



**LARA DAMAS ALVARENGA  
ROBERTA TEIXEIRA ROSA SANTOS**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA ATIVAÇÃO  
DE UMA UNIDADE DE PRODUÇÃO DE ETANOL ANIDRO  
EM UMA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA**

**LAVRAS – MG  
2023**

**LARA DAMAS ALVARENGA  
ROBERTA TEIXEIRA ROSA SANTOS**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE ATIVAÇÃO DE UMA UNIDADE  
DE PRODUÇÃO DE ETANOL ANIDRO EM UMA INDÚSTRIA  
SUCROENERGÉTICA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Luciano Jacob Correa  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2023**

**LARA DAMAS ALVARENGA  
ROBERTA TEIXEIRA ROSA SANTOS**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE ATIVAÇÃO DE UMA UNIDADE  
DE PRODUÇÃO DE ETANOL ANIDRO EM UMA INDÚSTRIA  
SUCROENERGÉTICA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 28 de julho de 2023.

Prof. Dr. Luciano Jacob Correa (DEG/UFLA)  
Presidente

Prof. Dr. Gilson Campani Junior (DEG/UFLA)  
Membro

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Suellen Mendonça Nascimento (DEG/UFLA)  
Membro

**LAVRAS – MG  
2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente aos nossos pais, irmãos, famílias e amigos por todo apoio, amor e carinho a nós concedidos durante toda a vida.

Aos nossos professores por tanto conhecimento compartilhado, em especial ao Professor Luciano por tamanho auxílio e orientação que nos foi prestado até aqui.

Às entidades acadêmicas das quais fizemos parte por tamanha experiência e aprendizado, em especial à PQ Júnior, na qual nos conhecemos e nos possibilitou estarmos hoje reunidas na consecução deste trabalho.

Aos colegas de empresa por todo apoio prestado durante o desenvolvimento do presente estudo.

## RESUMO

Devido às atuais preocupações com relação ao aquecimento global, o etanol tem se destacado como um dos principais combustíveis renováveis do mundo. A produção de etanol anidro combustível (EAC) pelo setor sucroalcooleiro é realizada por meio da desidratação do etanol hidratado combustível (EHC), objetivando um teor alcoólico mínimo de 99,30% em massa, de acordo com a resolução ANP nº 907 de 18.11.2022 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Atualmente, a produção do etanol anidro vem atingindo espaço no mercado frente ao etanol hidratado devido ao preço competitivo e à sua maior eficiência agregada. Diante disso, este trabalho objetiva avaliar a viabilidade econômica de um projeto de expansão industrial, através de metodologias de estimativa de custos, com a ativação de uma unidade de produção de etanol anidro via destilação extrativa em uma indústria sucroenergética fictícia no estado de São Paulo. Para o empreendimento em questão, o capital de investimento (CAPEX) necessário para *startup* da planta foi estimado em 12 milhões de reais, estando inclusos os custos dos equipamentos e gastos com sua instalação. As despesas operacionais (OPEX), incluindo os gastos com mão-de-obra, matéria-prima, utilidades e manutenção, resultou em um total anual de R\$2.455.454,68. Por fim, como forma de embasamento e auxílio na tomada de decisão da empresa em relação à expansão de suas instalações industriais, foram calculados alguns indicadores financeiros, os quais apresentaram um cenário encorajador, com um período de 7 anos necessário para retorno do investimento. A Taxa Interna de Retorno (TIR) foi calculada em 22,71% ao ano, superando a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 12,50%, o que também indica a viabilidade do investimento. Além disso, o Retorno sobre Investimento (ROI) de 24,08% mostra-se aceitável quando se avalia o valor robusto do investimento inicial.

**Palavras-chave:** Eficiência. Estimativa de Custos. Etanol. Expansão Industrial. Indicadores Financeiros. Mercado Competitivo.

## ABSTRACT

Due to current concerns regarding global warming, ethanol has emerged as one of the leading renewable fuels in the world. The production of anhydrous ethanol fuel (EAF) by the sugarcane industry is carried out through the dehydration of hydrated ethanol fuel (HEF), aiming for a minimum alcohol content of 99.30% by mass, in accordance with Resolution ANP No. 907 of November 18, 2022, from the National Agency of Petroleum, Natural Gas, and Biofuels (ANP). Currently, anhydrous ethanol production is gaining market share over hydrated ethanol due to its competitive price and higher overall efficiency. In light of this, this study aims to evaluate the economic viability of an industrial expansion project through cost estimation methodologies, by activating an anhydrous ethanol production unit via extractive distillation in a fictitious sugarcane industry in the state of São Paulo. For the specific venture, the Capital Expenditure (CAPEX) required to start up the plant was estimated at 12 million Brazilian Reals, including equipment costs and installation expenses. The Operational Expenditure (OPEX), including expenditures on labor, raw materials, utilities, and maintenance, resulted in a total of R\$2,455,454.68 per year. Finally, as a basis for decision-making support regarding the expansion of their industrial facilities, several financial indicators were calculated, which presented an encouraging scenario with a 7-year payback period. The Internal Rate of Return was calculated at 22.71% per year, surpassing the Minimum Attractive Rate of 12.50%, indicating the feasibility of the investment. Furthermore, the Return on Investment of 24.08% proves to be acceptable when considering the substantial value of the initial investment.

**Keywords:** Competitive Market. Cost Estimation. Efficiency. Ethanol. Financial Indicators. Industrial Expansion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do processo produtivo de açúcar e etanol.....	16
Figura 2 - Esquema simplificado do processo de destilação para produção de etanol.....	20
Figura 3 - Fluxograma da destilação extrativa com utilização do MEG como solvente.....	23
Figura 4 - Fluxograma da destilação azeotrópica heterogênea com cicloexano. ....	24
Figura 5 - Fluxograma da destilação por adsorção em peneiras moleculares. ....	26
Figura 6 - <i>Layout</i> industrial simplificado da planta, considerando a sua ampliação.....	39
Figura 7 - Comparativo do preço de venda de etanol anidro e hidratado.....	42
Figura 8 - Comparativo do volume de produção de etanol anidro e hidratado. ....	43
Figura 9 - Vendas de etanol hidratado no Brasil. ....	44
Figura 10 - Vendas de etanol anidro no Brasil. ....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção mundial de etanol (mil. Gal.). .....	14
Tabela 2 - Produção de etanol anidro e hidratado na região sudeste brasileira. ....	15
Tabela 3 - Correlações para os demais custos de produção. ....	34
Tabela 4 - Produção de etanol anidro e hidratado (em mil litros). ....	38
Tabela 5 - Preço do etanol anidro e hidratado (R\$/litro). ....	38
Tabela 6 - Relação de equipamentos e capacidade de operação. ....	39
Tabela 7 - Insumos e matérias-primas necessárias para a destilação extrativa com MEG. ....	40
Tabela 8 - Relação de custo e quantidade gasta com utilidades. ....	40
Tabela 9 - Capacidade produtiva de açúcar, etanol hidratado e etanol anidro. ....	45
Tabela 10 - Valor gasto, em mil reais por tonelada ou m <sup>3</sup> , com matérias-primas. ....	46
Tabela 11 - Cálculo do Demonstrativo de Resultados de Exercício. ....	47
Tabela 12 - Análise de <i>Payback</i> . ....	48

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	Objetivo geral.....	12
2.2	Objetivos específicos.....	12
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
3.1	A indústria sucroenergética.....	13
3.1.1	Produção mundial de etanol.....	14
3.2	Processo de produção de etanol.....	15
3.2.1	Preparo da cana.....	16
3.2.2	Extração do caldo.....	17
3.2.3	Clarificação do caldo.....	17
3.2.4	Concentração do caldo.....	18
3.2.5	Fermentação.....	18
3.2.6	Destilação.....	19
3.2.7	Desidratação.....	20
3.3	Etanol hidratado.....	20
3.4	Etanol anidro.....	21
3.4.1	Destilação extrativa com MEG (Monoetilenoglicol).....	22
3.4.2	Destilação azeotrópica heterogênea com ciclohexano.....	23
3.4.3	Destilação por adsorção em peneiras moleculares.....	25
3.5	Projeto de uma indústria química/bioquímica.....	26
3.6	Estudo de viabilidade técnico-econômica do projeto.....	27
3.7	Estimativa de custos.....	27
3.7.1	Capital de investimento (CAPEX).....	28
3.7.1.1	Correção da capacidade.....	29
3.7.1.2	Correção temporal.....	30
3.7.1.3	Correção de localização.....	30
3.7.1.4	Estimativa de estudo.....	31
3.7.2	Custos de produção (OPEX).....	32
3.8	Indicadores de análises financeiras.....	34
3.8.1	Demonstrativo de resultado de exercício (DRE).....	35
3.8.2	Valor presente líquido (VPL).....	35
3.8.3	Taxa interna de retorno (TIR).....	36

3.8.4	<i>Payback</i> .....	37
3.8.5	Retorno sobre investimento (ROI) .....	37
4	METODOLOGIA .....	38
4.1	Estudo de mercado .....	38
4.2	Projeto e condições operacionais da unidade de produção .....	38
4.2.1	Capital de investimento .....	39
4.2.2	Custos de produção .....	40
4.3	Indicadores de viabilidade econômica .....	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
5.1	Análise de mercado .....	42
5.2	Condições operacionais da unidade de produção.....	45
5.2.1	Cálculo CAPEX .....	45
5.2.2	Cálculo OPEX .....	46
5.3	Indicadores de análise financeira .....	47
5.3.1	DRE.....	47
5.3.2	VPL .....	48
5.3.3	TIR.....	49
5.3.4	<i>Payback</i> .....	49
5.3.5	ROI.....	50
6	CONCLUSÃO.....	51
	REFERÊNCIAS .....	52

## 1 INTRODUÇÃO

Com o aumento do consumo de derivados de petróleo, principais causadores do aquecimento global e responsáveis por um elevado percentual das emissões de dióxido de carbono para a atmosfera, surgiram importantes discussões relacionadas à necessidade de utilização de fontes de energia renováveis e menos poluentes. Dentre as alternativas levantadas destaca-se de maneira satisfatória a utilização de biocombustíveis, combustíveis produzidos a partir de fontes biológicas renováveis derivados de fontes vegetais, como cana-de-açúcar, milho e soja; e animais, como a gordura, caracterizando o biodiesel (SALLET, 2011).

O grande avanço na utilização do álcool foi a partir da crise do petróleo no início da década de 1970, na qual o Brasil produzia cerca de 20% do petróleo necessário e o preço elevado da matéria-prima gerou uma grave crise cambial no país. Para tanto, foram propostos o aumento da produção interna de petróleo e a utilização do etanol como combustível automotivo, sendo então instituído o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), em novembro de 1975, que buscava incentivar o aproveitamento e desenvolvimento da tecnologia sucroalcooleira para veículos automotores.

Com a criação do Proálcool, a produção brasileira desse combustível cresceu de 1 bilhão de litros, em 1975, para uma média de 20 bilhões de litros, em 2009. Cerca de 80% do álcool produzido é destinado ao uso como combustível, 10% é exportado e 10% é utilizado internamente para aplicações em outras áreas, como na indústria química, atuando como reagente, intermediário ou solvente na produção de ésteres e compostos cíclicos; na produção de tintas, vernizes, aerossóis, perfumes e cosméticos; nas indústrias farmacêuticas e de alimentos. Pode, ainda, ser usado como reagente na reação de transesterificação para produção do biodiesel, aplicação esta que requer o uso do etanol anidro (LOPES; GABRIEL; BORGES, 2011).

Em decorrência da crescente preocupação com as questões ambientais e da adoção de políticas públicas posteriormente às crises do petróleo, os biocombustíveis líquidos passam a ser inseridos e tomar grande participação na matriz energética brasileira. Dentre eles, os principais utilizados são o etanol, obtido principalmente a partir de cana-de-açúcar, e o biodiesel, produzido a partir de óleos vegetais ou de gorduras animais que é adicionado ao diesel de petróleo em proporções variáveis (ANP, 2022). Atualmente, segundo o Ministério de Minas e Energia, 20% do consumo do setor de transporte é de combustíveis renováveis e o Brasil tem caminhado para ampliar o consumo com o apoio da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Além disso, a matriz energética brasileira é uma das mais

renováveis entre todos os países com as grandes economias mundiais, com cerca de 48% de matriz renovável, sendo que a bioenergia representa 27% e, destes, 19% são de produtos originários da cana-de-açúcar. Por fim, em termos de geração de energia elétrica, quase 10% da nossa energia é produzida por resíduos da cana (ANP, 2022).

Dentre os biocombustíveis mais utilizados, o Brasil é pioneiro na utilização em larga escala de etanol combustível desde o fim da década de 1970 e, atualmente, é um dos que mais utilizam o produto e o segundo maior produtor mundial. O etanol pode ser comercializado como etanol hidratado combustível (EHC) e etanol anidro combustível (EAC). O etanol hidratado é destinado à utilização direta em motores a combustão interna, sendo vendido nos postos de combustíveis e possui cerca de 4,9% em volume de água. Já o etanol anidro é destinado ao distribuidor de combustíveis líquidos para mistura com a gasolina A na formulação da gasolina C e tem o teor de água em torno de 0,4% em volume (ANP 907/22). Atualmente é fixado, pelo decreto nº 10.940 de 13/01/2022, em 22% o percentual obrigatório de adição de álcool etílico anidro combustível à gasolina em todo o território nacional, podendo elevar o referido percentual até o limite de 27,5%, desde que constatada sua viabilidade técnica, ou reduzi-lo a 18% (BRASIL, 1993).

Diante da importância do etanol na matriz energética brasileira e do incentivo da política nacional para produção de biocombustíveis, a realização de pesquisas para minimizar os custos da produção de etanol e aumentar sua eficiência é importante para torná-lo mais competitivo frente aos combustíveis fósseis. Nas indústrias do setor sucroenergético, o etanol hidratado combustível é produzido a partir de colunas de destilação, operação unitária que objetiva a separação da mistura não ideal etanol-água. Já o etanol anidro, biocombustível de alta pureza, é obtido a partir da desidratação do etanol hidratado e, para vencer o ponto de azeótropo formado na mistura e obter a pureza objetivada, torna-se necessário adicionar outros processos à unidade para a sua produção, como a destilação azeotrópica, a destilação extrativa ou a adsorção por peneira molecular, responsáveis por 60%, 25% e 15%, respectivamente, das tecnologias utilizadas no Brasil (SANTOS *et al.*, 2021).

Nesse contexto, atualmente, a produção do etanol anidro, utilizado como aditivo oxigenante à gasolina, proporcionando o aumento da octanagem e redução das emissões dos gases precursores do efeito estufa, vem atingindo espaço no mercado frente ao etanol hidratado devido ao preço competitivo e à sua maior eficiência agregada. Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), em comparação à última safra, a produção de etanol anidro no Brasil aumentou em 14%, saltando de 10,22 bilhões de litros na safra de 2021/2022 para 11,65 bilhões de litros na safra de 2022/2023. Além disso, de acordo com o CEPEA-USP,

o etanol anidro apresentou, na safra de 2022/2023, uma média de preço de comercialização de R\$3,36, o que corresponde à R\$0,41 mais caro que o etanol hidratado.

Visando o estudo de viabilidade econômica da implementação de projetos de ampliação em indústrias, os quais objetivam diferencial competitivo, eficiência de produção, dentre outros, as empresas utilizam, como embasamento de estudo e fator de decisão, de metodologias de estimativa de custos para construção ou ampliação de uma indústria, tais como CAPEX (capital de investimento), OPEX (custos de produção) e Demonstrativo de Resultado do Exercício (DRE), além de análises dos indicadores financeiros, Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), *Payback* e Retorno sobre Investimento (ROI).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O estudo visa a análise de viabilidade econômica da expansão da produção energética com a ativação de uma unidade de produção de etanol anidro em uma indústria sucroalcooleira fictícia no interior do estado de São Paulo.

### **2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos constam na projeção da nova unidade, na realização da estimativa de custo de capital e custo operacional do empreendimento, na análise e interpretação da viabilidade econômica da implementação do projeto e na determinação do prazo de retorno do investimento.

### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1 A indústria sucroenergética**

A indústria sucroenergética é um setor econômico importante que abrange a produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar, a qual é amplamente cultivada em regiões tropicais e subtropicais do mundo, incluindo Brasil, Índia, Tailândia, China e Austrália. Adicionalmente, esse setor mostra-se como uma importante fonte de emprego e renda para as comunidades rurais em muitos desses países (VIDAL, 2020).

De acordo com o relatório "Perspectivas Agrícolas 2022-2031" publicado pela Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), a produção mundial de açúcar deve crescer em 12% até 2031, enquanto a produção de bioetanol deve aumentar em 18%. O relatório também prevê que o Brasil continuará sendo o maior produtor mundial de açúcar e um dos maiores produtores de bioetanol, representando cerca de 40% da produção global de açúcar e 30% da produção mundial de bioetanol (OECD; FAO, 2022).

A produção de açúcar e bioetanol no Brasil é concentrada principalmente na região Centro-Sul do país, onde estão localizados os principais polos produtivos. Além disso, a indústria sucroenergética tem um impacto significativo na economia do país, gerando empregos e movimentando a cadeia produtiva de diversos setores (UNICA, 2022).

No mercado nacional, segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), a produção de etanol no Brasil atingiu 30,5 bilhões de litros na safra 2022/2023, um aumento de 2,1% em relação à safra anterior. Já a produção de açúcar alcançou 37 milhões de toneladas, um aumento de 6% em relação à safra anterior. Esses números mostram a importância do setor sucroenergético na economia brasileira e a sua relevância no mercado global de açúcar e bioetanol (CONAB, 2023).

Nos últimos anos, o mercado brasileiro sucroenergético tem enfrentado desafios relacionados a fatores climáticos, variações no preço do açúcar e do etanol e questões relacionadas à sustentabilidade. No entanto, a expectativa é que a demanda por biocombustíveis e fontes de energia renovável continue a crescer, impulsionando o setor nos próximos anos (UNICA, 2022).

### 3.1.1 Produção mundial de etanol

O Brasil é o segundo maior produtor de etanol do mundo, responsável por 27,5% da produção global em 2021, principalmente por meio da cana-de-açúcar, embora o uso do milho para produzir etanol esteja crescendo. Apesar disso, o Brasil tem sido um grande consumidor do etanol americano, recebendo 15% das exportações dos EUA em 2020. Entretanto, em 2021, devido à pandemia da Covid-19 e à desvalorização do real em relação ao dólar, a demanda brasileira por combustível diminuiu e o Brasil passou a taxar o etanol americano em 20%, resultando na queda da sua importação, com recebimento de apenas 6% das exportações de etanol dos EUA neste ano, o que representa uma queda de quase 60% em relação à 2020 (RFA, 2022).

A Tabela 1 apresenta a evolução da produção de etanol entre os principais produtores do mundo. Pode-se observar que os Estados Unidos representam 55% da produção mundial, enquanto o Brasil responde por 27% dela.

Tabela 1 - Produção mundial de etanol (mil. Gal.).

Região	2016	2017	2018	2019	2020	2021	% da produção mundial
EUA	15,41	15,94	16,09	15,78	13,94	15,02	55
Brasil	6,84	6,73	8,06	8,86	8,10	7,32	27
União Europeia	1,19	1,25	1,30	1,35	1,28	1,35	5
China	730	850	810	1,01	930	970	3
Índia	260	230	430	460	540	850	3
Canadá	460	460	460	497	429	434	2

Fonte: Adaptado de RFA – Renewable Fuels Association (2022).

No Brasil, a maior parte do etanol produzido é vendido no mercado interno, principalmente no mercado de combustíveis. Desde 2022, há uma mistura obrigatória de 22% de etanol anidro na gasolina vendida no país, além da tecnologia de carros *flex*, capazes de utilizar qualquer porcentagem de gasolina e etanol hidratado. O etanol é considerado uma fonte de energia renovável e limpa, sendo valorizado por sua contribuição para a sustentabilidade ambiental. Entretanto, o mercado de carros elétricos tem crescido em todo o mundo e o apoio ao setor de biocombustíveis tem enfraquecido (VIDAL, 2022).

A produção de etanol no Brasil é principalmente concentrada no Sudeste e Centro-Oeste, que juntos foram responsáveis por 89% da produção de etanol de cana e milho na safra 2021/22 (VIDAL, 2022). Além disso, do total da quantidade de etanol produzido na região Sudeste, cerca de 80% é apenas no estado de São Paulo, como ilustra a Tabela 2, o que reforça a forte presença da indústria sucroenergética no estado.

Também pode ser observado na Tabela 2 um maior aumento percentual na produção de etanol anidro ao se comparar a quantidade de etanol anidro e hidratado produzido na safra 2022/23 *versus* a previsão da produção para a safra 2023/24. Essa diferença no aumento da variação entre os dois tipos de etanol pode se justificar pela atual competitividade do etanol anidro no mercado, dado seu preço de venda equivalente a R\$3,2246 por litro, enquanto para o etanol hidratado encontra-se a um valor de R\$2,7664 por litro (CEPEA, 2023).

Tabela 2 - Produção de etanol anidro e hidratado na região sudeste brasileira.

Região/UF	Safra 2022/23	Safra 2023/24*	Variação absoluta	Variação (%)
Etanol Anidro (mil litros)				
Sudeste	6.843.760,2	7.204.172,4	360.412,2	5,3
MG	1.201.283,2	1.254.877,6	53.394,4	4,5
ES	88.859,0	85.466,0	3.393,0	3,8
SP	5.553.618,0	5.863.828,8	310.210,8	5,6
Etanol Hidratado (mil litros)				
Sudeste	8.050.201,9	8.271.487,1	221.285,2	2,7
MG	1.438.226,9	1.690.132,4	251.905,5	17,5
ES	87.311,0	32.488,0	54.823,0	62,8
SP	6.415.042,0	6.439.244,7	24.202,7	0,4

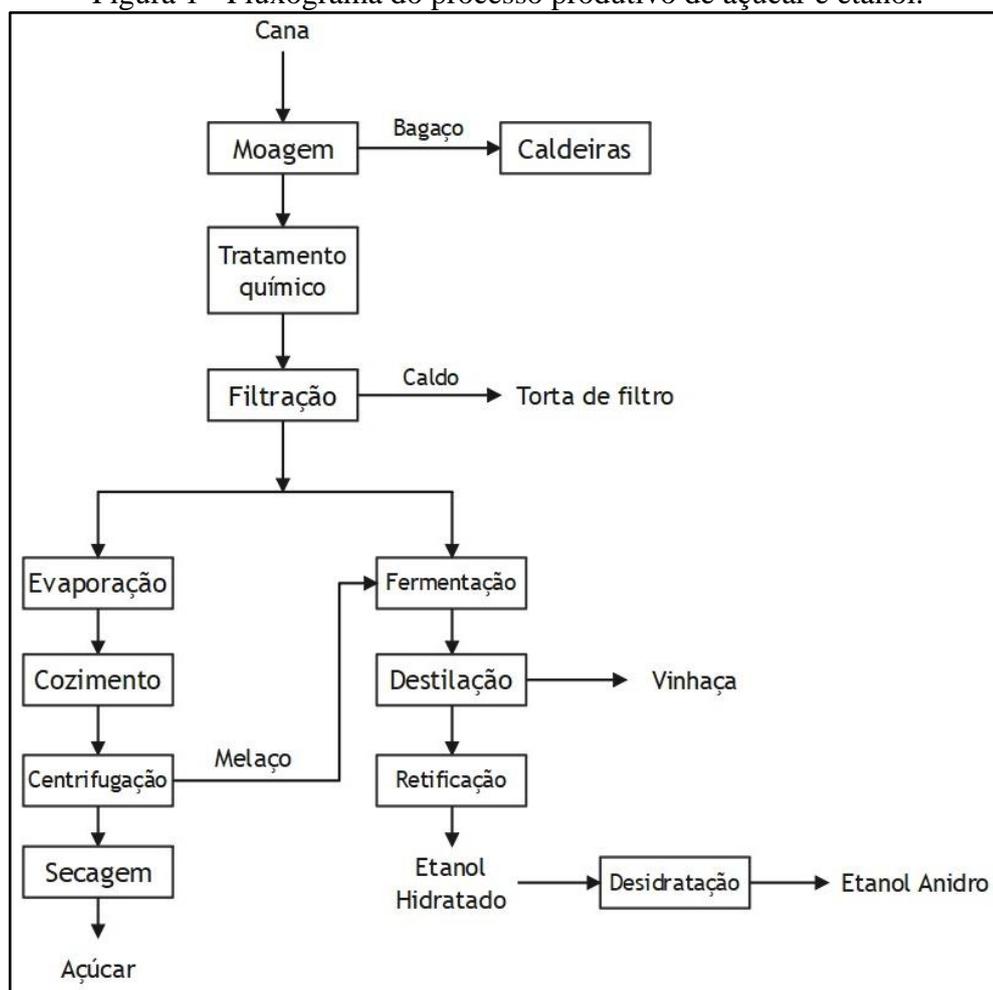
\*Previsão para a safra 2023/2024  
Fonte: Adaptado de Conab (2023).

### 3.2 Processo de produção de etanol

O processo produtivo para produção de etanol e açúcar possui algumas etapas em comum, sendo elas: a recepção e preparação da cana-de-açúcar e a extração e tratamento do caldo. Finalizadas essas etapas, o processo para obtenção dos dois produtos segue por caminhos diferentes, sendo que o líquido residual da produção do açúcar, o melaço, é misturado com o caldo de cana tratado previamente. Em seguida, esse caldo passa pela fermentação e seu produto segue para os processos de destilação, sendo obtido o etanol hidratado, o qual passará por uma etapa de desidratação para a produção do etanol anidro (DIAS *et al.*, 2015).

A Figura 1 apresenta um fluxograma do processo de uma usina que produz açúcar e etanol. Nos demais tópicos serão descritas detalhadamente as etapas do processo de produção de etanol.

Figura 1 - Fluxograma do processo produtivo de açúcar e etanol.



Fonte: Dos autores (2023).

### 3.2.1 Preparo da cana

Após sua colheita, a cana-de-açúcar é levada para as usinas, onde será limpa e fatiada em pedaços menores para facilitar a moagem. Os resíduos provenientes da colheita, folhas, pontas e bagaço, são aproveitados para a produção de bioenergia, como a geração de energia elétrica a partir do bagaço, podendo, também, serem utilizados para produção de etanol de segunda geração (LOPES; GABRIEL; BORGES, 2011).

O preparo da cana tem início com o seu descarte nos pátios da usina, na mesa alimentadora. Em seguida, a cana passa pelo processo de limpeza para a retirada de impurezas presentes nela, como folhas, terras e pedras. Por fim, antes de partir para a extração do caldo, a cana é desfibrada por meio de um sistema de facas rotativas, no qual objetiva-se quebrar as suas fibras e romper as suas células, de modo a facilitar a extração do caldo (DIAS *et al.*, 2015).

### 3.2.2 Extração do caldo

Durante a etapa de extração do caldo, separa-se o caldo da cana das fibras e dos resíduos sólidos, objetivando a obtenção de um líquido rico em açúcares que possa ser utilizado na produção de açúcar e na fermentação para produção do etanol. Os dois métodos principais para realizar a extração são por meio da moagem e da difusão, sendo o primeiro o mais utilizado no Brasil (LOPES; GABRIEL; BORGES, 2011).

O processo de moagem é realizado em um conjunto de equipamentos chamado de moenda. Elas podem ser de vários tipos, sendo as mais comuns as de três rolos, que possuem dois rolos superiores e um inferior, e as de quatro rolos, que possuem dois rolos superiores e dois inferiores. A cana chega até as moendas por meio de esteiras transportadoras, onde é triturada por rolos ou cilindros. Durante a moagem, o caldo da cana é liberado e separado das fibras e dos resíduos sólidos, formando uma mistura chamada de bagaço.

Em relação ao método de difusão, a extração do caldo ocorre por meio da imersão da matéria-prima em água quente. Nesse processo, a cana é picada em pedaços menores e colocada em uma série de equipamentos de difusão, onde é submetida a um processo de imersão e agitação em água quente. O caldo da cana é liberado e separado da fibra por meio de uma peneira rotativa (LOPES; GABRIEL; BORGES, 2011).

### 3.2.3 Clarificação do caldo

Após a extração do caldo, o mesmo segue para a remoção de impurezas e componentes indesejados, visando um produto final de qualidade. O processo de clarificação do caldo é dividido em várias etapas, que envolvem a adição de reagentes químicos e processos físicos.

A primeira delas é o tratamento químico, na qual é adicionada uma solução de hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ) para neutralizar a acidez do caldo de cana. Em seguida, o caldo é aquecido em um tanque de pré-aquecimento, o qual tem como função aumentar a temperatura do caldo antes da adição de coagulantes. A próxima etapa é a adição de coagulantes, geralmente sulfato de alumínio ( $Al_2(SO_4)_3$ ), que reagem com as impurezas presentes no caldo, formando agregados que serão removidos por processos físicos. O pH é controlado para otimizar a formação desses agregados (LOPES; GABRIEL; BORGES, 2011).

Em seguida, o caldo é enviado para um tanque de decantação, onde os agregados formados durante a adição de coagulantes são separados do líquido. O caldo clarificado é transferido para um tanque de clarificação para uma nova adição de coagulante e, após, é

enviado para a filtragem em filtros rotativos a vácuo ou prensas hidráulicas. O bagaço resultante desse processo poderá ser lavado com água e enviado para o processo de combustão para gerar vapor, sendo o excedente vendido para a rede de distribuição (LOPES; GABRIEL; BORGES, 2011).

#### **3.2.4 Concentração do caldo**

O mosto utilizado na produção do etanol é preparado a partir do caldo da cana-de-açúcar, sendo assim, este deve passar por um processo de concentração para atingir a concentração de açúcares adequada no processo de fermentação, aproximadamente 17% (PALACIOS *et al.*, 2015).

Tal processo ocorre em um sistema de evaporadores de múltiplos efeitos, no qual a pressão em cada evaporador decresce à medida que o caldo vai passando de um evaporador para outro, sendo que no último a pressão é zero. Essa configuração produz uma diferença de temperatura entre o vapor de aquecimento e do caldo ao longo dos evaporadores (DIAS *et al.*, 2015).

#### **3.2.5 Fermentação**

A fermentação do caldo ocorre a partir da adição de leveduras selecionadas ao líquido, que irão consumir os açúcares presentes na solução e transformá-los em etanol e dióxido de carbono. O processo é realizado em grandes tanques de fermentação, chamados de dornas de fermentação.

O primeiro passo da fermentação é a inoculação do caldo com a levedura. As leveduras são microrganismos vivos que metabolizam os açúcares presentes no caldo e, durante esse processo, produzem etanol e dióxido de carbono. As leveduras mais utilizadas na fermentação do caldo são da espécie *Saccharomyces cerevisiae*, também conhecida como levedura de pão ou de cerveja (DIAS *et al.*, 2015).

Durante esse processo, o caldo é mantido em agitação constante para que as leveduras possam se distribuir homoganeamente pelo líquido e ter acesso aos açúcares presentes em toda a solução. Além disso, o processo de agitação ajuda a homogeneizar o calor gerado pela fermentação e a manter a temperatura ideal para o crescimento das leveduras. A temperatura ideal para a fermentação do caldo é em torno de 30 a 35 °C. Além disso, é importante manter o pH do caldo entre 4,5 e 5,5, para que as leveduras possam se desenvolver de forma adequada.

O controle desses parâmetros é fundamental para garantir que a fermentação ocorra de forma eficiente e que a produção de álcool seja maximizada (LOPES; GABRIEL; BORGES, 2011).

A fermentação do caldo dura em média 8 a 12 horas, dependendo da concentração de açúcares no caldo e da temperatura de fermentação. Ao final do processo, é obtido um líquido com cerca de 7 a 10% de etanol em sua composição, chamado de vinho de cana (LOPES; GABRIEL; BORGES, 2011).

### **3.2.6 Destilação**

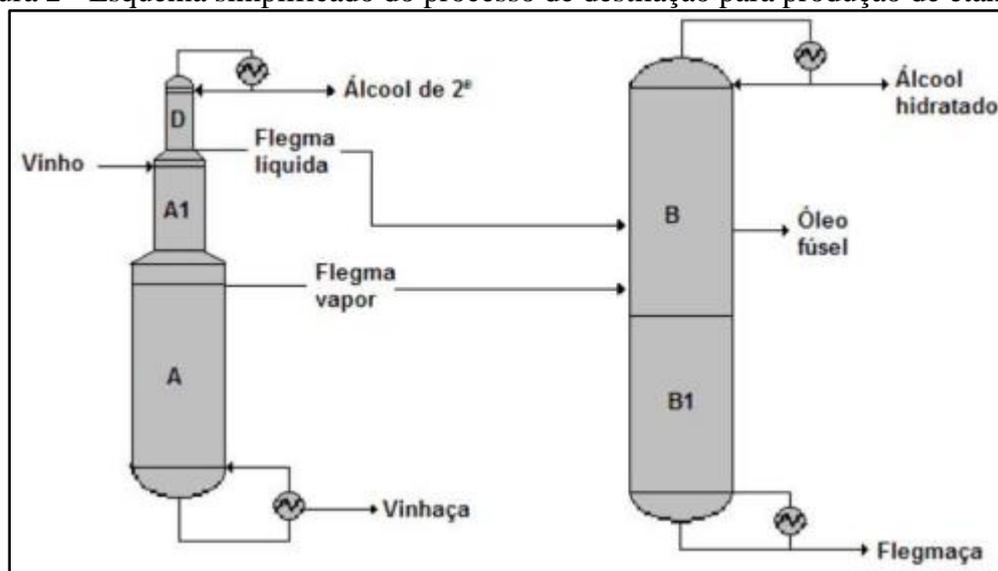
Para a produção do etanol combustível, o vinho resultante da fermentação deve ser purificado para atingir 95% da sua composição em etanol. Essa purificação ocorre em colunas de destilação e retificação, resultando no etanol hidratado com 93% de pureza (LOPES; GABRIEL; BORGES, 2011).

No Brasil, as colunas de destilação são configuradas de acordo com a Figura 2. Nela podemos observar que o mosto é alimentado no topo da coluna A', da qual tem-se a saída da flegma e a obtenção da vinhaça como produto de fundo, que é muito utilizada para fertirrigação da cana-de-açúcar (LOPES; GABRIEL; BORGES, 2011).

Na segunda coluna, conhecida como coluna de retificação, há a entrada da flegma, resultando na produção do etanol hidratado como produto de topo e na flegmaça, produto contendo cerca de 50% em concentração de etanol, como produto de fundo. Além desses dois produtos, também pode ser obtido o óleo fusel, que consiste em uma mistura de compostos orgânicos, sendo o principal deles o álcool isoamílico (DIAS *et al.*, 2015).

Apesar de muito utilizada, essa configuração das colunas de destilação possuem um consumo muito alto de vapor. Sendo assim, para diminuir esse consumo, tem sido implementado colunas de destilação de múltiplos efeitos e aumentado a quantidade de etanol no vinho (DIAS *et al.*, 2015).

Figura 2 - Esquema simplificado do processo de destilação para produção de etanol.



Fonte: Lopes; Gabriel; Borges (2011).

### 3.2.7 Desidratação

O etanol produzido até a etapa anterior é destinado para uso como combustível nos veículos *flex*. Entretanto, o etanol pode ser concentrado em até aproximadamente 99,3% para ser utilizado como composto adicionado à gasolina, caracterizado pelo etanol anidro. Para alcançar essa pureza, torna-se necessário a utilização de sistemas alternativos de purificação, uma vez que o etanol e a água formam um azeótropo na concentração de 95% de etanol. Sendo assim, pode ser aplicado o processo de desidratação, que no Brasil utiliza-se, principalmente, as técnicas de destilação azeotrópica com ciclohexano, destilação extrativa com monoetilenoglicol e adsorção por peneiras moleculares (DIAS *et al.*, 2015).

### 3.3 Etanol hidratado

O etanol hidratado é produzido através da mistura homogênea de água e etanol, resultando em uma solução azeotrópica que apresenta um ponto de ebulição constante. Na etapa de destilação é possível separar o etanol da água, obtendo-se uma concentração próxima a 96% de etanol em água, porém, na prática, outros processos podem ser empregados para se aproximar desse limite azeotrópico, o que resulta em menor consumo de energia. Essa solução, chamada de etanol hidratado combustível (EHC), é amplamente utilizado como combustível para veículos automotores no Brasil.

No que se refere ao seu aspecto, é essencial que ele seja livre de impurezas e apresente uma aparência homogênea, sem resíduos sólidos. A avaliação da qualidade é baseada apenas na análise visual, sem a necessidade de testes adicionais. No caso do etanol hidratado, a cor é um indicador de sua pureza, portanto ele deve ser transparente, uma vez que é uma mistura de álcool e água sem coloração. Em relação à densidade, o etanol hidratado deve apresentar uma massa específica entre 807,6 e 811,0 kg/m<sup>3</sup> a uma temperatura de 20 °C. Caso o etanol atinja uma massa específica de 799,8 a 802,7 kg/m<sup>3</sup>, ele pode ser vendido como etanol hidratado *premium*, desde que atenda a outros critérios de qualidade, incluindo o teor alcoólico (NOVA CANA, 2023).

O teor alcoólico estabelecido pela ANP para o etanol hidratado deve estar entre 95,1 e 96,0 °GL, enquanto a massa alcoólica deve representar entre 92,5% e 93,8% da sua massa total. Para ser considerado *premium*, o etanol deve apresentar entre 95,5% e 97,7% da massa e 97,1% a 98,6% de volume, quando importado, distribuído ou revendido. O pH deve estar entre 6 e 8, permanecendo neutro. Além disso, a ANP estabelece limites mínimos de álcool e máximos de água na mistura, a qual deve possuir no mínimo 94,5% de volume de etanol e no máximo 4,9% de água (NOVA CANA, 2023).

### 3.4 Etanol anidro

O etanol anidro, também conhecido como álcool absoluto, é composto quase que exclusivamente por etanol puro, sendo misturado à gasolina com o objetivo de melhorar o desempenho do combustível e reduzir a poluição. Essa mistura pode chegar a até 27,5% no Brasil e é regulamentada pelo decreto nº 10.940 de 13/01/2022 e pela ANP através do Regulamento Técnico ANP nº 907/2022, que estabelece os critérios de qualidade que devem ser seguidos.

Assim como o etanol hidratado, o etanol anidro precisa ser límpido e livre de impurezas, mas se diferencia em relação à cor, já que é adicionado um pigmento laranja na mistura. A ANP também estabelece o tipo de pigmento que deve ser utilizado, levando em consideração a solubilidade no etanol e a insolubilidade em água.

A densidade do álcool anidro deve ser no máximo de 791,5 kg/m<sup>3</sup>, sem limite mínimo estabelecido, sendo medido a uma temperatura de 20 °C. Já o teor alcoólico deve ser de no mínimo 99,6%, o que o torna praticamente puro, com uma massa mínima de 99,3%. O teor de etanol puro na solução também é rigorosamente controlado, com um mínimo de 98%, enquanto a água pode estar presente em no máximo 0,4%. Se a mistura tiver a presença de mais de 0%

de hidrocarbonetos e menos do que o limite permitido de 3%, o teor de etanol puro não será considerado (NOVA CANA, 2023).

Além do seu uso como aditivo à gasolina, o etanol anidro pode ser utilizado como reagente químico, solvente orgânico, matéria-prima para muitos produtos químicos importantes, intermediários para medicamentos, plásticos, lacas, polidores, plastificantes e cosméticos, em formulações farmacêuticas, na produção de biodiesel (ésteres etílicos de ácidos graxos), indústrias eletrônicas e militares (KUMAR; SINGH; PRASAD, 2010).

O etanol anidro é considerado uma excelente alternativa de combustível limpo em relação à gasolina. Em sistemas automotivos adequadamente projetados, o etanol tem o potencial de atingir níveis muito baixos de emissão. Além disso, os produtos da combustão de combustíveis renováveis como o etanol são considerados como ambientalmente seguros em termos de gases de efeito estufa.

Os processos de produção do etanol anidro têm sido aprimorados continuamente, de modo que ele atenda a requisitos rigorosos de qualidade e quantidade de produto. Vários são os processos empregados para sua obtenção, tais como, destilação azeotrópica, destilação extrativa, destilação por membranas, desidratação química, desidratação por destilação a vácuo, adsorção e destilação por difusão. Dentre eles, os três primeiros são os mais utilizados no Brasil, na proporção de 60%, 25% e 15%, respectivamente (SANTOS *et al.*, 2021).

### **3.4.1 Destilação extrativa com MEG (Monoetilenoglicol)**

A destilação extrativa, também conhecida como destilação azeotrópica homogênea, consiste na adição de um terceiro componente, como o monoetilenoglicol (MEG) para possibilitar a separação do etanol da água em uma coluna extrativa. Na parte inferior da coluna é obtida uma mistura solvente-água que é encaminhada para uma coluna para a recuperação do solvente, enquanto o etanol anidro produzido é retirado pelo topo da coluna (DIAS *et al.*, 2015).

A solução que inclui água, MEG e uma quantidade reduzida de álcool é direcionada para uma coluna de recuperação antes de voltar para o processo de desidratação. Durante o processo, o solvente acumula as impurezas removidas do álcool, tornando-se corrosivo e, portanto, requer purificação adicional. Isso é alcançado através da sua passagem em uma coluna preenchida com resinas de troca iônica, que retém os sais e diminui a sua acidez (LOPES; GABRIEL; BORGES, 2011).

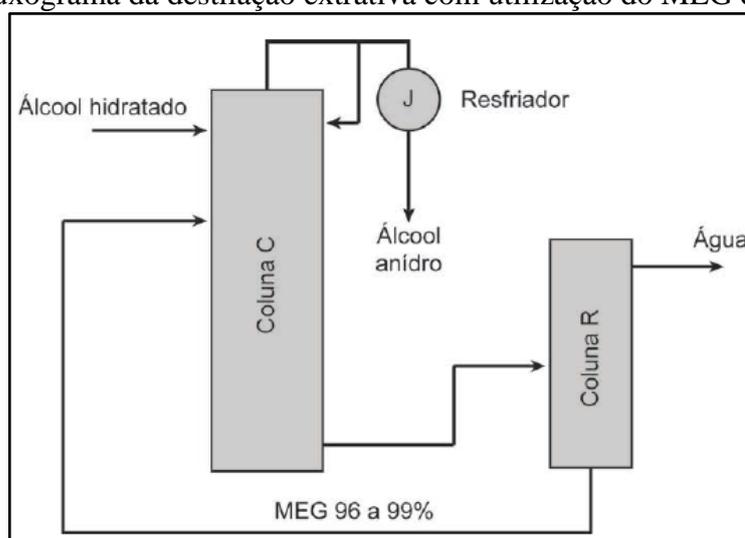
A utilização de um solvente em concentrações altas para a separação dos componentes altera a volatilidade de um dos componentes da alimentação, dessa forma a separação deles

pode ser feita na própria coluna. O solvente escolhido para esse processo é denominado solvente de destilação extrativa e, a depender do tipo a ser utilizado, poderá afetar mais a volatilidade do etanol do que a da água (KUMAR; SINGH; PRASAD, 2010).

O processo de destilação extrativa utilizando o monoetilenoglicol como solvente possui como vantagens, em relação a destilação azeotrópica, a menor quantidade de solvente de reposição, contribuindo para a redução do diâmetro das colunas. Além disso, o consumo de energia nas colunas é reduzido. Entretanto, para se obter uma concentração desejada de etanol, deve-se utilizar de variáveis importantes, como a relação molar do solvente para a alimentação e a relação de refluxo (BAEYENS et al., 2015).

A Figura 3 apresenta um fluxograma de blocos que ilustra o processo de destilação extrativa, no qual tem-se a entrada de etanol hidratado e monoetilenoglicol na Coluna C, obtendo como produto de topo do processo o etanol anidro e, como produto de fundo, a mistura de MEG. Esse último segue para uma coluna de recuperação, na qual ocorre a sua separação da água e o MEG resultante é reciclado no processo.

Figura 3 - Fluxograma da destilação extrativa com utilização do MEG como solvente.



Fonte: Lopes; Gabriel; Borges (2011).

### 3.4.2 Destilação azeotrópica heterogênea com ciclohexano

Na indústria, a destilação azeotrópica heterogênea é usada para separar misturas azeotrópicas ou de ebulição próxima que não podem ser separadas por destilação convencional. Nesse processo, um terceiro componente, chamado de arrastador, é adicionado à mistura binária, formando um novo azeótropo heterogêneo com um ou ambos os componentes originais da mistura, o que permite uma separação mais favorável do azeótropo binário original. Embora a formação de uma segunda fase líquida possa simplificar a recuperação e reciclagem do

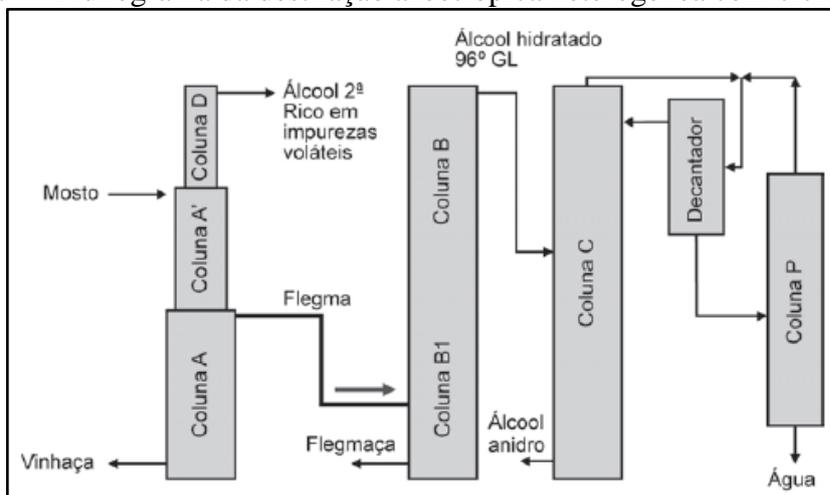
arrastador, ela pode afetar o desempenho da coluna e diminuir a eficiência do processo. No entanto, diferentes configurações podem ser utilizadas para minimizar a formação dessa segunda fase líquida sem comprometer a produção de etanol anidro (JUNQUEIRA, 2009).

Nesse processo, adiciona-se cicloexano a uma coluna azeotrópica juntamente com etanol hidratado, formando um novo azeótropo heterogêneo ternário com etanol e água. O azeótropo é removido no topo da coluna azeotrópica, enquanto o etanol anidro é produzido na parte inferior. Em seguida, o azeótropo ternário é resfriado e passa por uma separação líquido-líquido, na qual a fase orgânica, rica em cicloexano, é reciclada para a coluna azeotrópica, enquanto a fase aquosa é enviada para uma coluna de recuperação, onde se produz uma solução contendo etanol que é reciclada de volta para a coluna azeotrópica (DIAS *et al.*, 2015).

Esse processo, apesar do alto consumo de energia, continua sendo uma configuração muito usada nas usinas de cana-de-açúcar. Até o final da década de 1990, a destilação azeotrópica era a única alternativa para a produção de etanol anidro no Brasil, mas o benzeno era o agente de separação usado até 1997. Quando seu uso foi proibido devido a questões de segurança, o cicloexano começou a ser utilizado em substituição ao benzeno, permitindo o uso da infraestrutura existente (BAEYENS *et al.*, 2015).

O processo de destilação azeotrópica descrito acima está representado pela Figura 4, na qual tem-se a entrada do etanol hidratado, resultante do processo de destilação, e cicloexano na coluna C. Após a separação na coluna, obtêm-se etanol anidro como produto de fundo e uma mistura de água, etanol e cicloexano como produto de topo. Essa mistura, segue para um decantador onde há a separação líquido-líquido e o cicloexano recuperado retorna como reciclo no processo. Já a mistura etanol-água, segue para mais uma coluna de separação, na qual retira-se a água como produto de fundo e o etanol resultante volta a ser reciclado no processo.

Figura 4 - Fluxograma da destilação azeotrópica heterogênea com cicloexano.



Fonte: Lopes; Gabriel; Borges (2011).

### 3.4.3 Destilação por adsorção em peneiras moleculares

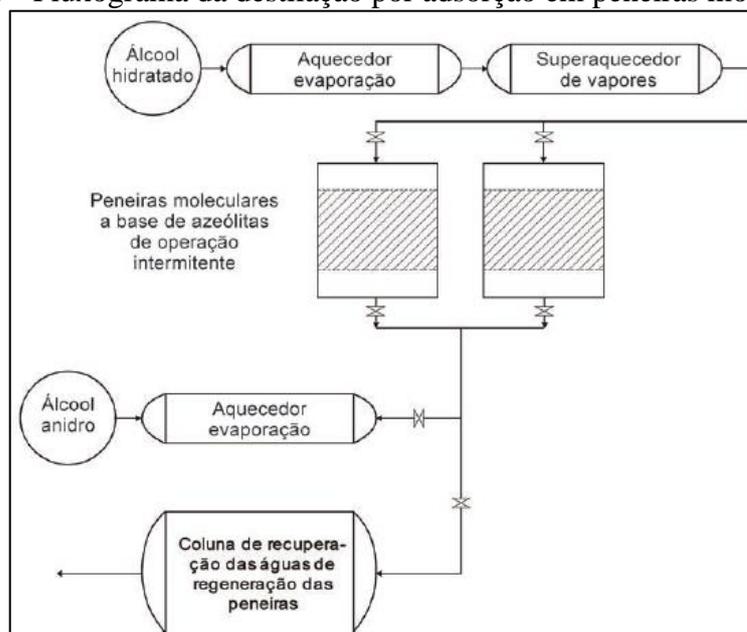
Diferentemente dos processos de desidratação que utilizam princípios de destilação, a técnica de adsorção não requer o uso de solventes químicos, mas sim um leito de zeólita responsável por remover a água do etanol hidratado. Nesse método, o vapor de etanol hidratado é direcionado para três leitos de zeólita, sendo um regenerado e os outros dois responsáveis por remover a água em uma operação cíclica. Quando o etanol hidratado entra em contato com as zeólitas, as moléculas de água são adsorvidas, enquanto o etanol anidro é coletado na parte inferior do leito. Durante a regeneração, a água é retirada das zeólitas por meio da aplicação de baixa pressão ao leito (Adsorção por Variação de Pressão) e a mistura água-etanol recuperada é reciclada para as colunas de destilação (DIAS *et al.*, 2015).

As peneiras moleculares são materiais com poros extremamente pequenos e precisos. Podem ser feitas de zeólita sintética em formato de *pellets* ou de adsorventes de origem vegetal, como fubá, palha e serragem. Geralmente compostas de minerais de aluminossilicato ou compostos sintéticos, possuem uma estrutura aberta que permite a difusão de moléculas pequenas, como argilas, vidros porosos, carvões microporosos e carvões ativados. As moléculas pequenas conseguem passar pelos poros e são adsorvidas, enquanto as moléculas maiores não. Para desidratar o etanol, são utilizadas peneiras moleculares com diâmetro de 3,0 Å, que capturam moléculas de água, com diâmetro de 2,5 Å. Já as moléculas de etanol com diâmetro de 4,0 Å não conseguem passar e, portanto, fluem ao redor do material. A peneira molecular pode adsorver água em até 22% de seu peso (KUMAR; SINGH; PRASAD, 2010).

Conforme os vapores de etanol-água adentram a coluna, a água é difundida e capturada dentro dos poros da estrutura adsorvente em uma camada delgada. À medida que mais etanol é introduzido na coluna, ele atravessa essa camada e alcança um nível ligeiramente mais baixo, onde mais água é adsorvida incrementalmente. Esse processo prossegue até que se alcance um ponto em que toda a adsorção possível de água da solução de etanol seja concluída (KUMAR; SINGH; PRASAD, 2010).

A Figura 5 representa o processo de destilação por adsorção em peneiras moleculares, no qual tem-se a entrada do etanol hidratado nas peneiras, nas quais a água será adsorvida pelos leitos de zeólitas e há a retirada do etanol anidro no fundo. Após a saturação dos leitos, os mesmos são submetidos a baixa pressão para retirada da água e, assim, poderem ser utilizados novamente. Além disso, a mistura água-etanol resultante do processo é reciclada para o início da desidratação.

Figura 5 - Fluxograma da destilação por adsorção em peneiras moleculares.



Fonte: Lopes; Gabriel; Borges (2011).

### 3.5 Projeto de uma indústria química/bioquímica

A concepção do projeto de uma indústria é um processo que envolve a elaboração de um plano detalhado para a criação, implementação ou expansão de uma empresa. Esse projeto deve ser construído com base em diversos fatores, como a análise de mercado, a definição dos objetivos da empresa, a seleção dos equipamentos necessários, o levantamento de recursos financeiros, a identificação dos fornecedores e a contratação de mão de obra. (PERLINGEIRO, 2018).

O projeto de uma indústria parte da necessidade de engenharia e/ou mercado. Assim, identificada a necessidade da existência do empreendimento, a elaboração do projeto se desenvolve através de diferentes fases.

O primeiro passo para conceber o projeto de uma indústria é a realização de um Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica (EVTE). Esse estudo acerca do comportamento econômico verifica a viabilidade de construção e operação, prevendo a lucratividade e a estabilidade financeira para justificar o investimento que será realizado.

Em posse de um estudo de viabilidade bem executado e detalhado, o projeto segue para as demais fases, Projeto Conceitual, Projeto Básico e Projeto Detalhado, até o comissionamento e ativação da planta (PERLINGEIRO, 2018).

### 3.6 Estudo de viabilidade técnico-econômica do projeto

O Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica (EVTE) é uma análise criteriosa que tem como objetivo avaliar a viabilidade de um projeto ou investimento, seja na criação, implementação ou expansão de um negócio, produto ou serviço. Essa análise envolve a avaliação dos aspectos técnicos e econômicos do projeto, considerando a sua capacidade de atender às demandas do mercado e de geração de retorno financeiro sobre os investimentos realizados.

O estudo de viabilidade técnica envolve a análise dos aspectos operacionais do projeto, ou seja, de todas as etapas do processo produtivo, desde a concepção até a comercialização do produto ou serviço, levando em consideração fatores como o tipo de tecnologia utilizada, a capacidade de produção, o dimensionamento dos equipamentos e a eficiência dos processos. Nesse contexto, busca-se garantir que o projeto seja viável tecnicamente, ou seja, que possa ser implementado com segurança e eficiência, e assegurar que a sua implementação seja permitida pelas legislações em vigor (ANDERS, 2020).

Já a análise econômica do projeto envolve a avaliação dos custos e dos retornos financeiros do investimento. Ela tem como finalidade determinar se o projeto tem condições de atender as expectativas e demandas dos investidores, para que a decisão de investir seja tomada ou não. Nessa etapa, é importante considerar os recursos envolvidos na realização das atividades do projeto, os quais são necessários para que o mesmo possa permanecer em condições de funcionamento (ANDERS, 2020). Entre eles estão os Investimentos, as Receitas, os Custos e a Depreciação, encontrados na Demonstração do Resultado do Exercício – DRE. A viabilidade econômica de investimento é então avaliada por vários indicadores econômicos, tais como, Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), *Payback* e Retorno sobre Investimento (ROI).

Com base nas análises técnica e econômica, é possível identificar possíveis riscos e oportunidades associados ao projeto e tomar decisões estratégicas em relação à sua viabilidade, garantindo o sucesso e a sustentabilidade dos projetos.

### 3.7 Estimativa de custos

A estimativa de custos é uma etapa fundamental no processo de concepção e planejamento de um projeto de uma indústria, pois permite avaliar os recursos financeiros necessários para a sua realização e identificar potenciais desvios de custo durante a sua

execução. O objetivo das estimativas é prever da maneira mais precisa possível com os recursos disponíveis o custo de implantação do empreendimento.

Para realizar a estimativa de custos, é necessário realizar um levantamento detalhado de todos os recursos necessários para a implementação do projeto, em termos de custos de capital e custos operacionais.

Com base na lista de recursos necessários, é possível determinar o custo de cada item, por meio de cotações de preços de mercado, histórico de preços da empresa ou por meio de orçamentos de fornecedores e prestadores de serviço. É importante lembrar que, para garantir uma estimativa mais precisa, é necessário considerar também os custos indiretos, como despesas administrativas, financeiras e de seguros.

A partir da lista de recursos e seus custos, é possível elaborar um orçamento detalhado do projeto, que deve ser atualizado regularmente durante a sua execução para refletir possíveis variações de custo.

### **3.7.1 Capital de investimento (CAPEX)**

CAPEX, do inglês *Capital Expenditure*, são os custos de capital referentes ao empreendimento e designam os investimentos de longo prazo que uma empresa faz em ativos físicos, como equipamentos, edifícios e terrenos, necessários para a produção de bens ou serviços, ou seja, correspondem à construção e instalação da planta deixando-a pronta para operar (NOGUEIRA, 2013).

O cálculo do CAPEX leva em consideração o valor total do investimento, incluindo a compra ou construção dos ativos, a instalação e montagem dos equipamentos, bem como os custos adicionais relacionados, como impostos, taxas e despesas legais. Sendo assim, o CAPEX é uma medida importante para avaliar o desempenho financeiro de uma empresa, a sua capacidade de investir em projetos estratégicos de longo prazo e usado para calcular o retorno sobre investimento de um projeto. Além disso, os custos de capital incluem uma ampla gama de categorias de custos, sendo importante entendê-los para garantir uma estimativa completa.

Os custos associados ao *startup* envolvem as despesas esperadas associadas às operações e às despesas técnicas, as quais dependem do tipo de processo, experiências de outras plantas e conhecimento do operador.

O capital de giro é o montante financeiro indispensável para sustentar as atividades da empresa até que as receitas sejam suficientes para cobrir as despesas e em momentos de paralisações eventuais da produção. Essa quantia é calculada com base em médias de gastos

relacionados à aquisição de matérias-primas, produtos em estoque e outros itens, além de levar em consideração o saldo entre as contas a receber e a pagar e parte dos impostos sobre vendas.

O investimento de capital fixo representa o custo total envolvido no planejamento, construção e instalação da planta industrial, preparando-a para o início das operações, podendo ser direto ou indireto. O investimento fixo indireto engloba as despesas com engenharia e construção. Já o investimento fixo direto inclui o investimento na aquisição, transporte e instalação dos equipamentos (TURTON, 2012).

Por fim, embora o terreno seja uma parcela menor do investimento total de capital, ele deve ser incluído. De acordo com Couper (2003), na ausência de dados e, apenas para estimativas preliminares, cerca de 3% do investimento de capital fixo pode ser usado para estimar os custos do terreno.

O custo de aquisição dos equipamentos constitui 65 a 80% do valor do investimento fixo, sendo os dados de custo de equipamento a base da estimativa desse investimento (PETER; TIMMERHAUS; WEST, 2003). Por isso, o custo de aquisição dos equipamentos deve ser determinado com a maior precisão possível.

A melhor fonte de custos de equipamentos adquiridos são dados recentes sobre preços reais pagos por equipamentos semelhantes contando com dados da literatura aberta ou software de estimativa de custos. Ainda assim, podem ser necessários ajustes e correções, adaptando as referências aos valores mais próximos dos reais do projeto em andamento, tais como ajustes relacionados à capacidade, correção temporal e de localização.

Por fim, dispendo-se do custo corrigido de aquisição dos equipamentos, diferentes técnicas podem ser aplicadas para chegar ao investimento fixo.

#### *3.7.1.1 Correção da capacidade*

Ao estimar o CAPEX de um projeto de uma indústria, é importante levar em consideração a correção da capacidade de equipamentos. Ou seja, ao estimar o custo de um determinado equipamento, é necessário considerar a sua capacidade de produção em relação à capacidade requerida pelo projeto.

Existem várias metodologias para a correção da capacidade de equipamentos, mas uma das mais comuns é a utilização de fatores de correção baseados na capacidade do equipamento, representado pela Equação 1. Esses fatores são geralmente fornecidos pelos fabricantes e representam uma estimativa da relação entre o custo do equipamento e a sua capacidade de produção.

$$\frac{C_{p1}}{C_{p2}} = \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^n \quad (1)$$

na qual  $C_p$  é o custo de aquisição do equipamento,  $S$  é o atributo de capacidade do equipamento,  $n$  é o expoente de custo e os subscritos 1 e 2 se referem ao equipamento com o custo que se deseja calcular e ao equipamento com o custo conhecido, respectivamente.

O expoente de custo depende do tipo de equipamento em questão e, segundo Couper (2003), encontra-se geralmente no intervalo de 0,30 e 1,20. Uma relação empírica muito utilizada quando não se conhece o fator de escala de determinado processo é a do “*Sixth Tenth Factor*”, na qual aplica-se a aproximação para um valor de 0,60 (PETER; TIMMERHAUS; WEST, 2003).

### 3.7.1.2 Correção temporal

A correção temporal de equipamentos nas estimativas de CAPEX é uma prática comum na engenharia de projetos industriais. Ela leva em consideração o fato de que o valor de um equipamento pode variar ao longo do tempo devido a diversos fatores, como inflação, mudanças na tecnologia, entre outros.

Assim, para realizar a correção temporal de equipamentos, é preciso considerar o ano-base da estimativa e aplicar um fator de correção monetária, que pode ser obtido a partir de índices econômicos, como o CEPCI (*Chemical Engineering Plant Cost Index*).

O fator CEPCI, publicado mensalmente pela revista *Chemical Engineering*, é um índice de custo de equipamentos, considerando a mão de obra e os materiais para o equipamento, a taxa de frete e custos de instalação, e que reflete as mudanças nos custos dos equipamentos ao longo do tempo, de acordo com a inflação e outras mudanças de mercado (TURTON, 2012).

Os valores do índice CEPCI consultados para cada ano podem ser atualizados de acordo com a Equação 2, na qual  $i$  representa o índice CEPCI.

$$\frac{C_{p1}}{C_{p2}} = \frac{i_1}{i_2} \quad (2)$$

### 3.7.1.3 Correção de localização

A correção da localização de equipamentos nas estimativas de CAPEX leva em consideração o fato de que o custo de um equipamento pode variar dependendo do local onde ele será instalado. Essas diferenças são corrigidas utilizando um fator de localização, levando

em conta diversos fatores, como a distância entre o local de fabricação do equipamento e o local de instalação, o transporte e manuseio do equipamento, a necessidade de adaptações para instalação e a disponibilidade de mão de obra especializada na região.

Tendo em vista que grande parte dos dados de custo de equipamentos da indústria química são fornecidos com base na Costa do Golfo dos EUA e no Noroeste da Europa e, visando a obtenção do custo de construção de uma planta em outro local, Towler e Sinnott (2012) disponibilizaram fatores de localização em seu Manual de Localização Internacional de Fator de Custo de Construção de Aspen Richardson, no qual o fator de localização para o Brasil equivale à 1,14. Tais fatores são baseados em dados de referência do ano de 2003 e que podem ser corrigidos multiplicando pela razão dólar americano/moeda local no ano desejado dividida pela razão dólar americano/moeda local em 2003, conforme demonstra a Equação 3.

$$\frac{C_{p1}}{C_{p2}} = FL_1 \left( \frac{R\$/US\$_x}{R\$/US\$_{2003}} \right) \quad (3)$$

em que  $FL$  é o fator de localização em relação à Costa do Golfo,  $x$  refere-se ao ano desejado de obtenção do custo e os subscritos 1 e 2 se referem à localização que se deseja calcular e à localização base Costa do Golfo nos EUA, respectivamente.

#### 3.7.1.4 Estimativa de estudo

A estimativa de estudo é uma das etapas do cálculo de CAPEX que envolve a previsão de gastos com atividades necessárias para o desenvolvimento do projeto, como estudos preliminares, projetos básicos e detalhados, licenciamento, entre outros. Tal estimativa envolve a análise detalhada de cada atividade e sua respectiva complexidade, tempo de duração e recursos necessários. Essa análise permite a identificação de custos específicos para cada atividade, que são somados para obter o valor total do estudo.

O método fatorial de Lang é uma técnica utilizada na estimativa de estudos em cálculos de CAPEX na construção de uma nova planta ou expansão de uma existente. Essa técnica é baseada em relações empíricas entre o custo total do projeto e alguns parâmetros-chave, tais como capacidade de produção, tipo de equipamento e tipo de processo. De acordo com essa metodologia, o custo total do projeto pode ser estimado pela soma de três componentes principais: custo de equipamentos, custo de construção e instalação e custos de engenharia e supervisão, os quais devem ser previamente ajustados pelos fatores de correção (SEIDER *et. al.*, 2016).

A estimativa do custo de equipamentos é baseada em tabelas de fatores de custo, que levam em consideração o tipo de equipamento, sua capacidade e sua localização. O custo de construção e instalação é estimado a partir do custo do terreno, construção civil, instalações elétricas e mecânicas, e outros itens associados. Os custos de engenharia e supervisão são geralmente calculados como uma porcentagem do custo total do projeto.

A metodologia de Lang é uma técnica relativamente simples e rápida para estimar os custos de um projeto de engenharia química. No entanto, é importante considerar os fatores de correção aplicáveis ao projeto específico em questão, a fim de obter uma estimativa mais precisa dos custos totais do projeto.

Para aplicar o método deve-se ter disponível os custos de compra *f.o.b* (do inglês, *free on board*) dos equipamentos, os quais são somados e o somatório é multiplicado por 1,05, fator que representa o custo de transporte dos equipamentos até o local da planta. Este valor é então multiplicado pelo fator de Lang, equivalente a 4,74 para plantas de processamento de fluido (BROWN, 2006), para se obter o investimento fixo total, conforme Equação 4.

$$I_F = 1,05 \times f_L \times \sum_i \left( \frac{CEPCI_1}{CEPCI_2} \right) C_i \quad (4)$$

na qual  $I_F$  é o investimento fixo total,  $f_L$  é o fator de Lang,  $C_i$  é o preço *f.o.b* de aquisição de um determinado equipamento  $i$  e  $CEPCI_1$  e  $CEPCI_2$  são os índices de correção temporal para o ano do projeto e o ano base, respectivamente.

### 3.7.2 Custos de produção (OPEX)

OPEX, do inglês *Operational Expenditure*, é um termo que se refere aos gastos operacionais de uma empresa, ou seja, os custos necessários para manter as atividades diárias do negócio em funcionamento, tais como despesas de operação da planta química, gasto de consumíveis e investimento em manutenção de equipamentos. Isso inclui despesas com matérias-primas, mão de obra, energia elétrica, água, materiais de limpeza, manutenção de equipamentos, entre outros. Gerenciar adequadamente os custos operacionais é fundamental para garantir a saúde financeira da empresa e maximizar a rentabilidade dos negócios (NOGUEIRA, 2013).

Os custos operacionais podem ser fixos ou variáveis. Os custos operacionais fixos são aqueles não afetados por mudanças na operação ou taxa de produção da planta, permanecendo o mesmo quando a produção é interrompida. Os custos fixos típicos incluem seguro e impostos sobre instalações, gerenciamento geral e salários administrativos, taxas de licença e custos de

juros sobre o capital emprestado. Já os custos operacionais variáveis são custos proporcionais à produção da planta ou à taxa de operação, ou seja, aqueles que variam com a quantidade de produção ou outras medidas do nível de atividade, como os custos de matéria-prima, utilidades (vapor, água de resfriamento, eletricidade, etc), consumíveis (solventes, ácidos, bases, materiais inertes, aditivos, catalisadores, etc), tratamento de efluentes, transporte e mão de obra (FREITAS, 2021).

Para estimar os custos associados à operação de uma planta são necessárias informações do processo, uma estimativa do investimento de capital fixo e uma estimativa do número de operadores necessários.

Os custos variáveis são determinados pela escolha da matéria-prima, da rota química do processo e da localização da planta. Os preços dos consumíveis e das matérias-primas podem ser negociados com fornecedores diretos ou consultados em histórico de valores. Os custos com utilidades são obtidos a partir dos preços unitários de cada concessionária.

Os resíduos gerados pelo processo podem ser reciclados, utilizados como subprodutos ou, ainda, serem descartados através de uma instalação própria da empresa. As despesas com disposição dos demais resíduos podem ser encontrados na literatura.

A mão de obra operacional é geralmente o segundo item de maior despesa direta dentro dos custos de produção (COUPER, 2003). De acordo com Turton (2012), os custos com mão-de-obra ( $C_{MO}$ ) podem ser obtidos a partir do produto entre o salário médio para operadores industriais no Brasil ( $S_M$ ), o número de trabalhadores requeridos por turno ( $N_{OL}$ ) e o número de turnos ( $T_N$ ), conforme Equação 5, sendo o número de trabalhadores por turno calculado pela Equação 6.

$$C_{MO} = S_M \times N_{OL} \times T_N \quad (5)$$

$$N_{OL} = \sqrt{6,29 + 31,7N_S^2 + 0,23N_{NS}} \quad (6)$$

na qual  $N_S$  equivale ao número de equipamentos que operam com sólidos e  $N_{NS}$  aos que não operam com sólidos.

Por fim, quando não estão disponíveis estimativas ou dados na literatura, os demais itens podem ser estimados como uma porcentagem do capital fixo de investimento ou como porcentagens das despesas de mão de obra, conforme descrito na Tabela 3.

Tabela 3 - Correlações para os demais custos de produção.

<b>Tipo</b>	<b>Custo</b>	<b>Correlação</b>
Custos Diretos	Supervisão Técnica ( $C_{ST}$ )	0,18 da Mão de Obra ( $C_{MO}$ )
	Manutenção e Reparos ( $C_{MR}$ )	0,06 do Investimento fixo ( $I_F$ )
	Suprimentos Operacionais ( $C_{SO}$ )	0,15 do $C_{MR}$
	Encargos de Laboratório ( $C_{LAB}$ )	0,15 do $C_{MO}$
	Patentes e <i>Royalties</i> ( $C_{PR}$ )	0,03 do custo de produção ( $C_P$ )
Custos Indiretos	Empacotamento e Estocagem ( $C_{EE}$ )	0,6 do $C_{MO} + C_{ST} + C_{MR}$
	Impostos Locais ( $C_{IL}$ )	0,032 do $C_I$
	Seguro ( $C_S$ )	0,005 do $C_I$
Despesas Gerais	Custos Administrativos ( $C_{ADM}$ )	0,15 do $C_{MO} + C_{ST} + C_{MR}$
	Distribuição e Venda ( $C_{DIST}$ )	0,11 do $C_P$
	Pesquisa e Desenvolvimento ( $C_{P\&D}$ )	0,05 do $C_P$

Fonte: Adaptado de Turton (2012).

### 3.8 Indicadores de análises financeiras

Os indicadores de análises financeiras são ferramentas usadas para avaliar a saúde financeira de um projeto e identificar possíveis problemas ou oportunidades de melhoria. Para Frizzone e Andrade Júnior (2005), antes de decidir por um investimento são necessárias análises econômicas que avaliem as possibilidades no tempo, levando em conta todas as variáveis que impactam o custo de implementação e de operação de uma planta. Nesse contexto, indicadores financeiros auxiliam e facilitam essa tomada de decisão.

Durante a avaliação da viabilidade de investimentos através de indicadores financeiros levando em conta a vida útil de um empreendimento deve-se avaliar o seu fluxo de caixa, ou seja, as entradas e saídas do caixa da empresa.

As entradas de capital no fluxo de caixa de um projeto são geralmente referentes às receitas obtidas pela comercialização do produto da planta, financiamentos, créditos recebidos e valor residual dos investimentos após sua venda. Já as saídas incluem os investimentos necessários para a construção da planta, custos fixos e variáveis, juros e amortização do financiamento, crédito dado a clientes e impostos.

Portanto, para uma correta análise de viabilidade, torna-se necessária a definição de uma taxa de juros a ser utilizada como parâmetro para a avaliação econômica, denominada de Taxa Mínima de Atratividade (TMA). A TMA é uma taxa de juros usada como parâmetro para representar o retorno mínimo esperado pelo investimento. Normalmente se utiliza um valor entre 10 e 15%, mas ela deve ser definida visando cobrir a inflação, o custo do capital e um

prêmio pelo risco do investimento, ou seja, maior do que o retorno de investimento seguro (NOGUEIRA, 2013).

### **3.8.1 Demonstrativo de resultado de exercício (DRE)**

O Demonstrativo de Resultado de Exercício (DRE) é uma ferramenta importante para avaliar o desempenho financeiro de um empreendimento, apresentando uma visão geral dos resultados operacionais e financeiros do projeto durante um determinado período de tempo, geralmente um ano. Ele permite identificar quais atividades geram mais receitas e quais têm os maiores custos e despesas, além de ajudar a identificar áreas em que o projeto pode ser otimizado para aumentar o lucro.

O DRE é composto por três principais elementos, as receitas, os custos e as despesas. As receitas são as entradas de dinheiro no projeto, provenientes da venda de produtos ou serviços. Os custos são os gastos necessários para produzir ou fornecer esses produtos ou serviços. Já as despesas são os gastos relacionados à administração do projeto.

Segundo o artigo 187 da Lei 6.404/1976, o DRE apresenta de forma vertical o resultado apurado das operações realizadas na empresa.

O primeiro bloco é representado pela Receita Operacional Bruta que se trata do patrimônio da empresa ou entrada de dinheiro no caixa, excluindo as deduções, abatimentos e impostos que incidem diretamente nas vendas. O segundo bloco é resultante da receita bruta subtraída das deduções de impostos, chamado de Receita Operacional Líquida, na qual incluem os custos com matérias-primas e demais custos do produto ou serviço comercializado. Reduzindo tais custos da receita líquida, obtém-se o Lucro Operacional Bruto, caracterizando o quarto bloco. Nesse último bloco, descontam-se as despesas com vendas, operacionais e administrativas para obtenção do Lucro Operacional. Por fim, o Lucro Líquido é obtido após dedução da provisão para contribuição social e do imposto de renda.

### **3.8.2 Valor presente líquido (VPL)**

O Valor Presente Líquido (VPL) é uma técnica de análise financeira utilizada para avaliar a viabilidade econômica de um projeto de investimento. O cálculo do VPL leva em consideração o fluxo de caixa projetado ao longo do tempo e os custos de capital, ou seja, o VPL traz o fluxo de caixa esperado ao longo da vida útil do projeto para o momento inicial. Para que o fluxo de caixa esteja em valores do presente uma taxa de desconto é aplicada,

chamada Taxa Mínima de Atratividade (TMA). A Equação 7 descreve esse cálculo (TURTON, 2012).

$$VPL = \sum_{j=0}^n \frac{FC_j}{(1+TMA)^j} \quad (7)$$

na qual  $FC_j$  representa o fluxo de caixa de cada período  $j$ .

O VPL é calculado como a soma do valor presente de todos os fluxos de caixa futuros, menos o investimento inicial. Esse cálculo é baseado em uma taxa de desconto, que representa o custo de oportunidade do capital e leva em conta o risco do investimento. Se o VPL resultante for positivo, isso significa que o projeto é viável do ponto de vista financeiro e gera valor econômico. Resultados negativos indicam prejuízo para o investimento e um VPL igual a zero cobre apenas o valor do custo e capital investido (PEREIRA, 2016).

### 3.8.3 Taxa interna de retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é uma medida de análise de investimentos que indica a taxa de rentabilidade de um projeto ao longo do tempo. Em outras palavras, a TIR é a taxa de juros que faz o valor presente líquido (VPL) do projeto igual a zero, como mostra a Equação 8.

$$VPL = \sum_{j=0}^n \frac{FC_j}{(1+TIR)^j} = 0 \quad (8)$$

sendo  $FC_j$  o valor presente das entradas de caixa,  $n$  o período do investimento,  $j$  o período em que ocorre o projeto e  $TIR$  a taxa interna de retorno.

O VPL é calculado a partir da diferença entre o valor presente das entradas (receitas) e o valor presente das saídas (despesas) de caixa do projeto, considerando-se uma taxa de desconto que representa o custo de capital do investidor. A TIR, desta maneira, é a taxa que torna o valor dos lucros futuros equivalente aos gastos realizados com o projeto, caracterizando, desse modo, a taxa de remuneração do capital investido (FRIZZONE; ANDRADE JÚNIOR, 2005).

Em um estudo de viabilidade técnica e econômica, a TIR é utilizada para avaliar a atratividade do projeto, comparando-a com a taxa mínima de atratividade (TMA) ou custo de oportunidade do investidor. Se a TIR for maior que a TMA, significa que o projeto é atrativo, pois a rentabilidade esperada é maior que o custo de oportunidade do investidor. Por outro lado, se a TIR for menor que a TMA, o projeto pode ser rejeitado por não ser rentável o suficiente (TURTON, 2012).

### 3.8.4 *Payback*

O período de *payback*, ou tempo de recuperação, é um indicador utilizado para avaliar a viabilidade financeira de um investimento. Ele se baseia no período necessário para recuperar o investimento inicial realizado, considerando o fluxo de caixa projetado. Quanto menor for o período de *payback*, mais atrativo será o investimento, pois ele retornará o capital investido em um período mais curto.

O *payback* é importante pois, mesmo que o VPL do projeto seja positivo, a viabilidade econômica não se sustenta se o período de retorno for muito longo. Um *payback* de 5 anos de operação é um valor médio aceitável considerado na indústria química (NOGUEIRA, 2013).

O tempo de retorno pode ser calculado com base no fluxo de caixa descontado utilizando a TMA, conforme Equação 9.

$$VPL(t) = 0 \quad (9)$$

### 3.8.5 Retorno sobre investimento (ROI)

O Retorno sobre o Investimento é uma métrica utilizada para avaliar o impacto financeiro e de negócios dos empreendimentos. Esse indicador calcula o valor financeiro gerado pelos investimentos, ou seja, o lucro líquido anual em comparação com os seus custos associados, conforme demonstra a Equação 10. O resultado indica o valor que a organização recebe em relação aos custos incorridos no investimento (TURTON, 2012).

$$ROI = \frac{\text{lucro líquido anual}}{\text{custo de investimento}} \times 100\% \quad (10)$$

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Estudo de mercado

O primeiro passo para a realização da análise de viabilidade econômica de uma expansão da indústria, com a inclusão da produção de etanol anidro, baseou-se em um estudo de mercado, visando a demanda e a oferta desse biocombustível no estado de São Paulo, no qual a unidade será implementada.

Através de dados do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA – ESALQ/USP) e da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) foram obtidos dados de volume de produção e de valores de etanol anidro e hidratado no estado de São Paulo, os quais estão listados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Produção de etanol anidro e hidratado (em mil litros).

	Safra 2021/22	Safra 2022/23	Safra 2023/24*
<b>Anidro</b>	5.347.976,0	5.553.618,0	5.863.828,8
<b>Hidratado</b>	6.596.730,0	6.415.042,0	6.439.244,7

\*Previsão para a safra 2023/2024  
Fonte: Adaptado de Conab (2023).

Tabela 5 - Preço do etanol anidro e hidratado (R\$/litro).

	Safra 2021/22	Safra 2022/23	Safra 2023/24*
<b>Anidro</b>	3,5573	3,2601	3,1587
<b>Hidratado</b>	3,1425	2,8582	2,7462

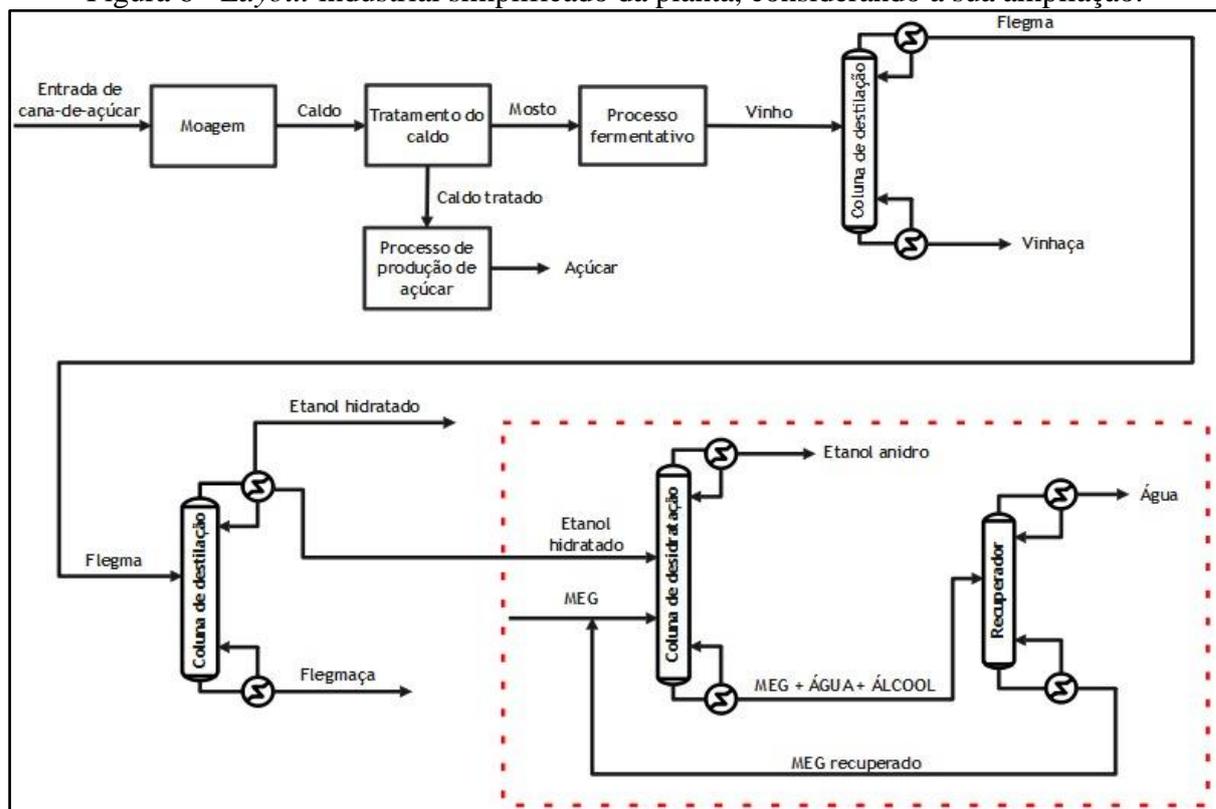
\*Previsão para a safra 2023/2024  
Fonte: Adaptado de CEPEA (2023).

### 4.2 Projeto e condições operacionais da unidade de produção

Em seguida, para a concepção do projeto de expansão de uma indústria foram definidas suas condições operacionais, seguido da coleta de dados necessários para a sua operação, como custos de capital e custos operacionais. Os dados foram obtidos através de fontes internas, de uma empresa sucroenergética de grande porte, e externas, incluindo relatórios financeiros, estudos de mercado, estudos de viabilidade anteriores e consultas a especialistas do setor.

A Figura 6 mostra o *layout* industrial da planta, com ênfase para a unidade de produção de etanol anidro.

Figura 6 - *Layout* industrial simplificado da planta, considerando a sua ampliação.



Fonte: Dos autores (2023).

#### 4.2.1 Capital de investimento

Os custos de capital envolvem os custos associados à construção e instalação da unidade de etanol anidro. Para tanto, foram consultados especialistas de mercado e sites de fornecedores que possibilitaram o levantamento da capacidade e valores de aquisição dos equipamentos necessários para operação e produção de etanol anidro, os quais estão listados na Tabela 6.

Tabela 6 - Relação de equipamentos e capacidade de operação.

Equipamentos	Capacidade (m <sup>3</sup> /d)	Quantidade
Coluna de desidratação	300	1
Coluna de recuperação	300	1
Condensador	300	4

Fonte: Dos autores (2023).

O valor dos equipamentos necessários para operação de uma planta de 300 m<sup>3</sup>/dia com vinho de 8 °GL foi estimado através de consulta com especialistas da área e juntamente à empresa de consultoria Newpro Engenharia.

O custo do terreno utilizado não foi contabilizado, visto se tratar apenas de um projeto de ampliação da produção e, portanto, já ser adquirido pela empresa.

#### 4.2.2 Custos de produção

Os custos operacionais são custos associados à operação da unidade de etanol anidro, como matéria-prima, mão de obra, energia, manutenção e outros. A Tabela 7 especifica os insumos e matérias-primas necessários para o processo de destilação extrativa na obtenção do etanol anidro e a quantidade exigida para produção em uma safra, com capacidade de operação de 250 m<sup>3</sup>/dia. Tais dados foram obtidos através de consultas com especialistas do setor sucroenergético.

Tabela 7 - Insumos e matérias-primas necessárias para a destilação extrativa com MEG.

<b>Insumos/Matéria-prima</b>	<b>Quantidade por safra</b>
Monoetilenoglicol (MEG)	15,0 ton
Etanol Hidratado	39395,0 m <sup>3</sup>
Bagaço de cana-de-açúcar	12124,0 ton
Soda Cáustica	70,0 ton
Anti Incrustante	1,0 ton
Anti Espumante	20,0 ton
Biocida Não Oxidante	3,5 ton
Dispersante Fermentação	10,0 ton
Inibidor de Corrosão	2,0 ton
Biocida Amônia	0,5 ton
Desinfetante Base Ácido	7,0 ton
Ácido Sulfúrico 98%	610,0 ton

Fonte: Dos autores (2023).

O custo com utilidade e a quantidade requerida estão listados na Tabela 8. Para a produção de etanol anidro, utiliza-se o bagaço da cana-de-açúcar como combustível para geração de vapor e energia.

Tabela 8 - Relação de custo e quantidade gasta com utilidades.

<b>Utilidade</b>	<b>Quantidade por safra (mil toneladas)</b>	<b>Custo (R\$/ton)</b>
Vapor	40	230

Fonte: Dos autores (2023).

O custo de mão-de-obra necessária para operação da unidade foi estimado de acordo com as Equações 5 e 6 estipuladas por Tourton (2012), considerando a operação dividida em três turnos, seis equipamentos que não operam com sólidos necessários para produção de etanol anidro e um salário médio de R\$2193,00 consultado no Glassdoor em 2023.

Não foram estimados valores gastos com tratamento de resíduos, por se tratar de uma unidade circular com recuperação dos materiais utilizados no processo.

### 4.3 Indicadores de viabilidade econômica

Para a análise da viabilidade financeira do projeto e visualização da projeção de fluxos de caixa ao longo do período de operação da unidade, foi estruturado um Demonstrativo de Resultados de Exercício (DRE), conforme descrito pelo Quadro 1, no qual foram projetadas as receitas com a venda de etanol anidro, os custos associados à sua operação e fatores externos, como inflação, câmbio e impostos.

Quadro 1 – Estruturação de um DRE.

	<b>Receita Operacional Bruta</b>
(-)	deduções, abatimentos e impostos (ICMS, PIS, COFINS)
=	<b>Receita Operacional Líquida</b>
(-)	custo com matéria-prima e serviços
=	<b>Lucro Operacional Bruto</b>
(-)	despesas operacionais e administrativas
=	<b>Lucro Operacional</b>
(-)	provisão para contribuição social e do imposto de renda
=	<b>Lucro Líquido</b>

Fonte: Dos autores (2023).

Para as deduções fiscais no estado de São Paulo, foram consideradas alíquotas de 1,65%, 7,6% e 18% para PIS (Programa de Integração Social), COFINS (Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social) e ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços), respectivamente. Além disso, considerou-se as deduções de 15% do imposto de renda e 10,5% da contribuição social.

Por fim, a análise da viabilidade do empreendimento pode ser inferida com o auxílio dos indicadores financeiros através das Equações 7, 8, 9 e 10, utilizando uma TMA de 12,5%, definida a partir da média entre o intervalo informado na literatura, para o cálculo do VPL, TIR, *Payback* e ROI, respectivamente.

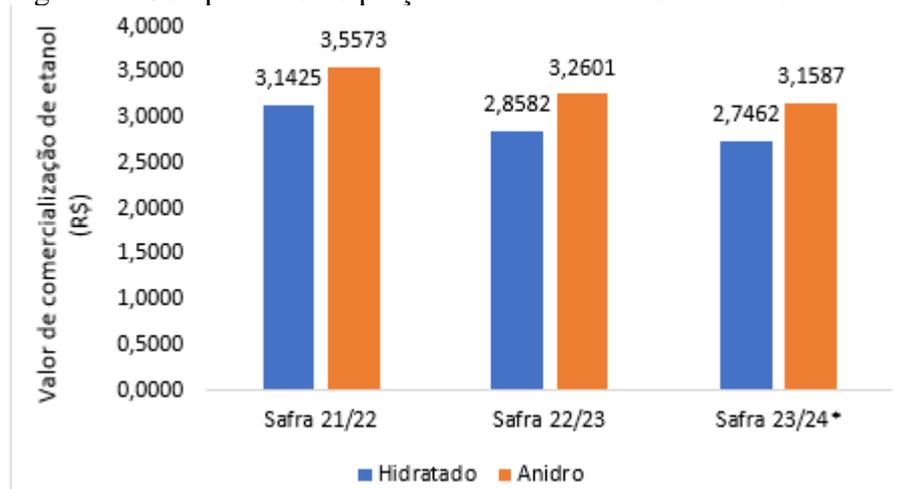
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Análise de mercado

Diante das necessidades de negócios, sejam elas evidenciadas por questões ambientais, de rentabilidade ou outros, as indústrias buscam meios viáveis de expansão para se manter frente ao mercado competitivo. Para o caso do setor sucroenergético, tendo em vista os fatores de custo e produção, a possibilidade da implementação de uma unidade de produção de etanol anidro torna-se vantajosa. Somado a isso, existe ainda a oportunidade de redução da dependência do mercado de açúcar, o qual pode ser afetado por variações sazonais de preço e demanda, além da geração de receitas adicionais com o aumento da rentabilidade da indústria.

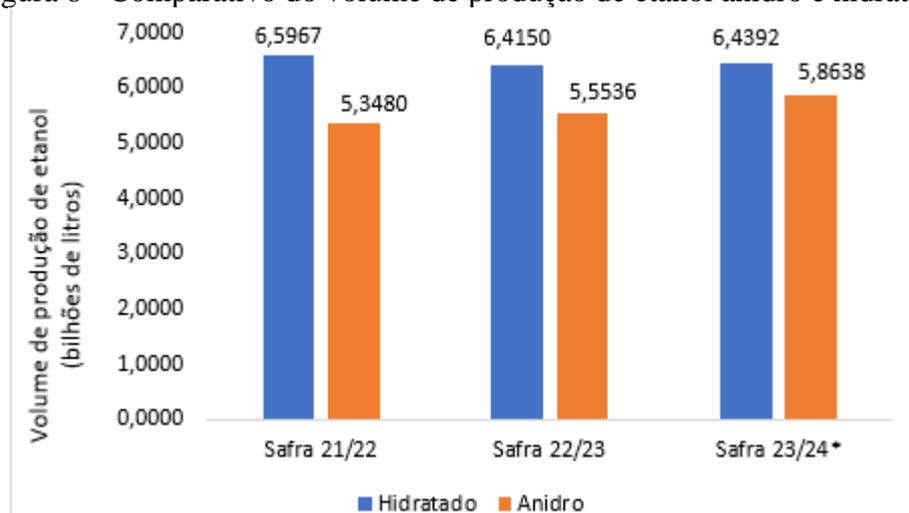
As Figuras 7 e 8 representam graficamente a variação do preço de comercialização e do volume de produção de etanol anidro e hidratado, respectivamente, no estado de São Paulo.

Figura 7 - Comparativo do preço de venda de etanol anidro e hidratado.



\*Previsão para a safra 2023/2024  
Fonte: Adaptado de CEPEA (2023).

Figura 8 - Comparativo do volume de produção de etanol anidro e hidratado.



\*Previsão para a safra 2023/2024

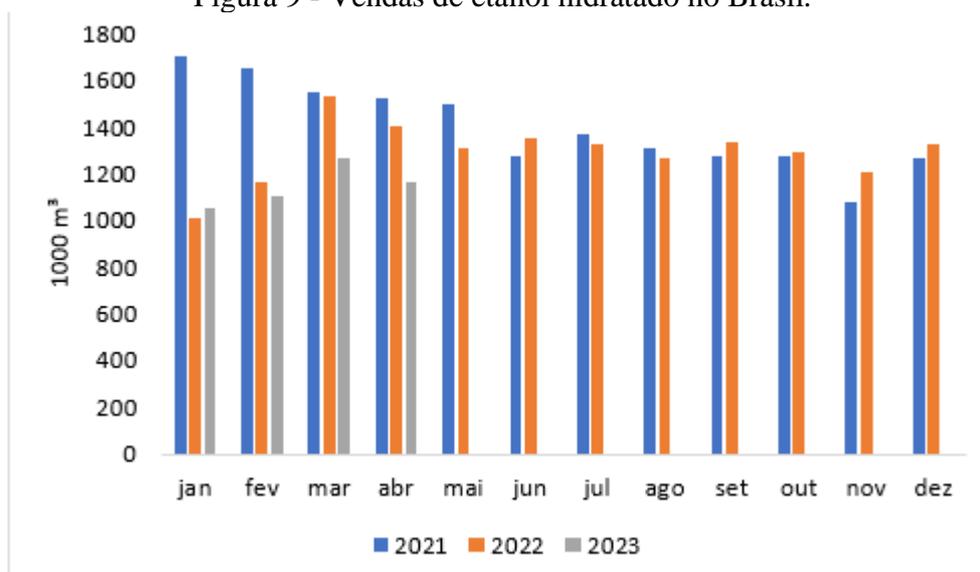
Fonte: Adaptado de Conab (2023).

Como analisado através da Figura 7, o etanol anidro foi comercializado por R\$3,2601 na safra de 2022/23, com variação de 14% em relação ao valor do etanol hidratado nessa mesma safra. Além disso, pode-se inferir pelos dados de produção de etanol no estado de São Paulo, representados na Figura 8, o crescimento da demanda de etanol anidro, com aumento da produção em 3,85% frente à safra 2021/22 e previsão de aumento em 5,58% para a safra de 2023/24.

O preço competitivo de etanol anidro no mercado brasileiro e o aumento da procura por esse biocombustível indicam um mercado em expansão, impulsionado pela conscientização crescente sobre a importância dos combustíveis renováveis e da redução da emissão de poluentes na atmosfera.

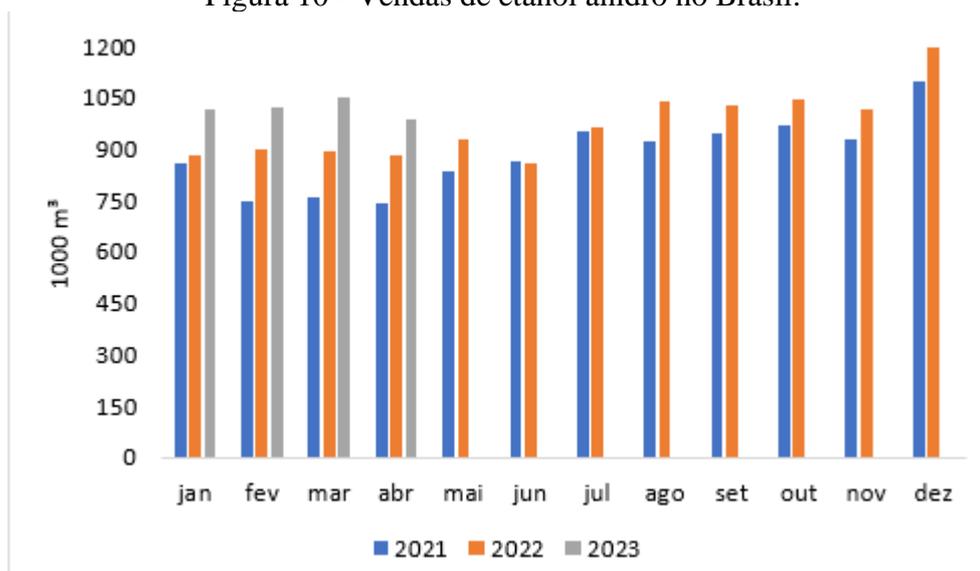
Além disso, avaliando-se as Figuras 9 e 10, que apresentam um demonstrativo das vendas de etanol hidratado e anidro no Brasil nos anos de 2021 a 2023, observa-se um aumento na venda de etanol anidro em contrapartida à queda nas vendas de etanol hidratado. Tais mudanças estão atreladas ao preço do petróleo e da gasolina, sendo o mercado de etanol prejudicado pela variabilidade dessa *commodities*, o que afeta diretamente o comportamento dos consumidores na escolha pelo combustível.

Figura 9 - Vendas de etanol hidratado no Brasil.



Fonte: Adaptado de ANP (2023).

Figura 10 - Vendas de etanol anidro no Brasil.



Fonte: Adaptado de ANP (2023).

Diante de tais análises, a produção de etanol anidro tem se mostrado uma opção promissora no setor de biocombustíveis, tendo-se, então, um respaldo para um estudo referente à expansão de uma indústria sucroenergética para a produção de etanol anidro.

Para tanto, o investimento em novas linhas de produção deve ser bem planejado e gerenciado. Sendo assim, o projeto de uma indústria química deve estar sustentado em avaliações de impacto e Estudos de Viabilidade Técnica e Econômica (EVTE), levando em consideração aspectos técnicos, financeiros e sociais, que auxiliem na maximização de benefícios e atividades e minimizem os impactos negativos. Portanto, um EVTE pode ser dividido nas etapas de cálculo de CAPEX, ou seja, os custos necessários para o *startup* da

planta, seguido do cálculo de OPEX que engloba os custos para operação da planta em questão e, por fim, a avaliação de viabilidade do empreendimento, fundamentada nas projeções do fluxo de caixa e nos indicativos de viabilidade financeira.

## 5.2 Condições operacionais da unidade de produção

A ampliação da unidade de produção de etanol anidro na indústria sucroenergética em questão foi concebida pelo *layout* industrial disposto na Figura 6. As capacidades produtivas de cada item fabricado na indústria foram obtidas através da produção total da última safra, 2022/2023, com 151 dias efetivos, e a capacidade diária da coluna de desidratação, considerando as perdas, equivalente à 250 m<sup>3</sup>/d. Os dados estão listados na Tabela 9.

Na atual concepção da indústria, parte da cana-de-açúcar processada é destinada a produção comercial de açúcar, com o bagaço resultante do processo sendo destinado à produção de vapor e energia para a destilação. Além disso, metade da produção de etanol hidratado é designado à desidratação para obtenção do etanol anidro.

Tabela 9 - Capacidade produtiva de açúcar, etanol hidratado e etanol anidro.

<b>Produto</b>	<b>Capacidade/safra</b>
Açúcar (kg)	150.000.000
Etanol hidratado (m <sup>3</sup> )	78.790
Etanol anidro (m <sup>3</sup> )	37.812

Fonte: Dos autores (2023).

### 5.2.1 Cálculo CAPEX

O cálculo de CAPEX constitui-se no cálculo do investimento de capital fixo necessário para um empreendimento, ou seja, o custo total de projetar, construir e instalar a planta, deixando-a pronta para o seu *startup*.

O valor requerido para aquisição dos equipamentos necessários para operação da nova planta de produção de etanol anidro foi estimado em R\$9.600.000,00, contemplando o módulo de operação das colunas de desidratação e recuperação. Segundo Peters e Timmerhaus (2003), o custo de aquisição dos equipamentos constitui 65 a 80% do valor do investimento fixo. Sendo assim, se tratando de um empreendimento de ampliação em que os custos para projeção e construção da planta são minimizados, considerou-se o valor do custo de equipamento equivalente à 80%, obtendo-se um investimento fixo total de R\$12.000.000,00.

## 5.2.2 Cálculo OPEX

O cálculo de OPEX refere-se aos gastos relacionados às operações diárias de uma empresa, ou seja, baseia-se nos custos com insumos, matérias-primas, utilidades, mão-de-obra e manutenção.

Grande parte dos custos operacionais gira em torno do valor gasto com insumos e matérias-primas. Para o empreendimento em questão, se tratando da ampliação de uma indústria com a inserção de uma unidade de produção de etanol anidro, o valor estimado para compra dos insumos necessários para o processo de destilação extrativa com uso do Monoetilenoglicol (MEG) está identificado na Tabela 10.

Tabela 10 - Valor gasto, em mil reais por tonelada ou m<sup>3</sup>, com matérias-primas.

Insumos/Matéria-prima	Quantidade por safra	Valor (kBRL)
Monoetilenoglicol (MEG)	15,0 ton	10,09
Etanol Hidratado	39395,0 m <sup>3</sup>	2,746
Bagaço da cana-de-açúcar	12124,0 ton	0,23
Soda Cáustica	70,0 ton	1,80
Anti Incrustante	1,0 ton	10,97
Anti Espumante	20,0 ton	10,77
Biocida Não Oxidante	3,5 ton	9,07
Dispersante Fermentação	10,0 ton	22,79
Inibidor de Corrosão	2,0 ton	11,64
Biocida Amônia	0,5 ton	25,74
Desinfetante Base Ácido	7,0 ton	8,57
Ácido Sulfúrico 98%	610,0 ton	2,21

Fonte: Dos autores (2023).

Para tanto, considerando-se todos os insumos necessários na desidratação do etanol hidratado para obtenção do etanol anidro, têm-se um gasto equivalente a R\$2.207.610,00 para produção em uma safra.

O valor gasto com utilidades resume-se ao custo com a manutenção da unidade de produção de açúcar, responsável pela geração do bagaço como subproduto, visto que na indústria sucroenergética esse bagaço proveniente da cana é utilizado como combustível para geração de vapor e energia. Sendo assim, para a produção do etanol anidro em uma safra utiliza-se 40 mil toneladas de vapor, resultando em um custo com essa utilidade de R\$9.200,00.

O custo com mão de obra anual necessário para a nova unidade de produção de etanol anidro foi estimado em R\$218.644,68, através das Equações 5 e 6, considerando três turnos, seis equipamentos que não operam com sólidos e um salário de operador médio de R\$2193,00.

Por fim, o gasto com manutenção e reparo durante os anos de operação da planta foi estimado com especialistas de mercado em, aproximadamente, R\$20.000,00 por ano.

### 5.3 Indicadores de análise financeira

Visando a análise de viabilidade do investimento, utilizou-se de indicadores financeiros para discutir sobre a rentabilidade do projeto. Para tanto, após estruturado o DRE, calculou-se os indicativos VPL, TIR, *payback* e ROI, cujos resultados foram detalhados e discutidos nos tópicos seguintes.

#### 5.3.1 DRE

Um Demonstrativo de Resultados de Exercício (DRE) fornece informações importantes sobre a performance financeira de uma empresa em um determinado período de tempo, levantando indícios sobre a viabilidade financeira de uma expansão industrial.

Considerando a receita operacional bruta obtida num período de 12 meses, a partir da venda de etanol anidro, e fazendo as deduções de impostos, custos e gastos operacionais foi encontrado um valor de R\$ 3.039.087,52 de lucro líquido através da estruturação do DRE, detalhado na Tabela 11.

Tabela 11 - Cálculo do Demonstrativo de Resultados de Exercício.

<b>Receita Operacional Bruta</b>	<b>R\$ 8.707.000,00</b>
(-) Dedução do ICMS	R\$ 1.567.260,00
(-) Dedução do PIS	R\$ 143.665,50
(-) Dedução do COFINS	R\$ 661.732,00
<b>= Receita Operacional Líquida</b>	<b>R\$ 6.334.342,50</b>
(-) Custo com matéria-prima	R\$ 2.207.610,00
(-) Custo com manutenção	R\$ 20.000,00
<b>= Lucro Operacional Bruto</b>	<b>R\$ 4.106.732,50</b>
(-) Gasto com mão-de-obra	R\$ 218.644,68
(-) Gasto com utilidades	R\$ 9.200,00
<b>= Lucro Operacional</b>	<b>R\$ 3.878.887,82</b>
(-) Provisão para CS	R\$ 407.283,22
(-) Provisão para IR	R\$ 581.833,17
<b>= Lucro Líquido</b>	<b>R\$ 2.889.771,43</b>

Fonte: Dos autores (2023).

Após análise do demonstrativo acima, observa-se que o lucro líquido anual resultante representa em torno de 33,19% da receita bruta inicial obtida com a venda do etanol anidro

produzido. A margem de lucro líquido é um indicador de rentabilidade e eficiência operacional da empresa. Portanto, o valor alcançado sugere que o investimento está gerando lucros substanciais em relação à sua receita bruta.

Os maiores gastos referem-se ao custo com matéria-prima, resultante em 89,91% do total das despesas, sendo justificável pela necessidade de diversos insumos para a operação eficiente da unidade de desidratação. Avaliando-se junto à margem de lucro líquido obtida, pode-se dizer que a empresa está controlando efetivamente seus custos e objetivando a maximização da eficiência de suas operações.

### 5.3.2 VPL

Com base na TMA definida em 12,5% ao ano, calculou-se o fluxo de caixa descontado ao longo de 10 anos para iniciar-se a análise do *payback* do projeto. A Tabela 12, apresenta em sua primeira coluna o fluxo de caixa anual, sendo o ano de investimento equivalente ao ano 0 e considerando o lucro líquido encontrado no cálculo do DRE para o fluxo de caixa dos outros anos.

Tabela 12 - Análise de *Payback*.

Ano	Fluxo de Caixa	Fluxo de Caixa Descontado	Saldo
0	-12.000.000,00	-12.000.000,00	-12.000.000,00
1	2.889.771,43	2.568.685,71	-9.431.314,28
2	2.889.771,43	2.283.276,19	-7.148.038,10
3	2.889.771,43	2.029.578,83	-5.118.459,26
4	2.889.771,43	1.804.070,07	-3.314.389,19
5	2.889.771,43	1.603.617,84	-1.710.771,35
6	2.889.771,43	1.425.438,08	-285.333,26
<b>7</b>	<b>2.889.771,43</b>	<b>1.267.056,07</b>	<b>981.722,81</b>
8	2.889.771,43	1.126.272,07	2.107.994,88
9	2.889.771,43	1.001.130,75	3.109.125,60
10	2.889.771,43	889.893,97	3.999.019,58

Fonte: Dos autores (2023).

O saldo acumulado foi calculado somando-se, do ano anterior, os resultados de Valor Presente Líquido, representados na coluna “Fluxo de Caixa descontado”, considerando o saldo negativo do investimento inicial para o ano 0.

Ao fazer a análise do saldo obtido nota-se que durante 5 anos o valor investido no projeto vai sendo quitado, tendo no ano 7 o primeiro saldo positivo pós início do investimento. O VPL

positivo, calculado em R\$ 3.999.019,60, indica que o investimento é executável e possui projeções financeiras.

### 5.3.3 TIR

A Taxa Interna de Retorno é atingida quando o Valor Presente Líquido do projeto se iguala a zero. Para tanto, após cálculos iterativos com base na Equação 8, obtêm-se uma TIR de 22,71% ao ano.

De acordo com Tourton (2012), o projeto é atrativo quando a TIR for maior que a TMA, ou seja, o projeto está superando a taxa de atratividade mínima e gerando um retorno substancialmente maior do que o custo de oportunidade do capital investido. Considerando a TMA utilizada para o projeto de 12,5% ao ano, têm-se que o projeto é rentável o suficiente e economicamente atrativo, sendo sua implementação considerada viável.

### 5.3.4 Payback

O *payback* é o período necessário para recuperar o investimento inicial realizado por meio dos fluxos de caixas gerados pelo projeto, ou seja, o ano em que a VPL se iguala a zero e o projeto começa a gerar lucro.

De acordo com o descrito na Tabela 12, observa-se que o saldo do empreendimento em questão começa a se tornar positivo a partir do ano 7, ou seja, o projeto torna-se lucrativo e, portanto, o investimento inicial é recuperado.

Em indústrias químicas, é comum que os investimentos tenham um tempo de retorno mais longo, pois podem envolver custos significativos de pesquisa e desenvolvimento, construção de instalações e desenvolvimento de novos produtos. Além disso, o ciclo de vida dos projetos de expansão na indústria química pode ser prolongado.

Segundo Nogueira (2013), na indústria química um *payback* médio de 5 anos é um valor aceitável. Além disso, quanto menor for o período de retorno mais atrativo será o investimento. Sendo assim, se tratando de um projeto com investimento relativamente alto, o *payback* de 7 anos é considerado viável e demonstra atratividade do empreendimento.

### 5.3.5 ROI

Através da Equação 10, considerando o lucro líquido estimado pela DRE e o investimento fixo aplicado no projeto, foi calculado o Retorno Sobre o Investimento (ROI), equivalente à 24,08%.

O ROI indica a porcentagem do investimento realizado que voltará ao caixa da empresa, ou seja, o percentual que o lucro líquido anual representa do investimento inicial. Assim, quando analisado o valor do Retorno Sobre o Investimento obtido, têm-se um valor aceitável para o projeto em questão, visto o elevado investimento inicial realizado.

A porcentagem ideal de ROI para a expansão de uma indústria química depende de diversos fatores, incluindo o tipo indústria, o mercado, a localização, o risco associado e a fase do ciclo de vida da indústria, sendo que os setores mais maduros ou com maior competição apresentam perspectivas de ROI mais moderadas.

Portanto, levando em consideração as flutuações de mercado e demanda e a taxa de retorno estimada em 7 anos necessária para cobrir o custo de capital, além dos demais indicadores analisados, o valor obtido para o ROI pode ser considerado rentável para o empreendimento em questão.

## 6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados, tanto técnicos quanto econômicos, encontrados e discutidos ao longo desse estudo e, levando em consideração os objetivos levantados no início do mesmo, tornou-se evidente a comprovação da viabilidade da implementação de uma unidade de produção de etanol anidro em uma indústria sucroenergética.

Para o Estudo de Viabilidade Técnico e Econômica da expansão da indústria, o investimento inicial foi estimado em 12 milhões de reais. Por meio de consulta a especialistas da área sucroenergética e de estimativas da capacidade de produção, calculou-se a receita bruta anual da unidade em operação, obtendo um valor de 8,707 milhões de reais. Após estruturação do DRE, deduzindo-se os impostos e custos de operação pertinentes, encontrou-se um lucro líquido anual de 3,89 milhões de reais.

Por fim, concluiu-se a análise através dos indicadores financeiros. Com uma TIR de 22,71% ao ano, *Payback* de 7 anos e ROI de 24,08% e considerando o tipo de empreendimento, o investimento indica boas projeções financeiras e a viabilidade técnica e econômica de implementação da nova unidade pode ser prevista.

No que se tange à situação do mercado considerado durante a elaboração desse trabalho, ressalta-se que qualquer mudança poderá impactar nos resultados das análises, principalmente as financeiras e econômicas. Entretanto, é notável que o constante aumento no uso de combustíveis renováveis, visando um futuro sustentável, torna o projeto muito promissor.

## REFERÊNCIAS

- ANDERS, Alberto Osvaldo. **Estudo de viabilidade técnica e econômica - EVTE para implantação de uma agroindústria processadora de amêndoas de cacau no município de Medicilândia – Pará.** Belém, PA: Universidade do Sul de Santa Catarina, 2020.
- ANP, Agência Natural de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Brasil é referência no campo da energia limpa e renovável,** 2022.
- ANP, Agência Natural de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Brasil avança no setor de biocombustíveis,** 2022.
- Associação Brasileira da Indústria de Cana-de-açúcar (UNICA). **Açúcar: produção e processamento.** Disponível em: <https://www.unica.com.br/processo/produto/acucar/>. Acesso em: 01 mai. 2023.
- BAEYENS, J., KANG, Q., APPELS, L., DEWIL, R., LV, Y., & TAN, T. (2015). **Challenges and opportunities in improving the production of bio-ethanol.** Progress in Energy and Combustion Science, 47, 60–88. doi:10.1016/j.pecs.2014.10.003.
- BRASIL. **Decreto nº 10.940, de 13 de janeiro de 2022.** Decreto Nº 10.940. Brasília, DF. Diário Oficial da União, 14 jan. 2022.
- BRASIL. **Lei nº 6.404, de 15 de dezembro de 1976.** Dispõe sobre as Sociedades por Ações. Artigo 187.
- BRASIL. **Lei nº 8.723, de 28 de outubro de 1993.** Dispõe sobre a redução de emissão de poluentes por veículos automotores e dá outras providências. Brasília, DF. Presidência da República Casa Civil, 1993.
- BRASIL. **Resolução nº 907, de 18 de novembro de 2022.** Resolução ANP Nº 907. Brasília, DF. Diário Oficial da União, 23 nov. 2022.
- BROWN, Thane. **Engineering economics and economic design for process engineers.** CRC Press, 2006.

- CEPEA. **Indicador semanal do etanol anidro CEPEA/ESALQ – SP**. 2023. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/indicador/etanol.aspx>. Acesso em: 13 abr. 2023.
- CIA, F. et al. (2021). **Sustainable Sugarcane Initiative: A Framework for Improving Sugarcane Production Sustainability in Brazil**. *Sustainability*, 13(11), 5964.
- CONAB. **Produção de cana chega a 610,1 milhões de toneladas na safra 2022/23, com melhora na produtividade nas lavouras**. Brasília, DF, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4977-producao-de-cana-chega-a-610-1-milhoes-de-toneladas-na-safra-2022-23-com-melhora-na-produtividade-nas-lavouras>. Acesso em: 07 mai. 2023.
- CONAB. **Tabela de dados - Produção de cana-de-açúcar e subprodutos**. Brasília, DF, 2023.
- DIAS, M. O. de S., MACIEL FILHO, R., MANTELATTO, P. E., CAVALETT, O., ROSSELL, C. E. V., BONOMI, A., & LEAL, M. R. L. V. **Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil**. *Environmental Development*, 2015.
- COUPER, James Riley. **Process engineering economics**. CRC Press, 2003.
- FREITAS, L. A. **Análise técnico-econômica de produção de etanol por gaseificação direta de biomassa lignocelulósica**. Rio de Janeiro, RJ: UFRJ, 2021.
- FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JUNIOR. **Análise de decisão econômica em irrigação. Piracicaba**. ESALQ/LER, 2005. 371p.
- JUNQUEIRA, T. L., DIAS, M. O. S., FILHO, R. M., MACIEL, M. R. W., & ROSSELL, C. E. V. **Simulation of the Azeotropic Distillation for Anhydrous Bioethanol Production: Study on the Formation of a Second Liquid Phase**. 10th International Symposium on Process Systems Engineering: Part A, 1143–1148, 2009.
- KUMAR, S., SINGH, N., & PRASAD, R. **Anhydrous ethanol: A renewable source of energy**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010.
- LOPES, C. H.; GABRIEL, A. V. M. D.; BORGES, M. T. M. R. **Produção de etanol a partir da cana-de-açúcar: tecnologia de produção de etanol**. UFSCAR-SP, São Carlos, 2011.

- NOGUEIRA, E. **Introdução à Engenharia Econômica**. São Carlos. Editora EDUFSCar, 2013. 113 p. Coleção UAB-UFSCar.
- NOVA CANA. **Controle de qualidade: especificações do etanol**. Nova Cana, 2023. Disponível em: <<https://www.novacana.com/noticias/control-e-qualidade>>. Acesso em: 08 mai. 2023.
- OCDE-FAO. **Perspectivas Agrícolas 2022-2031**, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/820ef1bb-es>.
- PALACIOS-BERECHE, R., ENSINAS, A. V., MODESTO, M., & NEBRA, S. A. **Double-effect distillation and thermal integration applied to the ethanol production process**. Energy, 82, 512–523, 2015.
- PEREIRA, D. A. S. et al. **Estudo da viabilidade de investimento em uma indústria de confecções: Utilização das técnicas VPL, TIR, Payback descontado e Índice de Lucratividade**. Vitória, ES: Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.
- PERLINGEIRO, Carlos Augusto G. **Engenharia de processos: análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos**. Editora Blucher, 2018.
- PETERS, Max S.; TIMMERHAUS, Klaus D.; WEST, Ronald E. **Plant design and economics for chemical engineers**. 5th ed. Boston, MA: McGraw-Hill, 2003.
- RPA (Renewable Fuels Association). **Annual Ethanol Production**. 2022. Disponível em: <<https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>>. Acesso em: 07 mai. 2023.
- SALLET, C. L. **Os biocombustíveis no Brasil e a relação entre os mercados agrícolas e de energia**. PUC-RS, Porto Alegre, 2011.
- SANTOS, M. C. *et al.* **Principais tecnologias para produção de etanol anidro no Brasil**. Revista Virtual de Química, Maceió - AL, 2021.
- SEIDER, W. D.; LEWIN, D. R.; SEADER, J. D.; WIDAGDO, S.; GANI, R.; NG, K. M. **Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation**. 4ª ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.

SUGARCANE. **Ethanol**. Disponível em: <<https://www.sugarcane.org/sugarcane-products/ethanol/>>. Acesso em: 07 mai. 2023.

TOWLER, Gavin; SINNOTT, Ray. **Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design**. Elsevier, 2012.

TURTON, R. et al. **Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes**. Person, 2012.

UNICA. **Relatório do resumo Safra 2022/2023**. Disponível em: <[observatoriodacana.com.br](http://observatoriodacana.com.br)>. Acesso em: 07 mai. 2023.

VIDAL, M. F. **Agroindústria - Etanol**. Caderno Setorial ETENE. Ano 7, n° 237. Setembro, 2022. Disponível em: <[https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1409/3/2022\\_CDS\\_237.pdf](https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1409/3/2022_CDS_237.pdf)>. Acesso em: 07 mai. 2023.

VIDAL, F. **Produção e mercado de etanol**. Caderno Setorial ETENE. Ano 5, n° 121. Julho, 2020. Disponível em: <[https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/906/1/2021\\_CDS\\_159.pdf](https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/906/1/2021_CDS_159.pdf)>. Acesso em: 07 mai. 2023.