

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCar
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIAS - CCET
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA - DEQ

Felipe Bressani Ferro

Estudo Técnico-Econômico da Produção de Etileno com
zero emissões de Escopo 1 e 2 de CO₂

São Carlos -SP

2025

Felipe Bressani Ferro

Estudo Técnico-Econômico da Produção de Etileno com 0 emissões de Escopo 1 e
2 de CO₂

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Universidade Federal
de São Carlos, para obtenção do
título de bacharel em Engenharia
Química.

Orientador: Prof. Dr. João Paulo
Silva Queiroz

São Carlos - SP
2025

AGRADECIMENTO

Primeiramente gostaria de agradecer a minha família por todo suporte e apoio em todos os momentos da minha vida. Em especial, agradecer imensamente aos meus pais, Adriana e Paulo, por todo esforço e dedicação para me fazer chegar até esse momento. À minha falecida mãe, agradeço por tudo e que sem dúvidas fez muita parte em todas as conquistas da minha vida. Ao meu pai, agradeço todo apoio e ajuda no pior momento da minha vida, me fazendo levantar a cabeça e seguir em frente.

Aos meus amigos de Atibaia que ao longo desses anos nunca deixaram de lado nossa amizade, mesmo por muito tempo sem nos vermos ou a longa distância. Aos meus amigos de São Carlos, que nos piores e melhores momentos da graduação sempre estiveram comigo, compartilhando memórias e histórias que sempre nos recordamos. E também meus amigos de Campinas, que nessa reta final tem sido amigos muito queridos e que estão juntos nesses momentos finais.

Por fim, agradeço a todos os funcionários e professores do DEQ e também de outros departamentos que fizeram parte dessa história na perseguição do meu sonho, mostrando caminhos e compartilhando uma parte dos seus conhecimentos para finalizar esse ciclo. E também ao meu orientador, João Paulo, pelo apoio nesse último momento da graduação.

Banca Examinadora

Orientador: Prof. Dr. João Paulo Silva Queiroz, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar)

Convidado: Prof. Dr. Felipe Fernando Furlan, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar)

Professor da disciplina: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar)

RESUMO

Dado o contexto mundial de preocupações com as alterações climáticas e os impactos causados pela ação humana na atmosfera, faz-se necessária uma reflexão sobre o desenvolvimento de tecnologias que reduzam o impacto das indústrias com relação à emissão de gases do efeito estufa, como o CO₂. Sabendo disso, e com o desenvolvimento de incentivos para empresas que investem em tecnologias para redução de emissões de CO₂, como os créditos de carbono, estudos são feitos para desenvolver novas tecnologias capazes de atender a esta demanda. As indústrias de etileno, fonte de uma grande parte das emissões de carbono, já que, em média, emitem 0,5 kg de dióxido de carbono para cada kg de etileno produzido, têm-se tornado foco para redução das emissões. Assim, desenvolveu-se uma análise para construção de uma planta de produção de etileno que utilizará hidrogênio em substituição ao gás natural como combustível, que pretende poupar cerca de 1 milhão de toneladas anuais de CO₂ de escopo 1 e 2, com um investimento inicial de 3,5 bilhões de dólares, resultando em um prejuízo de 2 bilhões de dólares para um cenário analisado de 25 anos.

Palavras-chave: Produção de Etileno. Emissões de Carbono. Sustentabilidade. Créditos de Carbono.

ABSTRACT

Given the global context of concerns about climate change and the impacts caused by human actions on the atmosphere, it is necessary to reflect on the development of technologies that reduce the impact of industries regarding the emission of greenhouse gases, such as CO₂. Knowing this, and with the development of incentives for companies that invest in technologies to reduce CO₂ emissions, such as carbon credits, studies are being conducted to develop new technologies capable of meeting this demand, as ethylene industries, on average, emit 0.5 kg of carbon dioxide for each kg of ethylene produced. Thus, an analysis was developed for the construction of an ethylene production plant that will use hydrogen instead of natural gas as fuel, which aims to save about 1 million tons of CO₂ annually from scope 1 and 2, with an initial investment of 3.5 billion dollars, resulting in a 2 billion loss in a scenario projected 25 years ahead.

Keywords: Ethylene Production. Carbon Emissions. Sustainability. Carbon Credits.

Lista de Figuras

Figura 1: Comparação dos rendimentos variando a matéria-prima.	13
Figura 2: Diagrama de Blocos Simplificado do Processo de Produção de Etileno.	15
Figura 3: Esquema representativo dos tipos de escopo de emissões de carbono	16
Figura 4: Energia Demandada Anualmente pelo Reator	29
Figura 5: Quantidade de Carbono Emitida por Escopos 1 e 2	30
Figura 6: Valores de fluxo de caixa desconsiderando a variação do dinheiro no tempo	31
Figura 7: Fluxo de caixa aplicado a TMAR	32
Figura 8: Fluxo de caixa aplicado a TIR	33
Figura 9: Comparativo Percentual dos Gastos	34

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Rendimentos massa/massa de materiais na corrente de saída do reator	21
Tabela 3.2: Coeficientes termodinâmicos do etano.	22
Tabela 3.3: Preços de venda de etileno e créditos de carbono	25
Tabela 3.4: Porcentagem de crescimento PIB.	26
Tabela 3.5: Custo de Matérias primas e Utilidades.	25
Tabela 4.1: Capacidade produtiva	28
Tabela 4.2: Receita com Créditos de Carbono	31

Lista De Siglas e Abreviaturas

EIA - *US Energy Information Administration*

FC - Fluxo de Caixa

IEA - International Energy Agency

ONU - Organização das Nações Unidas

PIB - Produto Interno Bruto

S.&P. - *Standard and Poor's*

TIR - Taxa Interna de Retorno

TMAR - Taxa Mínima de Atratividade

VPL - Valor Presente Líquido

Lista de Símbolos

ΔH	Variação de Entalpia
ΔE_p	Variação de Energia Potencial
ΔE_c	Variação de Energia Cinética
$^{\circ}C$	Graus Celsius
C_p	Capacidade Calorífica
CO	Custos Operacionais
K	Kelvin
kJ	Kilojoules
Q	Calor
Ton	Tonelada
USD\$	Dólar Americano
U	Utilidades

Sumário

RESUMO	5
ABSTRACT	6
Lista de Figuras	7
Lista de Tabelas	8
Lista De Siglas e Abreviaturas	9
Lista de Símbolos	10
1. Introdução	12
2. Fundamentação Teórica	13
2.1. Processo de Produção	13
2.2. Carbono	15
2.2.1. Tipos de Emissões de Carbono	15
2.2.2. Controle das emissões de Carbono	16
2.2.2.1. Substituição de combustíveis fósseis	16
2.2.2.2. Formas de tratamento de Carbono	16
2.3. Mercado de Carbono	17
2.4. Análise Econômica	18
2.4.1. Valor Presente Líquido (VPL)	19
2.4.2. Taxa Mínima de Atratividade (TMAR)	19
2.4.3. Taxa Interna de Retorno (TIR)	19
2.4.4. Payback	20
3. Métodos e Cálculos	20
3.1. Demanda energética	20
3.2. Quantidade de Carbono não Emitida	23
3.3. Retorno Financeiro	24
3.3.1. Formas de Renda	24
3.3.2. Gastos Necessários	26
3.3.3. Taxa de Retorno e Tempo de Payback	27
3.3.4. Fluxo de caixa	27
4. Resultados e Discussão	28
4.1. Demanda energética e Emissões de Carbono	28
4.2. Resultados Financeiros	30
5. CONCLUSÃO	34
6. REFERÊNCIAS	36
7. GLOSSÁRIO	38
8. APÊNDICE A - Massas Molares	39

1.Introdução

A partir do final do século XIX e começo do século XX, registraram-se as primeiras notícias sobre surgimento do plástico e materiais flexíveis, sendo pouco atrativo devido ao alto custo de produção. Ainda no começo dos anos 1900, Leo Hendrik Baekeland desenvolveu a primeira resina totalmente sintética e maleável, baseada numa combinação de fenol e formaldeído, conhecido como baquelite e sendo considerada uma das maiores invenções do século XX (ALVARO 2022) .

Já entre 1930 e 1950, surgiram tecnologias de polimerização que difundiram ainda mais a comercialização e utilização desses materiais em substituição a materiais originados de vidro e papel (ALVARO 2022). Dentre esses polímeros, o polietileno começou a ser produzido e utilizado em larga escala. Com esse crescimento, nota-se uma maior utilização de materiais de origem fóssil, como o gás natural utilizado como combustível para aquecimento dos reatores de craqueamento, empregados nas indústrias de produção de etileno. Além disso, as matérias primas do polietileno e de outros polímeros também vem de origem fóssil, como etano e nafta, originados do petróleo (PINHO 2024).

Os combustíveis fósseis, como petróleo, gás natural e carvão mineral, têm um impacto significativo no meio ambiente. A queima desses combustíveis, processo comum nas indústria de produção de polímeros, libera grandes quantidades de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), que contribuem para o aquecimento global e as mudanças climáticas (PORTILLO 2024).

Sabendo disso, a busca por meios de produção que tenham menor impacto ao meio ambiente tem se tornado uma preocupação central nas indústrias modernas, especialmente no contexto da produção de etileno. A redução das emissões de carbono é um dos principais desafios enfrentados por essas indústrias, que buscam equilibrar a produção eficiente com a responsabilidade ambiental.

Este trabalho explora as estratégias e práticas que podem ser adotadas pela indústria de etileno para minimizar seu impacto ambiental, destacando a importância da inovação e da colaboração entre diferentes setores em busca de uma produção que possa impactar o menos possível o meio ambiente, mostrando resultados financeiros aplicados a uma indústria de produção de etileno com 0

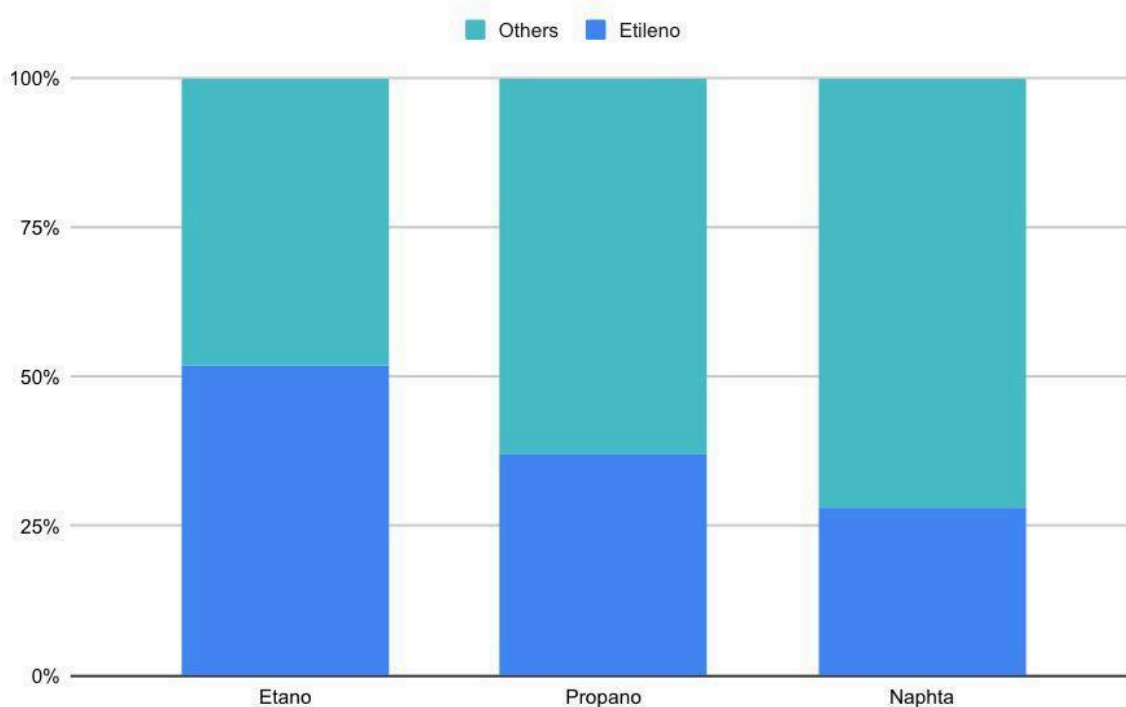
emissões de escopo 1 e 2 de dióxido de carbono, deixando assim, de emitir cerca de 900 mil toneladas de CO₂ para a atmosfera, cerca de 0,1% das emissões anuais da indústria química (*World Resources Institute 2022*).

2.Fundamentação Teórica

2.1. Processo de Produção

Na grande maioria dos processos de produção de etileno, as matérias-primas normalmente são etano ou nafta dependendo muita das vezes de qual o produto de interesse. No caso do etano, favorece mais a produção de etileno, já a nafta, além da produção de etileno, têm-se também, como produto, o propileno. (Zimmermann 2009). Na figura 1, pode-se ver a comparação entre os rendimentos do etileno de acordo com a matéria-prima escolhida.

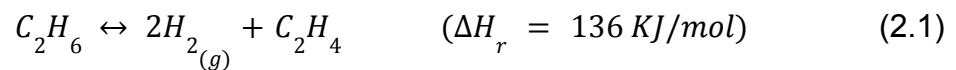
Figura 1: Comparação dos rendimentos variando a matéria-prima.



Fonte: Adaptado de Zimmermann (2009)

No processo de reação, temos a entrada da matéria prima escolhida

juntamente com água na forma vapor para que haja a redução da pressão parcial dos componentes e evitar formação de hidrocarbonetos mais pesados (C_{4+}). A corrente entra no forno onde é aquecida até temperaturas em torno de 850-900°C. Nessa faixa de temperatura, ocorre a desidrogenação das moléculas de etano e formação de hidrocarbonetos de moléculas menores, como etileno, propileno e alguns outros subprodutos. (THIRUVENKATASWAMY 2015).



Para aquecer a mistura, o combustível comumente utilizado é o Gás Natural. Devido à alta emissão de carbono relacionada a esse processo, outros combustíveis que não são originados de fontes fósseis têm sido estudados para sua utilização, como materiais de origem biológica (biodiesel ou biomassa) e também hidrogênio.

Após o processo de craqueamento, é necessária a separação dos produtos. Esse processo ocorre em 3 etapas. A primeira é onde ocorre o resfriamento da mistura de produtos, chegando a cerca de 42°C, evitando que ocorram reações químicas não desejáveis e formação de subprodutos (THIRUVENKATASWAMY 2015).

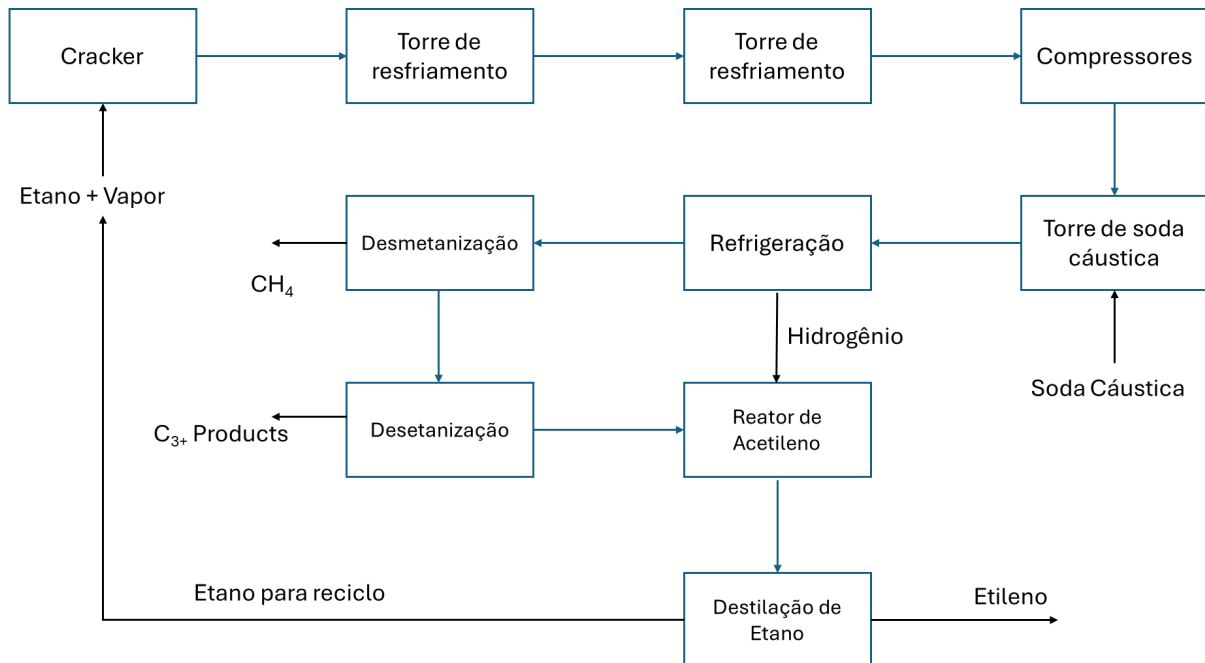
Na segunda etapa é onde ocorre a compressão em três estágios da corrente de produtos. Essa etapa se faz necessária para atingir a pressão de 15 bar que facilita a separação desses hidrocarbonetos formados (THIRUVENKATASWAMY 2015).

Na terceira etapa temos o processo separação de fato, sendo em uma série de colunas de destilação para separação baseada nos diversos pontos de ebulição e outras propriedades. Além da separação, ocorre também uma etapa onde se tem a reação catalítica de hidrogenação entre o acetileno e o hidrogênio, em fluxos controlados, formados no reator de craqueamento para elevar o rendimento do processo e obter maior quantidade de etileno.

Ao longo do processo produtivo há formação de dióxido de carbono, emissão por conta da queima de combustível na caldeira, reações secundárias podem formar CO_2 também, tornando um produto indesejado, que pode ser removido dos produtos durante o processo de adição de soda cáustica (THIRUVENKATASWAMY 2015). Além desses pontos, outro foco importante de emissões de dióxido de carbono é na geração de energia elétrica que irá suprir a demanda energética restante da planta,

muitas vezes vinda de queima de combustíveis fósseis.

Figura 2: Diagrama de Blocos Simplificado do Processo de Produção de Etileno.



Fonte: Adaptado de Thiruvenkataswamy (2015)

2.2. Gases do Efeito Estufa

2.2.1. Tipos de Emissões de Carbono

Na indústria têm-se 3 tipos de emissões de carbono, chamadas de emissões de escopo 1,2 e 3.

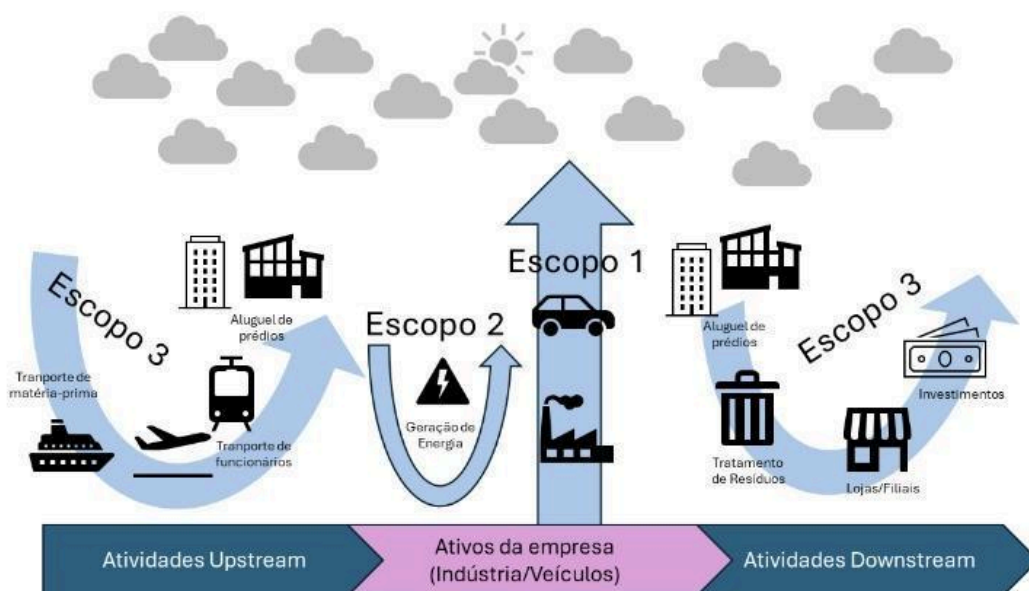
As emissões de escopo 1 são as caracterizadas por serem emissões de forma direta, ou seja, são os gases emitidos através do processo de produção industrial, como os emitidos durante a queima para aquecer o reator de craqueamento.

Com relação ao escopo do tipo 2, é originado de forma indireta a indústria, na produção de utilidades para o processo industrial, sendo eles energia elétrica e vapor. Como exemplo temos a queima de combustíveis para geração de vapor que será utilizado no reator de craqueamento.

As emissões de escopo 3 são as mais complexas de serem caracterizadas e controladas, por serem mais generalizadas. São emissões relacionadas à cadeia de valor da indústria, assim sendo, relacionadas a transporte de funcionários, produtos e tratamento dos resíduos e também na produção de matérias primas.

Na figura 3, observa-se as fontes dos 3 escopos de carbono.

Figura 3: Esquema representativo dos tipos de escopo de emissões de carbono.



Fonte: Adaptado de DataCenter Dynamics.

2.2.2. Controle das emissões de Carbono

2.2.2.1. Substituição de combustíveis fósseis

A utilização de combustíveis fósseis é uma das principais fontes de emissão de gases do efeito estufa, além de serem não renováveis. Sabendo disso, há uma maior necessidade da renovação da matriz energética, como a utilização de combustíveis de origem biovegetal. Um material que pode ser utilizado como substituição aos combustíveis fósseis é o hidrogênio, considerando sua origem da eletrólise da água, processo ainda pouco utilizado, sendo cerca de 4% do total produzido. (BHUIYAN 2025)

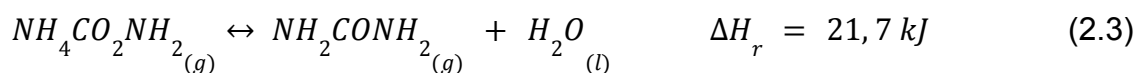
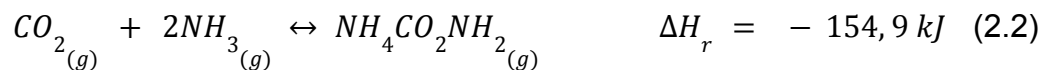
2.2.2.2. Formas de tratamento de Carbono

A preocupação com as emissões de carbono advindas das indústrias como um todo é pauta constante em discussões e fóruns ambientais, por conta disso, a cada ano surgem técnicas para tratamento do CO₂ gerado, podendo ser aproveitado como matéria-prima de algumas indústrias, como a de produção de fertilizantes, ou

também ser descartado de forma correta, nesse caso utilizando de poços de aterramento de carbono (BARROSO 2009). Além disso, uma forma bastante eficiente e que também auxilia na redução de emissões de CO₂ é a substituição das matrizes energéticas para fontes renováveis e mais limpas.

Sobre o aterramento de carbono, é uma técnica que envolve a captura do CO₂ emitido por fontes industriais, como usinas de energia e fábricas, e seu armazenamento em formações geológicas subterrâneas, em altas profundidades no oceano ou transformação em minerais. Assim que ocorre a captura, o CO₂ é armazenado em tanques a altas pressões e encaminhado para os locais onde será armazenado, sendo estes os mais comuns: formações geológicas profundas, como aquíferos salinos, campos de petróleo e gás esgotados, e camadas de carvão não exploradas. É uma técnica muito promissora e que pode mitigar de forma eficaz as emissões de CO₂, porém deve ser controlada e monitorada com muito afinco, para garantir que não há escape de gás para a atmosfera (Ecologia Cotidiana 2024).

Uma outra técnica de aplicação do CO₂ é a utilização do mesmo como matéria-prima na produção de ureia, importante químico para indústria de fertilizantes nitrogenados. O CO₂ é utilizado na parte de síntese da amônia, transformando-a em ureia, como mostrado nas equações 2.2 e 2.3.



2.3. Mercado de Carbono

O mercado de carbono como conhecemos atualmente começou a tomar este formato em 1988, quando James Hansen apresentou os conceitos de efeito estufa e a relação dele com a mudança climática global (EDF 2017). Na convenção da ONU de 1997 que fala sobre mudança do clima, foi estabelecido o tratado de Kyoto, para combate da interferência humana sob o clima (EDF 2017).

Neste protocolo, foram estabelecidas metas de redução de emissões de gases que provocam o efeito estufa. Como forma de incentivo às indústrias, neste mesmo tratado, foram regulamentados mecanismos de mercado, sendo eles o

Comércio de Emissões e os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo. Assim sendo, foram estabelecidas bases para o comércio de emissões de créditos de carbono.

Os créditos de carbono são certificados representando o quanto foi reduzido de emissões de dióxido de carbono ou gases de efeito estufa para a atmosfera a partir de algum projeto, sendo emitidos somente uma vez por projeto. A cada tonelada que deixa-se de emitir equivale a um crédito de carbono. Os projetos para se conseguir a emissão dos créditos incluem implementação de novas tecnologias, utilização de energia renovável, reflorestamento, captura e armazenamento de carbono, entre outros que gerem essa diferença de emissão de gases na atmosfera.

O mercado regulamentado é aquele estabelecido pelas políticas governamentais. Esse mercado segue com alguns problemas de regulamentação, após a determinação do protocolo de Kyoto não houve nenhum acordo bem definido entre países, o que dificultou a determinação do mercado global de carbono (Asadnabizadeh et al 2024). Com isso, surgiram alguns acordos comerciais entre países para regulamentarem o mercado de acordo com suas ideias, o *Clean Development Mechanism* baseado no protocolo de Kyoto, o *the European Union's Emissions Trading System (ETS)* que atualmente é o mais utilizado, *Regional Greenhouse Gas Initiative* desenvolvido pelos Estados Unidos o *New Zealand's Emissions Trade Scheme* e também o mercado voluntário, onde empresas e indivíduos podem comprar e vender créditos de forma voluntária, sem uma regulamentação bem desenvolvida dos governos e com maior flexibilidade nas transações (Newell et al 2013).

Após a criação do acordo de Paris em 2015, onde foram estabelecidas novas metas de redução do impacto ao meio ambiente, novas discussões acerca da regulamentação de um mercado de carbono surgiram e ainda sem nenhuma definição, sendo temas principais das conferências anuais do clima de Madri em 2019 e Glasgow em 2021 (Asadnabizadeh et al 2024).

2.4. Análise Econômica

Para o desenvolvimento de projetos nas indústrias um ponto muito importante e que gera discussões e é base fundamental para as decisões são as análises financeiras que são desenvolvidas para justificar uma aprovação ou reprovação do projeto.

2.4.1. Valor Presente Líquido (VPL)

O VPL é um conceito de análise financeira muito importante e que é frequentemente utilizado para se justificar um investimento ou projeto de capital. Esse conceito é aplicado ao se comparar o investimento inicial com os fluxos de caixa anuais, analisando-os no presente, ou seja, aplicando-se uma taxa nos fluxos de caixa anuais. Para análise do VPL pode-se aplicar a TMA, vista anteriormente e, caso o valor retornado seja positivo, o projeto é viável economicamente, além disso, pode-se calcular também a TIR, taxa interna de retorno, através do VPL (Turton 2007). Na equação 4, temos a representação do cálculo do VPL, a uma dada taxa i de juros.

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (2.4)$$

Onde FC_t é o fluxo de caixa em um dado ano t e i é a taxa de juros percentual que será aplicada no cálculo.

2.4.2. Taxa Mínima de Atratividade (TMAR)

A taxa mínima de atratividade é a taxa de retorno mínima que se espera de um projeto, trazendo os seus valores para o presente. É muito utilizada para entender se um projeto é viável, tomando como base no caso da taxa de retorno do projeto ser maior que a TMA, o projeto é viável economicamente. (Turton 2007). Na equação 2.5 encontra-se a equação para cálculo do VPL de um projeto aplicando a taxa mínima de atratividade.

$$VPL = - \text{Investimento inicial} + \text{Créd. Carbono} + \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+TMAR)^t} \quad (2.5)$$

2.4.3. Taxa Interna de Retorno (TIR)

Conceito muito utilizado para análises financeiras e atrelado ao Valor Presente Líquido (VPL) a TIR é uma taxa calculada com base nos fluxos de caixa de um projeto, igualando-os ao investimento inicial realizado. Basicamente, a TIR é utilizada para fazer com que o VPL de um projeto seja igualado a zero. Esse

fundamento é utilizado para comparar fluxos de caixa com comportamento diverso ao longo do tempo (Turton 2007). Na equação 2.6, tem-se o cálculo utilizado para calcular a TIR para o projeto.

$$VPL = 0 = - Investimento\ inicial + Créd.\ Carbono + \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} \quad (2.6)$$

2.4.4. Payback

O último conceito válido de ser mencionado é o *payback*, que é o tempo estimado para retorno de um investimento, ou seja, quando o faturamento será igualado ao investimento inicial. Esse método é mais simplificado, dado que não há análise da variância do dinheiro ao longo do tempo, levando a análises com desvios da realidade. (Turton 2007)

3. Métodos e Cálculos

3.1. Demanda energética

O primeiro ponto que é necessário ser estabelecido é qual será a matéria-prima base que será empregada no reator. Sabendo que a utilização de etano prioriza a formação do produto de maior interesse na indústria, o etileno, optou-se pela utilização do mesmo no processo industrial. Além disso, vale mencionar que o combustível utilizado para aquecer o reator será o hidrogênio, originado da eletrólise de água, reduzindo as emissões de CO₂ pelo processo industrial.

Baseando-se no estudo de (Thiruvengataswamy 2015) que também utilizou como matéria-prima o etano, tem-se calculado uma aproximação dos rendimentos de alguns materiais que são gerados além do etileno no processo industrial.

Tabela 3.1: Rendimentos massa/massa de materiais na corrente de saída do reator.

Componente	% massa/massa
Hidrogênio	3,8
Metano	2,6
Acetileno	0,08
Etano	40
Etileno	52,4
Propileno	1,1
Outros	0,02

Fonte: Thiruvenkataswamy (2015)

Sabendo dos rendimentos e massa de etileno que é pretendida ser produzida anualmente, calculou-se a quantidade de etano a ser fornecida para tal produção.

A partir da quantidade de Etano encontrada, foi possível estimar a quantidade de energia necessária para aquecer este material à temperatura desejada de 850°C, temperatura onde ocorre a desidrogenação do etano, por meio da equação 3.1.

$$\frac{\Delta H}{R} = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT = AT_1(\tau - 1) + \frac{B}{2}T_1^2(\tau^2 - 1) + \frac{C}{3}T_1^3(\tau^3 - 1) + \frac{D}{T_1}\left(\frac{\tau-1}{\tau}\right) \quad (3.1)$$

Sendo A, B, C e D coeficientes termodinâmicos tabelados para cálculo da capacidade calorífica para gases ideais e τ uma relação entre temperaturas mostrada na equação 3.2.

$$\tau = \frac{T_2}{T_1} \quad (3.2)$$

Para o etano, os coeficientes encontram-se na tabela 3.2

Tabela 3.2: Coeficientes termodinâmicos do etano.

Coeficiente	Valor
A	1,131
B	$1,922 \cdot 10^{-2}$
C	$-5,561 \cdot 10^{-6}$
D	0

Fonte: Smith 7ª Ed.

Encontrada a energia necessária para o aquecimento do reator, faz-se necessário determinar a energia necessária para manter a reação, dado que a reação desejada é extremamente endotérmica. Para isso, sabendo a energia de formação do etileno a partir do etano, aqui considerada a reação que representa o processo industrial, dado que os outros subprodutos representam menos de 10% da massa final de produtos formados. Na equação 2.1, temos a reação mencionada, bem como sua energia necessária para formação do etileno.

Calculadas as energias necessárias para manter o reator na temperatura ideal, estimou-se um balanço de energia para descobrir a quantidade de combustível necessária. Partindo-se da equação 3.4, é possível fazer algumas considerações para facilitar o cálculo.

$$\Delta H^{\circ} + \Delta E_c^{\circ} + \Delta E_p^{\circ} = Q^{\circ} + W_e^{\circ} \quad (3.4)$$

Para simplificação, assume-se:

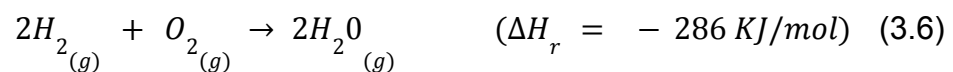
- Fluxo de entrada e saída são iguais: $E_c^{\circ} = 0$;
- Não há diferença de altura no sistema: $E_p^{\circ} = 0$;
- Não há trabalho de eixo sendo aplicado no sistema: $W^{\circ} = 0$.

Assim, a equação 3.4 se torna a equação 3.5.

$$\Delta H^{\circ} = Q^{\circ} \quad (3.5)$$

A partir desse ponto, tem-se determinada a quantidade de calor necessária para aquecer e manter o reator a 850 °C, considerando que há uma perda de 6.5% da energia para fora do sistema do reator (ZIMMERMANN 2009).

Calculado o calor necessário para manter a temperatura do reator de forma a favorecer a reação, faz-se necessário descobrir a quantidade de combustível, nesse caso o hidrogênio, que será utilizado para aquecimento do reator. A partir do calor encontrado pela equação 3.5 e sabendo o valor da energia liberada pela reação de combustão de hidrogênio, mostrada na equação 3.6.



Calcula-se a quantidade de mols de hidrogênio necessárias a partir da equação 3.7.

$$M(H_2) = \frac{Q}{\Delta H_r} \quad (3.7)$$

A demanda energética da planta não se limita somente ao reator, além da energia já calculada para manter o reator, sabe-se que a produção de etileno a partir do etano tem uma demanda de 16000 kJ/kg de etileno produzido (Zimmermann 2009). Sabendo a demanda do reator, já calculada anteriormente, a energia restante é necessária para manter o funcionamento dos outros equipamentos. Para essa energia, será contratado um fornecimento de energia externa a partir da queima do gás natural de uma termelétrica localizada próxima a planta produtiva. Como forma de reduzir a emissão de gases poluentes, será feito o aterramento do dióxido de carbono produzido na geração de energia.

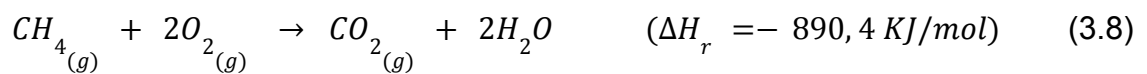
3.2. Quantidade de Carbono não Emitida

Novamente tomando como base o calor encontrado na equação 3.5, é possível estabelecer a quantidade de carbono que seria emitida no caso de seguir o processo convencional, utilizando gás natural como combustível, com isso, obtém-se as emissões do escopo 1.

Vale ressaltar que esse tópico é de suma importância para o

desenvolvimento do projeto visto que os créditos de carbono, como mencionado no tópico 2.3, são calculados com base na quantidade de CO₂ que deixa de ser emitido para a atmosfera.

Sabendo disso, para calcularmos a quantidade de carbono, é necessário encontrar a quantidade de gás natural que é demandada para manter o reator operando. Sabendo a energia da reação de combustão do gás natural, mostrada na equação 3.8, e utilizando-se da equação 3.7, encontra-se a massa molar de gás natural.



Um ponto importante a ser comentado, é que como o gás natural é composto por cerca de 90% em massa por metano (Gás Local), utiliza-se o mesmo para representação na reação química. A partir da massa molar de gás natural e seguindo os coeficientes estequiométricos da reação, encontra-se a massa molar de CO₂ que deixa de ser emitida para a atmosfera.

Partindo para as emissões de escopo 2, de origem da produção de energia necessária para o funcionamento da planta, considerou-se o valor de demanda de energia mencionada anteriormente e descontando a energia demandada pelo reator. Com isso, novamente utilizando-se da energia de combustão do gás natural, encontra-se a massa de CO₂ que deixa de ser emitida pelo escopo 2, já que o gás emitido pelo processo de queima do gás natural para geração de energia, será aterrado.

3.3. Retorno Financeiro

3.3.1. Formas de Renda

As formas de renda originadas do processo são a comercialização do Etileno produzido e também a renda obtida a partir da comercialização de créditos de carbono que obtêm-se com a execução do projeto.

Na parte de renda com a venda de Etileno, a produção anual foi estimada seguindo o modelo base desse projeto, a planta da Dow Química que está sendo implementada no Canadá. Sendo esse projeto com uma expectativa inicial de

produzir 1,3 milhões de toneladas, elevando essa produção para 1,9 milhões a partir de 2030 e por fim, em 2035, atingir o máximo de produção de cerca de 2 milhões de toneladas anuais.

Com relação à produção, sabendo que não é possível uma planta operar com toda sua capacidade para sempre, foi considerado, a cada 3 anos, uma pausa para *Turn Around*, esse conceito é utilizado para definir uma pausa programada da produção para possíveis reformas na planta produtiva, garantindo maior qualidade nos produtos. Com isso, nos anos de pausa, assume-se que a planta opera com capacidade reduzida em 10%.

Na tabela 3.3 têm-se os preços considerados para a venda de etileno e créditos de carbono encontrados em (*Carbon Market California 2024*) e (*Ethylene Prices 2024*).

Tabela 3.3: Preços de venda de etileno e créditos de carbono

Produto	Preço
Etileno	USD\$ 954 /ton
Créditos de Carbono	USD\$ 83,50 /ton CO ₂

Fonte: *Intratec Solutions* e *Ethylene Prices* .

Para obter uma estimativa mais realista, considerou-se a variação nos preços e custos de acordo com a projeção do PIB feita pela *Standard and Poor 's* (S & P) para 2024 e projetando o crescimento futuro com base na média dos anos anteriores. Dessa forma, os custos de produção e os preços de venda dos produtos variam ao longo dos anos. A Tabela 3.4 apresenta o valor médio da projeção do PIB aplicado ano a ano.

Tabela 3.4: Porcentagem de crescimento PIB.

% Crescimento médio
1,81%

Fonte: *Global economy*.

3.3.2. Gastos Necessários

3.3.2.1. Custo de Investimento Inicial

Seguindo com a base do projeto divulgado pela empresa Dow Química, para implementação de um processo de produção de Etileno sem emissões de carbono dos escopos 1 e 2, é necessário um investimento de cerca de 3,5 bilhões de dólares, para adaptação dos processos e também implementação de novas tecnologias para suportar a produção nova (Dow 2023).

3.3.2.2. Gasto Anual com Operações

O gasto anual com a operação do processo, que engloba nesse valor os gastos com salário de funcionários, pequenos consertos e limpeza em equipamentos e transporte de produtos, é estimado com base no investimento inicial do projeto. Estima-se um gasto anual com as operações da indústria de 20% do investimento inicial.

3.3.2.3. Gasto Anual com Matérias-Primas e Utilidades

Na tabela 3.5, encontram-se os valores de custo para a matéria prima, etano, e também os custos com utilidades, neste caso energia elétrica que será fornecida de uma fonte externa e também o hidrogênio utilizado como combustível para fornecer energia ao reator.

Tabela 3.5: Custo de Matérias primas e Utilidades.

Produto	Custo (USD)	Referência
Etano	\$ 229,42 USD/ton	EIA
Hidrogênio	\$ 3200,00 USD/ton	IEA
Energia Elétrica	\$ 0,15 USD/kWh	Energy Rates
Aterramento de CO ₂	\$25 USD/ton	Smith 2021

Fonte: Produzido pelo autor.

Vale mencionar que o custo do hidrogênio é alto dado a origem dele,

produzido a partir da eletrólise da água, esse processo ainda é pouco utilizado, sendo cerca de 4% da produção anual de hidrogênio, por isso o alto custo. (BHUIYAN 2025)

3.3.3. Taxa de Retorno e Tempo de *Payback*

Considerando os gastos e as fontes de renda calculados anteriormente, aplicou-se conceitos financeiros recomendados por Turton (2018). Primeiramente, o *Payback*, que é o tempo necessário para recuperação do investimento inicial, que será encontrado com base em análises gráficas mostradas nos resultados. Adota-se por convenção um valor ideal para o *payback* de 10 anos.

Além desse conceito, utilizou-se também os conceitos de VPL, que pode ser encontrado calculando conforme a equação 2.4.

Outro conceito considerado foi a TIR, utilizou-se a equação 2.6. Para efeitos de análise, será adotada como uma taxa mínima de atratividade (TMAR) para o projeto de 13%.

3.3.4. Fluxo de caixa

Para o cálculo do fluxo de caixa no primeiro ano, vai ser tomado como base o investimento inicial, de 3,5 bilhões de dólares, e desconta-se os valores recebidos com créditos de carbono cerca de 55 milhões de dólares, uma vez que os mesmos só podem ser gerados uma vez por projeto. Com isso, o fluxo de caixa do ano 1 se torna o mostrado na equação 3.9.

$$FC_1 = - Inv. Inicial + Créditos de Carbono + Receita - CO - H - EE - MP \quad (3.9)$$

Agora ao analisar nos anos futuros, tem-se como ponto de partida a receita, vinda da venda de etileno ao mercado, conforme mostrado no item 3.4.1. Descontando-se da receita, o valor com os gastos, de utilidades e operacional, é encontrado o Fluxo de caixa de cada ano, demonstrado na equação 3.10.

$$FC_t = Receita - CO - H - EE - MP \quad (3.10)$$

Onde FC_t é fluxo de caixa em um dado ano t , CO é o custo operacional e H é o gasto com hidrogênio, EE é o gasto com energia elétrica e MP é o gasto com matérias primas, no nosso caso, o etano.

4. Resultados e Discussão

4.1. Demanda energética e Emissões de Carbono

Com relação ao processo de produção, como mencionado no tópico 3.1, o processo industrial segue o modelo convencional, utilizando etano como matéria-prima principal para produção de etileno. A primeira etapa de cálculo é constituída pela determinação da quantidade de etano necessária para produção do etileno projetado. Esse valor foi obtido com base no rendimento do processo e já sabendo a quantidade de etileno que se deseja produzir.

Um ponto a ser considerado, baseado na tabela 3.1, é que há saída de etano no reator e, sabendo que o mesmo pode ser recuperado nos processos de separação, considerou-se o reciclo deste material levando a uma menor demanda de etano após o primeiro dia de produção, já que é possível sua reutilização no processo industrial. A cada 3 anos há uma redução na produção devido a pausa programada para possíveis reformas e troca de equipamentos. Na tabela 4.1 pode-se encontrar a capacidade de produção anual.

Tabela 4.1: Capacidade produtiva

Capacidade de Produção (kT/Ano)	
Até 2029	2485
Até 2035	3085
Até 2050	3200

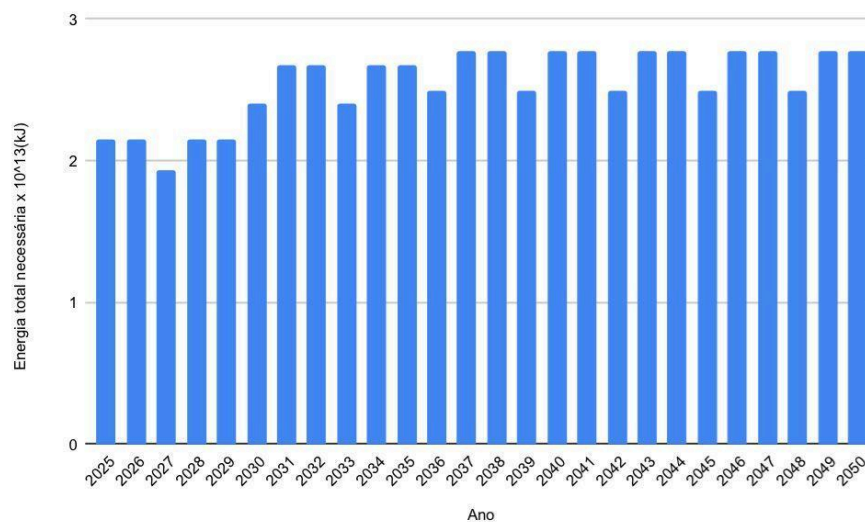
Fonte: Autor

A partir desse ponto, necessita-se determinar a energia necessária para produção. A primeira parte do cálculo é determinar a energia necessária para aquecer 1 mol de etano até a temperatura de 850°C , para tal, utilizou-se da equação

3.1, encontrando-se um valor de 2662 kJ/kg de etano. Além disso, para manter a reação acontecendo, é necessário fornecer a entalpia de reação da desidrogenação do etano, mostrada na equação 2.1, com valor de 4893 kJ/kg de etileno produzido.

A partir dos dados de capacidade produtiva e adotando as variações de produção anuais é possível determinar a energia necessária anualmente para atender a demanda da indústria, mostrados na Figura 4.

Figura 4: Energia Demandada Anualmente pelo Reator



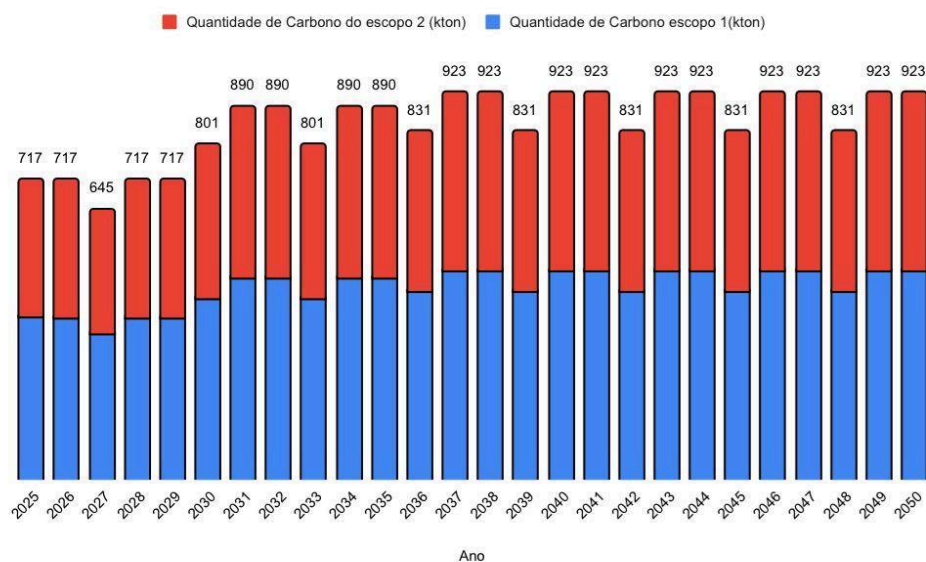
Fonte: Autor.

Sabendo a energia que é necessária para a operação da indústria ao longo dos anos também é determinável a quantidade de combustível demandada para manter essa operação, partindo-se de um balanço de energia, mostrado nas equações 3.3 e 3.4, calcula-se a demanda de hidrogênio para utilização como combustível e também da quantidade de carbono que seria emitida pelo processo com combustão de Gás Natural. Esses 2 valores encontrados são de suma importância para análise financeira do processo, com relação ao hidrogênio, a demanda será utilizada para estimação do valor gasto anualmente com utilidades. Já o carbono será utilizado para emissão de créditos de carbono que serão muito importantes para captação de dinheiro para abater o alto custo de investimento.

Na figura 5, encontra-se destacado a quantidade de dióxido de carbono que deixará de ser emitida, substituindo o combustível por hidrogênio e também, no processo de geração de energia, será possível recuperar o CO₂ e fazer o

aterramento.

Figura 5: Quantidade de Carbono Emitida por Escopos 1 e 2



Fonte: Autor.

O processo de produção de etileno é altamente consolidado, com diversas melhorias tecnológicas ao longo dos anos. A aplicação do hidrogênio como fonte de energia mostrou-se viável e sendo uma fonte sustentável de geração de energia, proporcionando uma redução significativa nas emissões de carbono de cerca de 900 mil toneladas anuais para o processo aplicado.

4.2. Resultados Financeiros

Já sabendo dos resultados relacionados ao processo industrial e as demandas necessárias para fazer o mesmo acontecer, necessita-se fazer a avaliação econômica do projeto.

O primeiro ponto a ser destacado do ponto de vista financeiro é o fluxo de caixa anual do projeto, considerando as entradas de receita advindas da venda do etileno no mercado, bem como as saídas de dinheiro gasto com as matérias primas, utilidades e também custos operacionais, como salários dos funcionários, manutenções preventivas, gastos com transporte, dados muito importantes para manter a saúde financeira da indústria.

O primeiro ponto a ser destacado do ponto de vista financeiro é a receita advinda da comercialização dos créditos de carbono emitidos assumindo que o projeto foi aprovado e os certificados emitidos. Créditos esses comercializados no mercado voluntário. Na tabela 4.2 temos o valor ganho com essa receita.

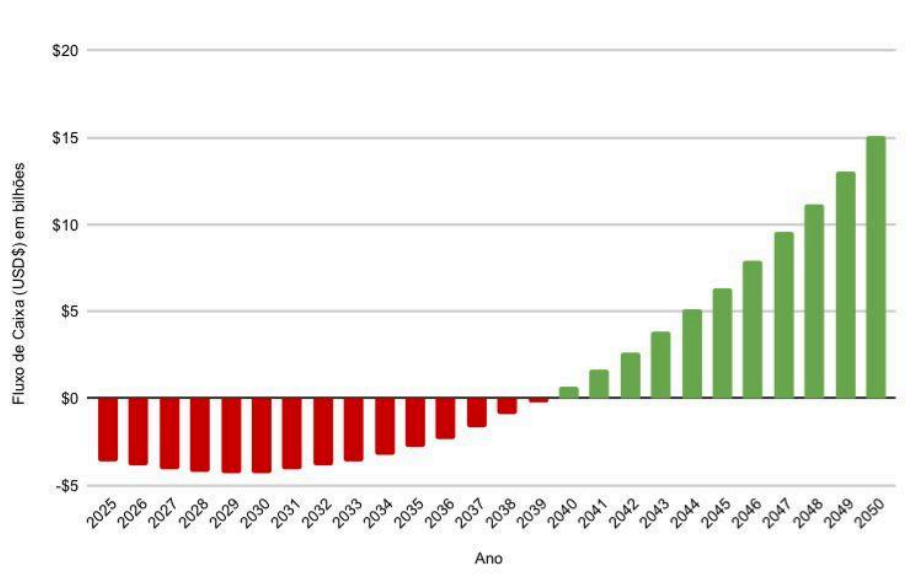
Tabela 4.2: Receita com Créditos de Carbono

Potencial Máximo de Redução de Emissão (ton)	9,2 x 10 ⁵
Preço unitário (USD \$/ton)	58,95
Receita (USD \$)	5,4 x 10 ⁷

Fonte: Autor.

Na figura 6 pode-se encontrar os resultados dos cálculos do fluxo de caixa, seguindo a equação 3.9.

Figura 6: Valores de fluxo de caixa



Fonte: Autor.

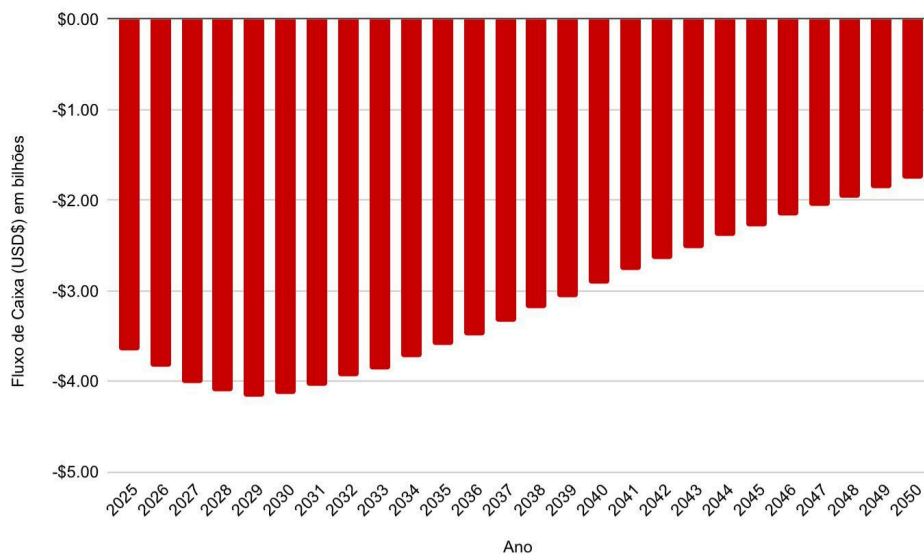
A partir do fluxo de caixa apresentado na figura 6, pode-se calcular o tempo de *payback*, para saber em quanto tempo o investimento inicial demora para ser

recuperado. Para isso, pode-se analisar a partir do gráfico apresentado anteriormente, tomando como base o investimento inicial de 3,5 bilhões de dólares e somando os fluxos de caixa ano a ano, o tempo de payback para esse projeto, descontando as variações do dinheiro no tempo, é de 14 anos. Esse ponto é identificado no gráfico onde há a mudança de um somatório de caixa total superior a 0, ou onde as barras do gráfico ficam na cor verde.

Um ideal estimado de um tempo de payback é de menos de 15 anos, dado que esse valor é adotado como convenção do tempo de vida para um equipamento, sem necessidades de manutenção. Sendo assim, um prazo de 14 anos para o retorno do investimento é um valor dentro do ideal.

Outro ponto de vista financeiro é como o projeto se comporta aplicando a taxa mínima de atratividade, TMAR, nesse caso de 13%. Na figura 7 pode-se encontrar o fluxo de caixa do projeto ao aplicar a TMAR, utilizando a equação 2.5.

Figura 7: Fluxo de caixa aplicado a TMAR



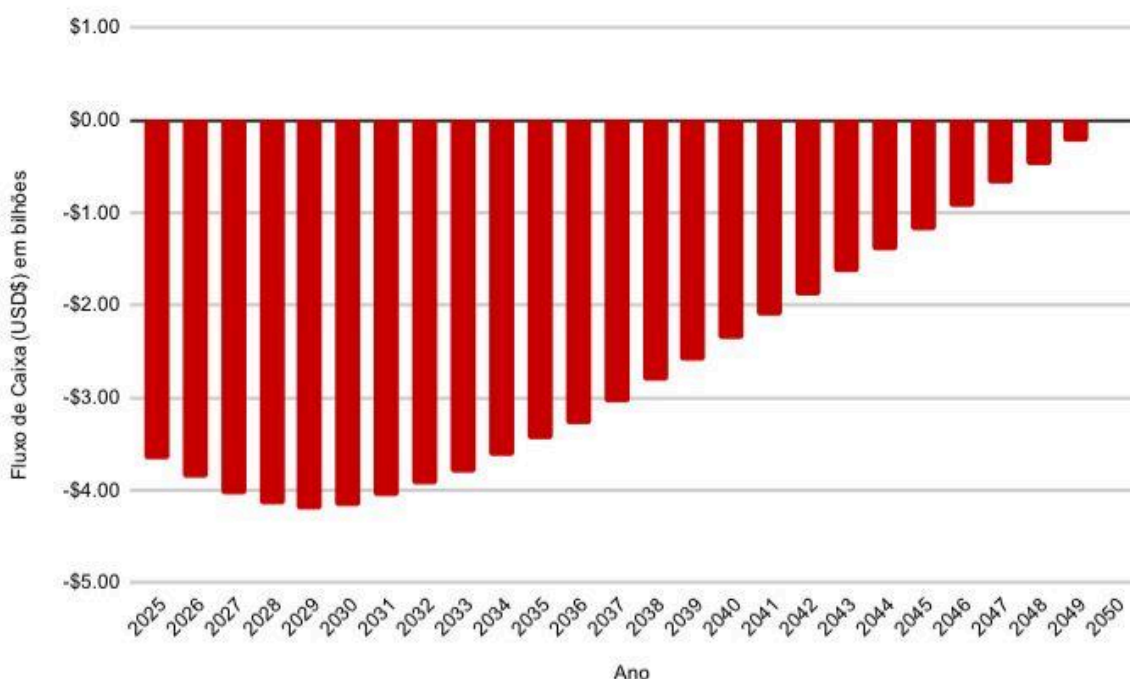
Fonte: Autor.

Com esse gráfico nota-se que o fluxo de caixa está longe de atingir um resultado satisfatório. Nota-se que o fluxo de caixa ao final de 25 anos é de aproximadamente 2 bilhões de dólares negativos. Isso nos mostra que o projeto não tem perspectiva de mostrar um retorno financeiro ideal e com um resultado

desastroso para o projeto.

Por fim, a partir do VPL pode-se também obter a TIR seguindo a equação 3.8. Encontrando-se um valor de aproximadamente 9,08%, ao analisar a projeção de 25 anos feita nesse projeto, menor valor se comparado com os 13% assumidos como mínimo ideal para viabilidade do projeto. Apesar do tempo de retorno estimado estar abaixo dos 15 anos recomendados, os resultados financeiros não foram tão satisfatórios, dado que o cálculo utilizado para determinação desse tempo não leva em consideração as mudanças de valor no tempo. No gráfico da figura 8 pode-se observar o comportamento do fluxo de caixa anual com a aplicação da TIR, resultando em um VPL de 0.

Figura 8: Fluxo de caixa aplicado a TIR



Fonte: Autor.

Tomando novamente como base o VPL, estimou-se o valor necessário de venda para que o processo atingisse uma taxa interna de retorno igual à taxa mínima de atratividade, de 13%, chegando a um preço de aproximadamente US\$1020 por tonelada de etileno, um valor 7% acima do atual.

Sabendo que os resultados obtidos financeiramente não foram tão satisfatórios, para entender um pouco mais quais os fatores, têm-se na figura 9

abaixo um gráfico com os comparativos de gastos para a matéria-prima, utilidades e gastos fixos, montado a partir dos custos unitários em relação ao volume produzido de etileno (\$USD/ton etileno).

Figura 9: Comparativo Percentual dos Gastos



Fonte: Autor

Ao analisar o gráfico, nota-se que os gastos fixos anuais reduzem sua participação conforme o volume de produção cresceu ao longo dos anos, já o custo de energia elétrica mostra um déficit alinhado ao projeto, sabendo que essa energia é a externa fornecida para suprir a demanda energética e o processo apresentado não possui estudos aprofundados de otimização e aproveitamento da energia gerada pela queima de combustível no reator, além disso, nos processos de resfriamento, pode-se aproveitar para aquecer correntes que são utilizadas ao longo do processo produtivo, reduzindo assim sua demanda energética e possivelmente viabilizando mais o projeto em termos financeiros.

5. CONCLUSÃO

Nos tempos modernos da indústria, principalmente a partir do final do século XX, muito se tem discutido sobre formas mais sustentáveis de crescimento do setor químico. Esse fato se tornou ainda mais claro com a adoção de medidas governamentais que regulamentaram e obrigaram as indústrias a repensarem seus processos e sua relação com o meio ambiente, ainda mais quando o assunto é produção de plásticos.

Analisando do ponto de vista técnico, o projeto é viável, dado que, além de poder ser algo construído do zero, é possível adaptar indústrias já produtoras de

etileno para substituição do combustível utilizado no processo de reação. Ainda olhando para o lado técnico, um ponto que traria uma visibilidade melhor dos resultados do processo, bem como maior precisão dos cálculos seria a realização de simulações em softwares de engenharia precisos e validados,, além do mais, há a possibilidade de um estudo mais aprofundado para aplicar técnicas já existentes de melhor aproveitamento energético, para aquecimento prévio da corrente de entrada do reator, resultando numa maior eficiência energética.

Com relação a parte de sustentabilidade, traria uma maior credibilidade às indústrias de plásticos, visto que há uma redução de 900 mil toneladas anuais de dióxido de carbono sendo emitidos para a atmosfera, trazendo mais um ponto positivo para o projeto.

Ao olhar para os resultados financeiros, nota-se que não é um investimento tão viável, visto que o retorno se daria a um longo prazo mesmo estando dentro do valor ideal, cerca de 14 anos para o *payback*, e também, para a projeção realizada até 2050, a taxa de retorno foi baixa ao comparar-se com o mínimo que se considera para ser um projeto atrativo.

Contrabalanceando esses resultados financeiros negativos, os valores de comércio adotados para o etileno são os utilizados nos dias atuais, com o processo convencional de combustão de gás natural, um produto com selo verde por ser menos impactante para o meio ambiente e com 0 emissões de carbono geraria um valor agregado maior, aumentando os ganhos com a venda do mesmo ao mercado, podendo chegar ao preço de 1020 dólares, calculado como o ideal para o projeto ser viável.

Tomando como base o lado financeiro o projeto é inviável se analisado os números, assumindo um grande risco de trazer um prejuízo para a empresa, porém, colocando em contexto os ganhos com a imagem que a indústria química receberia e também levando em conta que existem melhorias que podem ser aplicadas nas análises feitas neste trabalho possibilitando um melhor resultado financeiro. Além disso, a adoção de projetos por grandes empresas da área, como a Dow Química, geram uma reflexão de que o projeto pode, ao longo prazo, trazer benefícios tanto para a empresa, com adoção de práticas mais limpas, quanto para a população, com redução de emissões dos gases de efeitos estufa.

6. REFERÊNCIAS

ASADNABIZADEH, M.; MOE, E. **A review of Global Carbon Markets from Kyoto to Paris and beyond: the persistent failure of implementation.** *Frontiers in Environmental Science* Frontiers Media SA, , 2024.

BARROSO KRAUSE, P. **Estudo de alternativa de transporte de CO2 em dutos.** [s.l: s.n.].

Captura y Almacenamiento de CO2: Una Solución Sostenible para el Medio Ambiente - Ecología Cotidiana. Disponível em: <<https://ecologiacotidiana.es/captura-y-almacenamiento-de-co2-una-solucion-sostenible-para-el-medio-ambiente/>>. Acesso em: 29 dez. 2024.

Chemical Name Search. Disponível em: <<https://webbook.nist.gov/chemistry/name-ser/>>. Acesso em: 4 jan. 2025.

Chemical Price Analysis, Chemical Latest Prices | ChemAnalyst. Disponível em: <<https://www.chemanalyst.com/Pricing/Pricingoverview>>. Acesso em: 6 jan. 2025.

Climate Watch Historical GHG Emissions. 2022. Washington, DC: World Resources Institute. Disponível em: <<https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>>. Acesso em: 23 fev. 2025.

Dow's Board of Directors Approves Final Investment Decision for Path2Zero Project | Dow Investor Relations. Disponível em: <<https://investors.dow.com/en/news/news-details/2023/Dows-Board-of-Directors-Approves-Final-Investment-Decision-for-Path2Zero-Project/default.aspx>>. Acesso em: 26 dez. 2024.

EDF_Carbon_Market_Timeline. [s.d.]. Disponível em: <https://www.edf.org/sites/default/files/documents/EDF_Carbon_Market_Timeline.pdf> Acesso em: 29 dez. 2024.

FREITAS, D. D. S.; MARQUES, J. J.; PERLINGEIRO, C. A. G. Estudo da Viabilidade de Aproveitamento de CO2 Offshore Visando a Produção de Ureia. *Scientia Plena*, v. 12, n. 5, 12 maio 2016.

Global average levelised cost of hydrogen production by energy source and technology, 2019 and 2050 – Charts – Data & Statistics - IEA. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-average-levelised-cost-of-hydrogen-production-by-energy-source-and-technology-2019-and-2050>>. Acesso em: 6 jan. 2025.

Global Economy Watch - Projections. Disponível em: <<https://www.pwc.com/gx/en/research-insights/economy/global-economy-watch/projections.html>>. Acesso em: 6 jan. 2025.

HOSSAIN BHUIYAN, M. M.; SIDDIQUE, Z. **Hydrogen as an alternative fuel: A comprehensive review of challenges and opportunities in production, storage, and transportation.** *International Journal of Hydrogen Energy* Elsevier Ltd, , 01 fev. 2025.

Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics - 7th ed - Smith, Van Ness & Abbot. [s.d.].

MAIA, J. G. S. S. et al. Techno-economic viability study of an ethylene production process through ethane steam cracking. **Rio Oil and Gas Expo and Conference**, v. 22, n. 2022, p. 211–212, 26 set. 2022.

NEWELL, R. G.; PIZER, W. A.; RAIMI, D. Carbon markets 15 years after Kyoto: Lessons learned, new challenges. **Journal of Economic Perspectives**, v. 27, n. 1, p. 123–146, dez. 2013.

O que são escopos 1, 2 e 3?; DataCenter Dynamics Disponível em: <<https://www.datacenterdynamics.com/br/an%C3%A1lises/o-que-sao-os-escopos-1-2-e-3/>>. Acesso em: 10 ago. 2024.

PREETHA THIRUVENKATASWAMY. **SAFETY AND TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF ETHYLENE TECHNOLOGIES.** [s.l: s.n.].

Price | Carbon Pricing Dashboard. Disponível em: <<https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/compliance/price>>. Acesso em: 6 jan. 2025.

SMITH, E. et al. The cost of CO₂ transport and storage in global integrated assessment modeling. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 109, 1 jul. 2021.

U.S. ethane production, consumption, and exports set new records again in 2023 - U.S. Energy Information Administration (EIA). Disponível em: <<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=61704>>. Acesso em: 6 jan. 2025.

ZIMMERMANN, H.; WALZL, R. Ethylene. In: **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.** Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.

7. GLOSSÁRIO

Turn Around - Expressão utilizada para representar uma pausa programada na indústria.

Payback - Tempo estimado de retorno de um investimento.

8. APÊNDICE A - Massas Molares

Massas molares (g/mol)	
C ₂ H ₆	30,07
H ₂	2,02
H ₂ O	18,02
CO ₂	44,01