-cuba) até completar 25% do volume do meio reacional. O pé-de-cuba é composto por uma mistura de água, levedura e ácido diluído em proporções similares às utilizadas por Palacios Bereche (2011). Considerou-se uma temperatura média de fermentação de 28°C, em que se assume acontece o maior rendimento fermentativo (DIAS, 2008).

As seções que compõem a destilaria foram representadas como separadores comuns (ou tanques flash), especificando-se a fração de sólidos no vapor, sólidos no líquido, considerando que o vinho levedurado não possui células, e líquidos no fundo. O vinho centrifugado é enviado a etapa de destilação, o vinho final deve possuir um conteúdo de etanol na faixa de 8,0-9,0°GL.

5.4.6. Destilação, Retificação e Desidratação

O sistema segue o processo convencional de destilação observada na indústria. Nas destilarias é produzido álcool etílico hidratado carburante (AEHC) com concentração de 92,6-93,8 °INPM (cerca de 92,6-93,8% de etanol em massa), nas unidades de desidratação é obtido o álcool etílico anidro carburante (AEAC) com teor alcoólico de 99,3 °INPM (ANP, 2022; BNDES; CGEE, 2008).

O sistema etanol-água é uma mistura não ideal, os dois componentes formam um azeótropo (mistura de componentes com a mesma composição nas fases líquidas e vapor no equilíbrio, não podendo ser separados por destilação convencional) com fração molar de aproximadamente 89% de etanol (95,6% em massa) e 11% de água a 1 atm (LIMA, 2001). Por este motivo, nas destilarias é utilizado um processo convencional para promover a concentração da mistura até pontos próximos do azeótropo. Nas usinas brasileiras é frequentemente utilizado uma configuração de 5 colunas, chamadas de colunas de esgotamento do vinho, apuração do vinho, e de concentração de álcool de segunda, o conjunto das colunas constitui a coluna de destilação e o conjunto de retificação onde obtém-se o AEHC (DIAS, 2008).

Neste trabalho, adaptou-se o modelo de destilação disponível na biblioteca do software Aspen Plus® para produção de etanol a partir de material lignocelulósico. Na sequência, o vinho produzido na etapa de fermentação passa

primeiro para uma coluna de desgaseificação onde o etanol e a água são removidos em uma corrente lateral de vapor próxima ao topo da coluna, enquanto o destilado de vapor contém principalmente CO_2 não condensável que é recuperado em uma outra coluna de desgaseificação, nesta parte, todos os sólidos residuais (leveduras, enzimas, entre outros) são removidos em uma mistura conhecida como vinhaça na produção do álcool etílico. A solução destilada segue para uma coluna de retificação para purificar o etanol até seu ponto azeótropo com a água.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados da modelagem do processo de produção de etanol de segunda geração integrado ao processo convencional proposto neste trabalho. São apresentados os parâmetros e propriedades relevantes definidas e os que o simulador determinou nas diferentes operações unitárias das etapas de produção. Também é feita uma comparação com os resultados encontrados na literatura.

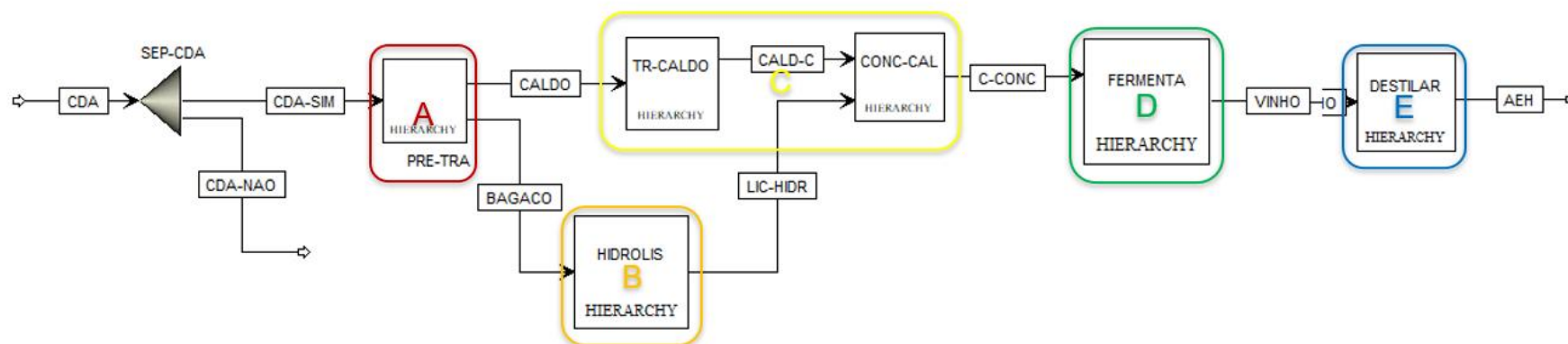
6.1. Análise de Resultados

A Figura 6 apresenta o diagrama de blocos do processo no Aspen Plus®, com as etapas do processo de produção de etanol, iniciando com a entrada da cana-de-açúcar na usina. Para o caso em estudo, considerou-se um cenário moderado em que 50% da cana-de-açúcar disponível no *ingenio* Chaparrastique passa pelo processo de produção de etanol, a fim de que a quantidade do insumo não comprometa a produção total do açúcar já consolidada na central açucareira.

Na Figura 6 é possível observar que a separação do bagaço é representada com um bloco tipo *FSplit*. Também, no diagrama é possível observar a implementação dos blocos hierárquicos (*Hierarchical Blocks*) para auxiliar na modularização do processo de produção do etanol dentro do simulador. Em cada um dos blocos *HIERARCHY* foram desenvolvidas as respectivas etapas descritas anteriormente na Seção 5.4: o Pré-tratamento da Cana-De-Açúcar (A), Hidrólise do Bagaço (B), Tratamento e Concentração do Caldo (blocos hierárquicos delimitados em C), Fermentação dos Açúcares (D), e Destilação do fermentado (E).

Para satisfazer as condições descritas na metodologia vários parâmetros foram ajustados com a ferramenta *Design Spec* e *Calculator* como as vazões de alimentação de água e vapor e as taxas de fluxo de algumas etapas e correntes, a modo de que as características esperadas dos produtos resultassem coerentes com os valores encontrados na literatura.

Figura 6. Esquema montado no Aspen Plus® para a produção de etanol 2G a partir da cana-de-açúcar



Fonte: Autor, 2026

6.1.1. Resultados do Pré-Tratamento da Cana-de-açúcar

A etapa desenvolveu-se integralmente dentro do bloco hierárquico indicado com A (Observar Figura 6). Considerou-se uma alimentação de 461,726 toneladas por hora de cana-de-açúcar que entra na usina no primeiro estágio que consiste no pré-tratamento ou acondicionamento da matéria. A cana-de-açúcar passa por uma limpeza para remoção do material grosso antes de ser moído para separação do caldo e do bagaço sólido, o líquido passa por outra peneira para remover as fibras e materiais finos em solução que resultaram da moenda, conhecido como bagacilho, tal material é reaproveitado misturando-o com a cana para extrair mais açúcar. Considerou-se uma perda geral de 0,5% dos demais componentes em cada etapa. Foram consumidas 144,361 m³/h de água na etapa de limpeza da cana, gerando em torno de 112.178 t/h de bagaço, desse total, 44,871 toneladas (40%) serão tratadas por hidrólise enzimática para gerar mais açúcares redutores, seguindo as observações vistas na literatura, em que uma parte do bagaço é destinado para a sínteses de etanol 2G.

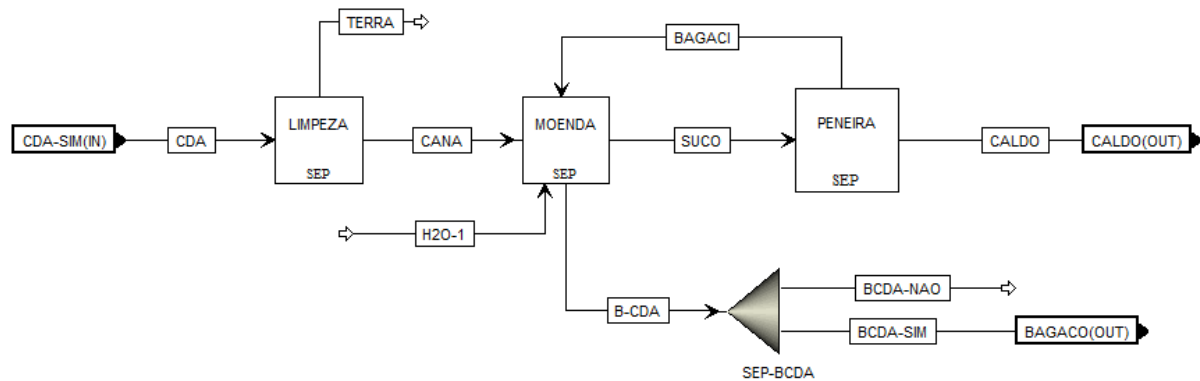
A Tabela 12 apresenta o resumo dos principais resultados obtidos no simulador. A Figura 7 apresenta a configuração da etapa de pré-tratamento da cana-de-açúcar desenhada no simulador, utilizou-se blocos tipo *Separador* para simular os processos de Limpeza, Moenda e Peneiramento, uma vez que não existe no simulador um componente específico para esses elementos; um bloco tipo *FSplit* separa o bagaço que vai ser utilizado nas próximas etapas de hidrólise.

Tabela 12. Resultados do Pré-tratamento da cana-de-açúcar

Parâmetro	Unidade	Magnitude
Cana-de-açúcar alimentada	t/h	461,726
Eficiência na remoção de impurezas na Limpeza	%	70
Eficiência de extração na Moenda	%	96,2
Eficiência na remoção de sólidos não solúveis na peneira	%	82,1
Umidade do bagaço	%	50
Umidade do bagacilho	%	70
Bagaço de cana-de-açúcar produzido	t/h	112,178
Bagaço destinado para hidrólise	t/h	44,871
Caldo extraído na moenda	t/h	482,309
Consumo total de água	m ³ /h	144,361
Percentual de perdas nos demais componentes	%	0,5

Fonte: Autor, 2026

Figura 7. Esquema no Aspen Plus® da etapa de pré-tratamento da cana-de-açúcar



Fonte: Autor, 2026

6.1.2. Resultados do Processo de Hidrólise do Bagaço da Cana-de-Açúcar

A etapa desenvolveu-se integralmente dentro do bloco hierárquico indicado com B (Observar Figura 6). Os 44,871 t/h do bagaço entram no tanque de pré-tratamento por explosão a vapor, onde é injetado vapor de água saturada a 100°C, na sequência, uma bomba de descompressão representada por um bloco do tipo *Heater* diminui a pressão da mistura e o excesso do vapor é separado por uma coluna de tipo *Flash*, onde também é ajustado a temperatura antes de entrar no reator de hidrólise. O material resultante passa por uma limpeza com água para remoção de sólidos e materiais inibidores antes de entrar no tanque de fermentação. Os reatores foram modelados com blocos do tipo *RStoic* e as reações foram definidas seguindo as especificações previstas na Seção 5.4.2. Após a reação no tanque obtém-se um produto úmido chamada de torta hidratada que passa por um filtro, representado no simulador por um bloco tipo *Separator* para extrair o licor de glicose, contendo os açúcares redutores, do resíduo sólido, chamado apenas de torta.

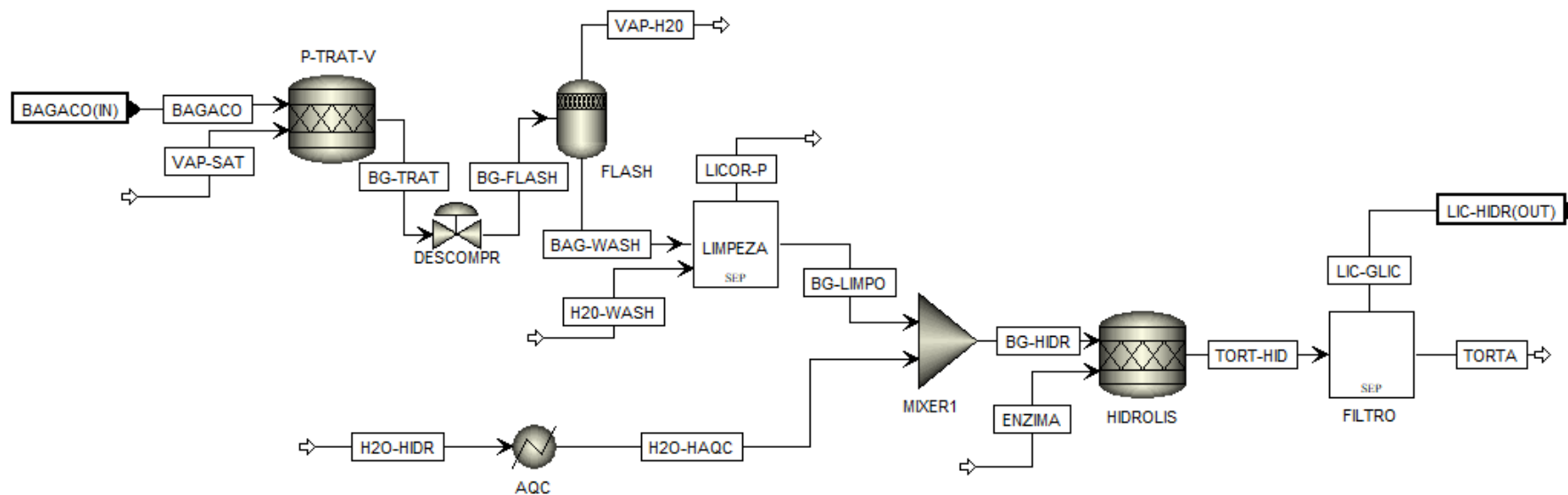
Foram produzidos 250,922 t/h de licor na hidrólise, a simulação mostrou um consumo total de água de 587,059 m³/h. A quantidade de vapor saturado e de água utilizada nas etapas de tratamento, limpeza e mistura no tanque foram ajustadas com as ferramentas *Design Specs* e *Calculator* para atender as condições definidas do processo. A Tabela 13 apresenta o resumo dos principais parâmetros e resultados obtidos na simulação, a Figura 8 representa o processo desenhado no Aspen Plus® na etapa de hidrólise.

Tabela 13. Resultados dos principais parâmetros na etapa de hidrólise do bagaço da cana-de-açúcar.

Parâmetro	Unidade	Magnitude
Bagaço de cana-de-açúcar alimentada	t/h	44,871
Vapor Saturado	kg/kg bagaço alimentado	0,55
Pressão no tanque de pré-tratamento	bar	12,5
Temperatura no tanque de pré-tratamento	°C	190
Água para limpeza	L/ kg Bagaço seco tratado	15
Água para hidrólise	L/kg Bagaço pré-tratado	6,094
Temperatura da água de hidrólise	°C	50
Enzima para hidrólise	kg/kg de bagaço	0,114
Licor de glicose obtido	t/h	250,922
Concentração de açúcares no licor	%m/m	3,020
Torta de filtro	t/h	42,987

Fonte: Autor, 2026.

Figura 8. Esquema no Aspen Plus® da etapa de hidrólise do bagaço da cana-de-açúcar.



Fonte: Autor, 2026

6.1.3. Resultados do Processo de Tratamento e Concentração do Caldo

As etapas desenvolveram-se integralmente com dois blocos hierárquicos, uma para realizar o tratamento do caldo e outra para modelar a concentração; para fins práticos, ambas são indicadas na Figura 6 com a letra C. Os 482,309 t/h do caldo extraído no pré-tratamento seguem para um processo de clarificação, o sólido residual é tratado com hidróxido de cálcio (chamado também de leite de cal ou simplesmente cal), conforme discutido na Seção 5.4.3. O produto de caldo clarificado é misturado com o licor de glicose obtido na hidrólise do bagaço, a mistura segue para uma etapa de concentração dos açúcares por meio de um sistema EME (Evaporadores de Múltiplo Efeito) para aumentar o teor de glicose e sacarose disponíveis para usar na fermentação.

No tratamento, o caldo alimentado primeiro passa por um trocador de calor para ter sua temperatura aumentada antes de decantar para separar os sólidos insolúveis. Na simulação, estas etapas foram representadas por um trocador de calor seguido de uma coluna tipo *Flash* que remove o excesso de vapor de água, enquanto para o decantador foi utilizado um bloco do tipo *Separator*. O líquido que sai é o caldo clarificado que segue para as próximas etapas, e, além disso, é gerado também um lodo que é tratado com hidróxido de cálcio e posteriormente filtrado. O resíduo sólido é levado para aterro sanitário enquanto o líquido, em alguns casos, pode ser reaproveitado misturando-o com o caldo alimentado para recuperar parte dos açúcares arrastados no lodo. Contudo, essa realimentação não foi considerada neste trabalho.

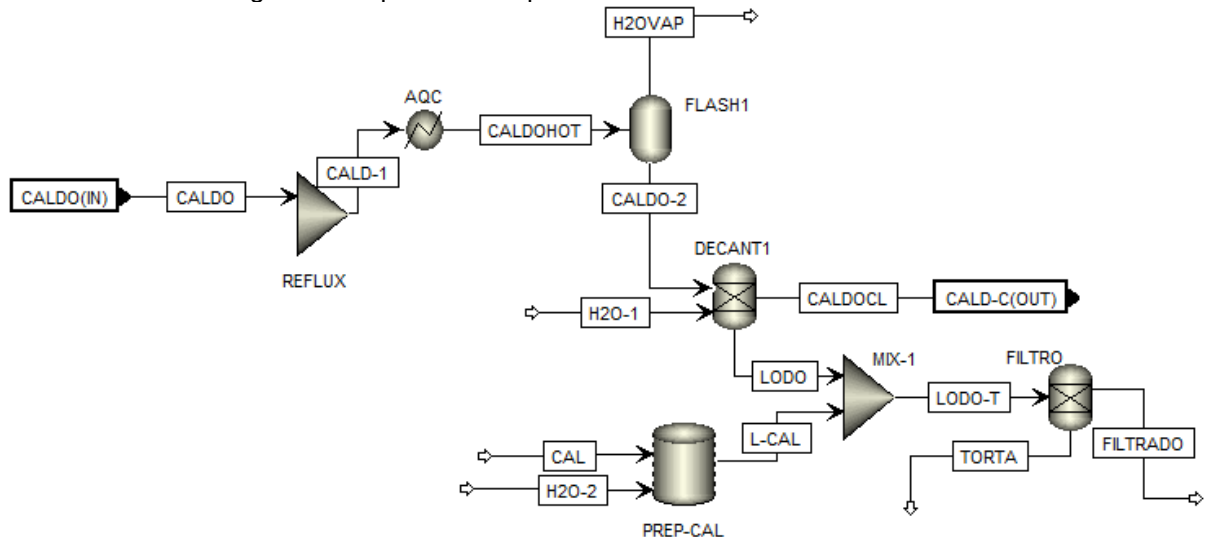
No processo foram gerados 120,031 t/h de lodo residual e produzidos 687,486 t/h de caldo que seguem para a próxima etapa, na simulação foram consumidos 785,469 m³/h de água, sendo que a maior parte foi consumida na decantação do caldo, a outra parte foi utilizada no preparo do cal. A Tabela 14 resume as condições definidas no tratamento do caldo e os principais resultados da simulação, enquanto a Figura 9 mostra o diagrama montado no simulador.

Tabela 14. Resultados dos principais parâmetros na etapa de tratamento do caldo

Parâmetro	Unidade	Magnitude
Caldo de cana-de-açúcar alimentado	t/h	482,314
Temperatura de aquecimento do caldo	°C	105
Pressão no descompressor	bar	0,97
Água no decantador	L/kg de caldo	1,5
Consumo de cal (CaO)	g/Kg de lodo decantado	0,5
Água misturada com a cal	L/kg de cal	15,6
Eficiência na separação dos açúcares na decantação	%	99
Perdas de açúcares na filtração do lodo	%	0,87
Caldo clarificado	t/h	687,486
Concentração dos açúcares no caldo	%m/m	8,985
Torta de Filtro gerada	t/h	35,969
Lodo final tratado	t/h	120,031
Umidade da torta no filtro	%	70
Pressão no tanque flash	bar	30

Fonte: Autor, 2026.

Figura 9. Esquema no Aspen Plus® do tratamento do caldo da cana.

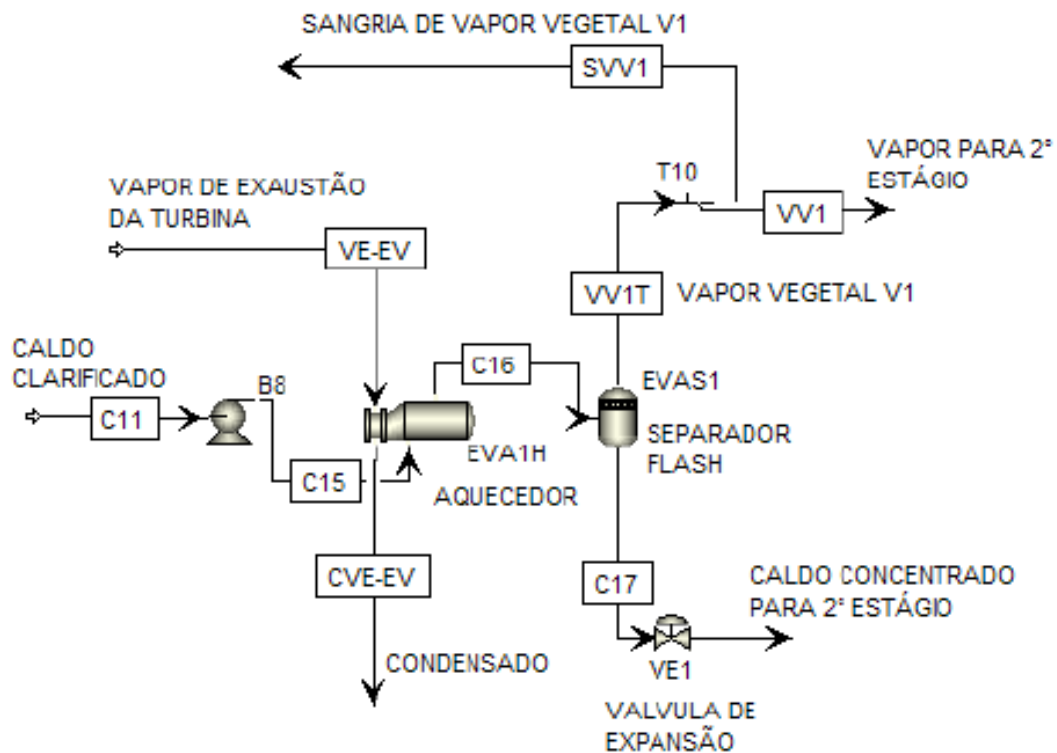


Fonte: Autor, 2026

Para a concentração do caldo foi simulado um sistema de evaporadores, seguindo o modelo de Palacios Bereche (2011). O sistema EME tomou de base a configuração do primeiro estágio implementado pelo autor e mostrado na Figura 10. Adotou-se uma estrutura composta por cinco estágios para o sistema, em que uma sequência de operações acontecem em série: a solução passa por um trocador de calor (bloco tipo *Heater*) para aumentar a temperatura, depois um evaporador (representado por um bloco *Flash*) separa o vapor quente da mistura que logo é usado como corrente quente para alimentar o trocador de calor do próximo estágio, em seguida a solução passa por uma válvula de expansão (representada por um bloco *Mixer*) antes de entrar no trocador de calor do próximo estágio.

Plus®

Figura 10. Esquema do primeiro estágio do evaporador de múltiplo efeito em Aspen



Fonte: Palacios Bereche, 2011.

No processo de concentração, uma fração da mistura de caldo e licor é direcionada aos EME. Após o aumento do teor de açúcares, o xarope obtido é misturado à fração remanescente até que a concentração final de açúcares solúveis atenda ao especificado na Seção 5.4.4. A solução que resulta é esterilizada (na prática precede ao armazenamento) prévio à etapa de fermentação gerando um produto conhecido como mosto, no programa é representado com um aquecedor e resfriador distribuídos em série.

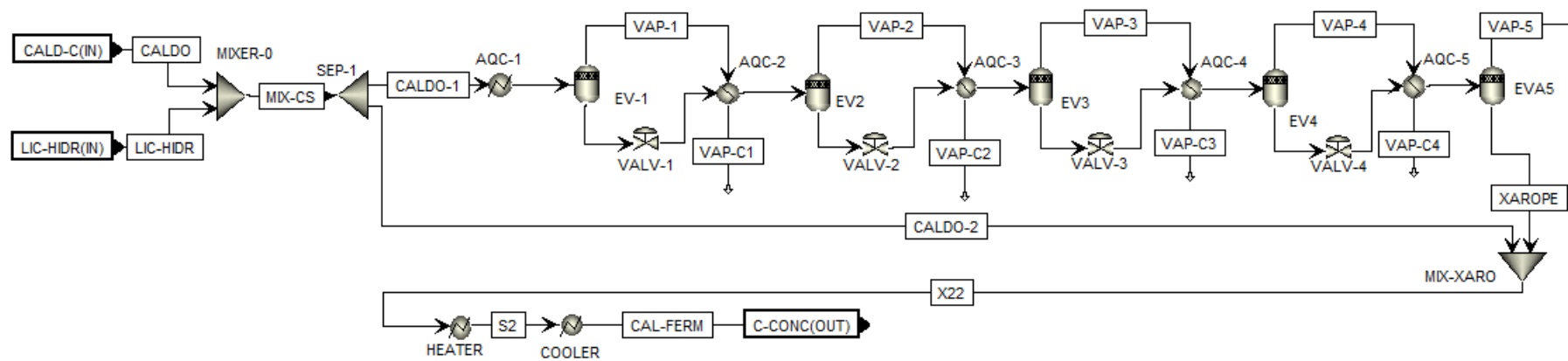
Na simulação, foram gerados cerca de 102,203 t/h de xarope, produzindo 278,864 t/h de mosto com 24,87% em concentração de açúcares. A Tabela 15 apresenta o resumo dos principais parâmetros e resultados obtidos na simulação. A Figura 11 mostra a configuração final do sistema montado para a concentração do caldo.

Tabela 15. Resultados na etapa de concentração do caldo da cana

Parâmetro	Unidade	Magnitude
Solução alimentada	t/h	938,401
Temperatura de entrada do caldo	°C	34,28
Pressão de operação do 1° efeito	bar	1,696
Pressão de operação do 2° efeito	bar	1,354
Pressão de operação do 3° efeito	bar	1,01
Pressão de operação do 4° efeito	bar	0,529
Pressão de operação do 5° efeito	bar	0,2
Concentração de açúcares no caldo de alimentação	%m/m	7,391
Concentração de açúcares no xarope concentrado	%m/m	55,089
Concentração de açúcares no mosto final	%m/m	24,870
Mosto produzido para fermentação	t/h	278,864
Temperatura de saída da esterilização	°C	130
Temperatura de saída do resfriamento	°C	32

Fonte: Autor, 2026.

Figura 11. Esquema no Aspen Plus® para a concentração do caldo



Fonte: Autor, 2026

6.1.4. Resultados do Processo de Fermentação

A etapa desenvolveu-se integralmente dentro do bloco hierárquico indicado com D (Observar Figura 6). Os 278,864 t/h de mosto produzidos na etapa anterior são adicionados uma mistura contendo a enzima previamente tratada com ácido sulfúrico e água em proporções que permitissem replicar as condições de operação observadas nas experiências de Palácios Bereche (2011) e Dias (2008). O tanque de fermentação foi representado com um bloco do tipo *RStoic*, as reações foram definidas acontecendo em série e seguindo as especificações da Seção 5.4.5, o produto é dividido em duas correntes em uma coluna representada por um bloco tipo *Flash*, a fase vapor passa por uma coluna de absorção modelada por um bloco tipo *RadFrac* para recuperar parte do álcool arrastado com o CO₂ em solução, a fase líquida passa por duas centrífugas (blocos tipo *Separator*) para separar a solução com álcool dos sólidos em suspensão e recuperar o fermento utilizado. São produzidos os vinhos fermentados que são misturados à corrente líquida que sai da coluna de absorção. O produto sólido das centrífugas é chamada de creme de levedura, uma parte é descartada, enquanto outra pode ser misturada no tanque de acondicionamento para reaproveitar parte da enzima recuperada.

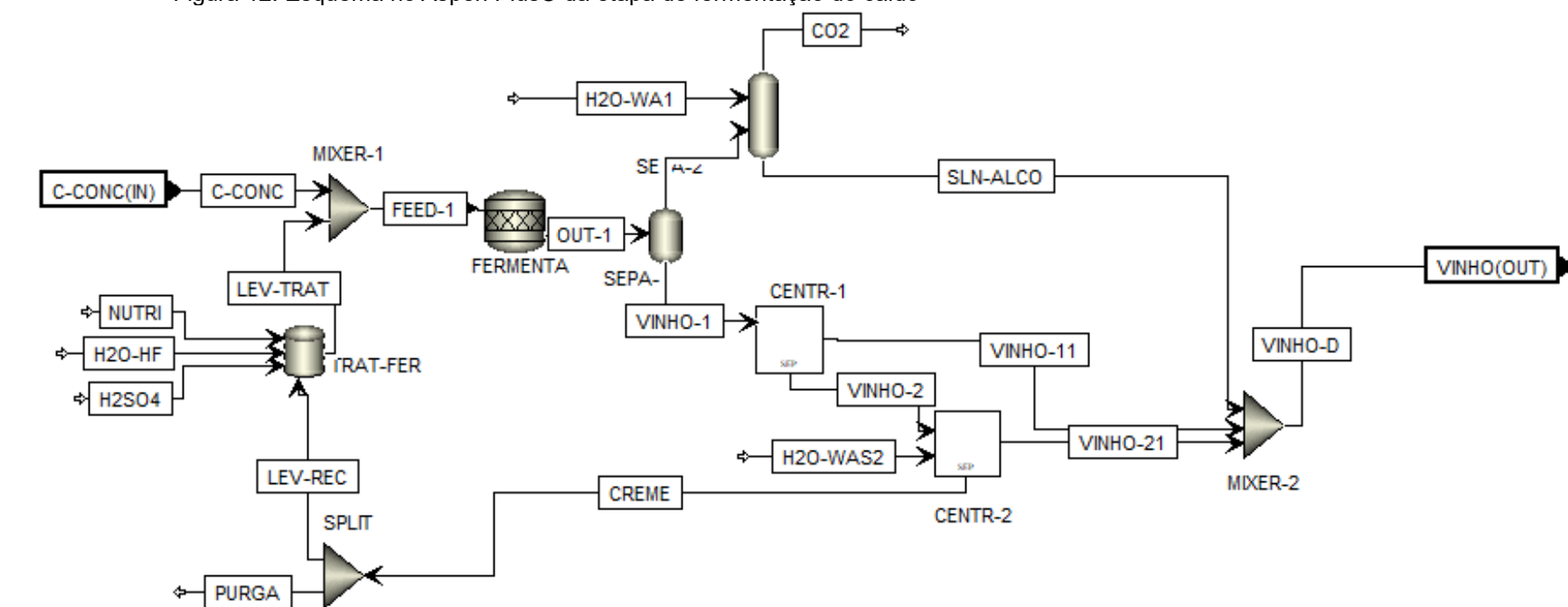
O processo apresentou um consumo de 1465,228 m³/h de água utilizada no acondicionamento da enzima e na remoção do CO₂ e produziu cerca de 258,012 t/h de vinho contendo o álcool etílico. A Tabela 16 apresenta o resumo dos parâmetros adotados no processo de fermentação do caldo e os principais resultados obtidos na simulação. A Figura 12 mostra o diagrama do processo no simulador.

Tabela 16. Resultados dos principais parâmetros na etapa de Fermentação.

Parâmetro	Unidade	Magnitude
Solução alimentada para fermentação	t/h	278,864
Temperatura de fermentação	°C	34
Fluxo de calor no reator	KJ/s (Kw)	-7599,06
Pressão nos separadores	bar	1,01325
Ácido sulfúrico para tratamento de levedura	kg/m ³ de Etanol	5
Levedura adicionada	g/kg de caldo	0,032
Umidade da Levedura tratada	%m/m	69,55
Vinho total produzido	t/h	258,012
Etanol no vinho final produzido	%m/m	13,125
% CO ₂ removido na coluna de absorção	%	99
Consumo total de água	m ³ /h	1465,228
Consumo total de vapor de água	t/h	8205,066

Fonte: Autor, 2026.

Figura 12. Esquema no Aspen Plus® da etapa de fermentação do caldo



Fonte: Autor, 2026

6.1.5. Resultados do Processo de Destilação

A etapa desenvolveu-se integralmente dentro do bloco hierárquico indicado com E (Observar Figura 6). Os 258,012 t/h de vinho produzido na etapa de fermentação seguem para as colunas de destilação projetadas para aumentar a concentração do teor alcoólico. O vinho fermentado é pré-aquecido a uma temperatura de 90°C antes de entrar na primeira coluna de destilação onde é realizada uma desgaseificação removendo o excesso de CO₂ que ainda pode estar em solução e a mistura do etanol com água é removida em uma corrente lateral chamada de flegma, o produto do fundo contém os sólidos residuais e não voláteis com um teor baixo em etanol, o vapor retirado passa por uma coluna de absorção gerando uma corrente gasosa composta maioritariamente de CO₂, enquanto parte do etanol arrastado na corrente de saída é recuperado e reaproveitado misturando-a com o vinho fermentado no aquecedor. A flegma é direcionada a uma coluna de retificação para aumentar o teor de álcool, no topo da coluna obtém-se o azeótropo da corrente de etanol de segunda geração, enquanto no produto de fundo encontra-se uma mistura conhecida como vinhaça, com baixo teor alcoólico.

Utilizou-se colunas de destilação do tipo *RadFrac* para simular a coluna de desgaseificação e de retificação por serem mais rigorosas na modelagem, enquanto a coluna de absorção foi modelada também com uma coluna do tipo *RadFrac*. A simulação mostrou uma produção de 36,219 t/h de etanol com concentração acima dos 92% e um consumo em água de 2,554 m³/h.

A corrente de AEH gerada no processo pode ser submetida a novas etapas de destilação para aumentar a concentração alcoólica, permitindo a produção de AEAC com pureza acima de 99%. Entre as técnicas que podem ser usadas, destaca-se a destilação extrativa com monoetilenoglicol (MEG), já abordada por Dias (2008) e Palacios Bereche (2011).

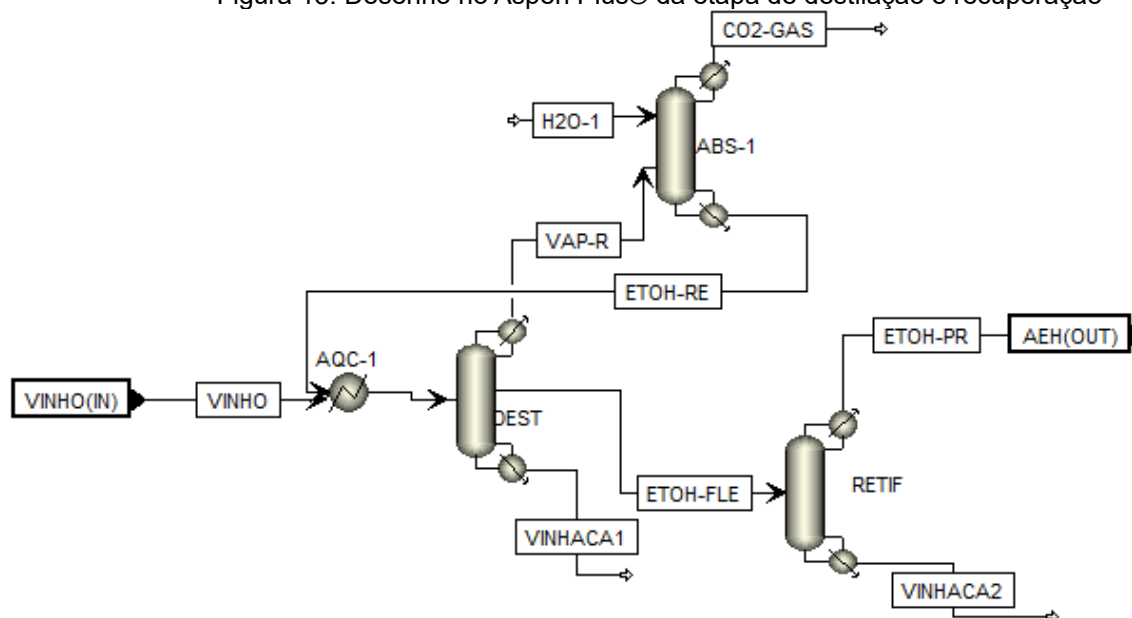
A Tabela 17 apresenta os principais parâmetros definidos e os resultados no simulador das variáveis na etapa de destilação para a obtenção do etanol, atendendo as condições previamente definidas na Seção 5.4.6. A Figura 13 mostra a configuração do processo montado no simulador.

Tabela 17. Resumo dos principais parâmetros na destilação e concentração

Parâmetro	Unidade	Magnitude
Temperatura da solução na saída do trocador	°C	90
Pressão no topo da coluna de desgaseificação	bar	2,068
Temperatura no topo da coluna de desgaseificação	°C	59,85
% CO ₂ removido na coluna de absorção	%	99
Pressão no topo da coluna de retificação	bar	1,01325
Temperatura no topo da coluna retificação	°C	77,82
Número de estágios na coluna de retificação	-	16
Estágio de alimentação na coluna de retificação	-	11
Concentração de etanol no produto de fundo	%m/m	0,075
Concentração de etanol na vinhaça	%m/m	0,001
Concentração de etanol na flegma	%m/m	27,80
Concentração de etanol no produto (AEH)	%m/m	92,62
AEH produzido	t/h	36,219
Consumo total de água	m ³ /h	2,554

Fonte: Autor, 2026.

Figura 13. Desenho no Aspen Plus® da etapa de destilação e recuperação



Fonte: Autor, 2026

6.1.6. Consumo de Água na Simulação

A simulação no Aspen Plus® mostrou um consumo variado de água utilizada diretamente nas diferentes etapas, tanto na sua forma líquida em condições padrão de 25°C e 1 atm como na forma de vapor de água a 100°C. A Tabela 18 reúne os resultados do software para as correntes de água utilizada em cada estágio, reportado nas seções anteriores.

Tabela 18. Consumo operacional de água nas etapas de produção

Estágio	Consumo de água (m³/h)	Consumo de Vapor de água (t/h)
Pré-tratamento da cana-de-açúcar	144,361	-
Hidrólise do bagaço da cana-de-açúcar	587,059	24,680
Tratamento e concentração do caldo	785,469	-
Fermentação	1465,228	8205,066
Destilação	2,554	-
Total	2984,671	8229,646

Fonte: Autor, 2026.

Como observado, a etapa de fermentação é responsável quase pela metade do consumo total de água, seguido pelas etapas de tratamento do caldo extraído da cana e de hidrólise do bagaço, a destilação e retificação do vinho apresenta a menor demanda dentre todos os estágios, seguido do pré-tratamento físico da cana-de-açúcar. O elevado consumo na penúltima etapa é justificado pela quantidade de água necessária para o preparo e acondicionamento da levedura utilizada na etapa de fermentação. Além disso, o vapor saturado consumido nesta etapa é utilizado para recuperação de parte do etanol arrastado na corrente de gases com a remoção do CO₂ liberado nas reações, enquanto no processo de hidrólise é utilizado diretamente no pré-tratamento do bagaço.

6.2. Análise Comparativa dos Resultados da Literatura com a Simulação

De acordo com o estudo do BNDS (2008), uma tonelada de cana processada produz cerca de 85 litros de etanol, o que corresponde a aproximadamente 67 kg do biocombustível por tonelada de cana-de-açúcar (0,067 kg de etanol por kg de cana), considerando uma densidade média do álcool de 0,79 kg·L⁻¹. Para o etanol 2G, obtido por hidrólise do bagaço, o documento indica um rendimento de 378 litros por tonelada de bagaço seco, em um cenário com o aproveitamento de 30% do bagaço disponível e metade da palha. Considerando os valores médios de geração de bagaço na indústria canavieira (estimados em 295 kg de bagaço com umidade de 50% produzidos por tonelada de cana), o volume é de cerca de 55,8 litros, equivalente a aproximadamente 44,0 kg de etanol, ou 0,0440 kg do álcool produzido por kg de cana. Em um cenário integrado de produção de etanol, a produção total pode alcançar aproximadamente os 78 kg por tonelada de cana processada, o que corresponde a 0,078 kg de álcool gerado por kg de cana.

Diversas simulações desenvolvidas nos trabalhos de Dias (2008) mostraram aumentos de 15% a 21% na produção de etanol em cenários que integravam a hidrólise do bagaço na produção convencional de etanol a partir da cana-de-açúcar como matéria-prima. Em cenários simulados onde houve um reaproveitamento de 60% do bagaço disponível, a produção alcançou os 99,6 litros por tonelada de cana processada, o equivalente a 0,0786 kg de etanol produzido por quilograma de cana, sendo que a contribuição do álcool de segunda geração representou cerca de 0,0123 kg. Em casos com maior reaproveitamento do bagaço, o rendimento atingiu os 102,23 litros de etanol por tonelada de cana (para um reaproveitamento de 80% do bagaço), a autora mostrou que uma integração de 70% do bagaço no processo produtivo pode aumentar a produção de etanol em cerca de 17%. Porém, destaca-se o desafio da integração da hidrólise do material lignocelulósico por conta do aumento na demanda energética e do consumo de água que podem inviabilizar o processo, aumentando também os custos de produção.

Por outro lado, o estudo de Palacios Bereche (2011) reportou uma produção de etanol de segunda geração no caso base da simulação industrial (moagem de 500 t/h de cana-de-açúcar) em 2,3 litros por tonelada de cana processada. Em cenários alternativos com maior integração energética e integração de bagaço ao processo de hidrólise, os valores variaram entre 2,6 e 2,8 litros por tonelada de cana. Fazendo as mesmas considerações com a densidade do etanol, os resultados correspondem a uma produção de entre 1,8 e 2,2 kg de etanol de segunda geração por tonelada de cana processada (entre 0,0018 e 0,0022 kg de etanol por quilograma de cana). No total, a produção de álcool anidro variou entre 79-88 L/t de cana (equivalente a 0,0624 a 0,070 kg de etanol por quilograma de cana), sendo que o menor resultado não considera a integração do bagaço na produção.

Os resultados da simulação neste trabalho mostraram uma produção de etanol hidratado (com concentração em álcool acima dos 92%) de 36219,529 kg (equivalente a 44649,41 litros em condições padrão de 25°C e 1 atm) com o processamento de 461726,388 kg de cana, dando uma produção média de 0,0784 kg de Álcool etílico/kg de cana-de-açúcar (equivalente a 96,70 L de Etanol/t de cana); desse total, a etapa de hidrólise do bagaço seria responsável por 8,574 kg por tonelada de cana processada (equivalente a 10,57 L de Etanol/t de cana). A Tabela 19 mostra uma comparação entre os dados encontrados na literatura estudada e aqueles obtidos pela simulação.

Tabela 19. Comparação entre resultados da literatura e da simulação para a produção de etanol 2G.

Fonte	Cana-de-açúcar processada (t/h)	Produção de Etanol (L/t de cana)		Produção de Etanol (kg/kg de cana)	
		Total	Hidrólise do bagaço	Total	Hidrólise do bagaço
BNDES (2008)	-	98,73	55,76	0,0780	0,0440
Marina Oliveira de Souza Dias (2008)	493,10	99,60	15,57	0,0786	0,0123
Reynaldo Palacios Bereche (2011)	500,00	~ 83,50	~ 2,70	~ 0,0662	~0,0020
Este trabalho	461,726	96,70	10,57	0,0784	0,00857

Fontes: Elaborado com resultados da simulação e baseado com dados dos trabalhos de Dias (2008) e Palacios Bereche (2011).

Cabe ressaltar que os autores consideram diferentes níveis de integração do bagaço no processo de produção de etanol. BNDES (2008) e Dias (2008) utilizam 30% ou mais do bagaço disponível nos seus cálculos, enquanto Palacios Bereche (2011) reporta bons resultados para uma integração de 70%. Para fins de comparação, neste trabalho foi considerado que 40% do bagaço gerado é integrado no processo convencional de produção de etanol, utilizando 50% do cultivo de cana-de-açúcar da usina Chaparrastique para refinaria, uma vez que as referências consultadas apresentam dados de produção de etanol com um aproveitamento de 30 a 80% do bagaço gerado nas usinas.

Outro fator importante é o elevado consumo de água no processo. Como foi mostrado, a hidrólise do bagaço pode representar cerca de 20% da demanda de água (19,66% com base nos resultados da Tabela 18), enquanto o processo de fermentação dos açúcares redutores pode significar quase a metade da demanda total (49,09%). Cabe mencionar que os resultados da simulação consideram um consumo teórico operacional, em que a água forma parte de uma corrente de matéria utilizada diretamente nos processos de transformação e reações das etapas de produção desenvolvidas na simulação, como lavagem de matérias, preparo de soluções, circulação intermediária, entre outros, sendo que o consumo real do recurso pode aumentar dependendo das necessidades reais da usina Chaparrastique e de fatores não considerados neste estudo.

7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho permitiu desenvolver uma análise teórica da produção de etanol de segunda geração integrado ao processo convencional de obtenção de etanol a partir da cana-de-açúcar, considerando informações sobre a produção de cana-de-açúcar em El Salvador e utilizando as ferramentas de modelagem e simulação do software Aspen Plus®. A partir da revisão bibliográfica e da implementação do modelo proposto, foi possível representar as principais operações unitárias envolvidas no processo industrial, desde o tratamento inicial da matéria-prima até as etapas finais de fermentação, destilação e concentração do álcool etílico hidratado produzido.

Os resultados demonstraram que o aproveitamento do bagaço da cana-de-açúcar como fonte de biomassa lignocelulósica apresenta potencial para ampliar a produção de etanol sem a necessidade de expandir significativamente as áreas cultivadas, agregando valor energético a um resíduo amplamente disponível na indústria açucareira. Em um país onde existem limitações de extensão territorial para a expansão de cultivos, a integração do processo de hidrólise ao sistema convencional pode aumentar a competitividade das usinas ao diversificar os produtos comercializados, reduzir desperdícios industriais e possibilitar novas aplicações energéticas para a biomassa residual. Além disso, a tendência internacional de expansão do mercado de biocombustíveis e de redução das emissões de carbono pode favorecer investimentos futuros em tecnologias de produção de etanol e bioenergia.

A modelagem desenvolvida no Aspen Plus® apresentou coerência com os dados e parâmetros reportados na literatura, principalmente nos trabalhos de Dias (2008) e Palacios Bereche (2011), e o relatório do BNDES (2008) utilizados como base metodológica para o estudo. Conseguiu-se uma produção de álcool com concentração de etanol dentro dos parâmetros esperados para álcool hidratado, AEH, produzido em usinas convencionais. Nesse sentido, o uso do modelo termodinâmico NRTL associado à equação de estado SRK mostrou-se adequado para representar o comportamento das misturas envolvidas nas etapas de fermentação e destilação, especialmente no sistema não ideal estudado de etanol-água.

Além disso, observou-se que as etapas de pré-tratamento e hidrólise representam pontos críticos no processo de produção de etanol 2G, tanto do ponto de

vista operacional quanto econômico, devido ao elevado consumo de vapor, água e enzimas, assim como pelas limitações relacionadas aos rendimentos de conversão da biomassa lignocelulósica. Ainda assim, a simulação demonstrou que a integração do etanol de segunda geração ao processo convencional constitui uma alternativa promissora para aumentar a eficiência global das usinas e contribuir para a diversificação da matriz energética.

A simulação mostrou que o processo de obtenção de etanol 2G incorporado ao processo convencional de produção por fermentação enzimática, apresenta um elevado consumo de água, a maior parte da demanda concentra-se no processo de conversão dos açúcares redutores em álcool (etapa de fermentação), dado que o recurso é utilizado em sua maioria no acondicionamento da levedura e lavagem do produto. Assim, devem ser avaliados mecanismos para melhorar a eficiência do aproveitamento do recurso no processo.

Finalmente, conclui-se que a produção de etanol de segunda geração a partir do bagaço da cana-de-açúcar representa uma alternativa tecnologicamente interessante e ambientalmente relevante para o aproveitamento energético da biomassa residual disponível na indústria açucareira salvadorenha. A incorporação do processo de hidrólise ao sistema convencional permitiu a conversão parcial da fração celulósica e hemicelulósica, presente no resíduo lignocelulósico de bagaço, em açúcares fermentescíveis, aumentando teoricamente a disponibilidade de substrato para a produção alcoólica. Os elevados consumos tanto em água e vapor observados na simulação mostram a necessidade de futuras otimizações operacionais e energéticas que podem ser relacionadas à integração térmica do processo e reaproveitamento de correntes hídricas, de modo de reduzir o consumo de utilidades e aproveitar os recursos de forma mais eficiente, buscando garantir uma viabilidade econômica e ambiental do processo.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a ampliação do estudo considerando análises energéticas, econômicas e ambientais mais detalhadas, bem como a incorporação de sistemas de cogeração e otimização das etapas de hidrólise e destilação, visando melhorar a eficiência global do processo e reduzir seus custos operacionais, da mesma forma em que os autores abordaram em seus estudos para a otimização do processo industrial.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Resolução ANP nº 907, de 18 de novembro de 2022**. Dispõe sobre as especificações do etanol combustível e suas regras de comercialização em todo o território nacional. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 23 nov. 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/>. Acesso em: 10 jun. 2026.

ARAÚJO MARTINS, Fernanda de; MARTIM, Thamara; CORRÊA, Andressa Maria; OLIVEIRA, Faberson Ferreira. **A Produção do Etanol de Segunda Geração a partir do Bagaço da Cana-de-Açúcar**. p. 5-16. In: Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção, 2014. Vol. 2, n. 3. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/>.

ASPENTECH. Aspen Plus. Disponível em: <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-plus>. Acesso em: 12 nov. 2025.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES); CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: BNDES, 2008.

BORGHI PELÁ, Ana Luiza. **Etanol de Segunda Geração a partir do bagaço de cana-de-açúcar: Análise do ciclo de vida com relação às emissões de CO₂**. 2014. Monografia (Engenharia Bioquímica) - Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de Lorena, São Paulo, 2014.

CASTIÑEIRAS FILHO, Sergio Luiz Pinto; PRADELLE, Florian. **Modelling of a Brazilian ethanol plant: impact of the bagasse use and the ethanol dehydration on energy efficiency and sustainability**. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 42, n. 568, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02653-3>. Acesso em 20 jun. 2026.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar. Safra 2025/26 – 4º levantamento**. Brasília, DF: CONAB, 2025.

CONSEJO SALVADOREÑO DE LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA (CONSAA). Site oficial. San Salvador: CONSAA, 2024. Disponível em: <https://consaa.gob.sv/>.

CORDERO DIAZ, Victor Armando; CASTILLO ZAPATA, Oscar Rene; MARTÍNEZ BENÍTEZ, Juan Carlos. **Estudio de Factibilidad para producir bioetanol a partir de la caña de azúcar y su uso en la mezcla con gasolina para vehículos automotores**. Tesis (Maestría em Gestión em energías renovables) – Universidad Don Bosco. La Libertad, El Salvador, 2019.

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**. 2008.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP, 2008.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2025: ano-base 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2025.

FUNDACIÓN SALVADOREÑA PARA EL DESARROLLO ECONÓMICO Y SOCIAL (FUSADES). **Mercado de azúcar en El Salvador: boletín informativo**. San Salvador: FUSADES, 2024. Disponível em: <<https://fusades.org>>.

GRASEL, Fabio dos S.; STIEHL, Ana C. R.; BERNARDI, Luis P.; HERPICH, Tiago L.; BEHRENS, Michele C.; ANDRADE, Jailson B. DE; SCHULTZ, Juliana; MANGRICH, Antônio S.; “**Inovação em Biorrefinarias I. Produção de Etanol de Segunda Geração a partir de Capim-Elefante (*Pennisetum purpureum*) e Bagaço de Cana-de-Açúcar (*Saccharum officinarum*)**”; p. 4-14. In: Revista Virtual de Química, 2016. Vol. 9, n. 1. Disponível em: <http://rvq.sbq.org.br>.

GUZMÁN, Jessica. **¿Cómo se transforma el bagazo de caña de azúcar a energía eléctrica?** San Salvador: El Diario de Hoy, 16 jan. 2018. Disponível em:

<<https://historico.elsalvador.com/historico/439746/como-se-transforma-el-bagazo-de-cana-de-azucar-a-energia-electrica.html>>. Acesso em: 28 set. 2025.

LIMA, Urgel de Almeida. **Biotecnologia industrial: processos fermentativos e enzimáticos / Urgel de Almeida Lima; outros coord.: Eugênio A. A. Aquarone, Walter Borzani, Willibaldo Schmidell**. São Paulo: Blucher, 2001. ISBN 85-212-0280-6.

OLADE – ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA. **PANORAMA ENERGÉTICO DE AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE**. Quito, dec. 2024. Disponível em: <<https://sielac.olade.org/WebForms/Reportes/VisorDocumentos.aspx?or=453&documentId=10000018>>.

PACHECO, Thályta Fraga. **Produção de Etanol: Primeira ou Segunda Geração?** – Circular Técnica 04 Embrapa. Brasília DF, 2011.

PALACIOS BERECHÉ, Reynaldo. **Modelagem e integração energética do processo de produção de etanol a partir da biomassa de cana-de-açúcar**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP, 2011.

PÉREZ MEJÍA, Carlos Isaac; RAMÍREZ MONTERROSA, Miguel. **Estudio de Mercado del Biodiésel en El Salvador, Honduras y Nicaragua**. 1 ed. Servicio Holandés de Cooperación al Desarrollo SNV World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). Honduras. Agosto 2008.

SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. H. de; COLODETTE, J. L. et al. **Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol**. São Paulo, 2012. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422012000500025. Acesso em 29 fev. 2024.

SUN, Y.; CHENG, J. **Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review**. Bioresource Technology, v. 83, p. 1–11, 2002.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOENERGIA (UNICA). **UnicaData: produção de etanol**. São Paulo: UNICA, [2026]. Disponível em: <https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=63>. Acesso em: 20 jun. 2026.

ANEXOS

ANEXO A – Diagrama de Blocos do Processo de Produção de Etanol Anidro a Partir do Caldo e do Bagaço da Cana-de-Açúcar

Na Figura A. 1 é apresentado o diagrama de blocos do processo convencional de produção de etanol anidro a partir do caldo da cana-de-açúcar considerado no trabalho de Dias (2008).

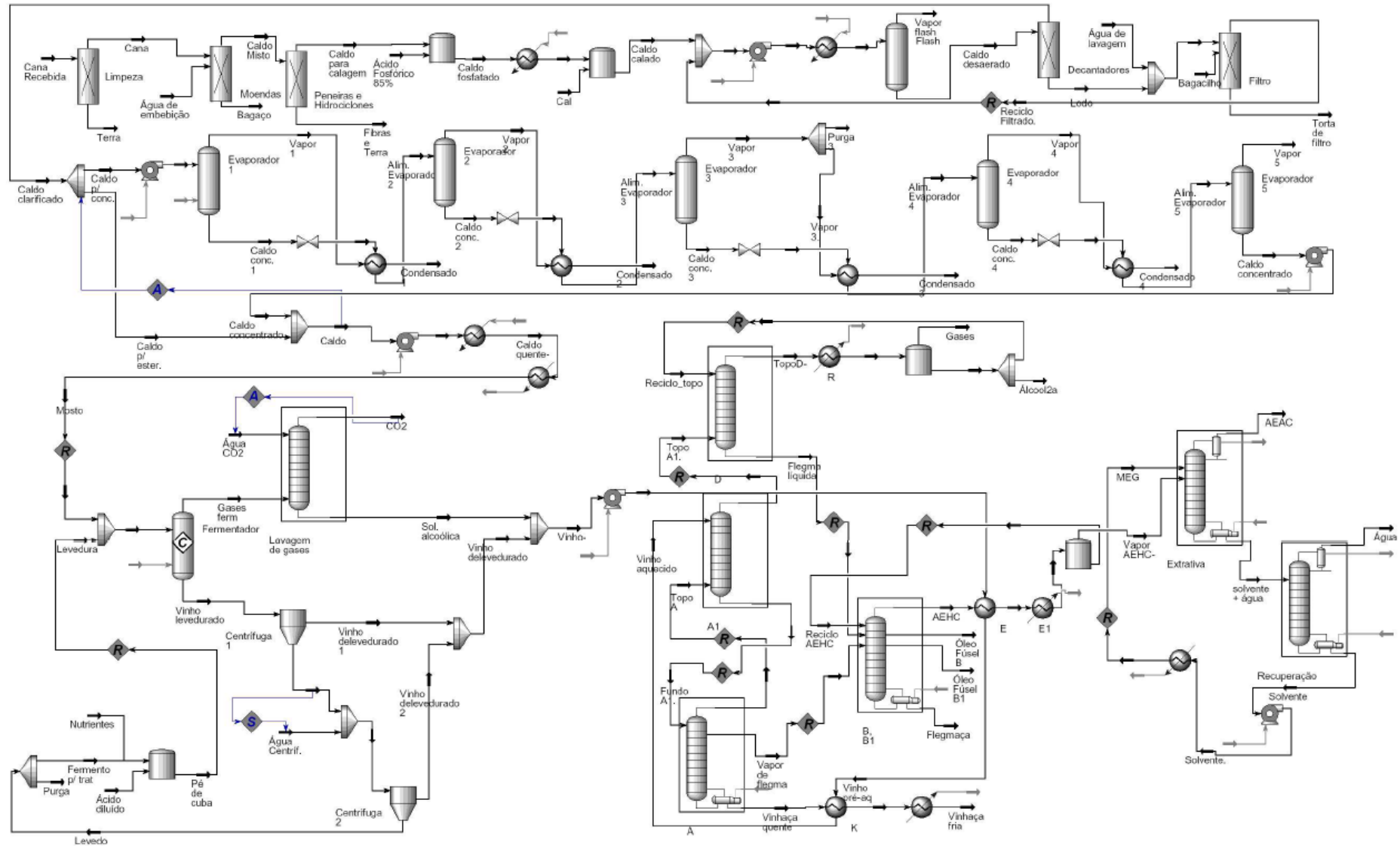
Versão Final Homologada
24/07/2026 11:07

ANEXO B – Fluxogramas dos Processos de Produção de Etanol a Partir da Cana e do Bagaço da Cana-de-Açúcar no Aspen Plus

As seguintes Figura B. 1 e Figura B. 2 apresentam o fluxograma da simulação completa do processo convencional de produção de etanol anidro e de hidrólise do bagaço da cana-de-açúcar desenvolvido por Dias (2008) no simulador Aspen Plus®.

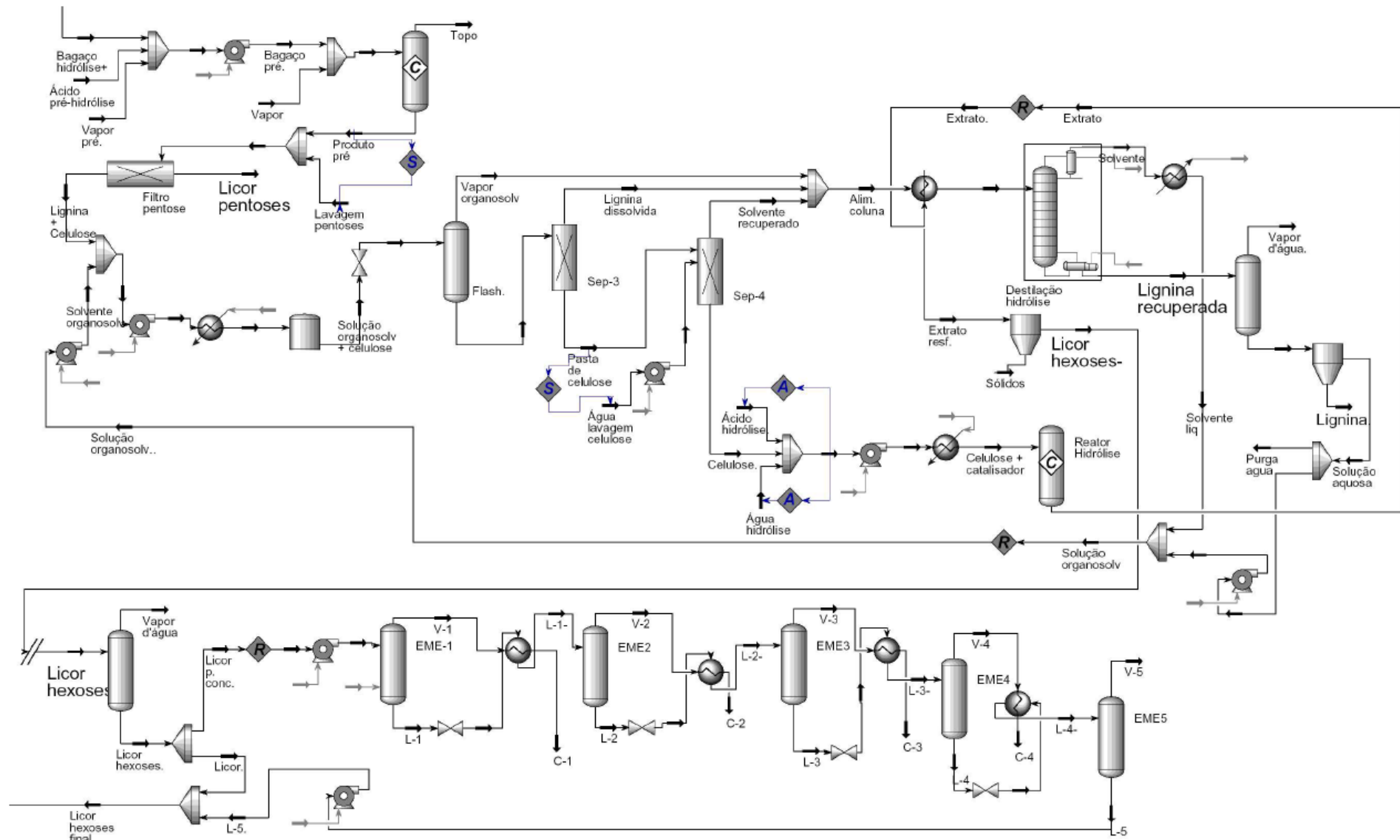
As figuras Figura B. 3 Figura B. 4 Figura B. 5 e Figura B. 6 apresentam os fluxogramas das etapas de tratamento do bagaço e hidrólise para obtenção de um licor de glicose, sistemas desenvolvidos por Palacios Bereche (2011) no simulador Aspen Plus®, que também leva em consideração a integração do processo de cogeração.

Figura B. 1: Fluxograma da simulação completa do processo convencional de produção de etanol anidro



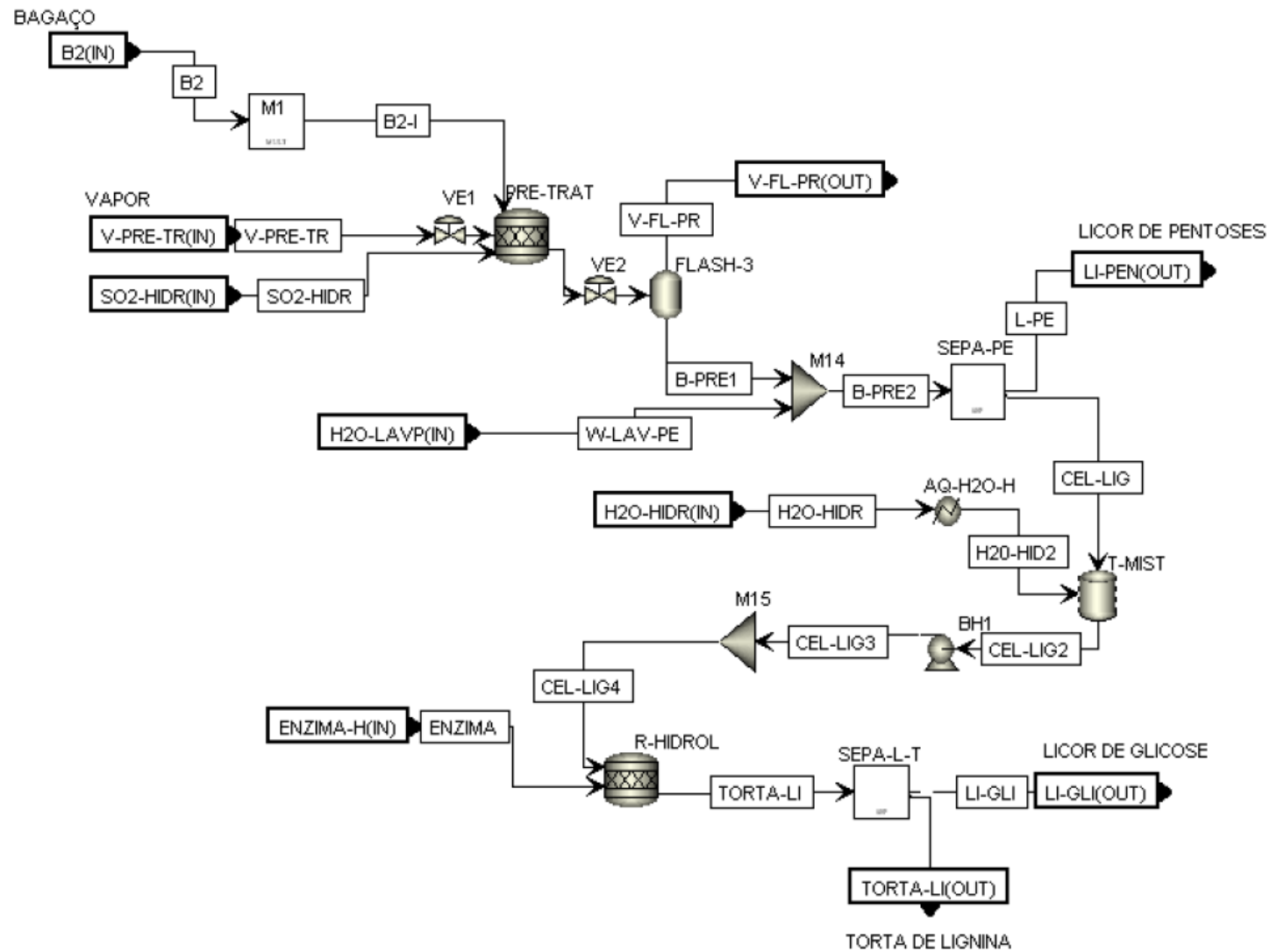
Fonte: Dias, 2008.

Figura B. 2: Fluxograma da simulação completa do processo de hidrólise do bagaço da cana-de-açúcar



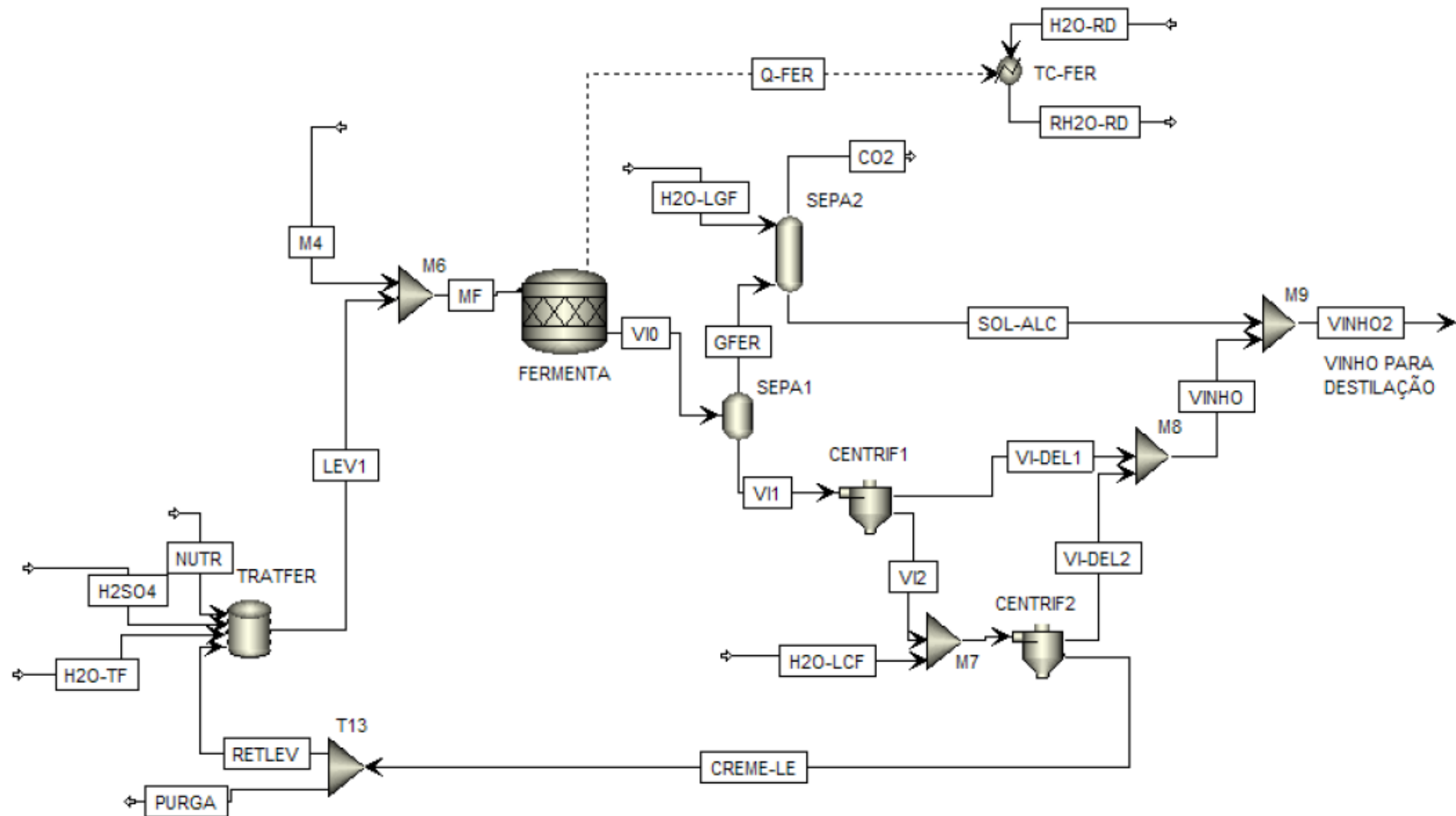
Fonte: Dias, 2008.

Figura B. 3: Fluxograma do processo de hidrólise enzimática com pré-tratamento por explosão a vapor no Aspen Plus



Fonte: Palacios Bereche, 2011.

Figura B. 4: Fluxograma do processo de fermentação em Aspen Plus®



Fonte: Palacios Bereche, 2011.

Figura B. 5: Fluxograma do processo de hidrólise enzimática integrado ao sistema de cogeração em Aspen Plus®

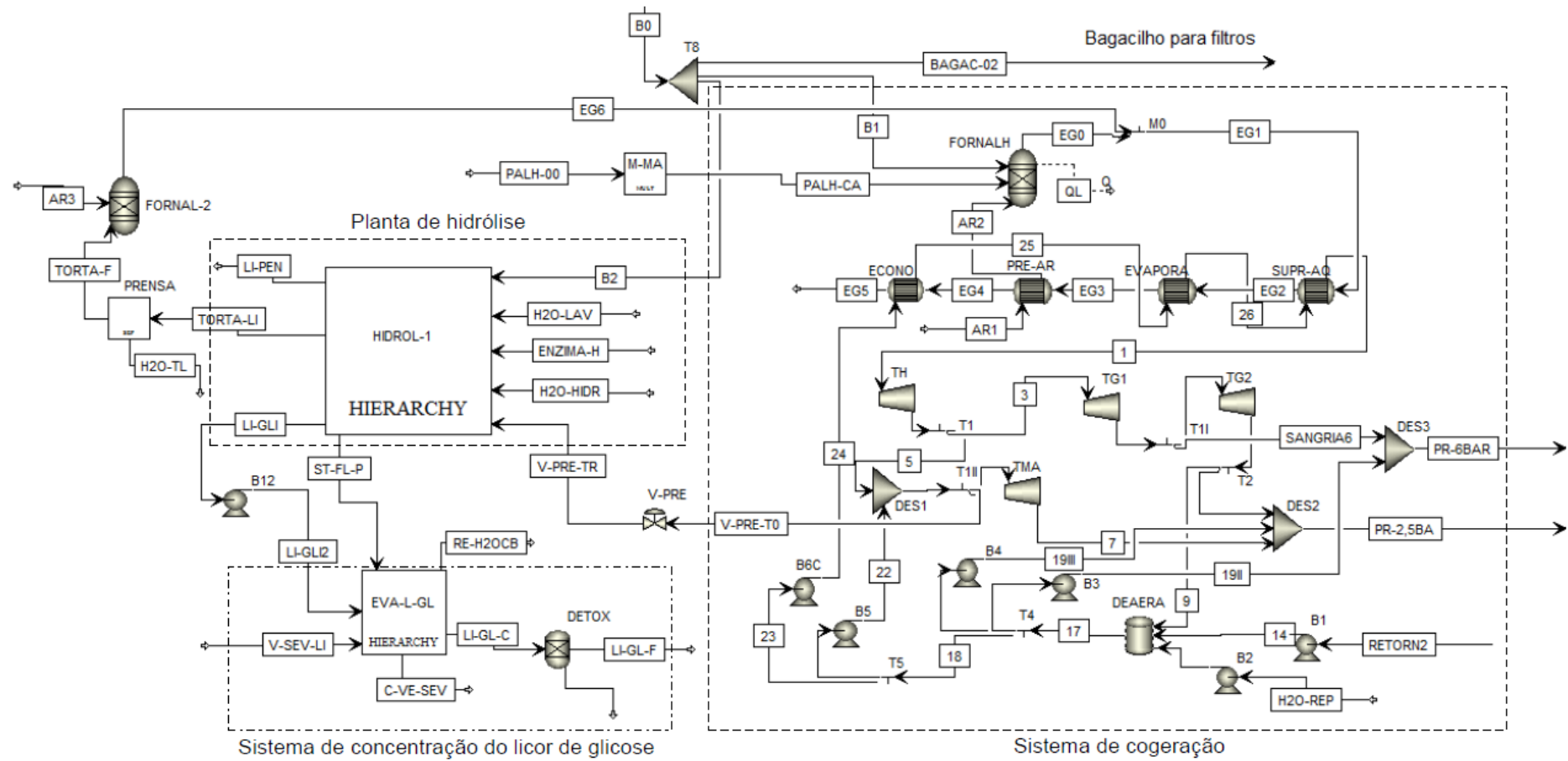
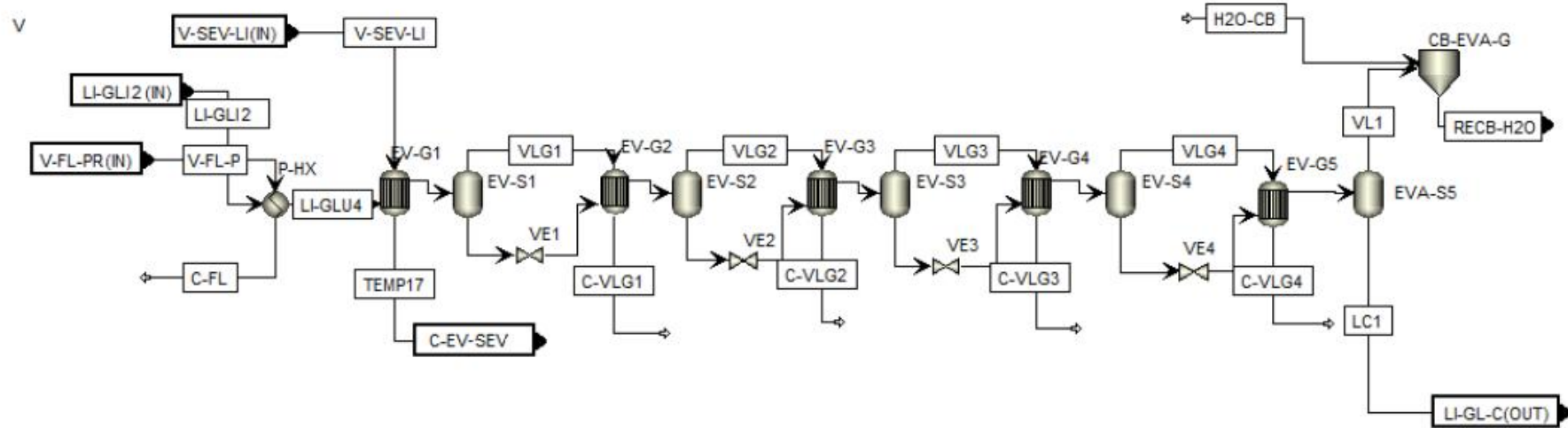


Figura B. 6: Fluxograma do sistema de concentração de licor de glicose em Aspen Plus



Fonte: Palacios Bereche, 2011.