



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA – DECON
CURSO DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS

ALYSSON JOHNNY LIMA SILVA FERREIRA

ECONOMIA CIRCULAR: UM MODELO AUTOSSUSTENTÁVEL DE USINA DE
ETANOL DE MILHO INTEGRADO AO CONFINAMENTO DE GADO

RECIFE
2026

ALYSSON JOHNNY LIMA SILVA FERREIRA

**ECONOMIA CIRCULAR: UM MODELO AUTOSSUSTENTÁVEL DE USINA DE
ETANOL DE MILHO INTEGRADO AO CONFINAMENTO DE GADO**

Monografia apresentada ao Curso de Ciências Econômicas da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas.

Orientadora: Profa. Dra. Isabel Cristina Pereira de Oliveira.

RECIFE

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Suely Manzi – CRB-4 809

F383e Ferreira, Alysson Johnny Lima Silva.
Economia circular: um modelo autossustentável de usina de etanol de milho integrada ao confinamento de gado / Alysson Johnny Lima Silva Ferreira. – Recife, 2026.
80 f.; il.

Orientador(a): Isabel Cristina Pereira de Oliveira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Ciências Econômicas, Recife, BR-PE, 2026.

Inclui referências e anexo(s).

1. Economia circular. 2. Etanol. 3. Milho. 4. Biocombustíveis 5. Economia - Estudo e ensino. I. Oliveira, Isabel Cristina Pereira de, orient. II. Título

CDD 330

ALYSSON JOHNNY LIMA SILVA FERREIRA

**ECONOMIA CIRCULAR: UM MODELO AUTOSSUSTENTÁVEL DE USINA DE
ETANOL DE MILHO INTEGRADO AO CONFINAMENTO DE GADO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Bacharelado em
Ciências Econômicas da Universidade
Federal Rural de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Economia.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Isabel Cristina Pereira de Oliveira (Orientadora)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profa. Dra. Ana Cristina Guimarães Carneiro (Examinadora Interna)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profa. Dra. Camila Maria Pernambuco Peixoto da Silva (Examinadora Interna)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

“A preservação de uma economia funcional é uma condição para a sobrevivência da civilização. O homem não pode se dar ao luxo de desperdiçar os recursos que garantem sua subsistência.”

Ludwig von Mises

RESUMO

A crescente demanda por fontes de energia renováveis e por modelos produtivos mais sustentáveis tem impulsionado a adoção dos princípios da economia circular em diversos setores da economia. Nesse contexto, o presente trabalho analisa a aplicação desses princípios na cadeia agroindustrial do etanol de milho, destacando seu potencial para promover ganhos econômicos, ambientais e operacionais. A pesquisa aborda a evolução da produção de etanol de milho no Brasil, seus diferenciais em relação ao etanol de cana-de-açúcar e o aproveitamento de coprodutos como DDG (*Dried Distillers Grains*), óleo de milho e biogás, elementos que ampliam a geração de valor e reduzem desperdícios ao longo do processo produtivo. Também são analisados aspectos relacionados à competitividade do setor, incluindo produtividade agrícola, custos de produção, flexibilidade logística e oportunidades de expansão da atividade. Os resultados observados indicam que a integração entre produção de biocombustíveis, aproveitamento de resíduos e geração de coprodutos contribui para a formação de um modelo produtivo alinhado aos fundamentos da economia circular, fortalecendo a sustentabilidade e a competitividade da agroindústria. Conclui-se que o etanol de milho apresenta potencial para ampliar sua participação na matriz energética nacional, especialmente quando associado a estratégias de inovação, eficiência operacional e valorização integral dos recursos utilizados. Metodologicamente, a pesquisa utiliza modelagem econômico-financeira em planilha estruturada, com projeção de receitas, custos, investimentos, tributação e indicadores de viabilidade, como VPL, TIR, ROI, payback e análise de sensibilidade.

Palavras-chave: Economia circular. Etanol de milho. Biocombustíveis.

ABSTRACT

The growing demand for renewable energy sources and more sustainable production models has driven the adoption of circular economy principles across different sectors of the economy. In this context, this study analyzes the application of these principles in the corn ethanol agro-industrial chain, highlighting its potential to promote economic, environmental, and operational benefits. The research examines the development of corn ethanol production in Brazil, its advantages compared to sugarcane ethanol, and the utilization of co-products such as DDG (Dried Distillers Grains), corn oil, and biogas, which increase value creation and reduce waste throughout the production process. The study also addresses factors related to sector competitiveness, including agricultural productivity, production costs, logistical flexibility, and opportunities for expansion. The results indicate that the integration of biofuel production, waste utilization, and co-product generation contributes to the establishment of a production model aligned with the principles of the circular economy, strengthening both sustainability and competitiveness in the agro-industrial sector. It is concluded that corn ethanol has significant potential to increase its participation in the Brazilian energy matrix, particularly when associated with innovation strategies, operational efficiency, and the full utilization of available resources. Methodologically, the study employs an economic and financial modeling approach using a structured spreadsheet, including projections of revenues, costs, investments, taxation, and feasibility indicators such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Return on Investment (ROI), Payback Period, and Sensitivity Analysis.

Keywords: Circular economy. Corn ethanol. Biofuels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema linear e economia circular

Figura 2 – Modelo de economia circular: princípios operacionais e básicos

Figura 3 – Potencial ganha-ganha da economia circular nas três dimensões do desenvolvimento sustentável

Figura 4 – Rendimentos por bushel de milho

Figura 5 – Análise SWOT do modelo integrado proposto

Figura 6 – Matriz de correlação entre os pilares de sustentabilidade e os ODS

Figura 7 – Demanda de milho e etanol no Brasil

Figura 8 – Produção nacional de etanol de milho

Figura 9 – Engenharia do projeto: usina integrada

Figura 10 – Transformação do milho

Figura 11 – Componentes da usina de biogás

Figura 12 – Modelo de biodigestor para geração de energia a biogás

Figura 13 – Curral de engorda semicoberto

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 1 – Receitas da planta representativa de Iowa, EUA

Tabela 1 – Premissas técnicas e de mercado (síntese)

Tabela 2 – Tributos sobre vendas por atividade (Lucro Presumido)

Tabela 3 – Balanço de produção e destinação dos coprodutos

Tabela 4 – Composição da receita bruta anual

Tabela 5 – Investimento total do projeto

Tabela 6 – Custos e despesas operacionais anuais

Tabela 7 – Demonstração do Resultado do Exercício (anual)

Tabela 8 – Intensidade de carbono e crédito (síntese)

Tabela 9 – Indicadores de retorno e criação de valor

Tabela 10 – Fluxo de caixa projetado e descontado (dez anos)

Tabela 11 – Sensibilidade do lucro líquido ao preço do álcool

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BNB	Banco do Nordeste do Brasil
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CA-GREET	California Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation
CAGR	Compound Annual Growth Rate (taxa de crescimento anual composta)
CAPEX	Capital Expenditure (dispêndio de capital)
CAPM	Capital Asset Pricing Model (modelo de precificação de ativos financeiros)
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CI	Carbon Intensity (intensidade de carbono)
CNA	Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CSLL	Contribuição Social sobre o Lucro Líquido
DDG	Dried Distillers Grains with Solubles (grãos secos de destilaria com solúveis)
DRE	Demonstração do Resultado do Exercício
EMF	Ellen MacArthur Foundation
ENA	Extra Neutral Alcohol (álcool extra neutro)
ESG	Environmental, Social and Governance
EUDR	European Union Deforestation Regulation (Regulamento Antidesmatamento da União Europeia)
EVA	Economic Value Added (valor econômico agregado)
FNE	Fundo Constitucional de Financiamento do Nordeste
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IL	Índice de Lucratividade
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
IRPJ	Imposto de Renda da Pessoa Jurídica
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OPEX	Operational Expenditure (despesa operacional)
PIS	Programa de Integração Social
ROA	Return on Assets (retorno sobre os ativos)
ROE	Return on Equity (retorno sobre o capital próprio)
ROI	Return on Investment (retorno sobre o investimento)
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade

UNEM União Nacional do Etanol de Milho

UNICA União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia

VPL Valor Presente Líquido

WACC Weighted Average Cost of Capital (custo médio ponderado de capital)

WDG Wet Distillers Grains (grãos úmidos de destilaria)

Sumário

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1 Do modelo linear ao modelo circular	16
2.2 Rentabilidade nos modelos de economia circular.....	22
2.3 Análise econômica e implicações para a competitividade	23
3 METODOLOGIA	26
3.1 Classificação da pesquisa	26
3.2 Instrumentos de análise estratégica e de sustentabilidade (SWOT e ESG)	27
3.2.1 Análise SWOT	27
3.2.2 Práticas ESG.....	28
3.3 Procedimentos de modelagem econômico-financeira	31
3.4 Indicadores de viabilidade e análise de resultados	32
4 PROPOSIÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA DA ECONOMIA CIRCULAR.....	35
4.1 Mercado	35
4.1.1 Mercado de álcool neutro	36
4.1.2 Demanda	37
4.1.3 Oferta.....	38
4.2 Aspectos econômicos: usina de etanol de milho	39
4.2.1 Diferenciais de cultivo e vantagem comparativa.....	40
4.2.2 Coprodutos e engenharia do projeto	41
4.2.3 Da plantação de milho ao álcool de cereais hidratado	42
4.2.4 Geração de biogás a partir de resíduos	43
4.2.5 Produção de ração animal e integração com o confinamento de gado	45
4.2.6 Financiamento subsidiado	45
4.2.6.1 Cooperativas de crédito	46

4.2.6.2 Oportunidades e linhas de crédito do Banco do Nordeste	47
5 PROJETO ECONÔMICO: ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MODELO	
CIRCULAR.....	49
5.1 Estrutura do modelo e articulação com a metodologia	49
5.2 Premissas técnicas, de mercado e tributárias	49
5.3 Produção e destinação dos coprodutos: a circularidade quantificada ...	50
5.4 Receitas operacionais	51
5.5 Investimentos (CAPEX)	52
5.6 Custos e despesas operacionais (OPEX)	52
5.7 Demonstração do Resultado do Exercício e tributação	52
5.8 Intensidade de carbono e crédito de carbono	53
5.9 Indicadores de viabilidade	54
5.10 Análise de sensibilidade ao preço do álcool	55
5.11 Cruzamento com a revisão de literatura e a proposição Error! Bookmark not defined.	
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
REFERÊNCIAS.....	58
ANEXOS	64

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções mais sustentáveis e eficientes na produção industrial tem revelado os limites dos modelos lineares de produção, caracterizados pelo ciclo de extrair, produzir e descartar. Nesse contexto, este trabalho investiga a viabilidade e os benefícios da transição para um modelo de economia circular aplicado à produção de etanol de milho, em integração com o confinamento de gado, de modo a otimizar o uso de recursos e reduzir o impacto ambiental.

A premissa central é que um sistema produtivo integrado, baseado nos princípios da economia circular, pode maximizar o aproveitamento de matérias-primas e coprodutos, reduzindo o desperdício e gerando ganhos de natureza econômica e ambiental.

Sob essa perspectiva, o modelo proposto alinha-se às atuais estratégias globais voltadas à descarbonização e ao fortalecimento da bioeconomia, em consonância com compromissos internacionais como o Acordo de Paris (2015), que estabelece metas de mitigação das emissões de gases de efeito estufa, e o Pacto Verde Europeu (*European Green Deal*), que visa à neutralidade climática até 2050 e promove a economia circular como eixo de competitividade.

A aplicação prática desses princípios pode ser observada na integração entre a produção de etanol de milho e o confinamento de gado. Ao promover o uso integral dos recursos, reduzir perdas e transformar resíduos em insumos valiosos, esse modelo contribui para a segurança alimentar global, para o atendimento a mercados internacionais cada vez mais exigentes e para a consolidação de uma transição energética justa e sustentável no Brasil.

Historicamente, o estado de Pernambuco destaca-se como um dos principais polos produtores de cana-de-açúcar no Brasil, com uma estrutura produtiva tradicionalmente voltada à fabricação de açúcar e etanol a partir dessa matéria-prima. Nos últimos anos, contudo, observa-se o avanço do etanol de milho como alternativa cada vez mais competitiva em relação ao etanol de cana-de-açúcar, principalmente em razão de suas vantagens operacionais e econômicas, estudada pela Embrapa e apresentada na seção 4.2.1 Diferenciais de cultivo e vantagem comparativa.

Segundo a Embrapa (2021), o cultivo do milho ocorre em duas épocas distintas no Brasil: a primeira safra, realizada no período chuvoso, entre os meses de agosto e

novembro, e a segunda safra, conhecida como safrinha, desenvolvida geralmente entre fevereiro e março. Além da flexibilidade de cultivo, o milho apresenta vantagens relevantes na produção de etanol, como maior facilidade de armazenamento, menor perecibilidade e menores custos industriais, diferenciais detalhados na seção 4.2.1.

Um dos diferenciais desse modelo reside no aproveitamento de seus coprodutos, especialmente o resíduo do processamento do milho, amplamente utilizado na formulação de ração animal. Esse fator reforça a integração entre as cadeias agroindustriais e contribui para maior eficiência no uso de recursos e para a agregação de valor ao sistema produtivo.

O problema central abordado neste estudo refere-se ao uso ineficiente de recursos no modelo produtivo linear, sobretudo no contexto da produção de etanol de milho, em que o potencial de aproveitamento de coprodutos ainda não é plenamente explorado. Entre esses coprodutos, destaca-se o DDG (*Dried Distillers Grains with Solubles*), ou grãos secos de destilaria com solúveis, cuja utilização amplia-se como forma de agregar valor ao processo produtivo.

Nesse sentido, propõe-se o desenvolvimento de um modelo empresarial orientado à maximização de receitas, fundamentado na integração produtiva e tecnológica e no melhor aproveitamento dos recursos disponíveis. Trata-se de uma abordagem alinhada a um setor estratégico para a economia, marcado pela oferta de um bem de demanda relativamente inelástica, e que busca incorporar eficiência e autossustentação energética, de insumos e de fertilizantes.

Diante desse contexto, formula-se a seguinte pergunta de pesquisa: de que forma os princípios da economia circular podem contribuir para a maximização de receitas e o aumento da eficiência produtiva no setor de etanol de milho?

Parte-se da hipótese de que a adoção de um modelo produtivo integrado, fundamentado nos princípios da economia circular, permite otimizar o uso de recursos, reduzir desperdícios e ampliar as fontes de receita a partir do aproveitamento de coprodutos como o DDG, configurando uma alternativa capaz de agregar valor à cadeia produtiva. Como resultado, espera-se que essa abordagem contribua para o aumento da eficiência econômica, para a competitividade das usinas, mediante a geração de novas fontes de receita e a redução de custos, e para o fortalecimento da sustentabilidade no setor de biocombustíveis, especialmente na produção de etanol de milho.

Este trabalho tem como **objetivo geral** propor um modelo de produção agroindustrial integrado, baseado na economia circular, para a produção de etanol de milho.

Para isso, estabelecem-se os seguintes **objetivos específicos**:

- a) investigar as etapas de transformação do milho, identificando oportunidades para o reaproveitamento de coprodutos e resíduos;
- b) avaliar o impacto econômico da implementação de práticas circulares na produção de etanol e ração animal;
- c) analisar a competitividade do modelo circular em relação às práticas tradicionais nos mercados de biocombustíveis e de ração animal.

A realização deste estudo mostra-se relevante diante da necessidade de avançar no entendimento de modelos produtivos mais eficientes e sustentáveis no setor de biocombustíveis, especialmente em um cenário marcado pela crescente preocupação com a redução de emissões e o uso mais racional dos recursos.

No campo acadêmico, a pesquisa contribui ao explorar a aplicação prática dos princípios da economia circular em sistemas agroindustriais integrados, tema ainda pouco desenvolvido sob essa perspectiva. Do ponto de vista econômico e profissional, o trabalho pode oferecer evidências para a identificação de estratégias que ampliem a competitividade das usinas, ao mesmo tempo em que favorecem ganhos ambientais e maior eficiência no aproveitamento de coprodutos.

Em um cenário internacional cada vez mais instável, eventos geopolíticos têm demonstrado forte capacidade de impactar simultaneamente os mercados de energia, logística e insumos agrícolas. Um exemplo recente foi o fechamento do Estreito de Ormuz, em 2026, uma das principais rotas marítimas do mundo, responsável pelo escoamento de aproximadamente um quarto do petróleo global. Segundo InfoMoney, a interrupção da navegação na região, decorrente de conflitos envolvendo grandes potências militares, provocou um choque imediato de oferta e elevou significativamente os preços do petróleo no mercado internacional.

Esse aumento não se restringe ao setor energético, pois afeta toda a estrutura produtiva global. A elevação do preço do petróleo amplia o custo dos combustíveis, em especial do diesel, essencial para o transporte de mercadorias, insumos agrícolas e biocombustíveis. A mesma rota marítima é estratégica para o escoamento de fertilizantes, como ureia, amônia e enxofre, fundamentais para a produção agrícola. A interrupção desse fluxo logístico gera aumento nos custos de produção, atrasos no

abastecimento e pressões inflacionárias, afetando diretamente economias dependentes de importação, como a brasileira.

No caso específico do setor de etanol de milho, os efeitos desse tipo de crise manifestam-se de forma encadeada. Por um lado, o aumento do preço do petróleo tende a elevar a competitividade do etanol frente à gasolina, favorecendo a demanda por biocombustíveis. Por outro, a elevação dos custos dos fertilizantes pressiona o custo de produção do milho, com impacto direto sobre a viabilidade econômica do etanol. Dessa maneira, o setor passa a enfrentar um cenário de simultânea oportunidade e risco, que exige soluções capazes de aumentar sua eficiência e resiliência. Quanto à sua organização, este trabalho estrutura-se em cinco capítulos. O primeiro corresponde a esta introdução, que apresenta o tema, o problema, a hipótese e os objetivos. O segundo capítulo dedica-se à revisão da literatura. O terceiro descreve a metodologia adotada. O quarto desenvolve a proposição teórico-metodológica da economia circular aplicada ao modelo de usina integrada. O quinto, trás os cálculos do modelo e por fim, o sexto reúne as considerações finais.

2 REVISÃO DA LITERATURA

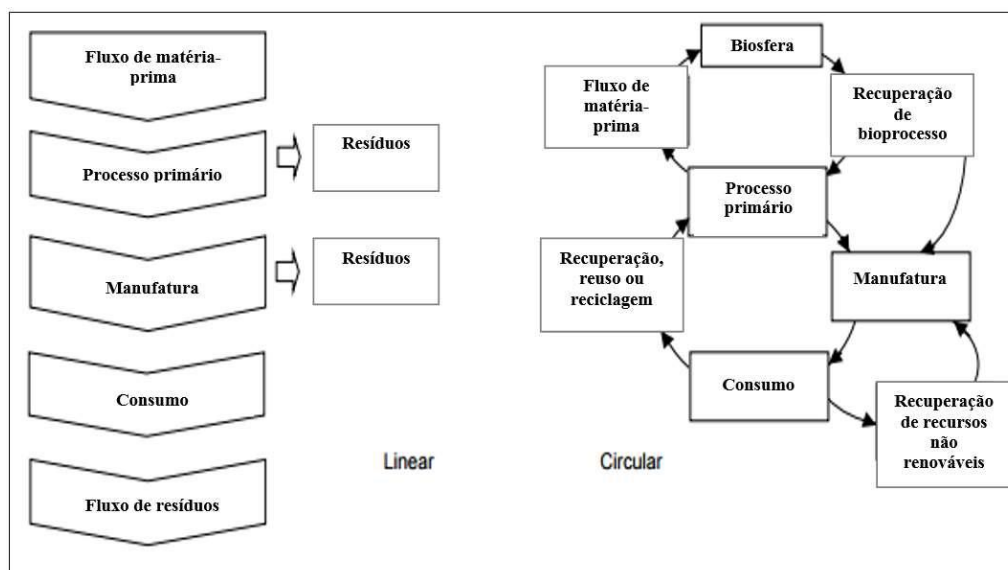
Esta seção apresenta os principais estudos e conceitos utilizados como base para o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, são abordadas discussões sobre a economia circular em diferentes contextos, incluindo análises comparativas entre Brasil e Europa, além de experiências já consolidadas em setores industriais. Em seguida, exploram-se aplicações práticas voltadas ao aproveitamento de resíduos e à integração produtiva, com destaque para iniciativas que buscam gerar valor a partir de coprodutos agroindustriais. Por fim, discutem-se aspectos relacionados à produção de etanol, com ênfase na estrutura de custos, nas fontes de receita e no papel dos coprodutos na formação de resultados econômicos, sobretudo no cenário internacional.

O relatório *Os limites do crescimento*, publicado em 1972, tem como tópico principal alertar sobre a exploração dos recursos naturais, a autodestruição e suas consequências. Esse tema foi amplamente debatido na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, realizada em Estocolmo, na Suécia, no mesmo ano. A ideia central é controlar grandes emissores de dióxido de carbono (CO₂), principal gás responsável pelo efeito estufa (Nações Unidas, 2015).

2.1 Do modelo linear ao modelo circular

O modelo de economia circular baseia-se em sistemas vivos, dinâmicos e adaptáveis, que reorganizam a relação entre desperdício e recursos e oferecem uma descrição de como o sistema deve funcionar, na forma de um guia para a criação de valor (EMF, 2013). Esse funcionamento ocorre por meio do gerenciamento de recursos renováveis e finitos e da divisão do sistema em dois ciclos, o técnico e o biológico, de modo a administrar e mitigar as externalidades decorrentes do sistema. A economia linear, por sua vez, contribui para a degradação ambiental, incluindo poluição, esgotamento de recursos naturais e mudanças climáticas. Os fluxos de processo distintos entre os dois modelos são apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Sistema linear e economia circular



Fonte: Burchart-Korol, Czaplicka-Kolarz e Kruczek (2015).

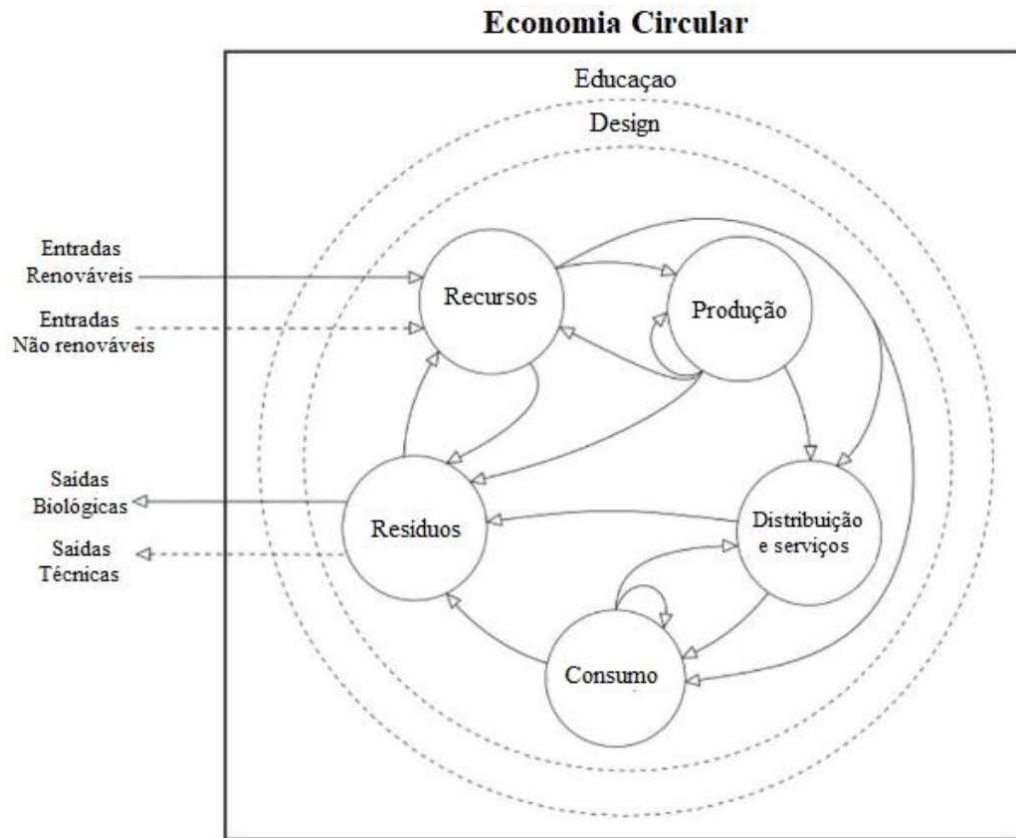
Este estudo responde à necessidade urgente de repensar os processos produtivos na agroindústria, visando não apenas à sustentabilidade ambiental, mas também à viabilidade econômica.

Segundo a Ellen MacArthur Foundation (2012), a economia circular constitui uma alternativa ao modelo linear tradicional ao priorizar a manutenção do valor de materiais, componentes e produtos ao longo do tempo, com ênfase em restauração, reaproveitamento e eliminação de desperdícios.

A partir dessa perspectiva, observa-se que os princípios da economia circular podem ser aplicados de forma prática na agroindústria. O uso integral do milho para a produção de etanol, alimentação animal e geração de energia é exemplar, pois demonstra como esses princípios podem ser aplicados de forma prática e escalável. Ao integrar esses processos, o modelo proposto maximiza o aproveitamento da matéria-prima e reduz significativamente os resíduos, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais.

A crescente demanda por produtos, acompanhada do aumento populacional, impulsionou o desenvolvimento da indústria manufatureira, mas também trouxe significativos impactos ambientais. O modelo linear opera sob a suposição de que os recursos naturais são ilimitados e de que o meio ambiente possui capacidade infinita de absorver resíduos e poluição, conforme representado na Figura 2.

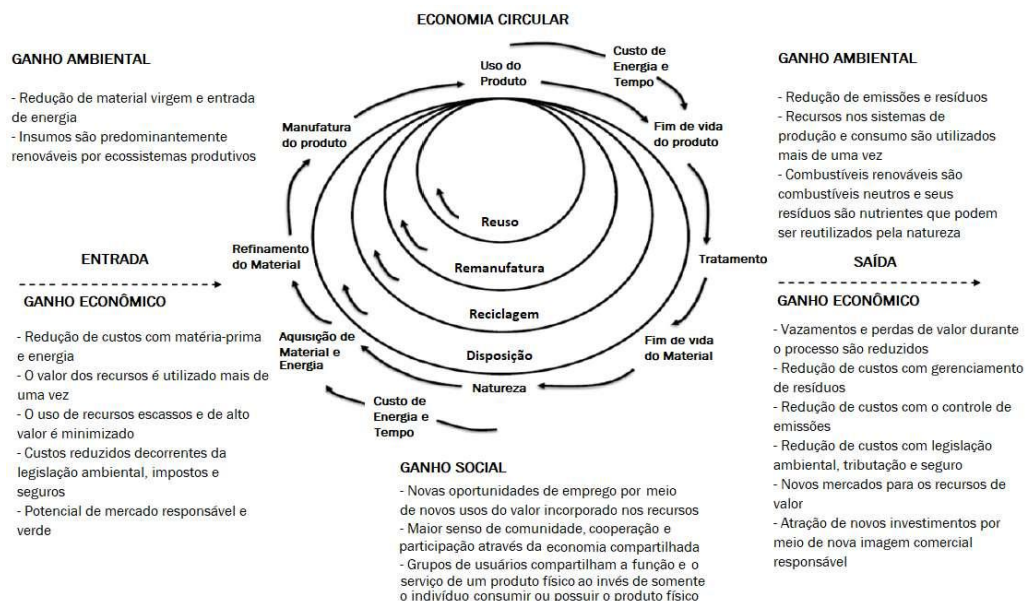
Figura 2 – Modelo de economia circular: princípios operacionais e princípios básicos



Fonte: Suárez-Eiroa et al. (2019, p. 959).

Já Korhonen, Honkasalo e Seppälä (2018) defendem que a economia circular deve ser analisada à luz das três dimensões do desenvolvimento sustentável e alertam que sua aplicação tenha rigor conceitual e científico, sobretudo quanto aos limites ambientais do sistema, conforme demonstrado na Figura 3.

Figura 3 – Potencial ganha-ganha da economia circular nas três dimensões do desenvolvimento sustentável



Fonte: Korhonen, Honkasalo e Seppälä (2018).

A aplicação do princípio de reutilização de coprodutos, conforme Korhonen *et al* (2018), orienta a configuração do modelo de integração lavoura-pecuária-biocombustível proposto neste estudo.

A economia circular surge como uma alternativa viável e sustentável que busca maximizar o aproveitamento dos recursos naturais e minimizar os impactos ambientais. Ela caracteriza-se por um sistema industrial regenerativo por concepção (*design*), no qual os fluxos de materiais e energia são aproveitados ao máximo e o conceito de fim de vida de um produto é substituído pela restauração e pela reutilização. Essa abordagem promove a resiliência, a diversidade e a utilização de energias renováveis. A operacionalização da gestão de fluxos renováveis desse sistema foi estudada no trabalho sobre *Aplicação dos princípios da economia circular em uma indústria de veículos comerciais*, de Barderi (2017).

Esse modelo tem como premissa o desenvolvimento de uma economia restaurativa e regenerativa, capaz de manter materiais, componentes e produtos em alto nível de utilidade e valor em toda a sua cadeia (EMF, 2012).

A produção de etanol de milho no Brasil vem ganhando relevância. Segundo Silva *et al* (2020), no artigo *Aspectos técnicos e econômicos da produção de etanol de milho no Brasil*, publicado na Revista de Política Agrícola da Embrapa, o crescimento do setor deu-se especialmente em razão de sua integração com as usinas de cana-de-açúcar, criando um modelo *flex* que permite maior eficiência e redução da sazonalidade na produção de etanol. A viabilidade econômica desse modelo é fortemente influenciada pela disponibilidade de milho a preços competitivos, pela integração produtiva entre cana e milho e pela comercialização dos coprodutos, como o DDG e o óleo de milho. Esses fatores aumentam a rentabilidade das usinas e oferecem alternativa viável para enfrentar os desafios do setor sucroenergético brasileiro.

O estudo *A economia circular e o cenário no Brasil e na Europa*, de Nery e Freire (2017), destaca as vantagens e os desafios da implementação da economia circular no Brasil e na Europa, ressaltando a importância da legislação e da logística reversa. Esse estudo pode ser diretamente associado ao plano da União Europeia para alcançar uma economia circular até 2050, que visa à transição para uma economia sustentável, com redução de resíduos, maximização do uso de recursos e reciclagem intensiva (Parlamento Europeu, 2021).

O plano da União Europeia enfatiza a necessidade de manter produtos e materiais em uso por mais tempo, gerando menos resíduos e novas oportunidades de negócio. A estratégia europeia alinha-se à visão dos autores sobre o papel central da logística reversa e do ecodesign, que estão entre os pilares do novo plano de ação europeu para a economia circular. A União Europeia planeja adotar leis mais rígidas e impulsionar a responsabilidade dos produtores, além de promover maior conscientização pública, desafio que Nery e Freire (2017) também identificam no contexto brasileiro.

Ambos os cenários apontam para a necessidade de conscientização e de uma infraestrutura adequada para lidar com resíduos. Enquanto o Brasil ainda enfrenta dificuldades culturais e legislativas, a União Europeia já estabeleceu metas claras para a transição à economia circular, prevendo o aumento da reutilização e da reciclagem de resíduos urbanos para 65% até 2035, além da redução progressiva da destinação de resíduos a aterros sanitários para, no máximo, 10% do total produzido (Consilium, 2024). Diferentemente da União Europeia, onde há metas claras e mecanismos rigorosos, o governo brasileiro não estabeleceu objetivos específicos ou prazos concretos para a transição à economia circular, o que prejudica o avanço das práticas sustentáveis no país.

O conceito de economia circular surge como resposta necessária a essa problemática, ao promover a utilização eficiente e integral dos recursos, em que os resíduos de um processo se tornam insumos para outro.

No artigo *“Impulsionando a implementação sistemática da economia circular na indústria brasileira: cases de sucesso na indústria química”*, de Brito e Rodrigues (2023), a hipótese central propõe que a adoção de práticas de economia circular na indústria química brasileira pode impulsionar não apenas ganhos econômicos, mas também avanços significativos no desenvolvimento sustentável. A principal questão investigada é como as empresas brasileiras estão implementando essas práticas e quais são os impactos resultantes nos contextos econômico e social.

A metodologia empregada nesse estudo baseia-se em estudos de caso de grandes empresas petroquímicas, como Braskem e Unigel, que têm liderado iniciativas voltadas à economia circular no Brasil. A Braskem destacou-se com projetos como a reciclagem mecânica e avançada de plásticos e a produção de biopolímeros a partir do etanol da cana-de-açúcar, como o polietileno verde. Essas iniciativas geraram novos negócios, a exemplo da criação de um laboratório de

desenvolvimento de embalagens para a economia circular, que estimula inovações em *design* de embalagens sustentáveis e colabora com *startups* e universidades para promover a circularidade de produtos. A Unigel, por sua vez, investiu em reciclagem química e reutilização de resíduos industriais, além de desenvolver produtos feitos com poliestireno reciclado, promovendo a logística reversa e a sustentabilidade na cadeia produtiva.

Os resultados evidenciam que a economia circular, ao integrar processos de reciclagem, reutilização e produção de matérias-primas renováveis, reduz custos, minimiza o uso de recursos naturais e estimula a criação de novos modelos de negócio. Além disso, gera impacto social significativo, como em programas de inclusão social e desenvolvimento socioeconômico de trabalhadores da reciclagem.

No artigo “*Bioeconomia, economia circular e agroindústria 4.0: proposições para as transições tecnológicas emergentes*”, Bastos *et al* (2022) alinham essas três abordagens e suas implicações tecnológicas. A hipótese central questiona o quanto as proposições tecnológicas da bioeconomia, da economia circular e da agroindústria 4.0 estão alinhadas para promover um desenvolvimento sustentável focado no sequestro de carbono.

O destaque para a integração tecnológica é promovido pela agroindústria 4.0, que otimiza a gestão de cadeias produtivas por meio de tecnologias como a internet das coisas e o *big data*, voltadas ao rastreamento e à automação. As políticas públicas são cruciais para fomentar essa integração, ao promover a inovação tecnológica e o uso de bioprodutos que reduzem as emissões de gases de efeito estufa e contribuem para a mitigação das mudanças climáticas.

No artigo “*A utilização de resíduos da uva no desenvolvimento de novos produtos, no contexto da economia circular*”, Vieira Filho, Queiroz e Lima (2023) investigam como os resíduos gerados no processamento da uva podem ser utilizados na criação de novos alimentos.

A pesquisa, de natureza qualitativa e bibliográfica, utilizou artigos disponíveis em bases acadêmicas para identificar oportunidades de valorização dos resíduos da uva, que representam fonte rica de compostos bioativos com propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e anticancerígenas, encontrados principalmente nas cascas e sementes.

Os resultados destacam que esses resíduos, que constituem cerca de 210 mil toneladas anuais, são promissores para o desenvolvimento de novos produtos de alto

valor agregado, como biscoitos de farinha de uva e óleo extraído das sementes. A farinha de uva, rica em antioxidantes e fibras, foi utilizada na fabricação de *cookies*, com estudos de aceitação que mostraram boa receptividade ao produto. O óleo de semente de uva, rico em ácido linoleico, demonstrou benefícios para a saúde cardiovascular, reduzindo o colesterol e a pressão arterial.

A metodologia envolveu a análise dos resíduos e de suas propriedades funcionais, destacando a relevância da economia circular no reaproveitamento desses coprodutos. Foram conduzidos estudos de aceitação sensorial para avaliar a viabilidade de mercado dos novos produtos, demonstrando que a aplicação de resíduos da uva em alimentos é uma estratégia viável e sustentável para agregar valor e minimizar desperdícios.

2.2 Rentabilidade nos modelos de economia circular

O estudo da rentabilidade da produção de etanol nos Estados Unidos, com base nos dados de Irwin (2024, 2025), no relatório sobre lucros da produção de etanol em 2023 (*Another Strong Year for Ethanol Production Profits in 2023*), concentra-se em custos, preços e rentabilidade. O modelo de rastreamento de rentabilidade do etanol de Hofstrand (2023), disponibilizado pelo *Ag Decision Maker da Iowa State University*, serve de base para cálculos de plantas representativas em Iowa, incluindo dados de custos e receitas. O relatório de índice de preços e previsões para o etanol do IMARC Group (2025) fornece dados regionais de preços, fatores de influência e projeções de mercado. O foco recai sobre a rentabilidade da produção de etanol, os custos de insumos, como milho e gás natural, os preços dos produtos, como etanol, DDG e óleo de milho, e os impactos econômicos mais amplos sobre a agricultura.

Nos Estados Unidos, maior produtor mundial de etanol de milho, usinas do Meio-Oeste, como as de Iowa, exemplificam a aplicação desses princípios. A indústria de etanol norte-americana consome cerca de 40% da safra de milho, gerando impactos significativos na agricultura. Para o período projetado, segundo o IMARC Group (2025), o mercado global de etanol deve crescer a uma taxa composta anual (CAGR) de 4,47%, atingindo US\$ 158,5 bilhões até 2033, impulsionado por mandatos de mistura de combustíveis renováveis e pela redução de emissões.

O aproveitamento integral dos coprodutos, como o DDG na alimentação de gado em confinamento, insere a usina em um ciclo produtivo de economia circular,

reduzindo perdas e transformando resíduos em fontes adicionais de receita. Os rendimentos por *bushel* de milho são apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Rendimentos por ***bushel*** de milho

PRODUÇÃO DE ETANOL DE MILHO DRY-MILL Rendimento por bushel processado ($\approx 25,4$ kg)	
 Etanol	2,8 galões ($\approx 10,6$ L)
 Grãos de destilaria (DDG)	18 libras ($\approx 8,16$ kg)
 Óleo de milho	0,91 libra ($\approx 0,41$ kg)

Fonte: Elaboração própria (2026), com base em Irwin (2024) e Hofstrand (2023).

O consumo energético médio de 34 pés cúbicos ($\approx 0,96$ m³) de gás natural por galão, otimizado por tecnologias de moagem a seco, reforça ganhos de eficiência e competitividade ao reduzir a intensidade energética da produção (Hofstrand, 2023).

2.3 Análise econômica e implicações para a competitividade

O desempenho econômico do setor de etanol em 2023, conforme o modelo de planta representativa em Iowa (Irwin, 2024), foi expressivo, com receitas totais estimadas em US\$ 336,87 milhões, quase o dobro dos US\$ 184,63 milhões projetados para o primeiro ano de operação (IMARC Group, 2025). Esse desempenho foi sustentado por três fluxos principais de receita: etanol (cerca de US\$ 240 milhões), DDG (cerca de US\$ 77,15 milhões) e óleo de milho (cerca de US\$ 19,72 milhões), com valor agregado total de US\$ 7,86 por *bushel*.

A estrutura de custos, estimada em US\$ 3,16 por galão, é fortemente influenciada pelo preço do milho, que responde por aproximadamente 62% do total, seguido pelo custo do gás natural e por despesas fixas e variáveis menores. A margem líquida média de US\$ 0,29 por galão, equivalente a US\$ 34,8 milhões, sugere resiliência operacional mesmo diante da volatilidade nos preços de *commodities*,

ainda que o custo dependa de múltiplos fatores além do preço do milho. Essa resiliência alinha-se aos princípios da economia circular, pois a diversificação das fontes de receita, por meio de coprodutos de alto valor, atua como amortecedor contra oscilações no mercado do etanol.

A partir dessas evidências, observa-se que a integração de uma usina de etanol a um sistema circular, com aproveitamento de DDG e óleo de milho, não apenas melhora o desempenho ambiental, mas também cria um amortecimento financeiro contra crises de preços. Esse arranjo reduz a vulnerabilidade às flutuações do mercado de combustíveis e aumenta a previsibilidade de caixa, elemento fundamental para atrair financiamento e manter a sustentabilidade de longo prazo.

A literatura consultada indica que, embora o mercado de etanol esteja sujeito a ciclos de expansão e contração, plantas que adotam práticas de economia circular e otimizam seus custos energéticos têm maior capacidade de se manter lucrativas em diferentes fases do ciclo econômico. No contexto brasileiro, em que as políticas públicas e a demanda interna por biocombustíveis podem variar, essa abordagem oferece diferencial competitivo e estratégico para a consolidação do setor. Nesse cenário, destaca-se a importância da diversificação das fontes de receita nas usinas de etanol de milho, especialmente por meio do aproveitamento de coprodutos industriais, que contribuem para a redução de custos e a ampliação da rentabilidade operacional. O Quadro 1 apresenta as principais receitas geradas em uma planta de etanol localizada em Iowa, nos Estados Unidos, evidenciando os impactos econômicos e competitivos associados à produção de etanol, DDG, óleo de milho e biogás.

Quadro 1 – Receitas da planta representativa de Iowa, EUA

Insumo	Produção	Preço médio 2023	Impacto na competitividade
Etanol	2,8 galões/bushel (≈ 10,6 L)	US\$ 2,00/galão	Receita principal (≈ US\$ 240 mi/ano)
DDG	18 lb/bushel (≈ 8,16 kg)	US\$ 200/t	Diversificação e valorização de coprodutos
Óleo de milho	0,91 lb/bushel (≈ 0,41 kg)	US\$ 0,50/lb	Resíduos transformados em insumos industriais
Biogás	34 pés ³ gás natural/galão	US\$ 0,88/galão	Redução de custo variável

Fonte: Irwin (2024).

Embora a literatura apresente experiências e desafios de integração agroindustrial, persiste a necessidade de uma base conceitual que sustente a modelagem prática do sistema proposto.

A literatura evidencia que a integração de processos produtivos, aliada ao aproveitamento de resíduos e coprodutos, pode gerar ganhos simultâneos em eficiência econômica e desempenho ambiental. Experiências internacionais, especialmente nos Estados Unidos e na União Europeia, demonstram que a valorização de coprodutos e a diversificação das fontes de receita contribuem para maior resiliência frente às oscilações de mercado. Reforça-se, assim, a relevância de modelos que promovam a articulação entre cadeias produtivas, como no caso da produção de etanol de milho integrada ao uso de coprodutos, o que indica um caminho promissor para o fortalecimento da sustentabilidade e da competitividade do setor.

Com base nesse arcabouço teórico, o próximo capítulo apresenta a metodologia adotada para modelar e analisar a viabilidade econômica, ambiental e operacional do sistema proposto.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve a classificação da pesquisa, os procedimentos de modelagem econômico-financeira e os indicadores empregados na avaliação da viabilidade do empreendimento proposto. A construção metodológica retoma os princípios da economia circular discutidos na seção 2.1 e busca operacionalizá-los em um instrumento de análise quantitativa.

3.1 Classificação da pesquisa

Quanto à natureza, esta pesquisa caracteriza-se como aplicada, pois se volta à geração de conhecimento dirigido à solução de um problema concreto, qual seja, avaliar a viabilidade econômico-financeira de um modelo agroindustrial integrado fundamentado nos princípios da economia circular (Gil, 2002; Marconi; Lakatos, 2017).

Quanto aos objetivos, a pesquisa classifica-se como descritiva e exploratória. É descritiva porque caracteriza a estrutura de receitas, custos e investimentos do empreendimento proposto, e é exploratória porque investiga um arranjo produtivo ainda pouco consolidado na região Nordeste, qual seja, a integração entre microdestilaria de etanol de milho, confinamento bovino e geração de biogás (Vergara, 2016).

Quanto à abordagem do problema, predomina o caráter quantitativo, uma vez que a análise se apoia na mensuração de variáveis financeiras e no cálculo de indicadores de desempenho. Esse enfoque é complementado por uma dimensão qualitativa na interpretação dos resultados e na discussão das implicações estratégicas do modelo.

Quanto aos procedimentos técnicos, adota-se demonstrações financeiras de empresas internacionais, operacionalizado por meio da modelagem econômico-financeira de uma microdestilaria de etanol de milho integrada ao confinamento de gado e à geração de biogás. A opção pela pesquisa justifica-se pela necessidade de analisar, em profundidade, um sistema produtivo específico e suas múltiplas inter-relações, em consonância com a proposição teórico-metodológica desenvolvida no capítulo 4.

3.2 Instrumentos de análise estratégica e de sustentabilidade (SWOT e ESG)

A avaliação qualitativa do empreendimento apoia-se em dois instrumentos complementares, aplicados às características do modelo proposto: a análise SWOT e os critérios ESG. Ambos funcionam como lentes de análise cujos resultados são retomados ao longo dos capítulos seguintes.

3.2.1 Análise SWOT

A análise SWOT é uma ferramenta de planejamento estratégico que organiza o diagnóstico em quatro dimensões: forças (*Strengths*) e fraquezas (*Weaknesses*), relativas ao ambiente interno, e oportunidades (*Opportunities*) e ameaças (*Threats*), associadas ao ambiente externo. Sua aplicação permite identificar vantagens competitivas, pontos de melhoria e riscos de mercado, subsidiando a tomada de decisão, conforme sintetizado na Figura 5.

Figura 5 – Análise SWOT do modelo integrado proposto



Fonte: Elaboração própria (2026).

Aplicada ao modelo aqui proposto, a análise SWOT evidencia uma configuração estratégica particular. Entre as forças, destacam-se a autossuficiência energética obtida com o biogás, a diversificação de receitas a partir de coprodutos e

a baixa intensidade de carbono, fatores que reduzem custos e ampliam as margens em relação às plantas convencionais.

As fraquezas, por sua vez, precisam ser explicitadas, por se tratar de um trabalho científico que deve mostrar os dois lados. (i) Alto investimento inicial: o CAPEX estimado em cerca de R\$ 26,5 milhões eleva a barreira de entrada e a exposição ao custo do capital, sobretudo em cenário de Selic elevada. (ii) Dependência do preço do milho: por representar a maior parcela do custo variável e do desembolso de confinamento, oscilações no grão comprimem diretamente a margem, ainda que a circularidade atenuar parte do efeito. (iii) Complexidade operacional e de gestão: integrar destilaria, confinamento e biodigestão exige coordenação técnica de três operações com lógicas distintas, com risco de gargalos logísticos. (iv) Rastreabilidade e certificação: o enquadramento em programas como o RenovaBio e a comprovação de intensidade de carbono são, para o milho e para a pecuária, mais trabalhosos do que para a cana, demandando governança de dados. (v) Escala e curva de aprendizado: como microdestilaria, a planta não captura as economias de escala das grandes biorrefinarias, e o posicionamento em álcool neutro premium pressupõe acesso a canais de venda exigentes. (vi) Sensibilidade a uma receita concentrada: cerca de metade do faturamento depende do preço do álcool, o que amplia a vulnerabilidade a esse mercado específico (ver seção 5.10).

No ambiente externo, as oportunidades decorrem da expansão do mercado de álcool neutro, das exigências ambientais do comércio internacional sobretudo na relação Mercosul-União Europeia, do acesso a créditos de carbono e das linhas de financiamento subsidiado do Banco do Nordeste. As ameaças associam-se à volatilidade dos preços das *commodities*, a choques geopolíticos como o do Estreito de Ormuz e à ausência de metas regulatórias claras para a economia circular no Brasil. O cruzamento desses fatores indica que a circularidade e a diversificação de receitas funcionam como amortecedores da volatilidade, ao passo que as oportunidades de mercado tendem a compensar as fraquezas de capital, desde que viabilizado o financiamento adequado. Essa leitura estratégica orienta a proposição desenvolvida no Capítulo 4.

3.2.2 Práticas ESG

Como segundo instrumento de análise, adotam-se os critérios ESG (*environmental, social and governance*), que avaliam o empreendimento sob os

aspectos ambiental, social e de governança, hoje determinantes de competitividade e de acesso a mercados no agronegócio. A aderência do modelo a esses critérios é examinada a seguir.

A incorporação de práticas ESG, relacionadas aos aspectos ambientais, sociais e de governança, tem ganhado espaço no agronegócio brasileiro, impulsionada principalmente pelas exigências do mercado internacional, especialmente nas relações entre Mercosul e União Europeia. Critérios como ausência de desmatamento, rastreabilidade e redução de impactos ambientais passaram a influenciar diretamente o acesso a mercados e a competitividade dos produtos.

No modelo proposto neste trabalho, baseado em uma usina de etanol de milho integrada ao confinamento bovino e à produção de biogás, essas exigências refletem-se na construção de um sistema produtivo mais eficiente e alinhado às demandas atuais. A origem dos insumos agrícolas, em especial o milho, torna-se fator estratégico. É fundamental garantir que o produto seja proveniente de propriedades ambientalmente regulares, sem desmatamento recente e com documentação em conformidade. A verificação de Áreas de Preservação Permanente e de Reservas Legais contribui para reduzir riscos e fortalecer uma política de compras mais criteriosa, com controle sobre fornecedores e incentivo à regularização.

O manejo do solo também é parte relevante desse processo. Práticas como plantio direto, rotação de culturas e adubação verde ajudam a preservar a fertilidade e a melhorar o balanço de carbono. A integração lavoura-pecuária-floresta pode ampliar a diversidade produtiva e reduzir riscos climáticos. A recuperação de áreas degradadas e a preservação da vegetação nativa permitem, ainda, a inserção em iniciativas ligadas a créditos de carbono e a pagamento por serviços ambientais.

O uso de insumos segue a mesma lógica de eficiência. O manejo integrado de pragas, aliado ao uso de bioinsumos, reduz a dependência de defensivos químicos e contribui para o controle de custos. Tecnologias de aplicação de precisão evitam desperdícios, enquanto avanços em biotecnologia aumentam a resistência das culturas e a estabilidade da produção. Como o milho é o principal insumo do sistema, esses fatores impactam diretamente o desempenho da usina.

A gestão de resíduos fortalece a proposta integrada do modelo. Coprodutos como vinhaça, bagaço e esterco são destinados ao biodigestor, onde são transformados em biogás e biofertilizantes, conforme descrito na seção 4.2.4. O biogás reduz a dependência de fontes fósseis, enquanto o biofertilizante retorna ao

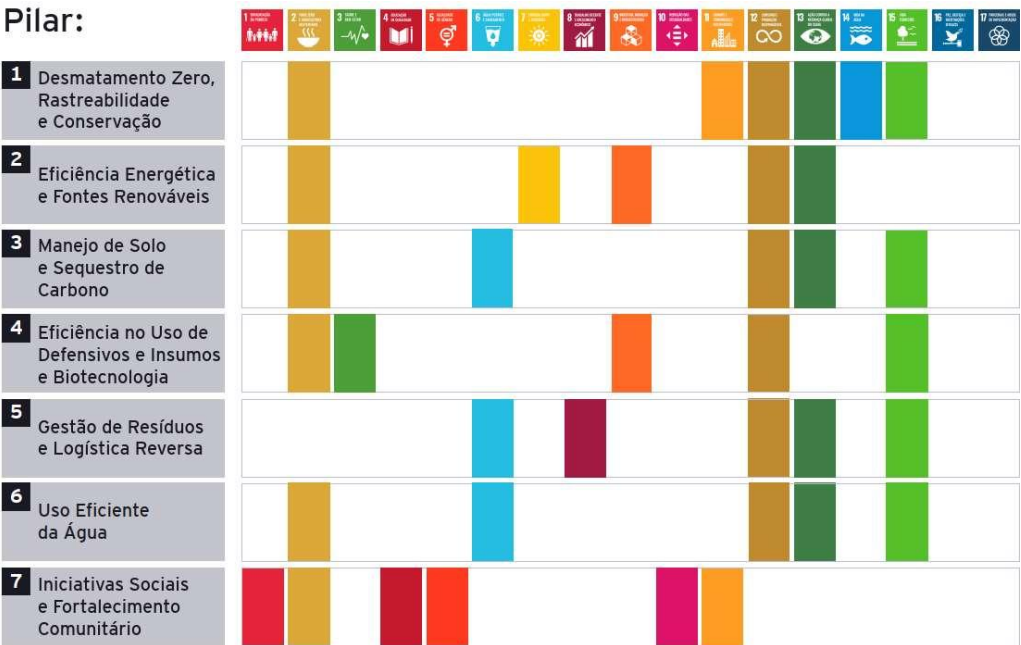
solo, diminuindo a necessidade de fertilizantes industriais. Práticas como compostagem e logística reversa complementam esse ciclo produtivo.

A gestão da água também é um ponto importante. O uso de irrigação controlada, o monitoramento da umidade do solo e o reaproveitamento em processos industriais contribuem para maior eficiência hídrica. Medidas de conservação do solo, como terraceamento e proteção de nascentes, ajudam a manter a disponibilidade de água e a reduzir impactos ambientais.

No aspecto social, a usina pode contribuir para o desenvolvimento regional por meio da capacitação de trabalhadores, do apoio a produtores locais e de ações voltadas à comunidade. O acompanhamento das condições de trabalho e a adoção de práticas de governança reforçam a transparência e a responsabilidade ao longo da cadeia produtiva. A inclusão de pequenos produtores amplia a base de fornecimento e fortalece a economia local.

A combinação entre rastreabilidade, manejo sustentável, uso eficiente de recursos, aproveitamento de resíduos, gestão hídrica e responsabilidade social estrutura um conjunto consistente de práticas ESG aplicado ao modelo proposto. Esses elementos aumentam a competitividade do empreendimento, reduzem riscos e o posicionam de forma mais sólida diante das exigências e mudanças do mercado. A correlação entre os pilares de sustentabilidade e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) é apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Matriz de correlação entre os pilares de sustentabilidade e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)



Fonte: Elaboração própria (2026).

3.3 Procedimentos de modelagem econômico-financeira

A modelagem foi construída em planilhas estruturadas, organizadas em módulos interdependentes que reproduzem a lógica contábil e financeira do empreendimento. Cada módulo alimenta o seguinte, de modo que a projeção de resultados decorra de forma encadeada das premissas físicas e de preço adotadas. O processo de modelagem compreendeu quatro etapas principais, descritas a seguir.

Na primeira etapa, projetou-se o faturamento, ou receita operacional bruta, estimado a partir das quantidades físicas produzidas e dos respectivos preços de mercado. Foram consideradas quatro fontes de receita: a venda de álcool fino, estimada em 1.900.000 litros ao preço de R\$ 6,00 por litro; a comercialização do excedente de WDG (grãos úmidos de destilaria), avaliado em R\$ 1.500,00 por tonelada; a venda do gado confinado, com abate anual de 1.710 cabeças; e o aproveitamento do biogás como crédito de energia elétrica injetada na rede. Os preços unitários foram parametrizados com base em cotações de mercado obtidas em fontes especializadas, a exemplo dos indicadores do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA/ESALQ) e de publicações setoriais, conforme detalhado na seção 4.2.

Na segunda etapa, sistematizaram-se os investimentos iniciais, correspondentes ao dispêndio de capital (CAPEX). Esses investimentos foram discriminados em equipamentos para colheita, equipamentos para manejo e irrigação, microdestilaria e construção civil, aquisição do rebanho para confinamento, projetos de viabilidade técnica e capital de giro inicial. A separação entre investimentos e custos operacionais seguiu o princípio contábil de não classificar dispêndios de capital, como a aquisição de máquinas, obras e biodigestor, no grupo de custos e despesas do período.

Na terceira etapa, organizaram-se os custos e as despesas operacionais (OPEX), segregados em três grupos: material de colheita e irrigação; insumos da microdestilaria; e folha de pessoal acrescida dos encargos sociais, estimados em 80% sobre a remuneração. Essa segregação permite identificar a estrutura de custos do empreendimento e sua sensibilidade às variações de preço dos principais insumos.

Na quarta etapa, com base nos módulos anteriores, elaborou-se a Demonstração do Resultado do Exercício (DRE) projetada, que evidencia a formação

do resultado desde a receita operacional bruta até o lucro líquido, contemplando a incidência tributária. Foram comparados os regimes de tributação pelo Lucro Presumido e pelo Lucro Real, a fim de identificar o enquadramento fiscal mais eficiente para o empreendimento, considerando as alíquotas de PIS (Programa de Integração Social), Cofins (Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social), ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços), IPI (Imposto sobre Produtos Industrializados), IRPJ (Imposto de Renda da Pessoa Jurídica) e CSLL (Contribuição Social sobre o Lucro Líquido) e o respectivo adicional do imposto de renda.

A formulação da DRE segue o regime de Lucro Presumido, com as seguintes regras de cálculo. As contribuições ao PIS e à Cofins, no regime cumulativo, incidem às alíquotas de 0,65% e 3,0% sobre a receita bruta. O ICMS observa a alíquota de 23% para o álcool não combustível destinado à industrialização (Lei estadual de Pernambuco nº 15.730/2016, art. 15, IV, “a”), aplicando-se isenção, redução ou diferimento às demais atividades. O IRPJ é apurado sobre base presumida de 8% da receita bruta, à alíquota de 15%, acrescida de adicional de 10% sobre a parcela da base que exceder R\$ 240.000 ao ano, de modo que $IRPJ = (0,08 \times RB) \times 15\% + \max[0; (0,08 \times RB - 240.000)] \times 10\%$. A CSLL incide à alíquota de 9% sobre base presumida de 12% da receita bruta, ou seja, $CSLL = (0,12 \times RB) \times 9\%$. Com a receita bruta de R\$ 22,65 milhões, obtêm-se IRPJ de aproximadamente R\$ 429 mil e CSLL de R\$ 245 mil, valores consistentes com a Demonstração do Resultado do Exercício apresentada no Capítulo 5.

3.4 Indicadores de viabilidade e análise de resultados

A avaliação da viabilidade apoiou-se em técnicas consagradas da engenharia econômica e da análise de investimentos (Assaf Neto, 2014). O fluxo de caixa projetado foi descontado por uma taxa mínima de atratividade (TMA), estimada a partir do custo médio ponderado de capital (WACC), que pondera o custo do capital próprio e o custo do capital de terceiros conforme a estrutura de financiamento adotada. O custo do capital próprio foi estimado pelo modelo de precificação de ativos, que considera a taxa livre de risco, o coeficiente beta e o prêmio de risco de mercado, enquanto o custo do capital de terceiros incorporou o benefício fiscal decorrente da dedutibilidade dos juros.

Sobre o fluxo de caixa descontado, calcularam-se os seguintes indicadores: o Valor Presente Líquido (VPL), que mede a riqueza gerada pelo projeto em valores

presentes; a Taxa Interna de Retorno (TIR), que expressa a rentabilidade intrínseca do investimento; o *Payback* descontado, que indica o prazo de recuperação do capital aplicado considerando o valor do dinheiro no tempo; e o Índice de Lucratividade (IL), que relaciona o valor presente dos fluxos de caixa ao investimento inicial.

Complementarmente, foram calculados o Retorno sobre o Investimento (ROI), o Retorno sobre o Capital Próprio (ROE) e o Retorno sobre os Ativos (ROA), além do Valor Econômico Agregado (EVA), que verifica se o empreendimento cria, mantém ou destrói valor ao confrontar o retorno operacional com o custo do capital empregado. O conjunto desses indicadores permite uma avaliação abrangente do desempenho financeiro, contemplando tanto a dimensão da rentabilidade quanto a da geração de valor.

Por fim, realizou-se uma análise comparativa entre os resultados projetados e os parâmetros de plantas representativas do setor, retomando as evidências internacionais discutidas na seção 2.3. Essa comparação permite avaliar a competitividade financeira do modelo circular frente ao modelo linear tradicional e dimensionar como o reinvestimento de coprodutos no processo produtivo eleva a eficiência e amplia a rentabilidade, ao reduzir custos operacionais e abrir novas fontes de receita.

Formalmente, os indicadores são calculados conforme as expressões a seguir. O custo do capital próprio segue o modelo de precificação de ativos financeiros (CAPM): $K_e = R_f + \beta \times (R_m - R_f)$, em que R_f é a taxa livre de risco (Selic), β o coeficiente de risco sistemático e R_m o retorno de mercado. O custo do capital de terceiros, líquido do benefício fiscal, é $K_i = K_d \times (1 - t)$. O custo médio ponderado de capital resulta da combinação das duas fontes conforme sua participação na estrutura de financiamento: $WACC = (E/V) \times K_e + (D/V) \times K_i$. O Valor Presente Líquido é obtido descontando-se os fluxos de caixa a essa taxa: $VPL = \sum FC_t / (1 + WACC)^t - I_0$, sendo o projeto viável quando $VPL > 0$. A Taxa Interna de Retorno é a taxa que anula o VPL ($\sum FC_t / (1 + TIR)^t = I_0$), indicando viabilidade quando $TIR > WACC$. O Índice de Lucratividade relaciona o valor presente dos fluxos ao investimento ($IL = \sum VP / I_0$; viável se $IL > 1$), e o *payback* descontado corresponde ao prazo em que o valor presente acumulado dos fluxos iguala o investimento. Complementarmente, o ROI (lucro líquido/investimento), o ROE (lucro líquido/patrimônio líquido) e o ROA (lucro líquido/ativo total) medem a rentabilidade, enquanto o Valor Econômico Agregado,

$EVA = NOPAT - (WACC \times \text{capital investido})$, verifica se o retorno operacional supera o custo do capital empregado, evidenciando criação de valor quando positivo.

Como instrumento auxiliar de redação e de organização textual, recorreu-se a ferramentas de IA como o Chat GPT e Claude, para apoio à escrita, à revisão e à elaboração de quadros e figuras, sem qualquer interferência na concepção analítica, na coleta de dados ou na interpretação dos resultados do estudo.

4 PROPOSIÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA DA ECONOMIA CIRCULAR

O modelo proposto relaciona a produção de etanol a atividades complementares, como o confinamento de gado, de forma a reinserir coprodutos do processo industrial, em especial o DDG (*Dried Distillers Grains with Solubles*), como insumos produtivos. Essa articulação permite que resíduos deixem de ser tratados como descartes e passem a ter valor econômico, contribuindo para um uso mais eficiente da matéria-prima e para a redução de custos operacionais, em coerência com os princípios apresentados na seção 2.1.

Do ponto de vista metodológico, a proposta combina a análise econômico-financeira, descrita no capítulo 3, com a avaliação dos fluxos produtivos, buscando compreender como receitas, custos e reaproveitamento de recursos se relacionam. A análise não se limita ao desempenho da produção de etanol, pois incorpora também as receitas geradas pelos coprodutos, o que amplia a visão sobre o funcionamento do sistema produtivo.

Assim, o estudo propõe a construção de um modelo integrado no qual os ganhos não são avaliados de forma isolada. A articulação entre as diferentes etapas produtivas permite evidenciar efeitos tanto na competitividade econômica quanto na redução de desperdícios. Busca-se demonstrar que a adoção de práticas associadas à economia circular pode tornar o sistema mais eficiente e menos dependente do modelo linear tradicional, especialmente no setor de biocombustíveis.

4.1 Mercado

No âmbito da agroindústria, a aplicação dos princípios da economia circular contribui para o desenvolvimento de novos elos na cadeia produtiva, como já vimos no artigo “A utilização de resíduos da uva no desenvolvimento de novos produtos, no contexto da economia circular” contido na revisão de literatura, através de práticas como otimização de processos, produto como serviço, compartilhamento, extensão da vida do produto, insumos circulares, recuperação de recursos e virtualização. A integração de uma usina de álcool de milho com o confinamento de gado representa um exemplo concreto dessa abordagem. Nesse modelo, os coprodutos da produção de etanol, como o resíduo de milho, podem ser utilizados como ração animal, enquanto o biogás gerado a partir dos resíduos orgânicos pode ser aproveitado para

a geração de energia, tornando o sistema autossustentável em termos energéticos e de alimentação animal.

4.1.1 Mercado de álcool neutro

Segundo o *Data Bridge Market Research* (2025) mercado global de álcool neutro vem registrando crescimento ao longo dos últimos anos, impulsionado pela diversidade de aplicações em setores como bebidas alcoólicas, indústria farmacêutica, cosméticos, fragrâncias e processos industriais. Trata-se de um tipo de etanol de alta pureza, geralmente superior a 95%, obtido por meio de sucessivas etapas de destilação e retificação de matérias-primas agrícolas, como grãos, melaço de cana e frutas. Sua principal característica é a neutralidade sensorial, o que permite sua utilização tanto na produção de bebidas de maior valor agregado quanto como solvente em formulações farmacêuticas e cosméticas.

Esse avanço não ocorre de forma isolada, pois acompanha mudanças mais amplas nas cadeias produtivas, com maior organização dos mercados, crescimento populacional, urbanização e ampliação dos usos industriais. Dados da *Data Bridge Market Research* (2025) indicam que o mercado global de álcool neutro deve passar de US\$ 7,45 bilhões em 2023 para US\$ 14,74 bilhões até 2033, o que representa uma taxa média de crescimento anual de 7,13% entre 2024 e 2033.

Essa continuidade da expansão do mercado de álcool neutro é impulsionada principalmente pelos segmentos de bebidas, farmacêutico e cosmético. De maneira geral, as projeções apontam para um período de expansão contínua até a próxima década, com tendência de consolidação de empresas e aumento da capacidade produtiva em regiões estratégicas. O mercado de álcool acompanha a evolução de novos modelos produtivos e as exigências por maior eficiência e sustentabilidade. Ele estrutura-se em diversas aplicações estratégicas: nas bebidas alcoólicas, é o insumo-base de vodca, gim, rum, licores e bebidas compostas; na indústria farmacêutica, é utilizado como solvente em formulações de medicamentos, antissépticos, extratos farmacológicos e vacinas; nos cosméticos e cuidados pessoais, é essencial em perfumes, desodorantes, colônias e loções; e, na produção industrial, serve de base para tintas, fragrâncias industriais, adesivos, solventes e formulações de limpeza, em razão de sua estabilidade química e volatilidade controlada.

Em relatório da *Next Move Strategy Consulting* (2026), o mercado regional atingiu um volume estimado de 1,8 bilhão de litros, com CAGR (Compound Annual

Growth Rate) próximo de 6,5% nos últimos cinco anos. A produção de etanol de milho na região Centro-Sul do Brasil aumentou quase 31% no ciclo 2024/25, atingindo 8,19 bilhões de litros, conforme dados da Unica (2025). No Nordeste, estima-se que a produção de etanol de cereais possa dobrar, atingindo 20 milhões de litros na próxima safra (Movimento Econômico, 2024).

Os dados de mercado indicam que o álcool neutro obtido de grãos é o segmento dominante, pois grãos como milho, trigo e cevada são amplamente disponíveis, possuem melhor custo-benefício em escala produtiva, oferecem maior eficiência de conversão em comparação com outras matérias-primas e produzem álcool mais neutro e sensorialmente limpo.

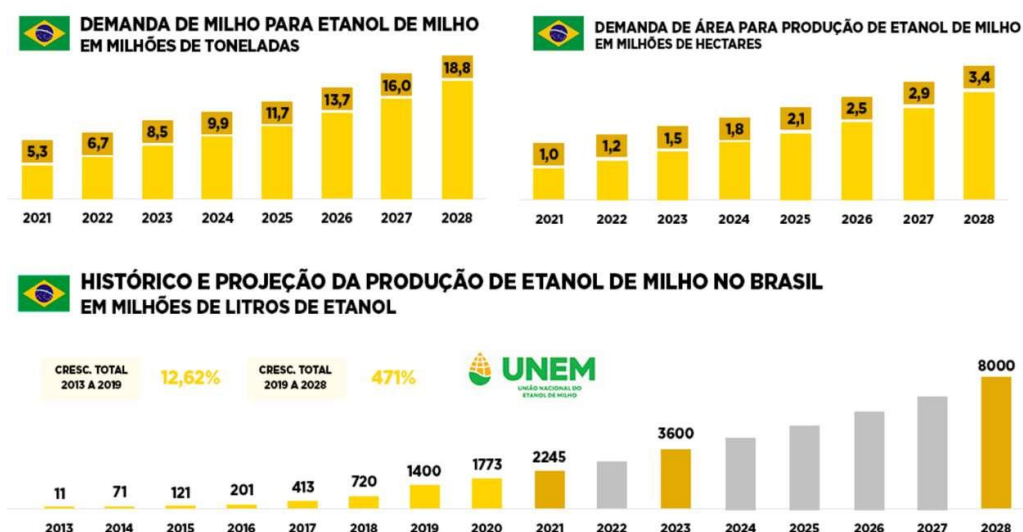
Com a indústria de bebidas *premium* em plena expansão, a intensificação do uso de etanol em formulações farmacêuticas e cosméticas e a crescente relevância do etanol em políticas ambientais, o mercado de álcool neutro está posicionado para um ciclo prolongado de crescimento.

4.1.2 Demanda

Na quinta edição da Conferência NovaCana, realizada em 2024, destacou-se que o milho registrou expressivos ganhos de produtividade nas últimas décadas, enquanto a cana-de-açúcar manteve-se relativamente estável em termos produtivos (NovaCana, 2024). Cabe ressaltar, contudo, que a cana é uma cultura de ciclo produtivo mais maduro no país, sendo natural um ritmo de crescimento menor, de modo que a comparação de trajetórias não implica superioridade de uma matéria-prima sobre a outra.

O avanço do etanol de milho tem elevado o consumo do grão no Brasil. Dados consolidados indicam que a produção de etanol de milho alcançou cerca de 8,2 bilhões de litros na safra 2024/25, alta de aproximadamente 31% frente ao ciclo anterior, respondendo por cerca de 23% de todo o etanol produzido no país (UNICA, 2025; UNEM, 2025). A demanda por milho para essa finalidade acompanha esse crescimento, consolidando o biocombustível como parte relevante da cadeia produtiva do grão. A relação entre demanda de milho e etanol é apresentada na Figura 7. Em síntese, os dados apontam para uma demanda estruturalmente crescente, sustentada pela elevação contínua do consumo do grão e pela ampliação da mistura de anidro na gasolina, condição favorável à viabilidade econômica do empreendimento proposto.

Figura 7 – Demanda de milho e etanol no Brasil



Fonte: União Nacional do Etanol de Milho (2024).

4.1.3 Oferta

A oferta brasileira de etanol de milho consolidou-se em patamar recorde. Na safra 2024/25, a produção alcançou cerca de 8,2 bilhões de litros, alta de aproximadamente 31% em relação ao ciclo anterior e expansão superior a 800% em menos de uma década (UNICA, 2025; UNEM, 2025). Esse avanço é impulsionado pela ampliação do parque industrial, 25 biorrefinarias de milho em operação e outras 16 autorizadas, pela oferta abundante de milho da safrinha, integrada à soja nas regiões Centro-Oeste (Mato Grosso, Goiás e Mato Grosso do Sul) e na fronteira do MATOPIBA, e pela crescente demanda por biocombustíveis (NovaCana, 2023; UNEM, 2025).

Segundo o coordenador técnico do Instituto para o Fortalecimento da Agropecuária de Goiás (IFAG), Alexandre Alves, existem diferenças significativas entre a cana-de-açúcar e o milho quanto ao potencial produtivo para a fabricação de etanol. De acordo com o especialista, a cana possui 54% menos açúcar do que o milho, resultando em rendimento médio de 89,5 litros de etanol por tonelada de cana processada. Já o milho, apesar da maior complexidade no processo de transformação do amido em açúcar, possui maior potencial de produção alcoólica, alcançando aproximadamente 407 litros de etanol por tonelada de grão (CNA Brasil, 2022).

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o fornecimento total de etanol no Brasil, em 2023, alcançou 26,3 bilhões de litros comercializados. Desse total, cerca de 20,7% foram produzidos por 19

companhias que utilizam milho como matéria-prima, o que corresponde a aproximadamente 5,45 bilhões de litros de etanol de milho e evidencia o crescimento acelerado da participação do cereal no mercado nacional de biocombustíveis (NovaCana, 2024). O histórico de produção nacional é apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Produção nacional de etanol de milho



Fonte: União Nacional do Etanol de Milho (2024).

Na safra 2025/26, a produção de etanol de milho atingiu cerca de 10,17 bilhões de litros, crescimento de aproximadamente 30% frente ao ciclo anterior, o que representa pouco mais de 27% de toda a produção nacional de etanol, que alcançou o recorde histórico de 37,5 bilhões de litros (CONAB, 2026).

4.2 Aspectos econômicos: usina de etanol de milho

Os aspectos econômicos de uma usina de etanol de milho envolvem a análise da viabilidade financeira do empreendimento, considerando custos de produção, investimentos em infraestrutura, logística e as dinâmicas do mercado de biocombustíveis. A produção de etanol a partir do milho apresenta potencial competitivo, especialmente em regiões com elevada disponibilidade da matéria-prima, como o Centro-Oeste (Mato Grosso, Goiás e Mato Grosso do Sul) e a fronteira do MATOPIBA, onde o grão da segunda safra é abundante e integrado à soja; isso permite não apenas a geração de combustível, mas também de coprodutos como o DDG, utilizado na alimentação animal (UNEM, 2025). Fatores como incentivos governamentais, demanda crescente por fontes de energia renováveis e oscilações

nos preços do milho e dos combustíveis influenciam diretamente a rentabilidade do setor, o que torna essencial uma análise econômica detalhada para garantir a sustentabilidade e a competitividade da usina.

4.2.1 Diferenciais de cultivo e vantagem comparativa

A escolha da usina de álcool de milho como componente central do projeto de economia circular fundamenta-se em sua importância para sistemas orgânicos de produção e em sua versatilidade como matéria-prima para possíveis integrações com outras cadeias produtivas, como as de carne, leite e ovos, além de sua eficiência comparativa em relação à estrutura sólida e histórica das usinas de etanol de cana-de-açúcar. Esse arranjo contribui para o aumento da produção e da oferta de alimentos, para a transição energética e para a descarbonização.

Segundo a Embrapa (2021), o plantio do milho divide-se em duas épocas: a primeira, no verão, durante o período chuvoso, entre o fim de agosto e os meses de outubro e novembro; e a segunda, a safrinha, referente ao milho de sequeiro, plantado em fevereiro ou março. Quanto às diferenças operacionais em relação à cana, destacam-se o ciclo e a conservação da matéria-prima: a cana tem ciclo de aproximadamente 12 meses por corte e exige processamento logo após a colheita, ao passo que o milho é colhido em cerca de 90 dias e pode permanecer armazenado por até dois ou três anos sem perdas relevantes de qualidade. Somam-se a isso o menor teor de água do grão, que reduz custos de transporte e de processamento industrial, e o elevado potencial de automação da planta, que favorece a eficiência operacional; no modelo proposto, essa eficiência é reforçada pela autossuficiência energética obtida com o aproveitamento do biogás.

No campo dos custos, um levantamento da safra 2021/22 estimou o etanol de milho em R\$ 1,76 por litro, ante R\$ 2,15 por litro do etanol de cana-de-açúcar (NovaCana, 2022; G1, 2022). Trata-se, porém, de um único ponto no tempo, influenciado pelo patamar de preços do açúcar naquele ciclo, o que recomenda cautela ao generalizar. Cada matéria-prima apresenta vantagens próprias: a cana beneficia-se de um parque industrial consolidado, da cogeração de energia a partir do bagaço e da flexibilidade entre açúcar e etanol, atributos especialmente relevantes em Pernambuco, enquanto o milho oferece estocabilidade, produção ao longo de todo o ano e coprodutos de alto valor, como o DDG. A escolha do milho como matéria-prima

central deste projeto justifica-se por sua aderência ao arranjo circular proposto, e não por uma suposta superioridade absoluta sobre a cana.

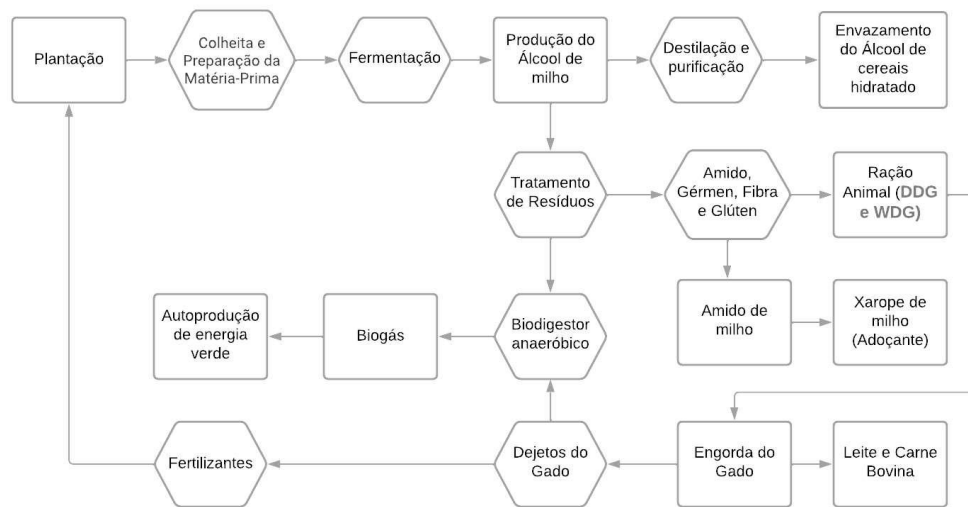
Conforme analisado por Almeida (2019), o rendimento produtivo do etanol de milho destaca-se de forma significativa em comparação ao da cana-de-açúcar. Segundo o autor, uma tonelada de cana produz entre 70 e 85 litros de etanol, enquanto uma tonelada de milho pode gerar entre 370 e 460 litros, a depender da qualidade da matéria-prima e do teor de amido presente no grão. Almeida (2019) também ressalta que a tendência futura é a ampliação da integração entre usinas sucroenergéticas e unidades de produção de etanol de milho, considerando os menores custos operacionais e a elevada atratividade econômica do setor. O processo industrial do milho apresenta, ainda, elevado potencial de automação, o que permite redução de custos com mão de obra e maior eficiência operacional.

4.2.2 Coprodutos e engenharia do projeto

O resíduo do milho é a forragem mais comum por constituir boa silagem, rica em cálcio, potássio, magnésio e amido, o que o torna excelente fonte de calorias para os animais. O milho é a principal matéria-prima das rações para bovinos, suínos e aves, representando mais de 60% dos alimentos consumidos por esses rebanhos (Estadão Agro, 2023). A trituração do cereal é o método utilizado para garantir maior digestibilidade.

Nas usinas, o milho é empregado não apenas para produzir etanol, mas também como fonte de energia. A queima da biomassa, incluindo resíduos de milho e eucalipto cultivados pelos produtores, é utilizada para gerar energia e movimentar os motores. A engenharia geral do projeto é representada na Figura 9.

Figura 9 – Engenharia do projeto: usina integrada

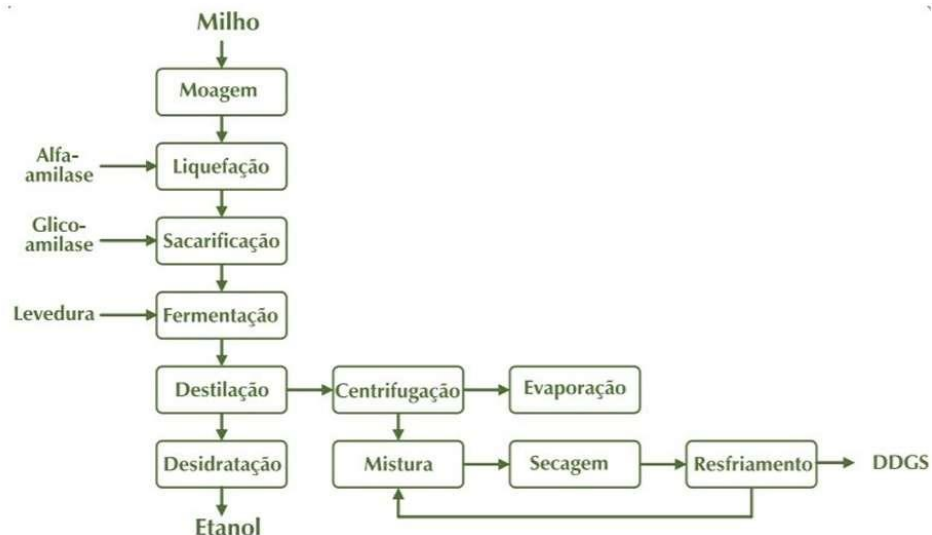


Fonte: Elaboração própria (2026).

4.2.3 Da plantação de milho ao álcool de cereais hidratado

O primeiro passo do processo é a plantação da matéria-prima principal, seguido da colheita do milho, que é transportado para a usina, onde passa por uma série de etapas de preparação, como limpeza, secagem e moagem, para torná-lo adequado à fermentação. As etapas de transformação são apresentadas na Figura 10.

Figura 10 – Transformação do milho



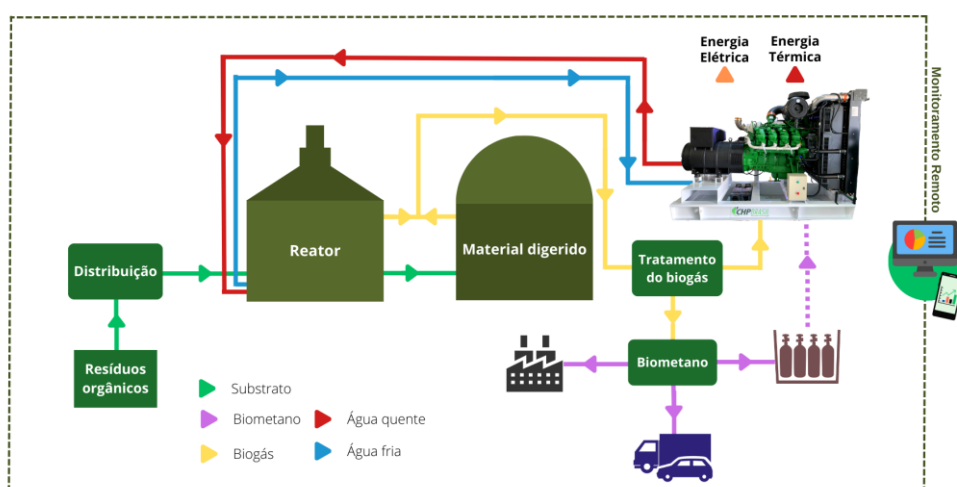
Fonte: BNDES e CGEE (2008).

O milho moído é misturado com água e enzimas para a conversão do amido em açúcares fermentáveis destinados à produção de etanol. O etanol resultante passa por processos de destilação e purificação para a remoção de impurezas e o aumento da concentração de álcool.

4.2.4 Geração de biogás a partir de resíduos

Os resíduos do processo de produção de álcool de milho, como bagaço e vinhaça, são utilizados na produção de biogás por meio de um biodigestor anaeróbico. O biogás gerado é, então, empregado como principal fonte de energia na própria usina, alimentando os processos de produção e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. A estrutura é composta conforme a Figura 11.

Figura 11 – Componentes da usina de biogás



Fonte: Biogás - CHP Brasil | Geradores a gás (2026).

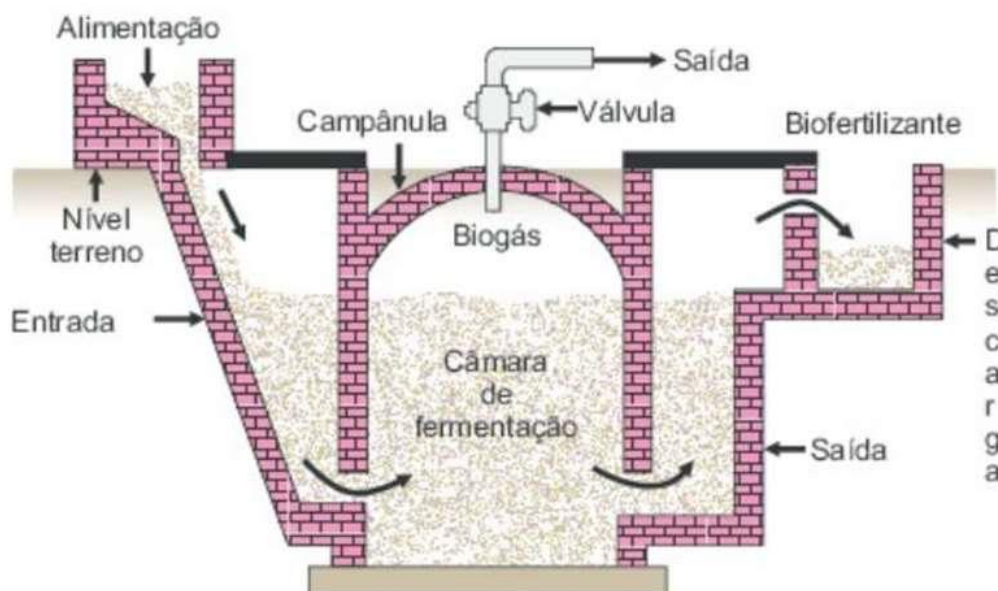
O funcionamento de um biodigestor começa pela coleta da matéria orgânica, dividida entre o coletor de matéria orgânica líquida e o coletor de matéria orgânica sólida, onde os resíduos são reunidos e preparados para o processamento. Em seguida, o material segue para os fermentadores, onde ocorre a digestão anaeróbia, processo em que microrganismos degradam a matéria orgânica na ausência de oxigênio, gerando biogás. Depois dessa etapa, o material passa pelos pós-fermentadores, que complementam a decomposição e aumentam a eficiência do sistema. O material resultante é encaminhado ao tanque de armazenagem, onde o digestato, que pode ser utilizado como fertilizante, fica armazenado. O sistema conta ainda com um conjunto de bombas hidráulicas, responsável por movimentar os resíduos entre as diferentes etapas do processo. Em seguida, os separadores dividem as partes sólida e líquida do material tratado, facilitando seu aproveitamento. Por fim, o biogás produzido é tratado e enviado ao motor gerador, onde é utilizado para a produção de energia.

O processo de produção de biogás inicia-se com a entrega e o armazenamento do substrato. Em seguida, ocorre um preparo e tratamento opcional, que inclui classificar, tritar, esmagar e homogeneizar o material. Depois, o material preparado é incorporado ao digestor, marcando o início da etapa em que o biogás é produzido como resultado principal, acompanhado de resíduos.

Os resíduos gerados seguem para a etapa de fermentação e beneficiamento dos restos de fermentação. Nesse estágio, pode-se optar pela separação entre sólido e líquido, resultando em esterco líquido e permitindo a aplicação ou a compostagem dos sólidos remanescentes. Paralelamente, o biogás produzido passa por tratamento e armazenamento, incluindo secagem e dessulfurização, e, após esse processo, é aproveitado para a produção de eletricidade e calor.

O confinamento de gado gera quantidade significativa de resíduos orgânicos, incluindo esterco e restos de ração. Esses resíduos são tradicionalmente considerados subprodutos de descarte, mas, no modelo de economia circular, são vistos como recursos valiosos. No projeto proposto, esses resíduos são direcionados à usina de biogás, onde são convertidos em energia renovável por meio do processo de digestão anaeróbica, conforme representado na Figura 12.

Figura 12 – Modelo de biodigestor para geração de energia a biogás



Fonte: Cardeal et al. (2026).

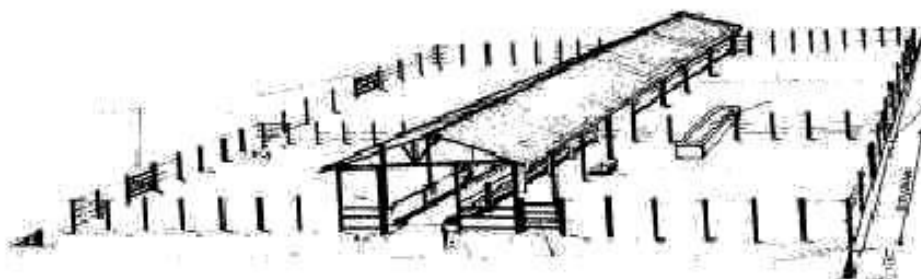
Essa integração permite uma gestão mais eficiente dos recursos, uma vez que os resíduos do gado não apenas são eliminados de maneira sustentável, mas também

contribuem para a autossuficiência energética da usina. Disso resultam benefícios mútuos: a usina de biogás alimenta-se dos resíduos do confinamento, enquanto o confinamento se beneficia da energia produzida, fechando o ciclo de produção de maneira eficiente e sustentável.

4.2.5 Produção de ração animal e integração com o confinamento de gado

A farinha de milho, coproduto da usina de álcool de milho, é utilizada na produção de ração animal. Esse processo garante o aproveitamento máximo dos grãos de milho e contribui para a alimentação de alta qualidade do gado confinado. A dieta balanceada proporcionada pela ração à base de milho é essencial para melhorar a qualidade da carne e do leite produzidos, aumentando o valor agregado dos produtos. O gado confinado é alimentado com a ração produzida na usina, o que proporciona uma solução integrada e sustentável para ambas as operações. Os dejetos do gado podem ser utilizados como fertilizante nas terras agrícolas circundantes, fechando ainda mais o ciclo sustentável. A estrutura de confinamento é ilustrada na Figura 13.

Figura 13 – Curral de engorda semicoberto



Fonte: Embrapa (1996).

O confinamento integrado permite uma gestão centralizada e eficiente dos recursos, em que os resíduos de uma operação alimentam outra. Isso não apenas reduz os custos operacionais, mas também aumenta a sustentabilidade do sistema como um todo, em consonância com a engenharia do projeto descrita na seção 4.2.2.

4.2.6 Financiamento subsidiado

A viabilidade do modelo integrado descrito nas seções anteriores depende, em grande medida, do acesso a fontes de financiamento adequadas ao perfil do empreendimento. Esta seção apresenta duas alternativas relevantes para o contexto

regional: as cooperativas de crédito e as linhas de crédito subsidiadas oferecidas pelo Banco do Nordeste.

4.2.6.1 Cooperativas de crédito

O papel das cooperativas de crédito no financiamento do agronegócio tem ganhado relevância e, para um empreendimento de médio porte como o proposto, elas representam alternativa estratégica ao crédito bancário tradicional. A diferença essencial é de natureza institucional: na cooperativa, o produtor é cooperado, e não cliente, parte dos resultados retorna sob a forma de sobras, e os recursos captados permanecem na própria região, reforçando o desenvolvimento local, dimensão aderente à economia circular e às práticas ESG discutidas neste trabalho.

O protagonismo do segmento é expressivo. Segundo o Portal do Cooperativismo Financeiro (2026), os quatro maiores sistemas, Sicredi, Sicoob, Cresol e Ailos, elevaram os ativos totais de R\$ 109,3 bilhões (2015) para R\$ 857,1 bilhões (2025) e a carteira de crédito de R\$ 64,1 bilhões para R\$ 528,9 bilhões, com expansão de 739 para mais de 9,5 mil pontos de atendimento. No crédito rural, o estoque de Letras de Crédito do Agronegócio (LCA) emitidas por cooperativas saltou de R\$ 8,5 bilhões (2020) para R\$ 77,3 bilhões (2024). Para o Plano Safra 2026/27, o Sicoob disponibilizou R\$ 70 bilhões e o Sicredi, R\$ 72,1 bilhões.

Em Pernambuco, o projeto pode apoiar-se em sistemas com atuação consolidada no estado, como o Sicoob Pernambuco, além de Sicredi e Cresol. Essas instituições oferecem linhas diretamente aderentes ao perfil do empreendimento: crédito rural (custeio, investimento e comercialização), capital de giro e financiamento de longo prazo para ampliação e modernização, operando tanto recursos subsidiados, Pronaf, Pronamp e demais linhas equalizadas do Plano Safra, quanto repasses do BNDES (Finame e Fundo Clima), o que as habilita a financiar itens específicos do CAPEX descrito na seção 5.5, como máquinas, sistemas de armazenagem e de irrigação.

Do ponto de vista estratégico, a cooperativa é particularmente eficiente para este empreendimento em três frentes. Primeiro, no capital de giro: o ciclo de confinamento exige desembolso recorrente com a compra de boi magro (cerca de R\$ 6,84 milhões por ano, seção 5.6), e as linhas de custeio e de antecipação de recebíveis permitem casar o prazo entre a aquisição do gado e a venda do boi gordo, reduzindo o capital próprio imobilizado. Segundo, na análise de proximidade: por

decidirem localmente, as cooperativas tendem a avaliar com mais aderência arranjos integrados e inovadores, condição favorável a um projeto pouco convencional como a integração usina-confinamento-biogás. Terceiro, na complementaridade com o Banco do Nordeste: as linhas cooperativas financiam custeio e itens de menor porte com agilidade, enquanto o FNE Verde (seção 4.2.6.2) responde pelo investimento estruturante de longo prazo, compondo um funding híbrido e diversificado.

Cabe uma ressalva: o crédito rural tem operado sob maior seletividade diante da Selic elevada, com aumento da inadimplência e do ticket médio. O acesso, portanto, condiciona-se à consistência técnica do projeto e à sua capacidade de pagamento, precisamente o que a análise de viabilidade deste trabalho busca demonstrar.

4.2.6.2 Oportunidades e linhas de crédito do Banco do Nordeste

Para um empreendimento localizado em Pernambuco, como o modelo aqui proposto, o Banco do Nordeste do Brasil (BNB) representa a principal fonte institucional de crédito de longo prazo em condições subsidiadas. O banco é o operador do Fundo Constitucional de Financiamento do Nordeste (FNE), com a finalidade de constituir fonte estável de recursos para o financiamento das atividades produtivas da região (Banco do Nordeste do Brasil, 2025). O FNE financia investimentos de longo prazo e, de forma complementar, capital de giro, abrangendo os setores agropecuário, industrial, agroindustrial e de infraestrutura, todos diretamente relacionados ao modelo integrado discutido neste trabalho.

Entre as linhas disponíveis, o FNE Verde destaca-se como a mais aderente ao caráter sustentável do projeto. Voltado ao financiamento de iniciativas de preservação ambiental, energias renováveis, eficiência energética e redução de emissões de gases de efeito estufa, o programa oferece prazos de pagamento que podem variar de oito a trinta e quatro anos, com períodos de carência de até doze anos, conforme o porte e o tipo de empreendimento (Banco do Nordeste do Brasil, 2025). Para 2025, o orçamento do FNE Verde foi ampliado em cerca de 39,8% em relação ao ano anterior, alcançando R\$ 7,77 bilhões, o que sinaliza a prioridade conferida pela instituição a projetos de descarbonização da economia regional.

Como o modelo proposto combina geração de biogás a partir de resíduos, produção de biocombustível e integração com a pecuária, ele se enquadra de modo particular nas finalidades do FNE Verde, que contempla expressamente a geração de

energia a partir de biomassa, o aproveitamento de resíduos e os sistemas de aumento da eficiência energética. A componente de geração de energia elétrica a partir do biogás, descrita na seção 4.2.4, pode ainda ser apoiada pelo FNE Sol, linha destinada à micro e à minigeração distribuída por fontes renováveis, incluindo a biomassa, com financiamento de até 100% do investimento.

Para as etapas estritamente agropecuárias do empreendimento, como a formação do plantel de confinamento e o custeio da lavoura de milho, o FNE Rural oferece condições específicas para o financiamento da agropecuária, em conformidade com as resoluções do Conselho Monetário Nacional aplicáveis ao setor rural. O componente de irrigação por gotejamento, previsto entre os investimentos de manejo, encontra apoio no FNE Irrigação, linha voltada a projetos de irrigação, drenagem, armazenagem e capacitação, com prazos longos e taxas reduzidas. A aquisição de máquinas e equipamentos industriais, por sua vez, pode ser viabilizada por meio das linhas operadas em parceria com o BNDES, como o BNDES Finame e o Fundo Clima, que contemplam expressamente sistemas voltados à produção de biogás e biometano e à intensificação sustentável da agropecuária.

As condições gerais dessas linhas incluem a possibilidade de financiar até 100% do investimento para produtores rurais e empresas de pequeno e médio porte, percentual que se reduz para portes maiores, além de bônus de adimplência que diminuem os encargos quando as parcelas são pagas em dia. O acesso ao crédito está condicionado à aprovação de cadastro e de limite no banco e à apresentação de projeto de financiamento ou de proposta de crédito, instrumento ao qual a análise de viabilidade econômico-financeira desenvolvida neste trabalho serve diretamente de subsídio.

Dessa forma, a combinação entre as linhas do FNE, em suas modalidades Verde, Sol, Rural e Irrigação, e as linhas operadas com o BNDES configura um ambiente de financiamento favorável à implantação do modelo proposto. O alinhamento entre o caráter circular e de baixo carbono do empreendimento e as prioridades de crédito climático do Banco do Nordeste reforça a viabilidade da iniciativa e amplia seu potencial de contribuir para o desenvolvimento sustentável da região, tema retomado nas considerações finais.

5 PROJETO ECONÔMICO: ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MODELO CIRCULAR

Este capítulo apresenta e discute os resultados da modelagem econômico-financeira do sistema integrado proposto, ou seja, a micro-destilaria de álcool de cereais articulada ao confinamento bovino e à biodigestão, organizados em planilha eletrônica estruturada em módulos vinculados por referências dinâmicas. Cada seção explica uma tabela do modelo, discute seus pressupostos e a cruza com a revisão de literatura e com a proposição teórico-metodológica dos capítulos anteriores. Ao final, consolida-se uma conclusão sobre a viabilidade do negócio. As tabelas completas constam dos Anexos.

5.1 Estrutura do modelo e articulação com a metodologia

Em coerência com a metodologia (Capítulo 3), o modelo parte de um conjunto de premissas técnicas e de mercado, das quais derivam a produção e a destinação dos coprodutos, as receitas, os investimentos, os custos operacionais e a Demonstração do Resultado do Exercício (DRE). Sobre esse alicerce calculam-se a intensidade de carbono, o crédito de carbono e os indicadores de retorno. Toda a cadeia é paramétrica: a alteração de uma premissa recalcula automaticamente os demais módulos, o que permite análise de sensibilidade e cenários. Os preços de mercado foram levantados em fontes atualizadas de 2025/2026 (CEPEA/Esalq, Pecuária.com.br, MF Rural, Exame/UNEM, ANEEL e Banco Central), e o tratamento tributário segue a legislação vigente.

5.2 Premissas técnicas, de mercado e tributárias

A Tabela 1 reúne as principais premissas. O rendimento de 400 litros de álcool por tonelada de milho situa-se na faixa relatada pela literatura (370 a 460 L/t), e o preço de R\$ 6,00/L corresponde ao posicionamento do produto como álcool neutro (ENA) de alto valor agregado – e não como etanol combustível, cujo indicador CEPEA situou-se em torno de R\$ 2,20 a R\$ 3,00/L em 2026. Esse posicionamento é sustentado pela seção 4.1.1, que projeta o mercado de álcool neutro de US\$ 7,45 bilhões (2023) para US\$ 14,74 bilhões até 2033, a uma taxa de 7,13% ao ano.

Tabela 1 – Premissas técnicas e de mercado (síntese)

Premissa	Valor	Referência
----------	-------	------------

Milho processado	4.700 t/ano	Modelo
Rendimento de etanol	400 L/t	CNA; Almeida (2019)
Produção de álcool neutro	1.880.000 L/ano	Cálculo
Preço do álcool neutro	R\$ 6,00/L	CEPEA; 21Química (2025)
WDG produzido	1.900 t/ano	Modelo
Preço do WDG (úmido)	R\$ 500/t	MF Rural; Scot (2026)
Animais terminados	1.710 cab/ano	570 cab × 3 ciclos
Boi magro (entrada)	R\$ 4.000/cab	Reposição
Boi gordo (saída)	R\$ 6.000/cab	CEPEA; B3 (2026)
Produção de biogás	850 m³/dia	Biodigestor
Geração de energia	651.525 kWh/ano	850 × 2,1 × 365

Fonte: elaboração própria (2026), com base em CEPEA/Esalq, Pecuária.com.br, MF Rural, Exame/UNEM e literatura técnica.

A Tabela 2 detalha os tributos sobre vendas por atividade, em regime de Lucro Presumido. O álcool não combustível destinado à industrialização (NBM/SH 2207 e 2208) sujeita-se à alíquota específica de ICMS de 23%, conforme o art. 15, inciso IV, alínea “a”, da Lei estadual nº 15.730/2016. O gado vivo é amparado por diferimento; os insumos e rações agropecuárias têm isenção ou redução (Convênio ICMS 100/97); a energia e o crédito de carbono não sofrem ICMS. Registre-se que o ICMS é não cumulativo, ou seja, os créditos dos insumos reduzem o ônus efetivo e que o enquadramento deve ser confirmado pela contabilidade.

Tabela 2 – Tributos sobre vendas por atividade (Lucro Presumido)

Atividade	PIS	Cofins	ICMS	Outros	Total
Álcool de cereais	0,65%	3,0%	23,0%	–	26,65%
WDG (insumo/ração)	0,65%	3,0%	0%	–	3,65%
Boi gordo	0,65%	3,0%	0%	1,5%	5,15%
Biogás (energia)	0%	0%	0%	–	0%
Crédito de carbono	0,65%	3,0%	0%	–	3,65%

Fonte: elaboração própria (2026) com base na Lei nº 15.730/2016 (PE), art. 15, IV, “a”, e no RIR/2018. O IRPJ adota presunção de 8% (alíquota de 15% mais adicional de 10%) e a CSLL presunção de 12% (alíquota de 9%).

5.3 Produção e destinação dos coprodutos: a circularidade quantificada

O núcleo da economia circular está na separação entre o que circula internamente (custo evitado, não tributado) e o que é efetivamente vendido (receita tributável). Conforme a Tabela 3, dos 1.900 t de WDG produzidos, 625 t alimentam o confinamento (custo evitado de R\$ 312,5 mil) e 1.275 t são vendidas. A silagem (7.200 t) destina-se integralmente à engorda, evitando a compra de cerca de R\$ 1,8 milhão em volumoso. A adubação é feita com adubo orgânico (esterco e digestato do gado), dispensando fertilizante NPK industrial, outro elo do ciclo. Esse arranjo materializa o

princípio de reutilização de subprodutos discutido na seção 2.1 e atende ao primeiro objetivo específico do trabalho.

Tabela 3 – Balanço de produção e destinação dos coprodutos

Coproduto	Produção	Consumo interno	Venda	Receita venda
WDG	1.900 t	625 t	1.275 t	R\$ 637.500
Energia (biogás)	651.525 kWh	557.000 kWh	94.525 kWh	R\$ 56.715
Silagem	7.200 t	7.200 t	0	–
Biofertilizante	uso interno	tudo	0	–

Fonte: elaboração própria (2026). Apenas a coluna “Venda” gera receita e tributos; o consumo interno é custo evitado.

Quanto à energia, o cenário adotado compara a demanda elétrica da planta – irrigação (192.000 kWh), destilaria (285.000 kWh) e confinamento/geral (80.000 kWh), totalizando 557.000 kWh/ano – com a geração de 651.525 kWh do biogás. O resultado confirma a autossuficiência energética afirmada na seção 4.2.4: o biogás cobre integralmente o consumo (custo evitado de R\$ 501,3 mil/ano à tarifa de varejo) e ainda gera um excedente de 94.525 kWh injetado na rede, sem necessidade de importação de energia. Apenas esse excedente é contabilizado como receita.

5.4 Receitas operacionais

A Tabela 4 consolida a receita bruta anual de R\$ 22,65 milhões. O álcool neutro responde por metade do faturamento (R\$ 11,28 milhões) e o boi gordo por outra parcela expressiva (R\$ 10,26 milhões); o WDG vendido, o excedente de energia e o crédito de carbono completam o quadro. A diversificação de fontes de receita é justamente o mecanismo de amortecimento descrito na seção 2.3 a partir da experiência das plantas de Iowa: múltiplos fluxos reduzem a vulnerabilidade à oscilação de um único mercado.

Tabela 4 – Composição da receita bruta anual

Produto	Receita (R\$)	Participação
Álcool de cereais (neutro)	11.280.000	49,8%
Boi gordo terminado	10.260.000	45,3%
WDG vendido (excedente)	637.500	2,8%
Crédito de carbono (potencial)	419.556	1,9%
Biogás vendido/creditado	56.715	0,3%
Receita bruta total	22.653.771	100%

Fonte: elaboração própria (2026).

5.5 Investimentos (CAPEX)

O investimento total é estimado em R\$ 26,48 milhões (Tabela 5), composto por imobilizado (R\$ 18,88 milhões – equipamentos agrícolas, irrigação, micro-destilaria, biodigestor, usina de biogás, construções e armazenagem), despesas pré-operacionais (R\$ 1,60 milhão) e capital de giro (R\$ 6,00 milhões). A aquisição anual de boi magro (R\$ 6,84 milhões) não integra o imobilizado, por ser custo recorrente financiado via capital de giro e prazo com fornecedor – alternativa de financiamento alinhada à discussão sobre cooperativas de crédito da seção 4.2.6.

Tabela 5 – Investimento total do projeto

Grupo	Valor (R\$)
Imobilizado	18.881.000
Pré-operacional (projetos e montagem)	1.600.000
Capital de giro inicial	6.000.000
Investimento total	26.481.000

Fonte: elaboração própria (2026).

5.6 Custos e despesas operacionais (OPEX)

Os custos operacionais somam R\$ 11,90 milhões/ano (Tabela 6). A compra de boi magro é a maior rubrica (R\$ 6,84 milhões, ou 57,5% do OPEX), seguida da folha de pagamento com encargos (R\$ 2,86 milhões). A inclusão explícita do custo do gado e das sementes corrige omissões da versão preliminar e é essencial para a fidedignidade da margem. Observe-se que a adubação não gera custo, por ser orgânica, e que a alimentação do confinamento provem majoritariamente da silagem e do WDG próprios, reflexo direto da circularidade na estrutura de custos.

Tabela 6 – Custos e despesas operacionais anuais

Rubrica	Valor (R\$)
Compra de boi magro	6.840.000
Folha de pagamento (com encargos)	2.855.520
Material da micro-destilaria	1.080.000
Material de colheita e irrigação	960.000
Sementes de milho	160.000
Custo operacional total	11.895.520

Fonte: elaboração própria (2026). Adubação feita com adubo orgânico (sem custo de NPK industrial).

5.7 Demonstração do Resultado do Exercício e tributação

A Tabela 7 apresenta a DRE anual. Da receita bruta de R\$ 22,65 milhões deduzem-se R\$ 3,57 milhões de tributos sobre vendas, resultando em receita líquida de R\$ 19,08 milhões. Após os custos operacionais, o lucro operacional alcança R\$ 7,19 milhões (margem operacional de 31,7%). Deduzidos o IRPJ e a CSLL pelo Lucro

Presumido, o lucro líquido é de R\$ 6,51 milhões, equivalente a uma margem líquida de 28,7%. Essa margem, superior à de plantas convencionais de etanol, que a seção 2.3 reporta próxima de 9% (Irwin, 2024), decorre de dois fatores combinados: o posicionamento em álcool neutro premium e os custos evitados pela circularidade.

Tabela 7 – Demonstração do Resultado do Exercício (anual)

Conta	Valor (R\$)
(=) Receita Bruta Operacional	22.653.771
(-) Impostos sobre vendas	(3.573.093)
(=) Receita Líquida	19.080.678
(-) Custos e despesas operacionais	(11.895.520)
(=) Lucro Operacional	7.185.158
(-) IRPJ	(429.075)
(-) CSLL	(244.661)
(=) Lucro Líquido do Exercício	6.511.422

Fonte: elaboração própria (2026). Margem operacional de 31,7% e margem líquida de 28,7%.
Tributação pelo Lucro Presumido.

5.8 Intensidade de carbono e crédito de carbono

Aplicando a lógica do modelo CA-GREET adaptado ao Brasil, com fatores de emissão nacionais (rede elétrica pela LowCarbonPower, N₂O pelo IPCC 2019 e combustíveis pela EPA), o sistema apresenta intensidade de carbono (CI) de apenas 5,86 gCO₂e/MJ, conforme a Tabela 8. O valor é expressivamente inferior ao do etanol de milho convencional (cerca de 60 a 70 gCO₂e/MJ) e ao da gasolina (cerca de 94 gCO₂e/MJ), pois a substituição do gás natural e da energia da rede pelo biogás autogerado zera as emissões industriais. Tomando a gasolina como linha de base, evitam-se cerca de 3.496 tCO₂e/ano, o que, a R\$ 120/tCO₂e, representa receita potencial de R\$ 419,6 mil/ano. Esse resultado quantifica as práticas ESG discutidas na seção 3.2.2 e preenche a seção de cálculo de créditos de carbono prevista no projeto.

Tabela 8 – Intensidade de carbono e crédito (síntese)

Item	Valor
Emissões líquidas	232 tCO ₂ e/ano
Intensidade de carbono (CI)	5,86 gCO ₂ e/MJ
Baseline (gasolina)	94 gCO ₂ e/MJ
Emissões evitadas	3.496 tCO ₂ e/ano
Receita potencial (R\$ 120/tCO ₂ e)	R\$ 419.556/ano

Fonte: elaboração própria (2026) a partir da metodologia CA-GREET adaptada (IPCC 2019, EPA, LowCarbonPower). CO₂ biogênico considerado neutro.

5.9 Indicadores de viabilidade

A Tabela 9 reúne os indicadores de retorno. O custo médio ponderado de capital (WACC) foi estimado em 14,6%, considerando 40% de capital de terceiros a custo subsidiado (10% ao ano) e capital próprio precificado pelo CAPM, com a taxa Selic de 14,25% (junho de 2026) como taxa livre de risco. Sobre um fluxo de caixa de dez anos descontado a essa taxa, o Valor Presente Líquido é positivo (R\$ 6,65 milhões) e a Taxa Interna de Retorno (20,9%) supera o WACC, com índice de lucratividade de 1,25 e *payback* simples de cerca de quatro anos. O valor econômico agregado (EVA) positivo (R\$ 2,63 milhões) indica que o projeto remunera o capital acima de seu custo, criando valor. Esses resultados atendem ao segundo objetivo específico que é avaliar o impacto econômico das práticas circulares.

Tabela 9 – Indicadores de retorno e criação de valor

Indicador	Valor
WACC	14,6%
ROI (lucro líquido / investimento)	24,6%
EVA	R\$ 2.634.604
VPL (10 anos)	R\$ 6.651.751
TIR	20,9%
Índice de Lucratividade (IL)	1,25
Payback simples	~4,1 anos

Fonte: elaboração própria (2026). Rf = Selic (BCB, jun./2026); Kd = crédito rural subsidiado.

A leitura conjunta dos indicadores confirma a atratividade do projeto. O VPL positivo (R\$ 6,65 milhões) indica que, após remunerar o capital ao custo do WACC, o empreendimento ainda gera riqueza em valor presente. A TIR de 20,9% supera o WACC (14,6%) em mais de seis pontos percentuais, o que representa margem de segurança: a decisão só se inverteria caso o custo de capital superasse esse patamar. O Índice de Lucratividade de 1,25 significa que cada R\$ 1,00 investido retorna R\$ 1,25 em valor presente. O *payback* simples, de cerca de 4,1 anos, e o descontado, entre seis e sete anos, são compatíveis com o horizonte de dez anos e com os prazos longos das linhas do FNE Verde. Por fim, o ROI de 24,6% e o EVA positivo (R\$ 2,63 milhões) confirmam que o resultado supera o custo do capital empregado, caracterizando criação de valor.

Cabe contextualizar a margem líquida projetada (28,7%) frente ao setor. Em plantas convencionais de etanol de milho, a referência internacional da planta representativa de Iowa aponta margem líquida da ordem de 9% (Irwin, 2024). A diferença decorre do posicionamento do produto como álcool neutro premium e dos

custos evitados pela circularidade. Ressalte-se, contudo, que se trata de projeção baseada em premissas de preço e produtividade sujeitas a variação e que o custo operacional é influenciado por fatores além do preço do milho; a resiliência do modelo apoia-se sobretudo na diversificação de receitas, que amortece a volatilidade de qualquer mercado isolado.

O fluxo de caixa foi projetado para um horizonte de dez anos sob a hipótese de fluxo constante: uma vez atingido o regime permanente de operação, o resultado anual é mantido estável ao longo do período, o que corresponde a uma taxa de crescimento nominal de 0%. Trata-se de simplificação conservadora, que não incorpora ganhos de produtividade, reajustes de preço nem expansão de capacidade, de modo que os indicadores obtidos representam um piso de desempenho. O fluxo anual líquido considerado é de aproximadamente R\$ 6,51 milhões, descontado à taxa de 14,6% ao ano, conforme a Tabela 10. O valor presente acumulado torna-se positivo entre o sexto e o sétimo ano (payback descontado), e o VPL ao fim do horizonte confirma o resultado da Tabela 9.

Tabela 10 – Fluxo de caixa projetado e descontado (dez anos)

Ano	Fluxo de caixa (R\$)	Fator $(1,146)^t$	Valor presente (R\$)	VP acumulado – I_0 (R\$)
0	(26.481.000)	1,000	(26.481.000)	(26.481.000)
1	6.511.422	1,146	5.681.900	(20.799.100)
2	6.511.422	1,313	4.958.300	(15.840.800)
3	6.511.422	1,505	4.326.400	(11.514.400)
4	6.511.422	1,725	3.775.300	(7.739.100)
5	6.511.422	1,977	3.294.300	(4.444.800)
6	6.511.422	2,265	2.874.100	(1.570.700)
7	6.511.422	2,596	2.508.300	937.600
8	6.511.422	2,975	2.188.600	3.126.200
9	6.511.422	3,409	1.909.700	5.035.900
10	6.511.422	3,907	1.666.500	6.702.400

Fonte: elaboração própria (2026). Fluxo constante (crescimento nominal de 0%); taxa de desconto de 14,6% a.a. (WACC). O VPL de dez anos ($\approx$ R\$ 6,7 milhões) equivale ao da Tabela 9, a menos de arredondamentos.

5.10 Análise de sensibilidade ao preço do álcool

Por concentrar metade do faturamento, o preço do álcool é a variável crítica do modelo. A Tabela 11 mostra o lucro líquido sob diferentes preços, mantidas constantes as demais premissas. A R\$ 6,00/L (álcool neutro *premium*, cenário adotado), o lucro líquido supera R\$ 6 milhões; a R\$ 2,80/L (etanol combustível *commodity*), a margem se comprime drasticamente.

Tabela 11 – Sensibilidade do lucro líquido ao preço do álcool

Preço do álcool	Posicionamento	Lucro líquido aprox.
R\$ 2,80/L	Combustível (CEPEA)	baixo / margem comprimida
R\$ 3,62/L	Neutro atacado (2025)	intermediário
R\$ 4,50/L	Cenário interm.	elevado
R\$ 6,00/L	Premium (adotado)	R\$ ~6,5 milhões

Fonte: elaboração própria (2026). Demais premissas constantes; varia apenas o preço do álcool.

Os resultados confirmam, em termos quantitativos, a hipótese formulada na introdução. Primeiro, o aproveitamento integral dos subprodutos como o DDG e silagem como alimentação, esterco e vinhaça como insumo do biodigestor, digestato como fertilizante e biogás como energia, os quais traduzem na prática os ciclos técnico e biológico descritos na seção 2.1, gerando cerca de R\$ 2,6 milhões anuais em custos evitados. Segundo a diversificação de receitas reproduz, em escala menor, o arranjo das plantas norte-americanas analisadas nas seções 2.2 e 2.3, nas quais os coprodutos atuam como amortecedor de preço. Terceiro, a baixa intensidade de carbono e o crédito associado concretizam as práticas ESG da seção 3.2.2.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho investigou a viabilidade de um modelo de economia circular aplicado à produção de etanol de milho, integrado ao confinamento de gado e à geração de biogás. A partir da pergunta de pesquisa formulada na introdução, buscou-se compreender de que forma os princípios da economia circular podem contribuir para a maximização de receitas e o aumento da eficiência produtiva no setor de etanol de milho.

A revisão da literatura demonstrou que a transição do modelo linear para o modelo circular, encontra respaldo tanto em experiências internacionais quanto em iniciativas brasileiras, e que a diversificação das fontes de receita por meio de coprodutos atua como fator de resiliência diante da volatilidade dos mercados. A metodologia de modelagem econômico-financeira, permitiu estruturar as receitas, os custos e os investimentos do empreendimento e avaliar sua viabilidade por meio de indicadores consagrados da engenharia econômica.

A proposição teórico-metodológica desenvolvida evidenciou que a integração entre a usina, o confinamento de gado e a geração de biogás reinsere resíduos no processo produtivo, reduz a dependência de insumos externos e amplia as fontes de receita. Somam-se a esses ganhos as práticas ESG e o acesso a financiamento subsidiado, especialmente por meio das linhas do Banco do Nordeste, que conferem ao projeto maior aderência às exigências de mercado e às prioridades de crédito climático da região.

Como limitações, registra-se que os resultados decorrem de projeções baseadas em premissas de preço e produtividade sujeitas a oscilações de mercado. Ainda assim, a análise econômico-financeira indica que o empreendimento é viável e diferenciado: os indicadores mostram-se consistentes, Valor Presente Líquido positivo, Taxa Interna de Retorno superior ao custo de capital, EVA positivo, Índice de Lucratividade acima da unidade e payback em torno de quatro anos. Sobretudo, o modelo demonstra que a integração circular eleva a eficiência, diversifica as receitas e reduz de forma expressiva a pegada de carbono, conferindo-lhe vantagem competitiva sobre o modelo linear tradicional.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Manoel Lázaro. *Etanol de cana x etanol de milho*. Piracicaba Engenharia, 2019. Disponível em: <https://www.piracicabaengenharia.com.br/etanol-de-cana-x-etanol-de-milho/>. Acesso em: 6 jun. 2026.
- APOLINÁRIO, Raíssa Helena Paiva; SOUZA, Maria Tereza Saraiva de. *Revisão teórica sobre modelos de economia circular*. In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE (ENGEMA), 23., 2021. Anais [...]. São Paulo: FEA/USP, 2021. Disponível em: <https://engemausp.submissao.com.br/23/anais/arquivos/261.pdf>. Acesso em: 6 jun. 2026.
- ASSAF NETO, Alexandre. *Finanças corporativas e valor*. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2014.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. *O que é cooperativa de crédito*. Brasília, DF: BCB, 2020.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. Histórico das taxas de juros (Selic). Brasília, 2026. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/cooperativacredito>. Acesso em: 6 jun. 2026.
- BANCO DO NORDESTE DO BRASIL. *Fundo Constitucional de Financiamento do Nordeste (FNE)*. Fortaleza: BNB, 2025. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/fne>. Acesso em: 6 jun. 2026.
- BANCO DO NORDESTE DO BRASIL. *FNE Verde: financiamento para o desenvolvimento sustentável*. Fortaleza: BNB, 2025. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/fne-verde>. Acesso em: 6 jun. 2026.
- BANCO DO NORDESTE DO BRASIL. *FNE Rural e Plano Safra: condições de financiamento da agropecuária*. Fortaleza: BNB, 2024. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/financiamentos/fne-rural>. Acesso em: 6 jun. 2026.
- BARDERI, Marcos Tavares. *Aplicação dos princípios da economia circular em uma indústria de veículos comerciais*. 2017. Dissertação (Mestrado em Administração de Empresas) - Centro Universitário FEI, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://repositorio.fei.edu.br/handle/FEI/205>. Acesso em: 6 jun. 2026.
- BASTOS, Bruno; LOPES, José; GONÇALVES, Ana; NEIVA, Kalil. Bioeconomia, economia circular e agroindústria 4.0: proposições para as transições tecnológicas emergentes. In: *COLÓQUIO ESTADUAL DE PESQUISA MULTIDISCIPLINAR*. Anais [...]. Taquara: FACCAT, 2022. Disponível em: <https://seer.faccat.br/index.php/coloquio/article/view/2375>. Acesso em: 30 set. 2024.
- BRITO, Henrique; RODRIGUES, Leonardo. *Impulsionando a implementação sistemática da economia circular na indústria brasileira: cases de sucesso na indústria química*. [S. l.]: ResearchGate, 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/376209715>. Acesso em: 30 set. 2024.

BURCHART-KOROL, Dorota; CZAPLICKA-KOLARZ, Krystyna; KRUCZEK, Marian. Model of eco-efficiency assessment of mining production processes. *Archives of Mining Sciences*, v. 60, n. 2, p. 455-464, 2015. Disponível em: <https://journals.pan.pl/publication/108229>. Acesso em: 30 set. 2024.

CARDEAL, Anna; PASSOS, Edson; ARAGÃO, Gabriel; MELO, Jonas; SANTOS, Natália; BOTAN, Maria. Estudo de viabilidade e dimensionamento de implementação de sistema de energia a biogás no Quilombo Ivaporunduva no Estado de São Paulo (SP). *Research, Society and Development*, v. 15, n. 5, e6115550952, 2026. DOI: 10.33448/rsd-v15i5.50952.

CEPEA/ESALQ-USP. Indicador do etanol e do boi gordo. Piracicaba, 2026. Disponível em: <https://cepea.org.br>.

CNA BRASIL. *Milho invade as indústrias de produção de etanol*. Brasília, DF: Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil, 2022. Disponível em: <https://cnabrasil.org.br/noticias/milho-invade-as-industrias-de-producao-de-etanol>. Acesso em: 6 jun. 2026.

CONAB. *Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar e etanol, safra 2025/26*. Brasília, DF: Companhia Nacional de Abastecimento, 2026. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 10 jul. 2026.

CONFEBRAS. *Cooperativismo de crédito: panorama e perspectivas*. Brasília, DF: Confederação Brasileira das Cooperativas de Crédito, 2020. Disponível em: <https://www.confefbras.coop.br>. Acesso em: 6 jun. 2026.

CONSILIUM. *Resíduos*. Bruxelas: Conselho da União Europeia, 2024. Disponível em: <https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/waste/>. Acesso em: 6 jun. 2026.

DATA BRIDGE MARKET RESEARCH. *Global Extra Neutral Alcohol (ENA) Market: industry trends and forecast to 2033*. [S. l.]: Data Bridge, 2025. Disponível em: <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-extra-neutral-alcohol-ena-market>. Acesso em: 10 mar. 2026.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *Towards the circular economy: an economic and business rationale for an accelerated transition*. Cowes: EMF, 2012. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>. Acesso em: 6 jun. 2026.

EMBRAPA. *Sistemas diferenciais de cultivo de milho*. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/sistemas-diferenciais-de-cultivo>. Acesso em: 6 jun. 2026.

ESTADÃO AGRO. *Nutrição animal: importância do milho para bovinos, suínos e aves*. São Paulo: Estadão, 2023. Disponível em: <https://agro.estadao.com.br/summit-agro/nutricao-animal-importancia-do-milho-para-bovinos-suinos-e-aves>. Acesso em: 6 jun. 2026.

FORBES BRASIL. *Conflito no Oriente Médio, mercados globais e reflexos no Brasil*. São Paulo, 4 mar. 2026. Disponível em:

<https://forbes.com.br/coluna/2026/03/conflito-no-orient-medio-mercados-globais-e-reflexos-no-brasil/>. Acesso em: 17 mar. 2026.

G1. *Produção de etanol do milho avança 34% com quebra histórica da cana: entenda prós e contras*. São Paulo, 26 abr. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/ribeirao-preto-franca/estacao-agro/noticia/2022/04/26/producao-de-etanol-do-milho-avanca-34percent-com-quebra-historica-da-cana-entenda-pros-e-contras.ghtml>. Acesso em: 6 jun. 2026.

G1. *Estreito de Ormuz: guerra no Oriente Médio coloca em risco rota vital do petróleo mundial*. São Paulo, 2 mar. 2026. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2026/03/02/estreito-de-ormuz-crise-no-orient-medio-petroleo.ghtml>. Acesso em: 17 mar. 2026.

GIL, Antônio Carlos. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

HOFSTRAND, Don. *Tracking ethanol profitability*. Ames: Ag Decision Maker, Iowa State University Extension, 2023. Disponível em: <https://www.extension.iastate.edu/agdm/energy/html/d1-10.html>. Acesso em: 6 jun. 2026.

IMARC GROUP. *Exploring the profit potential of ethanol manufacturing plant: a detailed cost model study*. [S. l.]: IMARC, 2025. Disponível em: <https://www.imarcgroup.com/insight/exploring-the-fascinating-profit-potential-of-ethanol-manufacturing-plant-a-detailed-cost-model-study>. Acesso em: 6 jun. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Genébra: IPCC, 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/> . Acesso em: 6 jun. 2026

IRWIN, Scott. Another strong year for ethanol production profits in 2023. *Farmdoc Daily*, Urbana, v. 14, n. 29, 2024. University of Illinois. Disponível em: <https://farmdocdaily.illinois.edu/2024/02/another-strong-year-for-ethanol-production-profits-in-2023.html>. Acesso em: 6 jun. 2026.

IRWIN, Scott. 2024 ethanol production profits: regression to the mean? *Farmdoc Daily*, Urbana, v. 15, 2025. University of Illinois. Disponível em: <https://farmdocdaily.illinois.edu/2025/03/2024-ethanol-production-profits-regression-to-the-mean.html>. Acesso em: 6 jun. 2026.

ISTOÉ DINHEIRO. *Entenda impactos da guerra no Irã e do fechamento do Estreito de Ormuz ao comércio mundial*. São Paulo, 2 mar. 2026. Disponível em: <https://istoedinheiro.com.br/guerra-no-ira-petroleo-comercio-ormuz>. Acesso em: 17 mar. 2026.

KORHONEN, Jouni; HONKASALO, Antero; SEPPÄLÄ, Jyri. Circular economy: the concept and its limitations. *Ecological Economics*, v. 143, p. 37-46, 2018. Disponível

em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800916300325>. Acesso em: 30 set. 2024.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. *Fundamentos de metodologia científica*. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MOVIMENTO ECONÔMICO. *Etanol de cereais: primeira usina do Nordeste projeta dobrar produção*. Maceió, 23 mar. 2024. Disponível em: <https://movimentoeconomico.com.br/estados/alagoas/2024/03/23/etanol-de-cereais-primeira-usina-do-nordeste-projeta-dobrar-producao/>. Acesso em: 21 ago. 2025.

NERY, Suzana; FREIRE, Amanda. *A economia circular e o cenário no Brasil e na Europa*. Rio de Janeiro: ABEPRO, 2017. Disponível em: https://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_248_434_33222.pdf. Acesso em: 1 set. 2024.

NEXT MOVE STRATEGY CONSULTING. *Extra Neutral Alcohol Market: global opportunity analysis and industry forecast, 2024-2030*. [S. l.]: Next Move, 2026. Disponível em: <https://www.nextmsc.com/report/extra-neutral-alcohol-market>. Acesso em: 6 jun. 2026.

NOVACANA. *Etanol de milho mais rentável que cana, ainda com desafios*. Curitiba, 2022. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/etanol-milho-mais-rentavel-cana-ainda-desafios-frente-201022>. Acesso em: 6 jun. 2026.

NOVACANA. *Produção de etanol de milho no Brasil deve crescer 36,7% em 2023/24*. Curitiba, 2023. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/producao-etanol-milho-brasil-crescer-36-7-2023-24-unem-080323>. Acesso em: 6 jun. 2026.

NOVACANA. *Fornecimento total de etanol em 2023: 20,7% das usinas processam milho*. Curitiba, 2024. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/fornecimento-total-etanol-2023-20-7-usinas-processam-milho-300424>. Acesso em: 6 jun. 2026.

MF RURAL. Cotações de DDG/WDG. 2026. Disponível em: [\[https://www.mfrural.com.br\]\(https://www.mfrural.com.br\)](https://www.mfrural.com.br). Acesso em: 6 jun. 2026.

O TEMPO. *Crise no Estreito de Ormuz e seus impactos na economia global*. Belo Horizonte, 9 mar. 2026. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/economia/2026/3/9/crise-no-estrito-de-ormuz-afeta-exportacoes-brasileiras>. Acesso em: 17 mar. 2026.

OPEB - OBSERVATÓRIO DE POLÍTICA EXTERNA E DA INSERÇÃO INTERNACIONAL DO BRASIL. *Rotas energéticas e disputas geopolíticas: o Estreito de Ormuz*. [S. l.], 12 mar. 2026. Disponível em: <https://opeb.org/2026/03/12/rotas-energeticas-e-disputas-geopoliticas-o-estrito-de-ormuz/>. Acesso em: 17 mar. 2026.

PARLAMENTO EUROPEU. *Como alcançar a economia circular na UE até 2050*. Bruxelas, 2021. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20210128STO96607/como-alcancar-a-economia-circular-na-ue-ate-2050>. Acesso em: 30 set. 2024.

PECUÁRIA.COM.BR. Cotação da arroba do boi gordo. 2026. Acesso em: 6 jun. 2026.
link

PORTAL DO COOPERATIVISMO FINANCEIRO. *Cooperativas dobram participação no crédito rural e ganham protagonismo no agro*. [S. l.], 2026. Disponível em: <https://cooperativismodecredito.coop.br>. Acesso em: 10 jul. 2026.

SICOOB. *Crédito rural e agronegócio: linhas de financiamento*. Recife: Sicoob Pernambuco, 2026. Disponível em: <https://www.sicoob.com.br/web/sicoobpernambuco>. Acesso em: 10 jul. 2026.

SILVA, Haroldo José Torres da; SANTOS, Peterson Felipe Arias; NOGUEIRA JUNIOR, Enilson Carlos; VIAN, Carlos Eduardo de Freitas. Aspectos técnicos e econômicos da produção de etanol de milho no Brasil. *Revista de Política Agrícola*, Brasília, DF, v. 29, n. 4, p. 142-159, 2020. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/1567>. Acesso em: 6 jun. 2026.

SUÁREZ-EIROA, Brais; FERNÁNDEZ, Enrique; MÉNDEZ-MARTÍNEZ, Gabriel; SOTO-OÑATE, David. Operational principles of circular economy for sustainable development: linking theory and practice. *Journal of Cleaner Production*, v. 214, p. 952-961, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618337612>. Acesso em: 30 set. 2024.

UNIÃO NACIONAL DO ETANOL DE MILHO (UNEM). *Produção de etanol de milho: safras 2024/25 e 2025/26*. [S. l.]: UNEM, 2025. Disponível em: <https://etanoldemilho.com.br>. Acesso em: 10 jul. 2026.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOENERGIA (UNICA). *Produção de etanol de milho no Brasil: safra 2024/25*. São Paulo: UNICA, 2025. Disponível em: <https://unica.com.br>. Acesso em: 10 jul. 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. *Diferenças entre o etanol de milho e de cana-de-açúcar*. Viçosa: Centro de Conhecimento em Bioenergia, [2023]. Disponível em: <https://ccbioenergia.ufv.br/diferencas-entre-o-etanol-de-milho-e-de-cana-de-acucar/>. Acesso em: 6 jun. 2026.

UOL ECONOMIA. *Por que fechamento do Estreito de Ormuz mexe com preço do petróleo mundial?* São Paulo, 1 mar. 2026. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/redacao/2026/03/01/fechamento-do-estrito-de-ormuz-trava-rota-de-petroleo-e-pressiona-precos.htm>. Acesso em: 17 mar. 2026.

VERDE.AG. *Ciclo do milho*. [S. l.]: Verde Agritech, [2023]. Disponível em: <https://blog.verde.ag/pt/nutricao-de-plantas/ciclo-do-milho/>. Acesso em: 6 jun. 2026.

VERGARA, Sylvia Constant. *Projetos e relatórios de pesquisa em administração*. 16. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

VIEIRA FILHO, José Rodolfo; QUEIROZ, Stefânia Aparecida Belute; LIMA, Lucas Mateus. *A utilização de resíduos da uva no desenvolvimento de novos produtos, no contexto da economia circular*. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso

(Bacharelado) - Libertas Faculdades Integradas, São Sebastião do Paraíso, 2023.

Disponível em:

<https://revistaic.pesquisaextensaolibertas.com.br/index.php/riclibertas/article/view/126>

6. Acesso em: 30 set. 2024.

ANEXOS

Premissas

Tabela 1 – Premissas técnicas e de mercado adotadas no modelo

Item	Unidade	Valor adotado	Faixa de mercado (2025/26)	Fonte
Milho processado na safra	t/ano	4.700	60% 1a + 110% 2a safra (BR)	Abramillho/UNEM, 2026
Rendimento de etanol	L/t	400	370 - 460 L/t	CNA/Almeida, 2019; NovaCana
Producao de etanol (alcohol)	L/ano	1.880.000	-	Calculo
Preco do alcohol de cereais	R\$/L	6	Combustivel 2,20-3,00; neutro atacado ~3,62; varejo 14-23	CEPEA 2026; 21Quimica 2025
WDG produzido (50% umidade)	t/ano	1.900	-	Modelo operacional
WDG vendido (excedente)	t/ano	1.275	-	Modelo operacional
Preco do WDG (umido 50%)	R\$/t	500	WDG umido 400-550; DDG seco 830-1.430	MF Rural; Scot; Exame 2026
Animais terminados	cab/ano	1.710	570 cab x 3 ciclos de 4 meses	Modelo operacional
Preco do boi magro (entrada)	R\$/cab	4.000	animal ~400 kg (reposicao)	Modelo; CEPEA reposicao
Preco do boi gordo (saida)	R\$/cab	6.000	@ 320-360 (jun/26) -> ~5.500-6.200/cab	Pecuaría.com.br; CEPEA; B3
Producao de biogas	m3/dia	850	-	Modelo (biodigestor)
Conversao biogas -> energia	kWh/m3	2,10	1,8 - 2,2 kWh/m3	Literatura biodigestao
Dias de operacao	dias/ano	365	-	Premissa
Energia gerada	kWh/ano	651.525	~652 MWh/ano	Calculo
Tarifa / credito de energia	R\$/kWh	60,0%	CELPE BT ~0,90; credito GD menor	ANEEL/CELPE 2026
Fonte: elaboracao propria (2026), com base em CEPEA/Esalq, Pecuaría.com.br, MF Rural, Scot Consultoria, Exame/UNEM e ANEEL.				

Tabela 2 – Tributos sobre vendas por atividade (validar com contador / SEFAZ-PE)

Atividade	PIS	Cofins	ICMS	Funrural/Outros	Total
Alcool de cereais (industrial - PE)	0,7%	3,0%	23,0%	0	26,7%
WDG (insumo/racao agropecuaria)	0,7%	3,0%	0	0	3,6%
Boi gordo (pecuaria)	0,7%	3,0%	0	1,5%	5,1%
Biogas (credito/compensacao de energia)	0	0	0	0	0
Credito de carbono (sem ICMS)	0,7%	3,0%	0	0	3,6%
Oleo de milho (industrial)	0,7%	3,0%	12,0%	0	15,7%

Atividade	PIS	Cofins	ICMS	Funrural/Outros	Total
Fonte: elaboracao propria (2026). Alcool nao-combustivel p/ industrializacao (NBM/SH 2207 e 2208); ICMS 23% (Lei 15.730/2016, art. 15, IV, 'a'). Gado vivo: diferimento; insumo/racao agropecuaria: isencao/reducao (Conv. ICMS 100/97). A racao de uso interno (engorda) NAO e tributada por nao haver venda. ICMS nao-cumulativo (creditos de insumos reduzem o efetivo). Validar com SEFAZ-PE/contador.					

Tabela 3 – IRPJ e CSLL – Lucro Presumido (venda de produtos/pecuaria)

Parametro	Aliquota
Presuncao IRPJ (8%)	8,0%
Aliquota IRPJ (15%)	15,0%
Adicional IRPJ (10% acima de R\$ 240 mil/ano)	10,0%
Presuncao CSLL (12%)	12,0%
Aliquota CSLL (9%)	9,0%
Fonte: elaboracao propria com base no RIR/2018. Atividades enquadradas como venda de produtos/pecuaria (presuncao 8%/12%).	

Tabela 2c – Parametros do oleo de milho (coproduto da destilaria)

Parametro	Valor
Rendimento de oleo (kg/t de milho)	15
Preco do oleo de milho (R\$/t)	5.600
Fonte: elaboracao propria (2026). DCO ~ R\$ 5,60/kg e ~15 kg/t de milho (BBM/especialistas, 2025/26); editaveis.	

Creditos de Carbono

Tabela 15 – Fatores de emissao (CA-GREET adaptado ao Brasil)

Fator	Valor	Unidade	Fonte
Fator de emissao da rede (SIN)	10,9%	kgCO ₂ e/kWh	LowCarbonPower (2024)
Diesel - CO ₂ combustao (TTW)	2,68	kgCO ₂ /L	EPA (2020)
Diesel - poder calorifico (LHV)	35,80	MJ/L	IPCC/EPA
Diesel - upstream (WTT)	13	gCO ₂ e/MJ	NTM/JRC
Gas natural - CO ₂	50,30	gCO ₂ /MJ	EPA
N ₂ O direto (EF1, clima umido)	1,6%	kg N ₂ O-N/kg N	IPCC 2019
N ₂ O indireto (volat.+lixiv.)	0,3%	kg N ₂ O-N/kg N	IPCC 2006/2019
GWP do N ₂ O (AR6)	273	kgCO ₂ e/kg N ₂ O	IPCC AR6
Conversao N ₂ O-N -> N ₂ O	1,57	kg/kg	Estequiometria 44/28
Transporte rodoviario	62	gCO ₂ e/t.km	Rodoviario BR
Energia do etanol (LHV)	21,10	MJ/L	CA-GREET Config
<i>Fonte: elaboracao propria (2026) a partir de MCTI/SIRENE, LowCarbonPower, IPCC 2019 Refinement e EPA, conforme base CA-GREET_BR.</i>			

Tabela 16 – Dados de atividade anuais do projeto

Parametro	Valor	Unidade
Producao de etanol (alcohol neutro)	1.880.000	L/ano
Milho processado	4.700	t/ano
Nitrogenio aplicado (fertilizante)	21	t N/ano
Diesel agricola	16.000	L/ano
Eletricidade da REDE - agro	0	kWh/ano
Distancia media de transporte do milho	30	km
Gas natural FOSSIL no processo	0	MMBtu/ano
Eletricidade da REDE - planta	0	kWh/ano
Credito de co-produtos (deslocamento)	0	tCO ₂ e/ano
<i>Fonte: elaboracao propria (2026). GN fossil e eletricidade da rede = 0 porque a planta usa biogas autogerado (autossuficiencia energetica).</i>		

Tabela 17 – Emissoes por etapa e intensidade de carbono (CI)

Etapa / emissao	tCO ₂ e/ano
Energia total do etanol (MJ/ano)	39.668.000
N ₂ O agricola (direto + indireto)	173,42
Diesel - combustao (TTW)	42,88

Etapa / emissao	tCO2e/ano
Diesel - upstream (WTT)	7,45
Eletricidade da rede - agro	0
Transporte do milho	8,74
Gas natural fossil (processo)	0
Eletricidade da rede - planta	0
(-) Credito de co-produtos	0
Emissoes liquidas totais	232,49
Intensidade de Carbono - CI (gCO2e/MJ)	5,86
<i>Fonte: elaboracao propria (2026). CI = emissoes liquidas (gCO2e) / energia do etanol (MJ). CO2 biogenico (biogas/biomassa) considerado neutro.</i>	

Tabela 18 – Estimativa de credito de carbono

Item	Valor
CI de referencia (baseline - gasolina WTW)	94
CI do projeto	5,86
Reducao de CI vs baseline (gCO2e/MJ)	88,14
Emissoes evitadas (tCO2e/ano)	3.496,30
Preco do carbono (R\$/tCO2e)	120
Receita potencial de credito de carbono (R\$/ano)	419.556,04
<i>Fonte: elaboracao propria (2026). Preco e baseline editaveis. Baseline padrao = gasolina (deslocamento de combustivel fossil).</i>	

Aplicabilidade: se o alcool for vendido como combustivel, aplica-se o RenovaBio (CBIO). Como o produto principal e alcool neutro (alimenticio/farmaceutico), o atributo de baixo carbono sustenta credito voluntario e/ou diferenciacao de produto; a captura de metano no biodigestor e um fluxo de credito adicional.

Consumo interno = custo evitado (NAO tributado) | Venda = receita tributada

Tabela 3a – Cenário de energia do biogas: autoconsumo x injeção na rede

Item	Valor
Demanda eletrica - irrigacao (kWh/ano)	192.000
Demanda eletrica - destilaria/industria (kWh/ano)	285.000
Demanda eletrica - confinamento e geral (kWh/ano)	80.000
Demanda eletrica total (kWh/ano)	557.000
Geracao de biogas (kWh/ano)	651.525
Autoconsumo (MIN geracao; demanda)	557.000
Excedente injetado na rede (MAX 0; ger-dem)	94.525
Deficit importado da rede (MAX 0; dem-ger)	0
Tarifa de varejo - autoconsumo/import. (R\$/kWh)	90,0%
Tarifa de credito - injecao na rede (R\$/kWh)	60,0%
Custo evitado (autoconsumo x varejo)	501.300
Receita de injecao (excedente x credito)	56.715
Custo de energia importada (deficit x varejo)	0
Fonte: elaboracao propria (2026). Demandas editaveis. Autoconsumo = custo evitado (nao tributado); excedente injetado = receita (credito/compensacao); deficit = energia comprada da rede.	

Tabela 3b – Producao, consumo interno e venda por coproduto

Coproduto	Producao total	Unid	Consumo interno (nao trib.)	Venda	Preco unit. (R\$)	Receita de venda (R\$)	Custo evitado (R\$)
WDG (grao de destilaria)	1.900	t/ano	625	1.275	500	637.500	312.500
Energia (biogas)	651.525	kWh/ano	557.000	94.525	60,0%	56.715	334.200
Silagem de milho	7.200	t/ano	7.200	0	250	0	1.800.000
Biofertilizante (digestato)	0	t/ano	0	0	0	0	0
Oleo de milho (DCO)	70,50	t/ano	0	70,50	5.600	394.800	0
Total						1.089.015	2.446.700
<i>Fonte: elaboracao propria (2026). So a coluna 'Venda' gera receita e tributos. A energia segue o cenario acima: autoconsumo no consumo interno e excedente na venda.</i>							

Receitas

Receita bruta anual por produto e tributos sobre vendas

Tabela 3 – Composicao da receita bruta anual e impostos sobre vendas por atividade

Produto	Quantidade	Unidade	Preco unitario	Receita (R\$)	Impostos s/ vendas (R\$)
Alcool de cereais (etanol fino)	1.880.000	L/ano	6	11.280.000	3.006.120
WDG vendido (excedente, nao usado na engorda)	1.275	t/ano	500	637.500	23.268,75
Boi gordo terminado	1.710	cab/ano	6.000	10.260.000	528.390
Biogas vendido/creditado na rede	94.525	kWh/ano	60,0%	56.715	0
Oleo de milho (DCO)	70,50	t/ano	5.600	394.800	61.786,20
Credito de carbono (potencial)	3.496,30	tCO2e/ano	120	419.556,04	15.313,80
Total				23.048.571,04	3.634.878,75
Fonte: elaboracao propria (2026). Quantidades e precos vinculados a Premissas; impostos por atividade conforme a matriz tributaria. ICMS nao-cumulativo (efetivo menor apos creditos).					

Obs.: o biogas tambem pode ser usado internamente (autossuficiencia energetica); neste caso a linha representa custo evitado, nao venda.

Investimentos

Investimento inicial (CAPEX) e capital de giro

Tabela 4 – Investimento total do projeto

Item	Valor (R\$)	Grupo
Equipamentos de colheita e plantio	3.701.000	Imobilizado
Equipamentos de manejo e irrigacao	4.180.000	Imobilizado
Microdestilaria e biodigestor (12.000 L/dia)	4.500.000	Imobilizado
Usina de geracao de energia a biogas (1.000 kWh)	2.500.000	Imobilizado
Construcoes (galpoes, casas, escritorios, cercas)	500.000	Imobilizado
Transformador trifasico de alta (1.000 kWh)	500.000	Imobilizado
Fios, cabos e postes	200.000	Imobilizado
Estrutura do confinamento	850.000	Imobilizado
Secador de graos com moega	1.500.000	Imobilizado
Balanca ensacadeira automatica	250.000	Imobilizado
Armazem / galpao de graos	200.000	Imobilizado
Projetos de viabilidade tecnica e economica	1.000.000	Pre-operacional
Despesas diversas do periodo de montagem	600.000	Pre-operacional
Capital de giro inicial (inclui financiamento do gado)	6.000.000	Capital de giro
Investimento total	26.481.000	
<i>Fonte: elaboracao propria (2026). Itens reconciliados a partir do detalhamento da planilha original.</i>		

Nota: a compra anual de boi magro (R\$ 6.840.000) e custo operacional recorrente (ver DRE), financiado via capital de giro/prazo com fornecedor, e nao integra o imobilizado.

Custos Operacionais

Custos e despesas operacionais anuais (OPEX)

Tabela 5 – Quadro de pessoal e folha anual

Funcao	Qtd	Salario (R\$)	Custo mensal	Custo anual
Gerente Operacional e Agricola	1	15.000	15.000	180.000
Secretario Gerencial	1	5.000	5.000	60.000
Lider Agricola	1	4.000	4.000	48.000
Lider Industrial	2	4.500	9.000	108.000
Lider de Oficina e Mecanico	1	5.000	5.000	60.000
Contador	1	5.000	5.000	60.000
Administrativo	3	2.500	7.500	90.000
RH	1	3.200	3.200	38.400
Enfermaria	1	5.000	5.000	60.000
Vigilante	4	3.000	12.000	144.000
Mecanico	1	3.500	3.500	42.000
Ajudante de Mecanico	1	2.200	2.200	26.400
Motorista de Caminhao	2	3.500	7.000	84.000
Operador de Trator	4	3.500	14.000	168.000
Operador de Irrigacao	2	3.000	6.000	72.000
Operador de Caldeira	2	3.000	6.000	72.000
Misturador de Caldo	2	2.200	4.400	52.800
Ajudante de Destilaria	4	1.800	7.200	86.400
Operador de Destilaria	2	3.200	6.400	76.800
Operador de Engenho	2	2.400	4.800	57.600
Subtotal (salarios)	38		132.200	1.586.400
Encargos sociais (80%)			80,0%	1.269.120
Custo total da folha				2.855.520
<i>Fonte: elaboracao propria (2026). Encargos estimados em 80% sobre a folha.</i>				

Premissas da lavoura de milho (producao propria)

Area de milho plantada (ha)	160	editavel - rever p/ produzir 4.700 t
Custo de sementes (R\$/ha)	1.000	milho hibrido; editavel

Tabela 6 – Custos e despesas operacionais anuais consolidados

Rubrica	Valor anual (R\$)
Compra de boi magro (custo da mercadoria)	6.840.000

Rubrica	Valor anual (R\$)
Sementes de milho (area x R\$/ha)	160.000
Material de colheita e irrigacao	960.000
Material de uso da microdestilaria	1.080.000
Folha de pagamento (com encargos)	2.855.520
Custo operacional total	11.895.520
<i>Fonte: elaboracao propria (2026). Boi magro reclassificado como custo recorrente. Sementes incluidas (lavoura propria). Adubacao feita com adubo organico (esterco/digestato do gado), sem custo de NPK industrial - fechamento do ciclo (economia circular).</i>	

DRE

Demonstracao do Resultado do Exercicio (DRE) - anual

Tabela 7 – Demonstracao do resultado do exercicio (modelo integrado)

Conta	Valor (R\$)
(=) Receita Bruta Operacional	23.048.571,04
(-) Impostos sobre vendas (por atividade)	-3.634.878,75
(=) Receita Liquida	19.413.692,30
(-) Custos e despesas operacionais	-11.895.520
(=) Lucro Operacional (EBIT)	7.518.172,30
Base presumida IRPJ	1.843.885,68
Base presumida CSLL	2.765.828,53
(-) IRPJ (15% + adicional 10%)	-436.971,42
(-) CSLL (9%)	-248.924,57
(=) Lucro Liquido do Exercicio	6.832.276,31
Margem liquida	29,6%
Margem operacional	32,6%

Fonte: elaboracao propria (2026). Tributos pelo Lucro Presumido; aliquotas a confirmar com contador. Investimentos (CAPEX) na o integram a DRE.

Nota: Nesta versão final da modelagem, foi incorporada a receita proveniente da comercialização do óleo de milho (DCO), coproduto gerado no processo de produção do etanol de milho. Considerou-se rendimento médio de 15 kg por tonelada de milho processado e preço de mercado de R\$ 5.600/t, resultando em receita adicional anual de R\$ 394.800,00. Sua inclusão reforça a aderência do modelo aos princípios da economia circular, ao ampliar o aproveitamento econômico dos coprodutos industriais

Tabela 8 – Indicadores de retorno (simplificados)

Indicador	Valor
Investimento total (CAPEX + giro)	26.481.000
Lucro liquido anual	6.832.276,31
Payback simples (anos)	3,88
Retorno sobre investimento (ROI a.a.)	25,8%
Fonte: elaboracao propria (2026). Payback simples (sem desconto), para referencia.	

Sensibilidade

Análise de sensibilidade do lucro líquido

Variável crítica: preço de venda do álcool de cereais (R\$/L)

Tabela 9 – Lucro líquido anual conforme o preço do álcool (demais premissas constantes)

Cenário / preço (R\$/L)	Combustível (CEPEA 2026)	Neutro atacado (jul/25)	Cenário intermediário	Premium adotado (modelo)
Preço do álcool (R\$/L)	2,80	3,62	4,50	6
Receita do álcool (R\$)	5.264.000	6.805.600	8.460.000	11.280.000
Demais receitas (R\$)	11.768.571,04	11.768.571,04	11.768.571,04	11.768.571,04
Receita bruta (R\$)	17.032.571,04	18.574.171,04	20.228.571,04	23.048.571,04
Lucro líquido (R\$)	2.604.833,11	3.688.115,43	4.850.662,31	6.832.276,31
Margem líquida	15,3%	19,9%	24,0%	29,6%
<i>Fonte: elaboração própria (2026). Mantidas constantes: WDG R\$ 520/t, boi gordo R\$ 6.000/cab, biogás e custos. So varia o preço do álcool.</i>				

Leitura: o resultado do projeto é altamente sensível ao preço do álcool. A viabilidade só se confirma se o produto for comercializado como álcool de cereais premium (alimentício/farmacêutico), não como etanol combustível.

Lucro Presumido

Apuracao tributaria - regime de Lucro Presumido (anual)

Tabela 9 – Apuracao de tributos pelo Lucro Presumido

Conta	Valor (R\$)
Receita Bruta Operacional	23.048.571,04
Tributos sobre o faturamento (por atividade)	
Alcool de cereais	3.006.120
WDG (insumo/racao)	23.268,75
Boi gordo (PIS/Cofins + Funrural)	528.390
Biogas (credito de energia)	0
Oleo de milho (DCO)	61.786,20
Credito de carbono (sem ICMS)	15.313,80
Subtotal sobre faturamento	3.634.878,75
Imposto de Renda (IRPJ)	
Base presumida (8% da RB)	1.843.885,68
IRPJ (15%)	276.582,85
Adicional de IRPJ (10% acima de R\$ 240 mil)	160.388,57
IRPJ devido	436.971,42
Contribuicao Social (CSLL)	
Base presumida (12% da RB)	2.765.828,53
CSLL devida (9%)	248.924,57
Carga tributaria total	432.077.473,4%
Carga tributaria sobre a receita bruta	18,7%

Fonte: elaboracao propria (2026), conforme RIR/2018 (Lucro Presumido). Aliquotas vinculadas a aba Premissas; confirmar ICMS/PE e enquadramento com contador.

ROI e WACC

Retorno e custo de capital (ROI, ROE, WACC e EVA)

Tabela 10 – Estrutura e custo de capital

Parametro	Valor
Capital investido total	26.481.000
Participacao de capital de terceiros (Wd)	40,0%
Participacao de capital proprio (We)	60,0%
Custo da divida - Kd (credito subsidiado a.a.)	10,0%
Aliquota para beneficio fiscal (t)	34,0%
Custo da divida liquido - Ki = Kd(1-t)	6,6%
Taxa livre de risco - Rf (Selic, jun/26)	14,2%
Beta (b)	1
Retorno de mercado - Rm	20,0%
Custo do capital proprio - Ke = Rf + b(Rm-Rf)	20,0%
WACC (custo medio ponderado de capital)	14,6%
<i>Fonte: elaboracao propria (2026). Rf = Selic (BCB, jun/2026); Kd = credito rural subsidiado.</i>	

Tabela 11 – Indicadores de rentabilidade e geracao de valor

Indicador	Valor
NOPAT (lucro liquido operacional)	6.832.276,31
ROI = Lucro liquido / Capital investido	25,8%
ROE = Lucro liquido / Capital proprio	43,0%
ROA = Lucro liquido / Ativo total	25,8%
Custo do capital investido (WACC x Capital)	387.681.840,0%
EVA = NOPAT - (WACC x Capital)	295.545.790,8%

EVA > 0 cria valor; = 0 mantem; < 0 destroi. ROI deve superar o WACC.

Fonte: elaboracao propria (2026).

Payback e VPL

Fluxo de caixa, Payback, VPL, TIR e IL

Tabela 12 – Premissas do fluxo de caixa

Investimento inicial (ano 0)	26.481.000
Fluxo de caixa anual (lucro liquido)	6.832.276,31
Crescimento anual do FCF (g)	0
Taxa minima de atratividade (TMA = WACC)	14,6%

Investimento inicial (ano 0)	26.481.000
Horizonte do projeto (anos)	10
<i>Fonte: elaboracao propria (2026). FCF aproximado pelo lucro liquido (regime de Lucro Presumido, sem itens nao-caixa relevantes).</i>	

Tabela 13 – Fluxo de caixa descontado e payback

Ano	FCF nominal	Fator desconto	FCF descontado	Saldo simples	Saldo descontado
0	-26.481.000	1	-26.481.000	-26.481.000	-26.481.000
1	6.832.276,31	87,2%	5.959.766,49	-19.648.723,69	-20.521.233,51
2	6.832.276,31	76,1%	5.198.679,77	-12.816.447,38	-15.322.553,73
3	6.832.276,31	66,4%	4.534.786,96	-5.984.171,07	-10.787.766,77
4	6.832.276,31	57,9%	3.955.676,00	848.105,23	-6.832.090,77
5	6.832.276,31	50,5%	3.450.519,89	7.680.381,54	-3.381.570,89
6	6.832.276,31	44,1%	3.009.874,29	14.512.657,85	-371.696,60
7	6.832.276,31	38,4%	2.625.500,95	21.344.934,16	2.253.804,36
8	6.832.276,31	33,5%	2.290.213,67	28.177.210,47	4.544.018,03
9	6.832.276,31	29,2%	1.997.743,95	35.009.486,78	6.541.761,98
10	6.832.276,31	25,5%	1.742.623,83	41.841.763,08	8.284.385,81

Tabela 14 – Indicadores de viabilidade

Indicador	Valor
VPL - Valor Presente Líquido	8.284.385,81
TIR - Taxa Interna de Retorno	22,4%
IL - Índice de Lucratividade	1,31
Payback simples (anos)	3,88
VPL positivo?	VIABEL
<i>Fonte: elaboracao propria (2026). VPL e TIR sobre fluxo de 10 anos descontado a TMA = WACC.</i>	

Investimentos detalhados (CAPEX)

Grupo / item	Valor (R\$)
Equipamentos para colheita	3.695.000
01 colhedora de silagens ATM 1.10 (2 linhas)	110.000
01 colhedora de milho em grãos	250.000
04 tratores de 100 cv 4x4 cabinados	1.200.000
01 plantadeira de precisão (5 linhas)	180.000
01 trator de 120 cv 4x4 cabinado	400.000
01 caminhão basculante	400.000
01 meio caminhão 3/4	150.000
01 grade aradora hidráulica 18x28	90.000
01 enxada rotativa de 2,2 m	180.000
01 pulverizador de barra de 16 m (2.000 L)	150.000
EPIs	25.000

03 motos	60.000
01 pick-up 4x4	250.000
02 veículos utilitários	250.000
Equipamentos para manejo e irrigação	4.180.000
Preparo de solo e plantio (160 ha)	480.000
Sistema de irrigação por gotejamento (160 ha)	3.200.000
4 poços de 200 m	500.000
Microdestilaria e construção civil	10.950.000
Microdestilaria e biodigestor (12.000 L/dia)	4.500.000
Usina de biogás	2.500.000
Construções (galpões, casas, escritórios, balança, cercas)	500.000
Transformador trifásico 1.000 kWh	500.000
Fios, cabos e postes	200.000
Estrutura do confinamento	800.000
Secador de grãos com moega	1.500.000
Balança de gado	25.000
Armazém de grãos	200.000
Despesas pré-operacionais (projetos e montagem)	1.600.000
Capital de giro inicial	6.000.000
Investimento total	26.481.000

Fonte: elaboração própria (2026).

Custos e despesas operacionais detalhados (OPEX)

Rubrica	Valor anual (R\$)
Material de colheita e irrigação	960.000
Peças de reposição, lâminas e parafusos	30.000
Óleos, lubrificantes e filtros	100.000
Material de desgaste	30.000
Manutenção de irrigação	500.000
Corretivos de solo e defensivos	250.000
Combustível e material de manutenção	50.000
Material da microdestilaria (R\$ 90.000/mês)	1.080.000
Folha de pagamento (com encargos de 80%)	2.855.520
Compra de boi magro	6.840.000
Sementes de milho	160.000
Custo operacional total	11.895.520

Fonte: elaboração própria (2026). A adubação não gera custo, por ser orgânica (esterco e digestato).