



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

GUILHERME JOÃO MUSSE NETO

**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE ACRILONITRILA
PRODUZIDA A PARTIR DE GLICEROL**

Salvador

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE ACRILONITRILA
PRODUZIDA A PARTIR DE GLICEROL**

Guilherme João Musse Neto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA.

Orientador: Prof.º Dr. Luiz Antônio Magalhães Pontes

Salvador

2023


DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, aos amigos e orientador pela compreensão, apoio e parceria durante o período de seu desenvolvimento.


MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
GUILHERME JOÃO MUSSE NETO

APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, EM 23 DE JANEIRO DE
2023.


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 LUIZ ANTONIO MAGALHAES PONTES
Data: 24/01/2023 12:33:14-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof.º Dr. Luiz Antônio Magalhães Pontes
Universidade Federal da Bahia - UFBA

Documento assinado digitalmente
 LEILA MARIA AGUILERA CAMPOS
Data: 24/01/2023 23:03:50-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof.ª Dr.ª Leila Maria Aguilera Campos
Universidade Salvador - UNIFACS

Documento assinado digitalmente
 OFELIA DE QUEIROZ FERNANDES ARAUJO
Data: 24/01/2023 18:15:42-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof.ª Dr.ª Ofélia de Queiroz Fernandes Araújo
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha família que durante toda a pós-graduação me proporcionou todo apoio necessário para que este sonho se tornasse realidade.

Ao professor Dr. Luiz Antônio Magalhães Pontes pela sua orientação coerente, acreditando que este trabalho poderia apresentar bons resultados.

Ao grupo de pesquisa H2CIN pela colaboração técnica no desenvolvimento do trabalho.

“Sonho que se sonha só

É só um sonho que se sonha só

Mas sonho que se sonha junto é realidade”

Raul Seixas

RESUMO

Musse Neto, G. J. **Análise do ciclo de vida de acrilonitrila produzida a partir de glicerol**. Dissertação (trabalho de conclusão de mestrado) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2023.

A acrilonitrila é um monômero negociado como *commodity* no mercado global e com aplicações em diversos setores industriais, produzido a partir da amoxidação do propeno. Novas alternativas tecnológicas vêm sendo estudadas para minimizar os potenciais impactos do processo ao meio ambiente, reduzindo a utilização de derivados do petróleo através de matérias-primas renováveis e *eco-friendly*. Este trabalho propõe a aplicação da análise de ciclo de vida em uma planta de acrilonitrila que utiliza glicerol como matéria-prima alternativa, visando avaliar os impactos ambientais gerados comparativamente a processo petroquímico comercial. O uso do glicerol, coproduto da produção de biodiesel, é avaliado com informações de bancos de dados estratégicos e documentos publicados, considerando sua origem no processo de produção de biodiesel de soja e óleos residuais com foco no estado do Mato Grosso. Os resultados mostram que as produções a partir do glicerol oriundo das rotas de biodiesel de soja e de óleos residuais apresentam emissões de GEE superiores ao processo SOHIO (acrécimo entre 6,84% e 276% kg CO₂-eq por kg acrilonitrila produzida a depender da rota). As categorias de consumo de água e escassez de recursos naturais mostram resultados favoráveis para a utilização da acrilonitrila. Os processos a partir da rota da soja e rota de óleos residuais economizam 2,0 litros e 5,9 litros de água por kg de acrilonitrila produzida, respectivamente. Por fim, a escassez de combustíveis fósseis pode reduzir 45,32% através da rota da soja e 35,52% para a rota de óleos vegetais residuais.

Palavras-chave: ACV, Acrilonitrila, Análise de Processo de Produção, Sustentabilidade.

Musse Neto, G. J. **Life cycle assessment of acrylonitrile produced from glycerol.** Dissertation (Master's thesis work) - Polytechnic School at Federal University of Bahia, Salvador, 2023.

ABSTRACT

Acrylonitrile is a monomer traded as a commodity on the global market and with applications in several industrial sectors, produced from the ammoxidation of propylene. New technological alternatives are being studied to minimize the potential impacts of the process on the environment, reducing the use of oil derivatives through renewable and eco-friendly raw materials. This work proposes the application of life cycle assessment in an acrylonitrile plant that uses glycerol as an alternative feedstock, aiming to evaluate the environmental impacts generated compared to a commercial petrochemical process. The use of glycerol, a co-product of biodiesel production, is evaluated with information from strategic databases and published documents, considering its origin in the production process of biodiesel from soybean and waste cooking oil, focusing on the state of Mato Grosso. The results show that the production routes from glycerol derived from the soybean biodiesel and waste cooking oil routes present higher GHG emissions than the SOHIO process (among 6.84% and 276% kg CO₂-eq per kg acrylonitrile produced at depend on the route). The categories of water consumption and fossil resource scarcity show favorable results for the use of acrylonitrile. The processes based on the soybean route and the residual oil route save 2 liters and 5.9 liters of water per kg of acrylonitrile produced, respectively. Finally, the scarcity of fossil fuels can reduce 45.32% through the soybean route and 35.52% for the residual vegetable oil route.

Keywords: LCA, Acrylonitrile, Production Process Analysis, Sustainability.

SUMÁRIO

	Pág.
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 <i>Objetivo Geral</i>	4
1.2 <i>Objetivos específicos</i>	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 <i>Considerações sobre o mercado da acrilonitrila</i>	5
2.1.1 <i>Aplicação e maiores empresas</i>	5
2.1.2 <i>Aspectos de mercado</i>	7
2.2 <i>Desenvolvimento do Processo SOHIO</i>	8
2.2.1 <i>Histórico de produção da acrilonitrila</i>	8
2.2.2 <i>Processo SOHIO</i>	9
2.3 <i>Glicerol</i>	11
2.3.1 <i>Produção e mercado</i>	11
2.3.2 <i>Política de desenvolvimento nacional</i>	13
2.3.3 <i>Óleos vegetais residuais</i>	14
2.3.4 <i>Acrilonitrila a partir do glicerol – Proposta de rota potencialmente sustentável</i> ..	15
2.4 <i>Análise do ciclo de vida (ACV) e sua aplicação</i>	17
2.4.1 <i>Estrutura da Análise do Ciclo de Vida</i>	18
2.4.2 <i>Amplitude de estudo para ACV</i>	23
2.4.3 <i>ACV aplicado na produção de acrilonitrila</i>	25
2.5 <i>Software e bases científicas</i>	26
2.5.1 <i>SimaPro®</i>	26
2.5.2 <i>Avaliação Econômica de planta industriais</i>	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1 <i>Origem do glicerol e processos de produção da acrilonitrila (Etapa 1)</i>	30
3.2 <i>Execuções das etapas de ACV</i>	33
3.2.1 <i>Objetivo e escopo</i>	33
3.2.2 <i>Alocação</i>	34
3.2.3 <i>Inventário da Análise do Ciclo de Vida (IACV)</i>	35
3.3 <i>Execução de ACV do processo convencional</i>	39
3.4 <i>Análise do inventário do Ciclo de Vida (AICV)</i>	40
3.5 <i>Avaliação econômica da planta de acrilonitrila</i>	41

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
<i>4.1 Avaliação do Ciclo de Vida Ambiental</i>	<i>42</i>
4.1.1 Avaliação de gases de efeito estufa (GEE).....	42
4.1.1.1 Análise de glicerol proveniente da soja	42
4.1.1.2 Análise do glicerol proveniente de óleo vegetal residual	47
4.1.1.3 GEE para a fase Acroleína	48
4.1.1.4 GEE para a fase Acrilonitrila	50
4.1.1.5 Acrilonitrila a partir de propeno	51
4.1.2 Consumo de água.....	52
4.1.2.1 Consumo de água da produção oriundo da soja.....	52
4.1.2.2 Consumo de água da produção de glicerol oriundo de OVR.....	53
4.1.2.3 Consumo de água do conjunto de processos da produção de acrilonitrila	53
4.1.2.4 Comparativo do consumo de água	54
4.1.3 Consumo de derivados fósseis.....	55
4.1.4 Toxicidade humana.....	56
4.1.5 Uso da terra	60
<i>4.2 Estudo de Viabilidade Econômica</i>	<i>61</i>
5 CONCLUSÃO	66
6 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	67
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
ANEXO A- Produção de biodiesel/glicerol da soja	77
ANEXO B- Produção biodiesel/glicerol a partir de OVR.	78
ANEXO C- Produção de acrilonitrila a partir do propeno na fase <i>gate-to-gate</i>	79
ANEXO D- Premissas e conceitos abordados para o estudo de valor presente líquido .	80

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1- Reações em leito fluidizado – SOHIO.	10
Tabela 2- Principais indicadores por pilares fundamentais.....	23
Tabela 3- referências para seleção de insumo por classificação geográfica.	28
Tabela 4- Fatores para aplicação do VPL da acrilonitrila.....	28
Tabela 5- Considerações para viabilidade econômica de projeto.....	29
Tabela 6 - Alocação para purificação do glicerol e produção da acrilonitrila.	35
Tabela 7- Plantios de soja do estado de Mato Grosso.	35
Tabela 8- IACV da etapa de purificação do glicerol.	38
Tabela 9 - Inventário para a desidratação em acroleína.....	38
Tabela 10- Inventário para a produção da acrilonitrila.	39
Tabela 11- Distribuição de emissões na obtenção de glicerol.....	46
Tabela 12 - Comparativo de emissões GEE para a purificação de glicerol.	48
Tabela 13 - Comparativo de emissões GEE para a produção de acroleína.....	49
Tabela 14 - Comparativo de emissões de GEE para a produção de acrilonitrila	50
Tabela 15- Adição de gás natural por kg de acrilonitrila em cada etapa 55	55
Tabela 16 - Distribuição de impactos carcinogênicos e não carcinogênicos (Oriundo da soja).....	57
Tabela 17 - Distribuição de impactos carcinogênicos e não carcinogênicos (Oriundo de OVR).....	59
Tabela 18 – Levantamento de preços de matérias-primas e produtos.	62
Tabela 19- Resultados de custos e receita para produção da acrilonitrila.....	62
Tabela 20 – Depreciação e fluxo de caixa da produção da acrilonitrila.	63
Tabela 21 – Taxa de juros nacional e geração de caixa.....	63
Tabela 22 – VPL para a produção da acrilonitrila.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1- Fórmula estrutural da acrilonitrila.	5
Figura 2-Distribuição da utilização da acrilonitrila.	6
Figura 3- Empresas de maior produção no mercado atual.	6
Figura 4- Países com maior exportação de acrilonitrila.	7
Figura 5- Países com maior importação de acrilonitrila.	8
Figura 6- Processo produtivo da acrilonitrila.	9
Figura 7-Produção global de biodiesel prevista até 2030.	11
Figura 8- Mercados que utilizam o glicerol.	12
Figura 9- Matérias-primas e produção de biocombustíveis na Europa.	14
Figura 10- Fluxograma simplificado de produção de acrilonitrila partir do glicerol.	16
Figura 11- Visão Global para estrutura ACV.	19
Figura 12- Esquema de categorias de impacto ambiental.	21
Figura 13- ACV e suas possibilidades de estudo.	24
Figura 14- Principais métodos de avaliação.	26
Figura 15- Partes sequenciais da produção.	31
Figura 16- Purificação do glicerol bruto.	31
Figura 17- Seção de reação.	32
Figura 18- Reação e purificação da acrilonitrila.	32
Figura 19 – Fronteiras do sistema para a produção da acrilonitrila a partir de glicerol .	34
Figura 20 – Divisões do processo para levantamento de inventários.	37
Figura 21- Emissões de kg de soja produzido para diferentes rotas.	43
Figura 22 - Comparativo de GEE na produção de glicerol.	46
Figura 23 - Comparativo para GEE da produção de glicerol purificado.	47
Figura 24 - Comparativo de emissões de GEE para a produção da acroleína entre as rotas	49
Figura 25 - Comparativo das emissões de GEE para a produção da acrilonitrila.	50
Figura 26 - Comparativo entre acrilonitrila (Glicerol) e acrilonitrila (comercial).	51
Figura 27 – Comparativo do consumo de água para a produção da acrilonitrila.	54
Figura 28- Escassez de recursos fóssil.	56

Figura 29- Distribuição de impactos carcinogênicos e não carcinogênicos (oriundo da soja).....	57
Figura 30- Distribuição de impactos carcinogênicos e não carcinogênicos (oriundo de OVR).....	58
Figura 31 - Comparativo de impactos carcinogênicos (a) e de impactos não carcinogênicos (b).....	60

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABS	Acrilonitrila – Butadieno – estireno
ACV	Análise do Ciclo de Vida
ACVS	Avaliação do ciclo de vida social
AECV	Avaliação econômica do ciclo de vida
AICV	Avaliação do impacto do ciclo de vida
BR	Brasil
CF	Custo Fixo
CV	Custo Variável
EU	Europa
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLO	Global
GWP	Global Warming Potential
ICV	Avaliação do inventário do Ciclo de vida
IDH	índice de desenvolvimento humano
IEA	International Energy Agency
IT	Investimento Total
kg	Quilograma
kg/h	Vazao mássica
Km	Quilômetro
KWh	Quilowatt – hora
MAPA	Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento
MT	Mega tonelada
NA	Acrilonitrila
NBR	Acrilonitrila – Butadieno
PD&I	Projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
PIB	Produto Interno Bruto
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel
REC	Receita
ROW	Rest of the Word
SAN	Acrilonitrila – Estireno

SCS	Selo combustível Social
TIR	Taxa interna de retorno
TO	Tempo operacional
VPL	Valor Presente Líquido
WCO	Waste cooking oil (óleo residual)
Wt%	Fração mássica

1 INTRODUÇÃO

A acrilonitrila, (C_3H_3N), é um dos monômeros utilizados na indústria química para produção de plásticos, borrachas, fibras acrílicas, fibras de carbono, resinas e têxtil. As propriedades deste polímero incluem alta resistência a solventes e elevada resistência a tração após estiramento (BELL, 2021). A versatilidade da acrilonitrila na produção de copolímeros com compostos insaturados, como a resina ABS (acrilonitrila-butadieno-estireno), a resina SAN (acrilonitrila-estireno) e a borracha nitrílica conhecida como NBR (acrilonitrila-butadieno), justifica seu alto valor de mercado. Em 2020, o valor médio da acrilonitrila no mercado global era de US\$ 3.035,00/t com aproximadamente 1,5 Mt/ano (COMEZ, 2022a; REZAIE *et al.*, 2020).

O processo SOHIO, desenvolvido pela *The Standard Oil Company*, é o mais utilizado comercialmente e consiste na amoxidação de propeno em presença de amônia e ar, em reator de leito fluidizado, obtendo acrilonitrila a 99,4 p/p (FIROUZI *et al.*, 2019; DIMIAN; BILDEA, 2008). Um catalisador com molibdato de bismuto ($BiMoO_x$) como fase ativa foi desenvolvido na década de 50 e, desde então, diversas melhorias têm sido feitas, com a adição de novos metais e promotores aumentando a sua atividade, seletividade e estabilidade (BELL, 2021). A substituição de metais promotores, *e.g.* cromo por antimônio, indica melhorias na produção, com aumento de conversão de propeno e maior seletividade a acrilonitrila (SILVA *et al.*, 2016).

No setor industrial, além de modificações de processos, duas estratégias podem ser adotadas para alternativas tecnológicas: substituição de catalisador ou alteração de matéria-prima. A substituição da matéria-prima está relacionada à disponibilidade do mercado, variação no custo de produção e a outros objetivos estratégicos técnicos, tais como melhorias de indicadores ambientais e sociais. A utilização de matéria-prima derivada de biomassa emerge como alternativa para a produção da acrilonitrila, podendo coexistir com outros processos já consolidados. No entanto, estudos identificam barreiras para implementação em escala comercial que envolvem aspectos econômicos e sociais possivelmente relacionadas à localização e a políticas governamentais (BRAZDIL, 2019).

A substituição da matéria-prima fóssil por uma derivada de biomassa pode contribuir para a estratégia de descarbonização da indústria na transição para uma economia de baixo carbono, adequando-se a metas de redução de emissões de gases de efeito estufa, bem como no desenvolvimento de novos modelos de negócio. Adicionalmente, a produção da acrilonitrila a

partir de biomassa tem o potencial de ser viável economicamente, elevar o desenvolvimento social e desempenho ambiental mais favorável. Um exemplo de impacto positivo é o Selo Combustível Social (SCS), cuja identificação é concedida pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) a cada unidade industrial produtora de biodiesel com o intuito de impulsionar a inclusão e o desenvolvimento sustentável familiar na produção deste biocombustível, facilitando o crescimento do negócio, obtenção de financiamentos, aquisição de equipamentos, entre outros benefícios (EPE, 2020).

O glicerol pode ser utilizado em diversos ramos industriais como matéria-prima, *e.g.*, produção de cosméticos, produção de alimentos e fármacos. Como consequência do aumento da produção de biodiesel devido ao crescimento da demanda global, existe uma necessidade de desenvolver novos usos de glicerol.

A demanda crescente por combustível e a potencial redução dos impactos gerados em suas respectivas cadeias, tem promovido o uso de óleos vegetais residuais (WCO) na produção de biodiesel, agregando valores econômicos, ambientais e sociais no cenário energético. A geração de resíduos é normalmente decorrente da utilização de óleos vegetais em cozinhas, restaurantes e indústrias que utilizam fritura de alimentos. Estima-se que entre os anos de 2020 e 2021 o consumo global de óleos vegetais foi de aproximadamente 200 milhões de toneladas (AWOGBEMI *et al.*, 2021).

Uma alternativa potencialmente mais sustentável para produção da acrilonitrila é a reação de desidratação de glicerol a acroleína que, em seguida, é amoxidada a acrilonitrila em reator de leito fluidizado na presença de amônia e ar (BRAGA *et al.*, 2021). A possibilidade de uso do glicerol aumentaria a sustentabilidade e economicidade das plantas de biodiesel. Além de ser uma alternativa para consumir a oferta elevada de glicerol no mercado, a sua utilização na produção de acrilonitrila enquadra-se no conceito de economia circular entre as cadeias produtivas (YE & REN, 2020). É relevante que o excesso de oferta de glicerol reduz o seu valor e o torna atrativo para geração de produtos de maior valor agregado.

A Análise do Ciclo de Vida (ACV) pode ser empregada para avaliar os impactos e desempenho ambiental da utilização do glicerol no processo de produção da acrilonitrila. A ACV permite, através de dados de inventários obtidos de balanços de massa, energia e informações de modais de transporte em cada etapa de produção, a identificação dos efeitos ambientais de um determinado processo ou produto, avaliando os impactos ambientais gerados ao longo da cadeia (ABNT 14040, 2014). A realização de estudos detalhados de ACV

possibilita a identificação de oportunidades de melhorias no desempenho ambiental na cadeia do produto, auxilia na tomada de decisão no desenvolvimento e acompanhamento de processos industriais e na proposição de indicadores de desempenho ambiental (ESTEVEVES, 2016).

A ACV é uma ferramenta de gestão ambiental que possibilita identificar aspectos ambientais, quantificar seus impactos e propor melhorias nos projetos. No entanto, esta técnica pode ser expandida para estudos mais complexos visando a análise de três dimensões fundamentais do ciclo de vida de processos e produtos: econômica, social e ambiental. Assim, a análise tridimensional do ciclo de vida fornece o desempenho ambiental, assim como os impactos econômico e social de determinado processo ou produto (WAHRLICH *et al.*, 2020).

Entre os softwares comerciais dedicados à análise de ciclo de vida na sua dimensão ambiental, o SimaPRO[®] é o mais utilizado, possuindo diversos métodos de avaliação de impacto (RIBASKI *et al.*, 2020). Outra vantagem do emprego do SimaPRO[®] é a integração com nove bancos de dados com destaque para o *Ecoinvent*. Criado e mantido pelo governo da Suíça, o banco de dados *Ecoinvent* constitui o maior conjunto de dados do mundo, abrangendo cerca de 4000 inventários de produtos nas mais diversas áreas, *e.g.*, química, produção de combustíveis, agrícola, suprimentos, biomateriais, resíduos e farmacêutica. (ESTEVEVES, 2016; MORENO RUIZ *et al.*, 2021). Por fim, este *software* possui grande flexibilidade para lidar com diferentes métodos e avaliações de impacto, ajustando-se facilmente a diferentes cenários ao considerar, por exemplo, particularidades da matriz energética local (ALVARENGA NETTO; LUCENTE, 2016).

Nesse trabalho, busca-se avaliar se o glicerol, coproduto da produção de biodiesel, é economicamente viável e ambientalmente sustentável na substituição de propeno na produção da acrilonitrila. Até onde temos conhecimento, não existe na literatura uma análise comparativa, a nível de sustentabilidade de produto, entre a rota comercial da acrilonitrila e a rota a partir do glicerol como matéria-prima. Em particular, é fundamental a análise ambiental, social e econômica dos métodos de obtenção da matéria-prima utilizada na produção do biodiesel, como o óleo de soja e os óleos vegetais residuais para identificar suas características e potenciais impactos.

1.1 Objetivo Geral

Realizar e avaliar a Análise do Ciclo de Vida (ACV) de acrilonitrila produzida a partir da amoxidação do glicerol, oriundo do biodiesel de grãos de soja e óleo vegetal residual, seguido do estudo da viabilidade econômica e a sustentabilidade socioambiental, comparando com o processo industrial atual, baseado no propeno de matriz fóssil.

1.2 Objetivos específicos

- Analisar os impactos ambientais associados à utilização de grãos de soja do estado do Mato Grosso para produção de biodiesel e glicerol;
- Avaliar a utilização de óleos vegetais residuais como rota para a produção da acrilonitrila;
- Aplicar a técnica de Análise do Ciclo de Vida (ACV) para a rota de produção de acrilonitrila a partir do glicerol com base em dados de estudos modelados existentes na literatura;
- Analisar o cenário de produção da acrilonitrila a partir dos resultados ambientais realizadas no SimaPro[®], considerando categorias condizentes com o processo;
- Comparar os processos de amoxidação do propeno e glicerol considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais;
- Realizar a análise de viabilidade econômica da utilização do glicerol para a produção de acrilonitrila.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

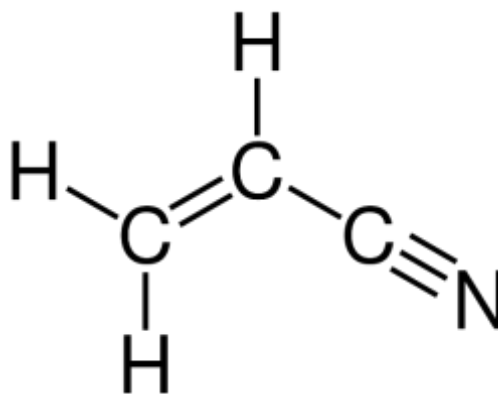
2.1 Considerações sobre o mercado da acrilonitrila

Nessa seção será apresentada uma análise das aplicações comerciais, principais produtores e aspectos globais do mercado da acrilonitrila.

2.1.1 Aplicação e maiores empresas

A acrilonitrila é um monômero orgânico líquido e transparente obtida, normalmente, através da amoxidação do propeno. Sua estrutura molecular (Figura 1) consiste em um grupo vinil ligado a um grupo nitrila. Versátil, de vasta empregabilidade e capaz de formar copolímeros com compostos insaturados, a acrilonitrila é utilizada na produção de resinas, como ABS (acrilonitrila-butadieno-estireno), SAN (acrilonitrila-estireno), borracha nitrílica - NBR (acrilonitrila-butadieno), acrilamida, fibra acrílica, além de outros (DA SILVA, 2014).

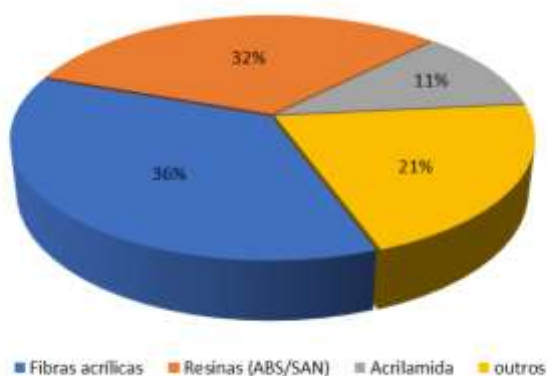
Figura 1- Fórmula estrutural da acrilonitrila.



Fonte: (DA SILVA, 2014).

Estima-se que 36% de toda acrilonitrila produzida no mundo é utilizada por indústrias de fibras acrílicas, 32% em indústrias de resina ABS e SAN (utilizadas em eletrodomésticos e automóveis). A parcela remanescente de acrilonitrila é distribuída entre as indústrias de acrilamidas (empregada como agente de floculação em tratamento de água) e outros seguimentos como éter-aminas e adiponitrila, utilizadas como aditivos para mineração e produção do nylon 66 respectivamente, conforme a Figura 2.

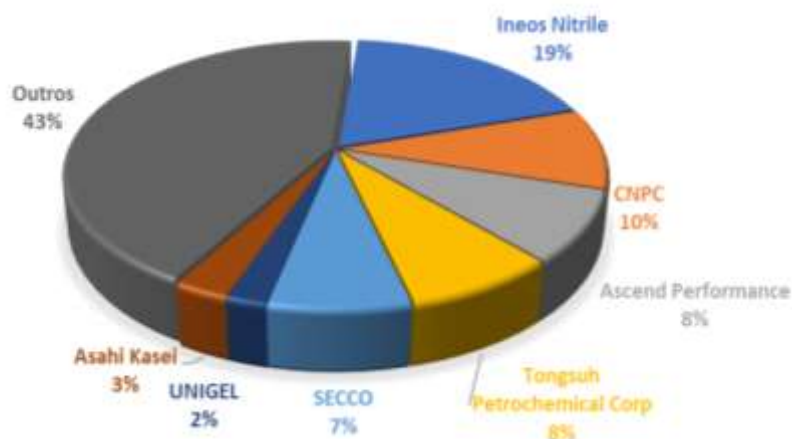
Figura 2-Distribuição da utilização da acrilonitrila.



Fonte: Adaptado IGTPAN (2021).

A acrilonitrila é produzida em diversos países do mundo. Dentre os países produtores, Alemanha, Estados Unidos, China e Japão são os mais relevantes, detendo o maior número de unidades produtoras e com maior expressividade no ano de 2020. Um levantamento realizado pelo Instituto Granado de Tecnologia da Poliacrilonitrila (IGTPAN) identificou os maiores produtores de acrilonitrila no ano de 2020, conforme a Figura 3.

Figura 3- Empresas de maior produção no mercado atual.



Fonte: Adaptada IGTPAN (2021).

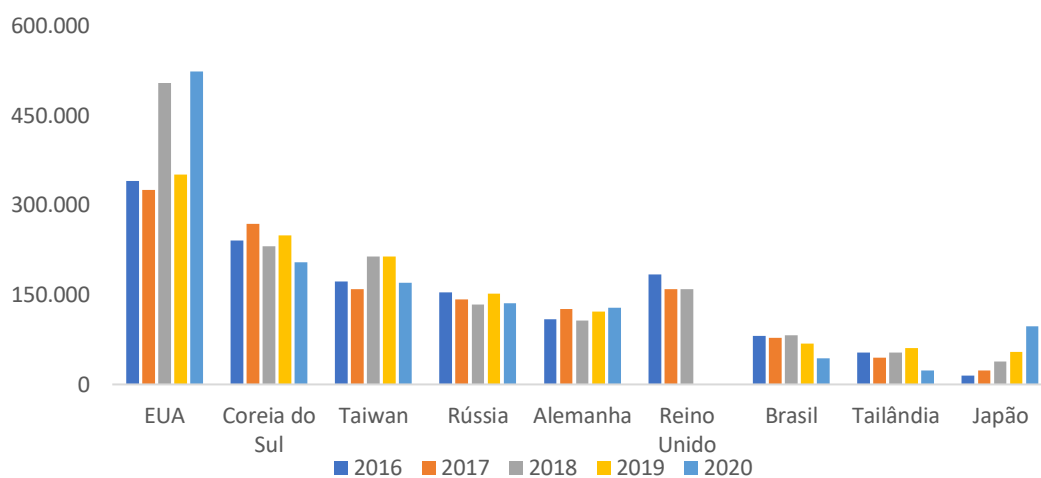
Destacam-se três empresas, em especial: INEOS (19%) – empresa alemã reconhecida pelo seu *Know-How* tecnológico e título de maior produtora, UNIGEL (2%) – empresa brasileira classificada entre as 20 maiores produtoras do mundo, e a Asahi Kansei (3%) –

empresa japonesa listada entre as maiores possuindo como base produtiva a utilização do propano como matéria-prima.

2.1.2 Aspectos de mercado

Um levantamento das exportações por países entre os anos de 2016 e 2020 foi realizado com base no ITC (*International Trade Center*), ilustrado na Figura 4 (ITC, 2021).

Figura 4- Países com maior exportação de acrilonitrila.

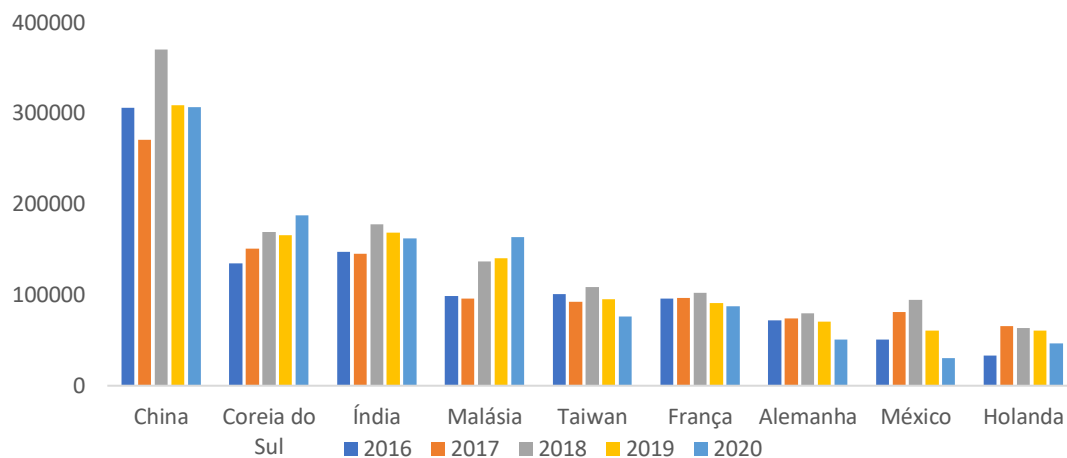


Fonte: Adaptado de ITC (2021).

Nota-se a hegemonia dos Estados Unidos na produção de acrilonitrila, seguido pela República da Coreia, Taiwan, Rússia e Reino Unido. Em casos como Estados Unidos e Rússia, a disponibilidade do propeno proveniente do petróleo infere na elevada expressividade comercial. Em países como República da Coreia, Taiwan, Reino Unido e Tailândia, a produção da acrilonitrila pode ser considerada elevada, tendo em vista a necessidade continental do produto. Adicionalmente, vale ressaltar que o Reino Unido não divulgou os dados referentes aos anos de 2019 e 2020. No Brasil, a única empresa produtora de acrilonitrila é a UNIGEL e maior parte de sua produção é destinada à exportação.

Por sua vez, a Figura 5 ilustra os países com maior expressividade na importação de acrilonitrila.

Figura 5- Países com maior importação de acrilonitrila.



Fonte: Elaborado a partir de ITC (2021).

A maior parte dos países com importação significativa de acrilonitrila estão equiparados em termos de demanda, refletindo a importação e emprego da acrilonitrila para atender as necessidades de mercado nacional e regional (considerando países vizinhos e parceiros). No entanto, a liderança da China na importação da acrilonitrila é constatada devido ao expressivo volume adquirido. Este fato pode ser justificado por este país ser “a fábrica do mundo”, agregando diversas indústrias (CINTRA *et al.*, 2015).

2.2 Desenvolvimento do Processo SOHIO

O processo SOHIO é apresentado de modo a facilitar entendimento e expressar a importância de seu emprego, descrevendo-se, além das etapas de processo, um resumo sobre seu desenvolvimento ao longo da história.

2.2.1 Histórico de produção da acrilonitrila

O primeiro relato da síntese da acrilonitrila, por Charles Moureu, ocorreu somente 50 anos após o primeiro esboço teórico descrito por Ferdinand Redtenbacher em 1843. Neste momento, a acrilonitrila era pensada para fins de pesquisas visando a aplicabilidade para borrachas sintéticas (SCHAECHTER, 2009).

Comercialmente, a acrilonitrila ganhou destaque durante a segunda guerra mundial, sendo produzida principalmente na Alemanha e nos Estados Unidos devido a busca por

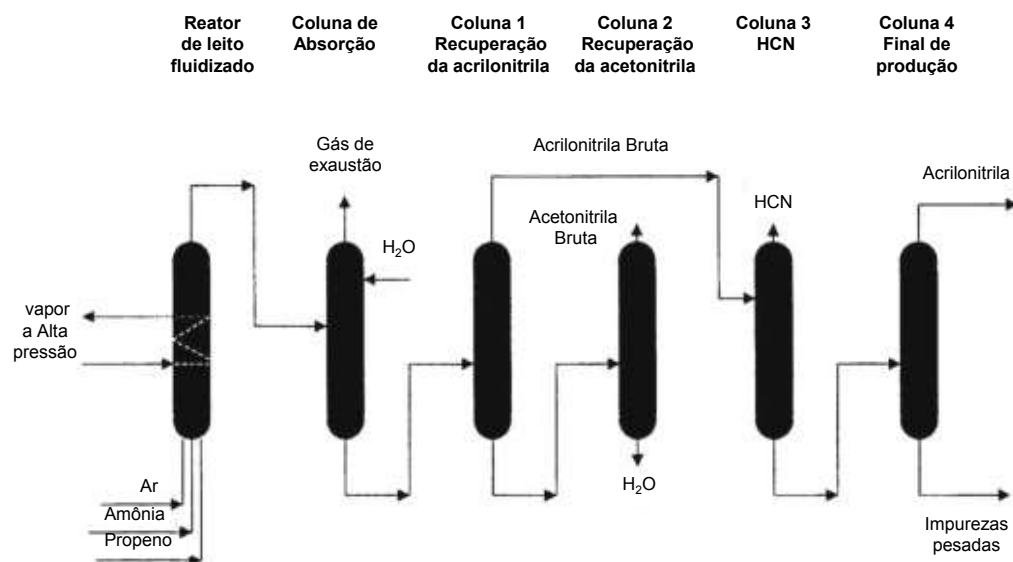
borrachas mais resistentes à temperatura, menor desgaste e mais seletivas à degradação por solventes (OLABISI *et al.*, 2016). O processo neste período era baseado na desidratação catalítica de cianidrina de etileno, produzida a partir de óxido de etileno e de ácido cianídrico.

Com o aumento da demanda das resinas acrílicas, por volta de 1950, a necessidade de produzir acrilonitrila em maior quantidade e com menores custos envolvidos no processo tornou-se crucial para o desenvolvimento econômico dos mais diversos setores envolvidos. Então, a empresa SOHIO, *The Standard Oil Company*, fundada por John D. Rockefeller, investiu em diversas linhas de pesquisa no intuito de promover maior usabilidade do petróleo explorado em território norte americano. Uma dessas linhas foi baseada em um processo em fase vapor, por oxidação seletiva de propeno e de amônia, conhecida como amoxidação do propeno – Processo SOHIO (BRAZDIL, 1991).

2.2.2 Processo SOHIO

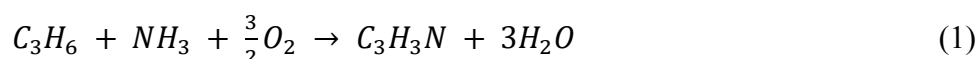
Consolidado no mercado, o processo SOHIO é o mais empregado entre as empresas produtoras de acrilonitrila no mundo. O processo produtivo da acrilonitrila a partir do propeno foi descrito mais recentemente por Gupta; Afshari (2018), demonstrando o processo produtivo e as principais correntes, Figura 6.

Figura 6- Processo produtivo da acrilonitrila.



Fonte: (GUPTA; AFSHARI, 2018).

O processo SOHIO é baseado na reação de amoxidação do propeno que ocorre em fase gasosa. Primeiramente, um reator de leito fluidizado contendo catalisadores de óxidos metálicos mistos é alimentado por correntes contendo propeno, amônia e ar para a produção da acrilonitrila (BASTIÃO; CAXIANO; PRATA, 2019). Parte do oxigênio presente no ar da corrente de entrada auxilia no processo regenerativo do catalisador. Devido ao caráter exotérmico da reação, representada na equação (1), o reator é resfriado através de serpentinas, gerando vapor de alta pressão.



Segundo Dimian; Bildea (2008), outras reações paralelas com menores taxas de conversão podem ocorrer no leito fluidizado, produzindo ácido cianídrico (HCN), acroleína (C₃H₄O), succionitrila (C₄H₄N₂) e CO₂. A Tabela 1 apresenta as possíveis reações e suas conversões.

Tabela 1- Reações em leito fluidizado – SOHIO.

Reação	Conversão
$C_3H_6 + NH_3 + 1,5 O_2 \rightarrow C_3H_3N + 3 H_2O$	0.801
$2 C_3H_6 + 3 NH_3 + 3 O_2 \rightarrow 3 C_2H_3N + 6 H_2O$	0.021
$C_3H_6 + 3 NH_3 + 3 O_2 \rightarrow 3 HCN + 6 H_2O$	0.027
$C_3H_6 + 4,5 O_2 \rightarrow 3 CO_2 + 3 H_2O$	0.107
$C_3H_6 + O_2 \rightarrow C_3H_4O + H_2O$	0.027
$C_3H_3N + HCN \rightarrow C_4H_4N_2$	0.005

Fonte: (DIMIAN, BILDEA, 2008).

A corrente de amônia que não reagiu no leito fluidizado é neutralizada por uma corrente adicional de ácido sulfúrico, convertendo-a em sulfato de amônio (DEEPA; ANUSHA; ASHA, 2016). O sulfato de amônio é o primeiro coproduto da produção da acrilonitrila e, normalmente, é empregado no setor agrícola como repositores de nitrogênio e enxofre no solo.

Após a neutralização da amônia remanescente, o efluente é resfriado em uma torre de absorção onde, através da água inserida em contracorrente, são separados os produtos reacionais dos gases de exaustão proveniente na corrente (como monóxido de carbono, dióxido de

carbono, nitrogênio e outros hidrocarbonetos que não reagiram). Os produtos reacionais são direcionados para colunas de separação onde são produzidos outros subprodutos como ácido cianídrico e acetonitrila. A acrilonitrila pura é obtida na última coluna de separação onde uma fração de substâncias impuras é separada e destinada para tratamento e incineração.

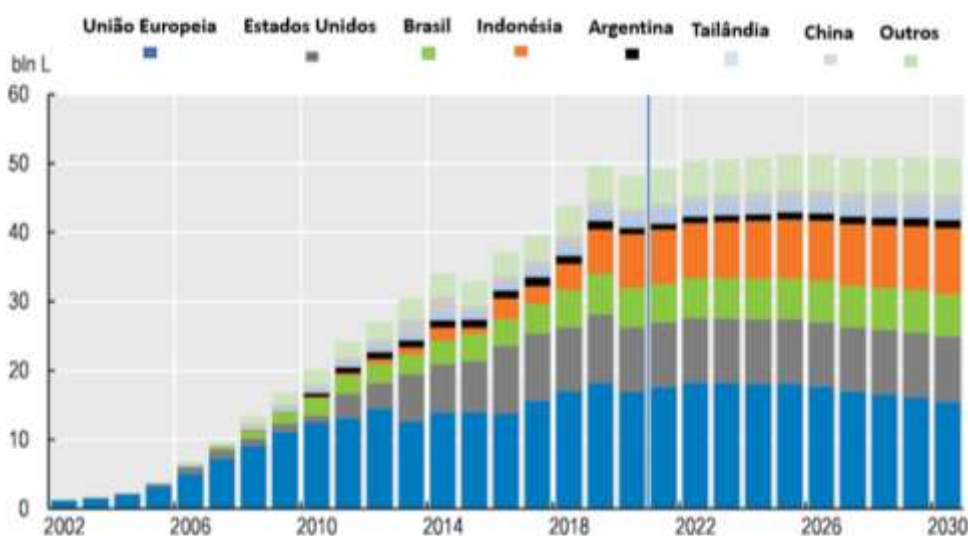
2.3 Glicerol

Coproduto do processo de obtenção do biodiesel, o glicerol é um composto orgânico de grande aplicabilidade no mercado. Normalmente, a cada 10 kg de biodiesel produzido é obtido 1 kg de glicerol bruto como coproduto (ZHANG *et al.*, 2022). A grande disponibilidade de glicerol no mercado tem incentivado a busca por processos que o utilizem como matéria-prima para obtenção de produtos com maior valor agregado, como a acrilonitrila.

2.3.1 Produção e mercado

O aumento da demanda energética que atenda o crescimento do mercado global e a corrida por combustíveis que apresentem menor pegada global, ou menor *footprint*, acelerou significativamente a produção de biocombustíveis. Estimativas provenientes da *Organisation for Economic Co-operation and Development* (OECD) indicam que a produção de biocombustíveis deve aumentar de 2019 a 2030, proveniente de políticas governamentais, disponibilidade de matéria-prima e potencialidade de mercado (Figura 7).

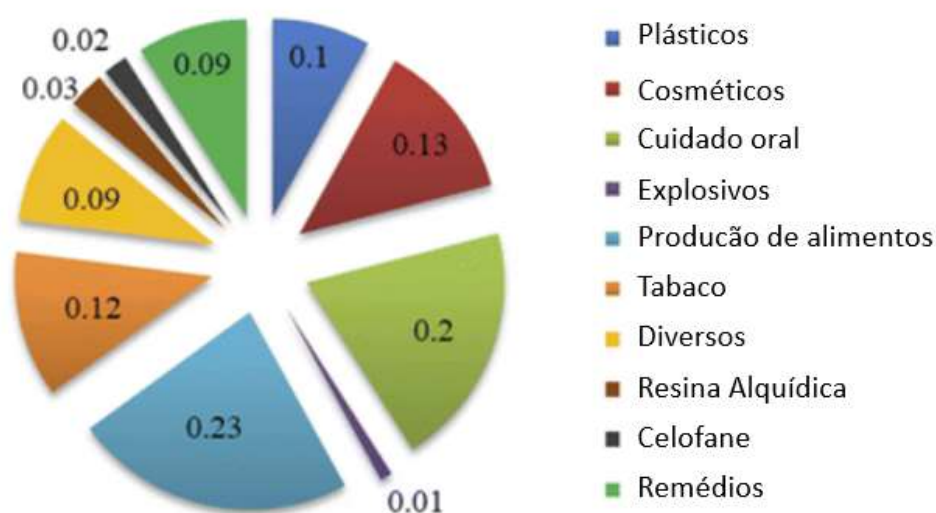
Figura 7-Produção global de biodiesel prevista até 2030.



Fonte: (OECD, 2021).

A retração do mercado global em 2020, proveniente do efeito pandêmico (COVID - 19), refletiu diretamente na produção de biocombustíveis, reduzindo a quantidade produzida de biodiesel. Considerando as informações anteriores, estima-se que, desde 2019, cerca de 5 bilhões de litros de glicerol foram produzidos anualmente. A depender do grau de pureza, o glicerol pode ser utilizado em diversos setores produtivos como alimentício, farmacêutico, indústria de cosméticos, papelero e outros. A Figura 8 ilustra os potenciais mercados onde se faz presente o uso do glicerol (LIU; ZHONG; LAWAL, 2022).

Figura 8- Mercados que utilizam o glicerol.



Fonte: (LIU; ZHONG; LAWAL, 2022).

Destacando alguns dos setores, na indústria farmacêutica o glicerol é utilizado na formulação de xaropes, plastificantes para cápsulas e pomadas. Já para o setor de cosméticos pode-se encontrar o glicerol na composição de shampoos, condicionadores, cremes e protetores. Por fim, pode-se utilizar o glicerol na indústria alimentícia em produtos como espessantes, e na fabricação de bolos, refrigerantes e doces (MARIYAM *et al.*, 2022).

O aumento da demanda por biocombustíveis de certo modo acompanha as necessidades e interesse do mercado global, relacionando a pegada ambiental, potencial energético, preço e disponibilidade do mercado. No entanto, o mercado dos coprodutos, como o glicerol, não cresce com o mesmo potencial, considerando que a utilização de matérias-primas com menor *footprint*

ainda é emergente se comparada com a utilização de matérias-primas fósseis. Abordagens que empregam o glicerol como purificação para fabricação de fármacos, uso como óleo de aquecimento e reforma de hidrogênio têm como objetivo elevar o seu consumo através de produtos com maior valor de mercado (CHILAKAMARRY *et al.*, 2021).

2.3.2 *Política de desenvolvimento nacional*

O Brasil destaca-se no desenvolvimento do setor agrícola como um dos principais países produtores e exportadores de alimentos, além de deter áreas de preservação de alta biodiversidade. Tal desenvolvimento setorial interfere no equilíbrio do balanço “expansão versus preservação”, reforçando a necessidade de regulamentações e planos nacionais de desenvolvimento. Com a rápida expansão agrícola e o aumento da demanda de combustíveis derivados de biomassa, decorrente do aumento populacional, houve um crescimento produtivo de biocombustíveis, atendendo o mercado (GOES *et al.*, 2018).

O Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) foi lançado em 2004 pelo Governo Federal com o intuito de traçar planos estratégicos, buscando alternativas aos combustíveis fósseis e promover o desenvolvimento do agronegócio familiar. As diretrizes deste programa ressaltam a importância da inclusão social, sustentabilidade, geração de renda e desenvolvimento econômico, além de estimular a competição comercial e incentivar a produção de biodiesel, a partir de diferentes fontes de oleaginosas em todo território nacional (DA COSTA; PEREIRA, 2020).

Dentre os mecanismos empregados pelo Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), o Selo de Combustível Social (SGS) é um componente de identificação concedido às empresas produtoras de biodiesel, promovendo regulamentação e adequação do produto às leis de mercado nacional, inserção da família brasileira no mercado, geração de empregos, potencial de investimento e disponibilidade para solicitação de auxílios e empréstimos para desenvolvimento (ISOLANI; TONIN, 2013).

Com todo este biodiesel sendo produzido e destinado em sua grande maioria para o mercado exterior, desenvolve-se um problema com glicerol, pois mesmo sendo comercializado entre indústrias parceiras, o volume remanescente no mercado reflete a necessidade do maior emprego de alternativas viáveis para estimular o consumo deste coproduto. Implementar

processos que utilizem esta matéria-prima podem, além de promover produtos com maior valor agregado, fortalece o conceito de economia circular na cadeia produtiva.

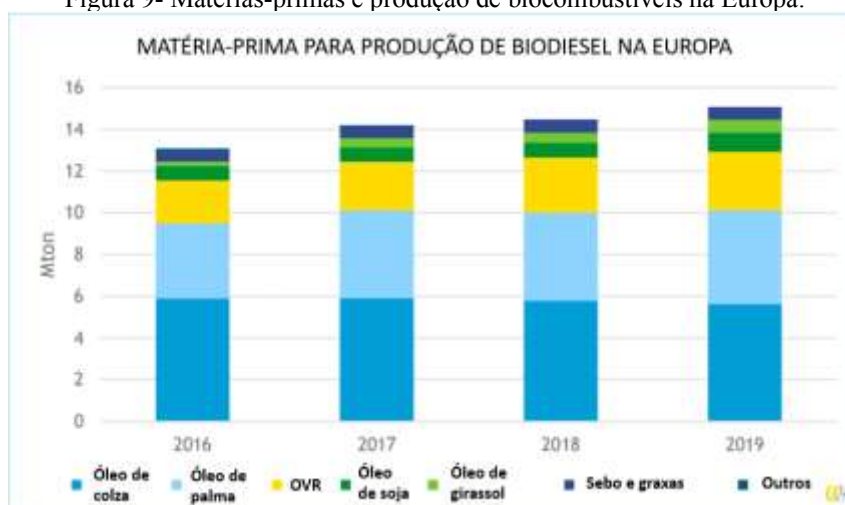
2.3.3 Óleos vegetais residuais

Os óleos vegetais residuais (OVR) são provenientes do preparo de alimentos e, quando coletados, podem ser utilizados para a produção de biodiesel, sabões e insumos para produção de tintas, vernizes e para a produção de ração animal (ABIOVE, 2021a). Normalmente, estes óleos são descartados indevidamente e podem causar impactos ambientais significativos no solo devido às suas características de impermeabilização que impede a germinação de novas sementes e a captação de água. Além disto, os OVR podem acelerar a proliferação de vetores e roedores devido ao acúmulo de resíduos orgânicos nas cidades (THODE FILHO *et al.*, 2020).

A coleta e utilização de OVR tem crescido em escala global, em destaque para países Europeus e Reino Unido. As novas políticas promovidas pela EU-28, *EU Export promotion Programs for Agricultural Productions*, dobraram as cotas nacionais de energia sustentável para os países do bloco, com exceção da Alemanha que pratica com maior intensidade a política de descarbonização (ZUR; OEL-PROTEINPFLANZEN, 2017).

Segundo o relatório *CE Delft* (GRINSVEN *et al.*, 2020), o biodiesel proveniente de OVR já ocupa uma parcela significativa na matriz energética dos países europeus e tem crescido ao longo dos anos. A Figura 9 mostra a produção de biodiesel, por tipo de matéria-prima, e suas respectivas participações ao longo dos anos de 2016 a 2019.

Figura 9- Matérias-primas e produção de biocombustíveis na Europa.



Fonte: (GRINSVEN *et al.*, 2020).

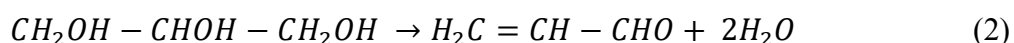
Nota-se que no período de 2016 a 2019 houve um acréscimo na utilização de biodiesel oriundo de OVR. Ainda segundo o relatório do *CE Delft*, em 2019 mais da metade de todo OVR convertido em biodiesel na Europa foi importado de países como China, Indonésia, Rússia e Estados Unidos. Estimativas indicam que a Europa consumiu cerca de 2,6 Mt de OVR na produção de biodiesel em 2020. Deste total, 73% correspondem a parcela importada de outros países.

No Brasil, cerca de 3 bilhões de litros de óleos vegetais virgens (OVV) são consumidos anualmente para fim alimentício (ABIOVE, 2021a). Mesmo existindo a lei N° 12.305 (Política Nacional de Resíduos Sólidos), a sua aplicação e controle para abater maiores parcelas de OVR descartados irregularmente é insuficiente. Destaca-se que a cada litro de óleo despejado na rede de esgoto tem o potencial de poluir cerca de 1 milhão de litros de água pura (DE CALDAS; SCOTON; BATTISTELLE, 2018).

2.3.4 *Acrilonitrila a partir do glicerol – Proposta de rota potencialmente sustentável*

A utilização de glicerol como matéria-prima para a produção da acrilonitrila teria como possíveis vantagens competitivas menor ambiental e grande disponibilidade de matéria-prima (BRAGA *et al.*, 2019), com potencial para deslocar o uso de matéria-prima não renovável (fóssil).

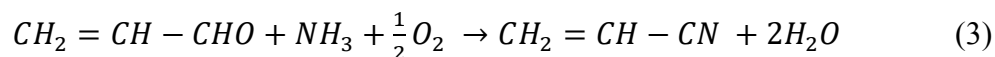
Desenvolvido e patenteado por Jean-Luc Dubois (DUBOIS, 2008), o método para converter o glicerol em acrilonitrila é baseado em um processo reacional de duas etapas: Desidratação do glicerol em acroleína e amoxidação da acroleína em acrilonitrila. A etapa de desidratação ocorre em presença de um catalisador ácido. O mecanismo para a primeira etapa da reação está descrito na equação (2):



Além da acroleína, há coproduto de acetol, propanaldeídos, acetaldeídos, acetona, éteres de glicerol cíclicos, fenol e compostos poliaromáticos. Os coprodutos de característica aromática promovem a desativação do catalisador por coqueificação (BOZGA *et al.*, 2011).

Para evitar este acúmulo, adiciona-se oxigênio na corrente de alimentação (proveniente do ar) com o intuito de oxidar os coprodutos mais pesados. A amoxidação, na etapa seguinte,

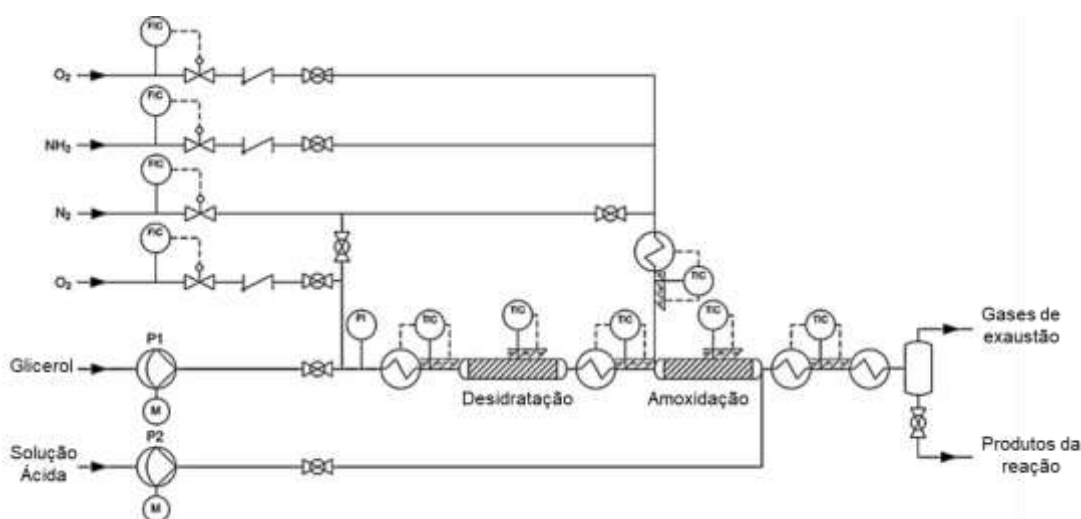
ocorre com adição de amônia e ar (para suprimir oxigênio), descrita na equação (3), com produção de água:



Observa-se que após a reação obtém-se, pela estequiometria, 2 mols de água para cada mol de acrilonitrila.

Um esquema proposto por Liebig *et al.*, (2013) utiliza dois reatores em série: O primeiro é responsável pela desidratação do glicerol e o segundo pela amoxidação da acroleína. A acrilonitrila produzida é direcionada para uma coluna de absorção onde são removidos os gases de exaustão. A representação esquemática é apresentada na Figura 10.

Figura 10- Fluxograma simplificado de produção de acrilonitrila partir do glicerol.



Fonte: (LIEBIG *et al.*, 2013).

Os produtos de reação são direcionados para colunas de destilação onde obtém-se a acrilonitrila purificada e seus coprodutos. O projeto do trem de destilação depende da especificação de pureza dos produtos a alcançar e dos coprodutos a recuperar. Destaca-se que não há projeto em operação para o processo proposto.

Braga *et al.*, (2021) concluíram que a viabilidade da produção de acrilonitrila a partir de glicerol, considerando a redução de custo de matéria-prima e a eficiência de recuperação do produto com alto grau de pureza (99,9%). Segundo os autores, a diferença do custo de propeno (US\$ 1.048,00 / t) e glicerol (US\$ 275,60 / t) e a projeção de aumento da produção de biodiesel justificam esforços de desenvolvimento do processo.

Assim como a utilização do biodiesel, espera-se que o glicerol contribua positivamente para a redução de Gases de Efeito Estufa (GEE), mais especificamente do CO₂, quando empregado como matéria-prima no processo industrial do estudo, tendo em vista seu conceito de matéria-prima mais sustentável. Caracterizado como resíduo de produção industrial em diversos estudos devido seu grande volume produzido, o glicerol tem sido incluído em projeções futuras como insumo de uma matriz energética global descarbonizada como, por exemplo, na obtenção de hidrogênio (ALIZADEH SAHRAEI *et al.*, 2021).

2.4 Análise do ciclo de vida (ACV) e sua aplicação

A análise do ciclo de vida utiliza fluxos de entrada e saída de massa e energia ao longo do ciclo de vida do produto (desde a extração de matéria-prima à produção, transporte, utilização e descarte) para identificar e mensurar os impactos ambientais ao longo das etapas do sistema proposto – ciclo de vida, e é descrita na ABNT ISO 14040 (2014).

A ausência de indicadores de impacto, dados estatísticos, modelagem complexa, diferença de cenários, as hipóteses foram assumidas e o grau de precisão dos dados são alguns dos fatores que podem alterar e limitar a análise (SEVIGNÉ-ITOIZ *et al.*, 2021). Adicionalmente, o desenvolvimento da ACV depende do ponto de vista e experiência de quem propõe o estudo. Por sua natureza subjetiva, o estudo requer um painel de especialistas para validação de resultados, envolvendo revisão de etapas de construção de inventário de ciclo de vida e de análise desse inventário.

A *The International Organization for Standardization* (ISO) estabelece procedimentos e padrões para o desenvolvimento de análises de sustentabilidade auditáveis. Com início na ISO 14040, elaborada na década de 90, foram desenvolvidas normas internacionais complementares, atualizadas ao longo dos anos (SALWA *et al.*, 2021).

Mesmo apresentando um conjunto de oportunidades e atributos para mapear e promover a produção com menor *footprint*, a aplicação da técnica ACV tem limitações que podem apresentar variações significativas ao longo do projeto. A ausência de indicadores de impacto, dados estatísticos, modelagem complexa, diferença de cenários, quais hipóteses foram assumidas e grau de precisão dos dados validados são alguns dos fatores que podem alterar os resultados obtidos ao longo do estudo e limitar a análise (SEVIGNÉ-ITOIZ *et al.*, 2021). Além

disso, o desenvolvimento da ACV depende do ponto de vista e experiência de quem propõe o estudo, podendo apresentar divergências em futuras réplicas e trélicas.

A adequação de processos de produção às normas técnicas tem denotado o comprometimento e credibilidade da empresa no mercado. Atender as normas de gestão ambiental proporciona vantagem comercial, alinhando sustentabilidade, organização orçamentarem e visão estratégica em um cenário global (AMOAKO, 2020).

A utilização da NBR ISO 14001 para o desenvolvimento de trabalhos baseados em gestão ambiental é considerada de suma importância, tendo em vista a organização de metas de sustentabilidade ambiental como abatimento de emissões, gestão de resíduos, benefícios à sociedade e proteção ao meio ambiente (GROTTA *et al.*, 2020).

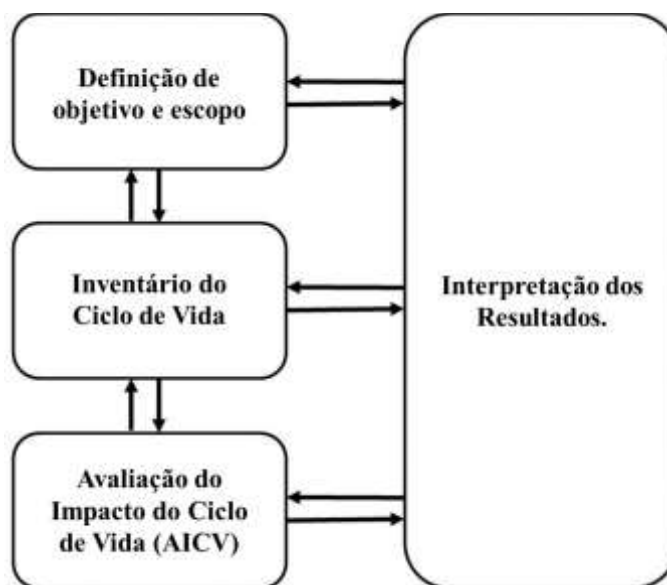
Dentro do pacote de normas existentes na série NBR ISO 14001, as que atendem as necessidades do estudo ACV são:

- ABNT NBR ISO 14040: 2014 – Avaliação do ciclo de vida – Esta norma descreve os princípios e estruturas de uma ACV, compreendendo desde a obtenção do objetivo e escopo até a obtenção dos resultados e seus critérios de análise.
- ABNT NBR ISO 14044: 2009 – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações. Esta norma serve como material complementar para a norma ABNT NBR ISO 14040: 2014. Os conceitos de Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida e Estudos de Inventário do Ciclo de Vida são aprofundados nesta norma.

2.4.1 Estrutura da Análise do Ciclo de Vida

Para o desenvolvimento do estudo ACV é obrigatório cumprir as etapas chaves descritas na norma ABNT NBR ISO 14040 que são: Definição de objetivo e escopo, Inventário do Ciclo de Vida, Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e Interpretação dos Resultados, ilustrado na Figura 11.

Figura 11- Visão Global para estrutura ACV.



Fonte: (ROUAULT *et al.*, 2016).

- *Definição do Objetivo e Escopo*

A primeira etapa determina quais são as fronteiras do estudo, abrangendo todas as decisões gerais, fluxo temporal, espaço geográfico, descrição do projeto, sistemas integrados, conjunto de matérias primas, produtos, emissões e outros.

Quando o objetivo é definido coerentemente com as necessidades do processo ou produto é importante considerar 3 dimensões: extensão, profundidade e largura. O que diz respeito às extensões, deve-se saber onde se iniciará e terminará a técnica de ACV. A largura refere-se a quantos e quais subsistemas serão considerados. Por fim, a profundidade diz respeito ao número de detalhes em que a técnica irá abranger (PEYROT, 2018).

O escopo é um “documento vivo” e pode ser alterado durante a aplicação da técnica ACV. Caso o objetivo mude ao longo do caminho ou o conjunto de resultados do estudo seja diferente do estimado, ou não validado por um painel de especialistas, uma revisão no escopo possibilitará ajustes e resultados mais assertivos.

- *Avaliação do Inventário do Ciclo de Vida (ICV)*

A segunda etapa consiste na organização das informações do ciclo de vida do processo ou produto. O ICV é uma compilação estruturada das informações adquiridas da literatura, de simulações e de bases de dados. A utilização de software de análise de ciclo de vida oferece a facilidade de bancos de dados e indicadores para a construção do ICV.

Esta parte da análise do ciclo de vida é considerada a parte mais técnica e, normalmente, o pesquisador utiliza de dados primários (coleta diretamente da fonte) ou dados secundários (coletados a partir de artigos e patentes) (ITO, 2011).

- *Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)*

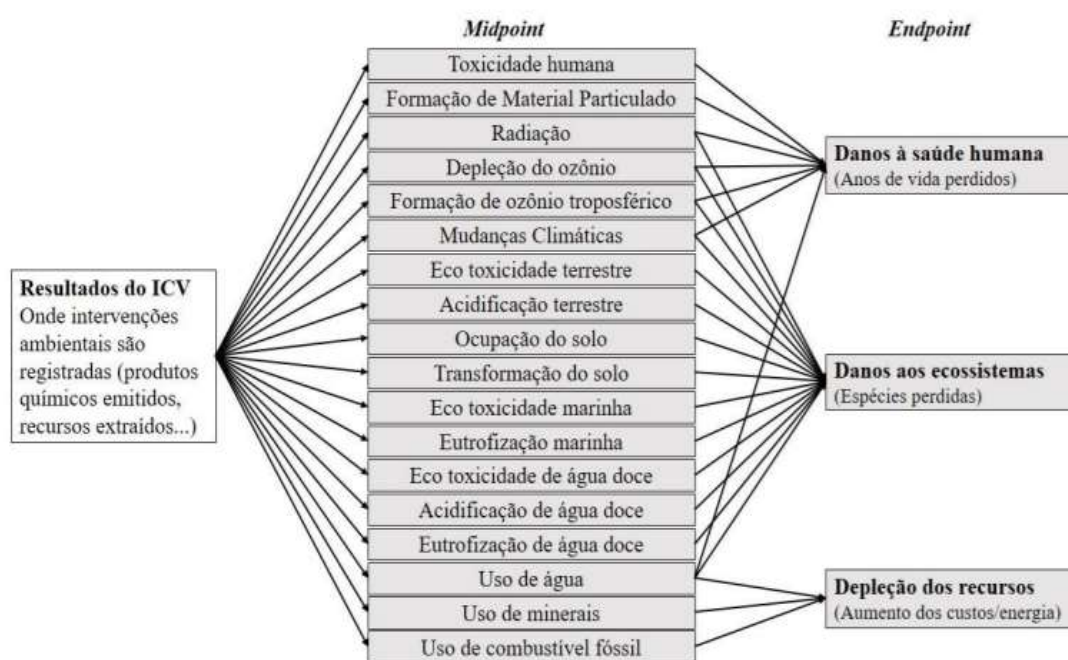
A etapa AICV consiste na identificação dos potenciais impactos contidos no ICV. A seleção do método de avaliação empregado para mensurar o AICV dependem dos objetivos traçados para o projeto e dos resultados que se deseja obter para o estudo de ACV. Existem diversas categorias de impactos, vários indicadores em cada categoria, métodos de normalização e agregação de indicadores e métricas. Portanto, um bom estudo ACV depende da seleção de indicadores e métodos de análise que priorize impactos, alinhando à coerência do estudo de caso (PIZZOL *et al.*, 2011).

Os métodos desenvolvidos em países, como Canadá, Europa, Japão e Estados Unidos, caracterizam informações contidas normalmente em um cenário estatístico específico, considerando impactos ambientais para o próprio cenário ou generalistas e globais. No Brasil, não existe uma norma regulamentadora que defina qual método representa o padrão nacional, tornando os estudos em AICV abrangente e de escolha do portador do projeto e de suas necessidades (MENDES, 2015).

Dentre as preocupações globais, necessidades estipuladas por governanças e entidades, o Potencial de Aquecimento Global (GWP - *Global Warming Potential*) destaca-se entre as categorias de impacto mais relevantes, abordando a análise dos gases de exaustão que, por sua vez, intensificam a absorção da radiação e, conseqüentemente, o efeito estufa. Gases como CO, CO₂, CH₄, N₂O, NO e SO₂ são os mais comuns a serem encontrados nas correntes de exaustão e são mensurados em relação à equivalência de impacto do CO₂, tendo em vista que este componente apresenta maior potencial de impacto medido (GIODA, 2018).

Os indicadores ambientais podem ser reportados em *Midpoint* (pontos médios), *Endpoint* (pontos finais), de acordo com a Figura 12. No *Midpoint*, todos os indicadores são reportados por categorias de impacto. No *Endpoint*, a caracterização inclui o mecanismo ambiental até as consequências (os pontos finais): danos à saúde, danos ao ecossistema, e depleção de recursos naturais, combinando o inventário levantado com modelos de projeção de danos.

Figura 12- Esquema de categorias de impacto ambiental.



Fonte: (TEDESCO GIROTTO, 2018).

Os principais indicadores utilizados em aplicações da técnica de ACV são definidos a seguir:

- Toxicidade Humana: Avaliação qualitativa e quantitativa do potencial e ocorrência de impacto de substâncias químicas quando em contato com séries vivos (PEREIRA BATISTA, 2021);
- Mudanças Climáticas: Alterações atribuídas direta ou indiretamente à atividade humana que altere a composição da atmosfera global. Aplicação para estudo considerando a variação ao longo de determinado tempo (KLUG *et al.*, 2016);

- Ecotoxicidade de Água Doce: Avaliação e qualitativa e quantitativa do potencial e ocorrência de impacto de substâncias químicas quando em contato com água doce (PEREIRA BATISTA, 2021);

- Ecotoxicidade Terrestre: Avaliações qualitativas e quantitativas do potencial e ocorrência de impacto no ecossistema terrestre, investigando alterações químicas devido a concentração de agentes tóxicos e físicas ao longo do tempo avaliado (SILVA *et al.*, 2015; ACVBRASIL, 2022);

- Ecotoxicidade Marinha: Avaliações qualitativas e quantitativas do potencial e ocorrência de impacto no ecossistema marinho, investigando alterações químicas devido a concentração de agentes tóxicos (SILVA *et al.*, 2015; ACVBRASIL, 2022);

- Depleção do Ozônio: Avalia e quantifica o potencial impacto que um produto ou processo promove na camada de ozônio. Associa resultados de ACV a outros fatores diretos e indiretos como aumento de temperatura global, aumento do índice UV-B, redução na taxa de crescimento de plantas e florestas, etc. (ACVBRASIL, 2020);

- Uso de Combustíveis fósseis: Avalia o tipo e a quantidade do combustível fóssil a ser consumido assim como os impactos causados devido à sua utilização.

- Uso de água: Avalia a quantidade de água associada a um processo ou produto em seus mais diversos aspectos.

- Danos na Saúde Humana: Mensura a quantidade de impactos existente em uma cadeia através da soma de outros indicadores (como os descritos anteriormente). Geralmente, atrela-se seus resultados a dois fatores: Mortalidade e morbidade.

Quanto mais específico for o indicador, mais assertiva será a quantificação dos impactos e a tomada de decisão para abatê-los ao longo da cadeia. Para exemplificar, pode-se analisar impacto de mudanças climáticas e emissão de CO₂ de modo a descrever o potencial de impacto que a emissão deste gás proporciona e qual a sua influência no indicador de mudanças climáticas.

Para análise de sustentabilidade, os pilares social e econômico têm alguns indicadores mostrados na Tabela 2.

Tabela 2- Principais indicadores por pilares fundamentais.

Econômicos	Sociais
Preços de insumos	IDH
Custo de manutenção	Sociedade
Preço de venda	Localidade
Energia	Política
Defasagem	População
Retorno de investimento	Saúde e segurança humana
Quota de mercado	Acesso a água potável
Inovação	Estresse Sócioeconômico

Fonte: ARULNATHAN *et al*, 2022; EPA, 2022.

- *Interpretação dos Resultados*

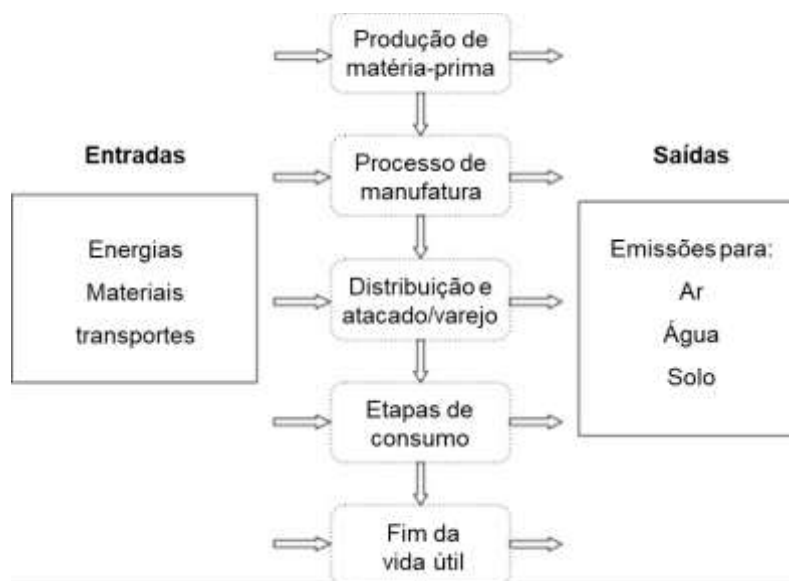
Por fim, a última etapa consiste na análise e interpretação de todos os resultados obtidos em cada etapa do processo analisado. Para isto, observa-se se o conjunto de dados obtidos é condizente com os objetivos e escopo determinados para o início do projeto. Quando de acordo, o resultado da Análise do Ciclo de Vida fornecerá todos os pontos críticos contidos no sistema, oferecendo assim uma visão e medidas de impacto para que se possa desenvolver projetos e/ou se aplique ferramentas de melhoria contínua para obtenção de processos com menor pegada ambiental e, conseqüentemente, produtos mais sustentáveis.

2.4.2 *Amplitude de estudo para ACV*

A profundidade do estudo ACV depende dos limites estipulados para o projeto – a fronteira de estudo. As necessidades de estudo dependem, por exemplo, obtenção da matéria - prima, responsabilidades e limitações do projeto, obrigações, grau de impacto etc. Geralmente, projetos muito amplos apresentam fatores com grau de impacto elevado em diversas etapas existentes no processo.

A Figura 13 ilustra as possíveis combinações de estudo para os diversos níveis de entrada e saída abordadas pela ABNT NBR ISO 14001 (ABNT 14001, 2015).

Figura 13- ACV e suas possibilidades de estudo.



Fontes: (MUTHU, 2020).

Nota-se que é possível aplicar a técnica de ACV em qualquer etapa de um processo ou produto a depender do objetivo que se pretende alcançar. Segundo a norma ABNT BR ISO 14040, pode-se classificar os possíveis tipos de ACV em:

- Do berço-ao-portão (*cradle-to-gate*) – O escopo utiliza a extração de recursos, como a obtenção da matéria-prima, podendo ter algum processo industrial, serviço ou operação. No entanto, exclui todas as atividades após o portão;
- Do berço-ao-túmulo (*cradle-to-grave*) – O escopo utiliza desde a extração dos recursos e matérias primas até o consumo do produto. Este tipo de ACV engloba a análise de todos os processos de material, energia, produção, distribuição e consumo;
- Do portão ao portão (*gate-to-gate*) – O escopo aborda do portão de entrada de um processo, seja de indústria, fazenda, depósito, montadora etc., até o portão de saída da produção, não considerando a obtenção da matéria-prima ou o consumo após produção. Este tipo de ACV considera os transportes e energias que entram na fábrica, considerando seus potenciais de impacto no escopo;
- Do portão ao túmulo (*gate-to-grave*) – O escopo aborda o estudo ACV do portão de entrada de um processo, seja de indústria, fazenda, depósito, montadora etc., até o consumo final do produto. Este tipo de ACV considera os transportes que alimentam a fábrica, assim como os transportes de saída e as emissões geradas até o final da vida do produto.

Além dessas 4 possibilidades, existe a certificação C2C – berço ao berço (*Cradle-to-Cradle*). Criada por William McDonough e Michael Braungart, a certificação C2C aplica o conceito do reaproveitamento do consumo final do produto como matéria-prima, retornando ao ciclo produtivo. O processo redesenhado não reduz o fluxo de produção ou uso de materiais, mas elimina o conceito de lixo e amplia seu valor como matéria-prima. O reprocessamento proporciona menor *footprint* ao processo global e garante diferencial de mercado para a empresa certificada (ALIGLERI *et al.*, 2016).

2.4.3 ACV aplicado na produção de acrilonitrila

A indústria química é um dos setores mais relevantes para a economia global, impactando drasticamente em desenvolvimento tecnológico, geração de empregos e balança comercial. A acrilonitrila, por sua vez, é um dos produtos desenvolvidos no segmento têxtil de crescente demanda anual desde 1930, alavancada pelas resinas ABS e SAN (BRAZDIL, 2012). Pesquisas recentes buscam promover a produção da acrilonitrila a partir de matérias-primas sustentáveis, podendo impactar positivamente no cenário da produção química e participar do processo de transição para produtos de baixo carbono (GUERRA *et al.*, 2022).

A utilização do estudo ACV em processos produtivos da acrilonitrila pode ser considerada como uma estratégia promissora para evidenciar e conectar parâmetros de sustentabilidade com eficiência de produção. Cespi *et al.*, (2014b) estudaram ACV através de uma perspectiva comparativa onde investigou-se, parâmetros da planta e produção, mas o desempenho no quesito impacto com base em duas matérias-primas distintas: propeno e propano.

Outro tipo de abordagem foi realizado por Morales-Mora *et al.*, (2012) comparando duas plantas diferentes: a primeira, planta antiga onde todo resíduo gerado era imediatamente incinerado, e a segunda, modernizada e projetada para tratar e reaproveitar os resíduos. Como resultado, concluiu-se através do estudo ACV que a planta modernizada reduziu de 36% dos impactos globais entre 11 categorias, destacando-se as reduções de 46% de emissões de CO₂ e 42,5% em custos marginais de prevenção (custos ecológicos).

Portanto, o emprego da técnica ACV permite identificar gargalos de sustentabilidade no pilar ambiental. A produção da acrilonitrila a partir do glicerol, por sua vez, representa um

produto com potencial de mercado, considerando a conversão de um material disponível e de baixo custo para um produto de maior valor agregado.

2.5 Software e bases científicas

A seção apresenta a plataforma computacional utilizada para ACV no presente estudo, e analisa-se as suas bases de dados quanto ao biodiesel brasileiro.

2.5.1 SimaPro®

O SimaPro® é uma ferramenta comercial utilizada para análise do ciclo de vida. Constituído por vários métodos de avaliação de impacto e com diversos bancos de dados em seu inventário, este *software* permite calcular os impactos associados aos sistemas em questão, possibilitando o armazenamento da informação para análise comparativa entre as diversas etapas do processo.

Os métodos podem ser escolhidos a partir da necessidade de análise, considerando amplitude (global, continental ou nacional) e seu conjunto de classificação (*Endpoint* ou *Midpoint*). A Figura 14 ilustra alguns dos principais métodos disponíveis no SimaPro®.

Figura 14- Principais métodos de avaliação.

Métodos AICV	Categorias de impactos tradicionais								
	Mudanças climáticas	Depleção camada de ozônio	Toxicidade humana	Ecotoxicidade	Acidificação	Eutrofização	Uso da Terra	Consumo de recursos	Oxidantes fotoquímicos
CML	Glo	Glo	Glo	Glo	Glo	Glo	Glo		Glo
	M	M	M	M	M	M	M		M
Eco Indicador 99	Glo	Glo		EU		Holanda	EU	Glo	
	E	E		E		E	EU	E	
Impact 2002 +	Glo	Glo	Glo	Glo	Glo		Glo	Glo	Glo
	M E	M E	M E	M E	M E		M E	M E	M E
Recipe	Glo	Glo	Glo	Glo	Glo		Glo	Glo	Glo
	M E	M E	M E	M E	M E		M E	M E	M E
Impact world +	Glo	Glo	Glo	Glo	Glo	Glo	Glo	Glo	
	M E	M E	M E	M E	M E	M E	M E	M E	

Fonte: Adaptado de (VINHAL, 2016).

Onde: Glo – Global; Eu – Europa; M – Midpoint; E – Endpoint; ME – Midpoint e Endpoint

Entre os métodos ilustrados na Figura 14 destacam-se os métodos *Impact 2002+*, *Recipe* e *Impact World +*. O primeiro método foi baseado a partir do método CML e Eco-Indicator 99 e propõe a implementação de uma abordagem *midpoint* e os danos, podendo abranger diversos tipos de ciclo de vida. O segundo método, foi desenvolvido na Nova Zelândia através da junção de diversos métodos e é reconhecido pela eficácia em harmonizar as abordagens de *midpoint* e *endpoint*, proporcionando resultados consistentes. Por fim, a *Impact World +* foi proposto a partir dos métodos *Impact 2002+* e outros com o intuito de contemplar todo o mundo, resultando em diferentes caracterizações para cada geografia com suas próprias incertezas e variações espaciais (VINHAL,2016).

Ademais, uma atualização do método *Recipe*, além de ter maior amplitude de aplicação, permite trabalhar com *Midpoint*, *Endpoint* e combinadas para processos diversos, utilizando modelos característicos que refletem o estado da arte da análise de impacto do ciclo de vida (HUIJBREGTS *et al.*, 2017), sendo o mais utilizado na atualizado, chamado de ReCiPe 2016.

Outro método indispensável para o estudo de gases de efeito estufa (GEE) é o IPCC 2010 que promove a análise totalmente direcionada à categoria *Global Warming* (potencial de aquecimento global). Não disponível na Figura 14, este método utilizando as linhas horizontais temporais de 20 a 50 anos, descreve os efeitos proporcionais quantitativos dos gases para a atmosfera.

Quanto ao banco de dados, o *software* oferece a disponibilidade de informação necessária para trabalhar com os mais diversos tipos de projeto. Criado e mantido pelo governo Russo, o *Ecoinvent* é líder no seguimento e contempla informações consistentes, transparentes e atualizadas de seguimentos químicos, agrícolas, energéticos, biológicos, etc. (MANSILHA *et al.*, 2016).

As referências existentes nos bancos de dados podem ser selecionadas com base na disponibilidade da região ou características de blocos comerciais/globais. A Tabela 3 apresenta algumas referências classificatórias para escolha do insumo.

Tabela 3- referências para seleção de insumo por classificação geográfica.

Abrangência	Definição
ROW (<i>Rest of the world</i>)	RoW é gerado como uma cópia do conjunto de dados GLO com incerteza ajustada. O RoW recém-gerado é então vinculado às atividades de uma geografia adequada, criando uma cadeia de suprimentos específica do ROW.
Glo (Global)	Abreviação para conjunto de informações globais.
BR (Brasil)	Abreviação para conjunto de informações provenientes do Brasil.
US (Estados Unidos)	Abreviação para conjunto de informações provenientes nos Estados Unidos.
IN (Índia)	Abreviação para conjunto de informações provenientes na Índia.
CN (China)	Abreviação para conjunto de informações provenientes na China.

Fonte: (ECOINVENT, 2022)

2.5.2 Avaliação Econômica de planta industriais

Para realizar avaliações econômicas de indústrias pode-se empregar estudos de Valor Presente Líquido (VPL). Este método é vastamente empregado no mercado financeiro para realizar estimativas de investimento através de equações matemáticas para determinar pagamentos futuros no valor presente. Em resumo, é a análise da soma dos fluxos de caixa, positivos e negativos, nas etapas do processo (URTADO *et al.*, 2011).

Considerando o valor de investimento inicial, as etapas e custos do processo, tempo de desenvolvimento e taxa de conversão é possível estabelecer as receitas e despesas do sistema, obtendo assim o valor final dos produtos. Para tal, foram considerados os seguintes fatores, Tabela 4.

Tabela 4- Fatores para aplicação do VPL da acrilonitrila.

Lista de Fatores	Definição
TO	Tempo de operação
IT	Investimento total (US\$)
CV	Custo Variável (US\$)
CF	Custo Fixo (US\$)
REC	Receita
TIR	Taxa Interna de Retorno

Fonte: Autoria Própria

O estudo de viabilidade econômica do projeto para produção de acrilonitrila a partir do glicerol foi condicionada às considerações descritas na Tabela 5.

Tabela 5- Considerações para viabilidade econômica de projeto.

Considerações	Definição
VPL > 0	Considera-se projeto como economicamente viável, pois proporcionará lucros futuros;
VPL < 0	Considera-se projeto como economicamente inviável, pois o lucro obtido não compensará os gastos;
VPL = 0	Considera-se neutra a decisão de aceitar ou rejeitar o projeto. As receitas e despesas se equiparam. Normalmente, rejeita-se;
TIR > 0	A taxa interna de retorno é maior do que a taxa do mercado;
TIR < 0	A taxa interna de retorno é menor do que a taxa do mercado;
TIR = 0	A taxa interna de retorno é igual a taxa do mercado.

Fonte: (LAPPONI, 2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho envolve três etapas, a saber: (1) Definição da origem do glicerol e do processo produtivo da acrilonitrila, levantando as principais características da rota a partir do glicerol; (2) Execução das etapas ACV (objetivo e escopo, avaliação do inventário, impacto ambiental) para a rota de produção da acrilonitrila a partir de glicerol, coproduto de biodiesel de soja e de biodiesel de óleos residuais; e (3) Execução de ACV do processo convencional (comercial) de produção da acrilonitrila a partir do propeno. As etapas 2 e 3 fundamentaram a análise comparativa de impactos ambientais.

3.1 Origem do glicerol e processos de produção da acrilonitrila (Etapa 1)

A escolha do glicerol oriundo da soja para o estudo de produção de acrilonitrila baseia-se na disponibilidade de informações no banco de dados *Ecoinvent* e na literatura que aborda macrorregiões de referência no Brasil. A seleção permite realizar análise crítica em torno dos resultados, apontando eventuais divergências. A inclusão no estudo de glicerol de óleos residuais vegetais (OVR) é motivada pela aplicação de economia circular, valorando um resíduo, minimizando seu descarte indevido, com aproveitamento de co-produto (glicerol).

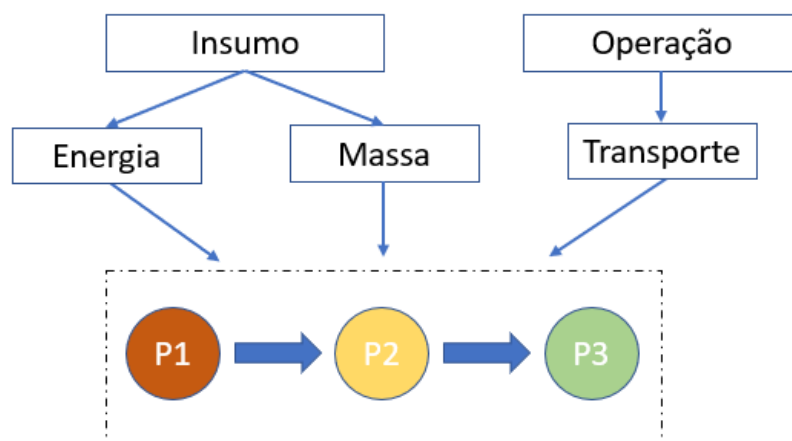
O banco de dados do *Ecoinvent* inclui o processo de produção de glicerol a partir de óleos vegetais residuais baseados em países que utilizam essa rota (Estados Unidos, China, França e Alemanha, por exemplo) e médias globais generalistas. No entanto, como o Brasil não tem uma estratégia bem definida para coleta, tratamento, armazenamento e utilização, o estudo emprega dados de glicerol OVR da literatura.

O processo de produção de acrilonitrila a partir do glicerol utilizado neste trabalho tem como base os resultados de Braga *et al.*, (2021). Os autores estabeleceram em seu estudo a compra do glicerol em seu estado bruto (de 40 a 80 % p/p), sendo necessário o processo de pré-tratamento para purificação, fornecendo glicerol 90% p/p, na entrada do reator de desidratação. O processo é setorizado em três partes: seção de pré-tratamento do glicerol bruto, seção de reação (desidratação seguida de amoxidação) e seção de purificação da acrilonitrila.

As Figuras 15 a 18 apresentam o processo objeto da ACV, para as rotas de glicerol de biodiesel (soja e OVR), em seções e suas principais entradas, saídas e emissões. A Figura 15 exemplifica as partes do processo, considerando que a cadeia de produção está sendo

alimentada pelas matérias-primas, pela energia elétrica e térmica e pelas condições de transporte associadas às respectivas distribuições.

Figura 15- Partes sequenciais da produção.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 16 descreve simplificada a purificação do glicerol, considerando sua compra entre 40% e 80% p/p e elevando seu percentual de pureza para 90%. Resíduos líquidos e sólidos, provenientes da produção do biodiesel, são removidos nesta etapa do processo como: ácido sulfúrico da reação com os sabões presentes no glicerol, sais e cinzas.

Figura 16- Purificação do glicerol bruto.

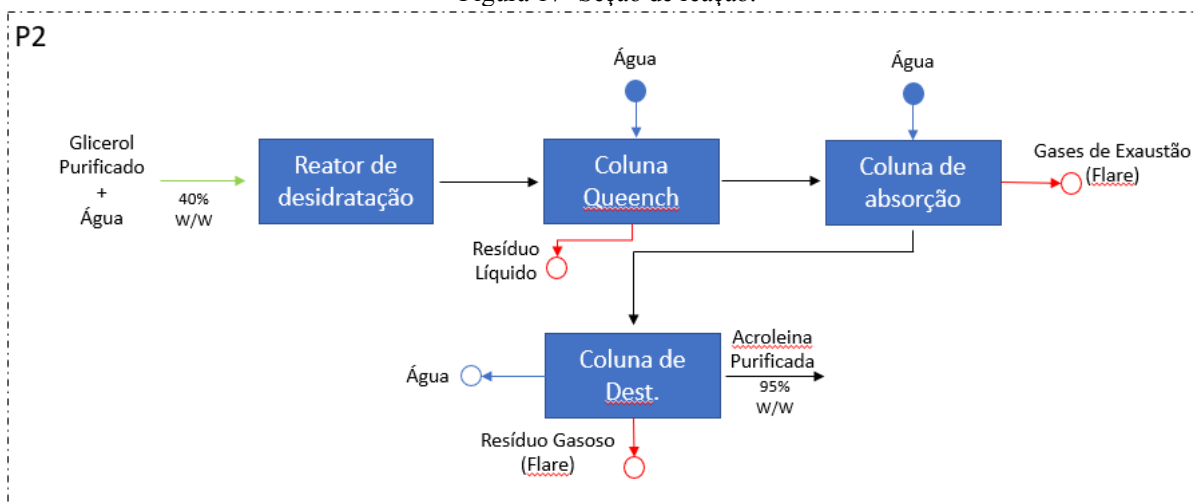


Fonte: Autoria Própria.

A parte 2 do processo, Figura 17, mostra a seção de reação com alimentação do reator de desidratação com glicerol purificado diluído em água (40 % p/p). Após a sua desidratação,

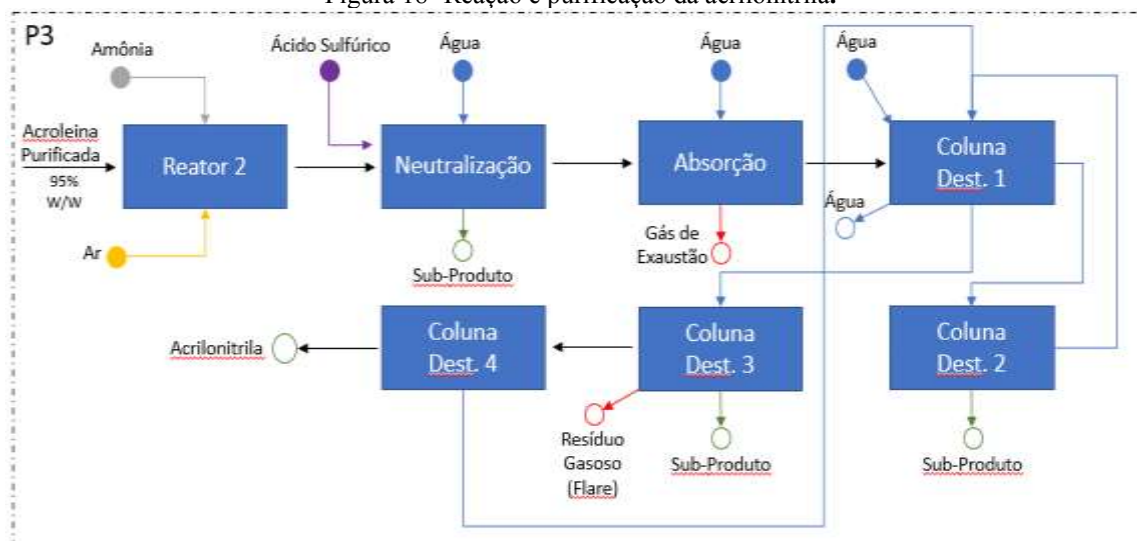
o glicerol é convertido em acroleína. A corrente de acroleína precisa ser purificada para eliminar produtos indesejados como propanaldeídos, acetaldeídos, acetona, éteres de glicerol cíclicos, fenol e compostos poliaromáticos.

Figura 17- Seção de reação.



Por fim, a Figura 18 apresenta a última etapa do processo produtivo da acrilonitrila. O reator 2 é alimentado pela corrente de acroleína purificada (95% w/w), amônia e ar. Em seguida, a corrente de saída contendo acrilonitrila é direcionada para a neutralização da amônia remanescente, separação dos subprodutos e purificação da acrilonitrila para uso comercial.

Figura 18- Reação e purificação da acrilonitrila.



A distribuição das fases citadas favorece o entendimento das distribuições de insumos, impactos ambientais que são gerados por produtos e subprodutos existentes na cadeia da acrilonitrila.

3.2 Execuções das etapas de ACV

Os próximos tópicos apresentam cada etapa na aplicação da técnica ACV na produção da acrilonitrila.

3.2.1 Objetivo e escopo

Adota-se o limite *cradle-to-gate*, partindo-se da produção do grão da soja ou óleo residual, produção e purificação do glicerol, desidratação do glicerol em acroleína e purificação e, por fim, a amoxidação da acroleína em acrilonitrila e sua purificação. Foram desconsideradas as possíveis variações nas condições de transporte entre os processos. Os balanços de massa, energia, condições de reação, emissões de gases de efeito estufa e resíduos encaminhados para tratamento foram desenvolvidos com base na literatura. Para definir o escopo foi necessário avaliar os seguintes aspectos listados na ABNT 14040:2014. Os dados para o estudo do *cradle* foram provenientes do da colheita da soja do *Ecoinvent* e da macrorregião brasileira do estado do Mato Grosso, descrevendo o contexto de produção em território brasileiro.

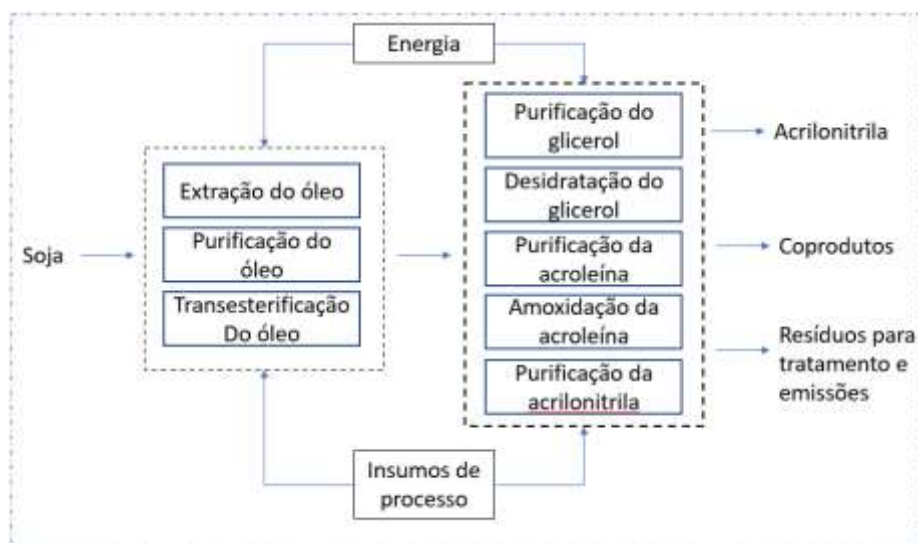
- **Unidade Funcional**

A unidade referência quantitativa à qual todos os fluxos de entradas e saídas na ACV estão relacionados. Para teste estudo considerou-se a produção de 1 kg de acrilonitrila.

- **Fronteira do sistema**

A fronteira do sistema são os limites estipulados para o projeto, determinando quais são os processos e quais partes do ciclo de vida serão analisados. A Figura 19 ilustra a fronteira para o sistema de produção da acrilonitrila a partir da soja.

Figura 19 – Fronteiras do sistema para a produção da acrilonitrila a partir de glicerol



Fonte: Autoria Própria

3.2.2 Alocação

Alocação é a separação dos fluxos (entradas e/ou saídas) de um processo ou de um sistema de produto, entre o sistema de produto em estudo e um ou mais sistemas de produtos (ABNT 14040, 2014).

A alocação de impactos entre os produtos utiliza como base a massa produzida, sendo o fator de alocação calculado de acordo com a Equação 4.

$$\text{Alocação (massa)} P_n \% = \frac{Kg P_n}{(Kg P_1 + Kg P_2 + Kg P_3 + Kg P_4)} \quad (4)$$

Onde:

kg P_n : Produto desejado;

kg P_1 : kg acrilonitrila;

kg P_2 : kg acetoneitrila;

kg P_3 : kg ácido cianídrico;

kg P_4 : kg Sulfato de amônio;

A Tabela 6 apresenta os resultados para as alocações de purificação do glicerol e produção da acrilonitrila.

Tabela 6 - Alocação para purificação do glicerol e produção da acrilonitrila.

Alocação					
Produtos	1 kg de glicerol bruto	%	Produtos	1 kg glicerol purificado	%
Glicerol Purificado	0,800	80,00%	Acrilonitrila	0,2695	45,46%
Sulfato de sódio	0,034	3,40%	Acetonitrila	0,0108	1,81%
Ácidos Graxos	0,053	5,30%	Ácido cianídrico	0,0219	2,18%
			Sulfato de amônio	0,3012	50,67%

Fonte: Autoria Própria.

3.2.3 Inventário da Análise do Ciclo de Vida (IACV)

O inventário de Análise do Ciclo de Vida foi baseado na unidade funcional de 1 kg de acrilonitrila. Os dados de processo baseiam-se em uma planta com capacidade de produzir 100 mil toneladas por ano, simulada por (BRAGA *et al.*, 2021). Os dados de glicerol baseiam-se em publicações de plantio resumidos na Tabela 7.

Tabela 7- Plantios de soja do estado de Mato Grosso.

Soja (grão)	kg de CO ₂ -eq	Fonte
Soja ECO 01	4,500	<i>Ecoinvent</i> , 2022
Soja MT 01	0,188	Vituri <i>et al.</i> , 2019
Soja MT 02	0,186	Raucci <i>et al.</i> , 2015
Soja MT 03	0,503	Toloi <i>et al.</i> , 2021

Fonte: Autoria Própria.

As fazendas de Mato Grosso são utilizadas como referência, pois devido à sua relevante produtividade de soja no Brasil, que vem se expandindo desde a década de 1980. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2017 o estado de Mato Grosso já produzia quase um terço de toda a produção nacional aproximadamente 30 milhões de toneladas (IBGE, 2020).

Os dados da rota Soja MT 01 são provenientes de estudos em diversas macrorregiões do estado de Mato Grosso realizados por Vituri *et al.*, (2019). Neste trabalho, os autores quantificaram as emissões de CO₂ eq para cada quilograma de soja produzida e as condições de transporte existentes na região para escoar a produção comercialmente. Como resultado, foi observado que na maioria dos casos analisados as emissões referentes à produção de 1 kg de

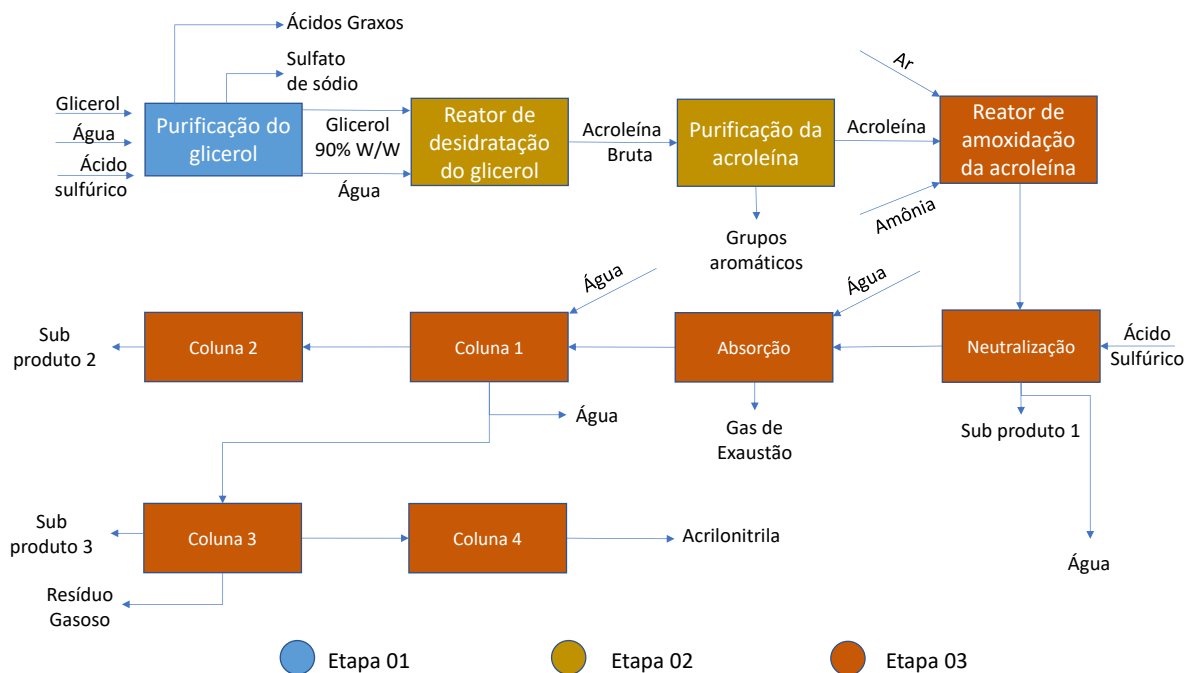
soja emitiram mais CO₂-eq para a atmosfera do que o modal de transporte empregado para o mesmo peso. Além disto, foi debatido que melhorias na infraestrutura e integração de mais métodos de transporte na malha de escoamento podem mitigar parte do CO₂ existente na cadeia de produção do grão de soja para em fazendas do Mato Grosso. As emissões médias de GEE para as macrorregiões do estado de Mato Grosso foram de 0,188 kg de CO₂-eq.

Os dados da Soja MT 02 são provenientes de estudos em 55 fazendas durante 3 safras. Os autores, Raucci *et al.*, (2015), avaliaram as principais fontes de emissão de gases de efeito estufa na produção de soja em 55 fazendas durante 3 safras. Foram considerados aspectos colheita, combustíveis, decomposição de resíduos, calagem, pesticidas etc. Os autores identificaram que para o cenário proposto a produção para cada kg de soja produzida emite aproximadamente 0,186 kg de CO₂-eq. Os dados de Raucci *et al.*, (2015) ratificam a média dos valores obtidos por Vituri *et al.*, (2019), mostrando similaridade de valores.

Por fim, os estudos desenvolvidos por Tolo *et al.*, (2021) foram desenvolvidos em 7 diferentes regiões do estado mato grossense a partir de dados disponibilizados em relatórios de produções agrícolas de safras entre 2018 e 2019. Foram considerados os diferentes biomas de cada região, quantidades de herbicidas, calcário, combustíveis, energia e malha de transportes, obtendo valor médio de 0,503 kg de CO₂-eq por kg de soja produzida.

A simulação foi dividida em 3 partes, destacando a purificação do glicerol para grau de pureza igual ou superior a 90% (p/p), transformação do glicerol purificado hidratado (40% p/p) em acroleína e acrilonitrila e, por fim, a purificação da acrilonitrila. A Figura 20 mostra o segmento gate-to-gate de produção da acrilonitrila para levantamento do inventário.

Figura 20 – Divisões do processo para levantamento de inventários.



Fonte: Autoria Própria.

- Dados de inventário de ciclo de vida

O inventário de ciclo de vida de biodiesel e glicerol de Castanheiras *et al.*, (2015) é utilizado no presente trabalho. O inventário para a produção de 1 kg de biodiesel e 0,13 kg de glicerol consta no Anexo A. A base do inventário para as etapas de obtenção do glicerol a partir de óleos residuais é o trabalho Ripa *et al.*, (2014). O inventário para a produção de 1 kg de biodiesel e 0,11 kg de glicerol consta no Anexo B.

Os resultados de Braga *et al.*, (2021), válidos para a escala de cem mil toneladas, são considerados representativos para a fase de produção de acrilonitrila a partir do glicerol. Os dados foram escalonados para a unidade funcional do presente estudo (1 kg de acrilonitrila), segundo o diagrama de blocos ilustrado na Figura 19. As tabelas 8, 9 e 10 apresentam os principais parâmetros por etapa da modelagem para a avaliação do IACV para a produção de acrilonitrila.

Tabela 8- IACV da etapa de purificação do glicerol.

Insumos	Dados ACV purificação do glicerol	
	Quantidade e Unidade	Unidade
Glicerol	2,8480	kg * kg ⁻¹ de An
Gás Natural	0,0151	kg * kg ⁻¹ de An
Ácido Sulfúrico	0,0083	kg * kg ⁻¹ de An
Eletricidade	0,0002	kwh
Produtos		
Glicerol purificado	2,2784	kg * kg ⁻¹ de An
Sulfato de Sódio	0,0968	kg * kg ⁻¹ de An
Ácidos graxos	0,1501	kg * kg ⁻¹ de An
Resíduos		
Sólidos de descarte (Orgânicos)	0,0968	kg * kg ⁻¹ de An
Água com resíduos orgânicos para tratamento	0,1501	kg * kg ⁻¹ de An

Fonte: Cálculos baseados em dados de Braga *et al.*, (2021).

Tabela 9 - Inventário para a desidratação em acroleína.

Insumos	Dados ACV produção acroleína	
	Quantidade e Unidade	Unidade
Glicerol purificado	2,2784	kg * kg ⁻¹ de An
Gás Natural	0,0904	kg * kg ⁻¹ de An
Eletricidade	0,0004	kwh
Água deionizada	0,5173	kg * kg ⁻¹ de An
Produtos		
Acroleína	1,3541	kg * kg ⁻¹ de An
Resíduos		
Água contaminada encaminhada para tratamento	1,7369	kg * kg ⁻¹ de An

Fonte: Cálculos baseados em dados de Braga *et al.*, (2021).

Os dados de Deleplanque *et al.*, (2010), obtidos em um reator PFR na presença do catalisador de óxido misto, Fe_x(PO₄)_y, foram considerados representativos da fase de desidratação. O inventário de purificação da acroleína foi considerado em conjunto no inventário da Tabela 9, tendo em vista que somente a acroleína é gerada nesta fase do processo. No entanto, o catalisador não foi considerado no balanço do inventário.

Tabela 10- Inventário para a produção da acrilonitrila.

Dados ACV produção da acrilonitrila		
Insumos	Quantidade	Unidade
Acroleína	1,3541	kg * kg ⁻¹ de An
Gás Natural	0,2103	kg * kg ⁻¹ de An
Ar	8,5791	kg * kg ⁻¹ de An
Amônia	0,4759	kg * kg ⁻¹ de An
Ácido sulfúrico	0,1927	kg * kg ⁻¹ de An
Água deionizada	2,0621	kg * kg ⁻¹ de An
Elettricidade	0	kWh
Produtos		
Acrilonitrila	1 Kg	kg
Acetonitrila	0,0399	kg * kg ⁻¹ de An
Sulfato de amônio	1,1177	kg * kg ⁻¹ de An
Ácido Cianídrico	0,0480	kg * kg ⁻¹ de An
Resíduos		
Água contaminada encaminhada para tratamento	1,2567	kg * kg ⁻¹ de An
Parcela de resíduo incinerado		
Dióxido de carbono	0,1725	kg * kg ⁻¹ de An
Nitrogênio	6,6251	kg * kg ⁻¹ de An
Água	0,0910	kg * kg ⁻¹ de An
Oxigênio	1,5922	kg * kg ⁻¹ de An

Fonte: Cálculos baseados em dados de Braga *et al.*, (2021).

O inventário da fase de amoxidação da acroleína em acrilonitrila considera a condução da reação em mistura de catalisadores óxidos (MoVTeNB). Sabe-se que periodicamente o catalisador perde a atividade ao longo do processo, sendo substituído. Neste trabalho, considerou-se que no período de um ano de operação não houve perda de atividade catalítica e que o catalisador é completamente regenerado durante o processo, na incluído no inventário. O glicerol que alimenta a produção de acrilonitrila é puro, não havendo nesse segmento de inventário qualquer distinção de origem.

3.3 Execução de ACV do processo convencional

Os dados de ciclo de vida da produção de acrilonitrila pelo processo SOHIO considera os trabalhos de Dimian e Bildea (2008) e Seider (2009), escalonados para a base funcional (1kg

de acrilonitrila). O inventário de ciclo de vida da fase gate-to-gate está disponível no Anexo C. Como a cadeia de valor do propeno comercial é muito extensa e complexa, a realização da análise ACV com os dados disponíveis, além de ser um trabalho extensivo, acarretaria diversos erros acumulativos ao longo da cadeia de valor. Por isto, adotou-se a referências globais para todos os insumos do processo, generalizando os resultados como uma análise preliminar que pode ser otimizada em estudos futuros.

Os dados da reação catalítica correspondem a rota catalisada com uma mistura de óxidos metálicos no meio reacional, com conversões baseadas no trabalho de Dimian e Bildea (2008). O balanço mássico do catalisador não é considerado na presente análise de ciclo de vida, admitindo-se que este seja regenerado pelo oxigênio existente na corrente de ar. Tal consideração é possível, pois o presente trabalho propõe a análise em uma unidade operacional durante o período de um ano e que o catalisador não sofreu perda de atividade significativa, sendo regenerado ao longo do processo.

3.4 Análise do inventário do Ciclo de Vida (AICV)

Para análise do inventário do ciclo de vida quatro fatores são relevantes para os resultados da análise: localização do empreendimento e local de origem da matéria-prima, método de avaliação (*e.g.*, *Midpoint* ou *Endpoint*), definições das categorias de impacto e abrangência do impacto, conforme definido em Mendes *et al.*, (2015).

- **Localização**

Considera-se a produção da acrilonitrila com glicerol oriundo da soja, avaliando-se macrorregiões no Brasil, e com glicerol oriundo de óleos residuais vegetais. Assumem-se condições médias de transporte decorrente da grande distribuição de produtores de grãos e biodiesel em território nacional.

- **Método de avaliação de impacto**

Abrange as categorias caracterizadas no *Midpoint* e *Endpoint*. Para a análise das emissões de gases de efeito estufa, utiliza-se o método IPCC 2010, atrelando os resultados ao potencial de mudanças climáticas (*midpoint*). As demais categorias de impacto são analisadas a partir do método ReCiPe 2016 (IBICT, 2019).

- Categorias de impacto

Foram escolhidas as categorias de *Global Warming*, consumo de água, esgotamento de recursos naturais, impactos carcinogênicos e não carcinogênicos e uso da terra. As categorias *Global Warming* e *Fossil resource scarcity* são tipicamente abordadas em pesquisas sobre acrilonitrila e sua produção. As demais categorias são relevantes devido à utilização de derivados da soja, sendo categorias de grande contraste entre as rotas.

- Abrangência da aplicação

A abrangência do escopo aplicada foi delimitada para o cenário global, *Rest Of the World* e nacional. O cenário global e *Rest of the World* foram empregados em insumos que não variavam entre os processos. O presente estudo emprega o cenário nacional (Brasil) para o glicerol a partir de soja e de ORV.

3.5 Avaliação econômica da planta de acrilonitrila

Será empregada a técnica VPL para verificar a viabilidade econômica da produção da acrilonitrila a partir de glicerol, utilizando referências de dados de uma planta de produção em solo Norte Americano com preços de insumos corrigidos para a cotação de 2022.

Salienta-se que existem diferenças para a comparação dos resultados da acrilonitrila a partir da rota de glicerol e propeno. A utilização do propeno como referência global não apresenta a mesma base de estudo proposta para este trabalho, impossibilitando a comparação aprofundada. Isto se dá, principalmente, pela diferença de processos de obtenção do gás natural.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados referentes à avaliação ambiental da produção de acrilonitrila a partir de glicerol e análise de viabilidade econômica da planta são apresentados neste capítulo.

4.1 Avaliação do Ciclo de Vida Ambiental

O inventário do processo proposto foi utilizado no software SimaPro[®] para o desenvolvimento das análises de produção de acrilonitrila a partir de diferentes fontes de glicerol.

4.1.1 Avaliação de gases de efeito estufa (GEE)

Utilizou-se o método IPCC 2010 para estudar isoladamente a categoria de impacto *Global Warming*, avaliando as emissões de gases para a atmosfera. Os compostos emitidos para a atmosfera foram quantificados e expressos em intensidade de emissão, como kg de CO₂-eq para cada kg de acrilonitrila.

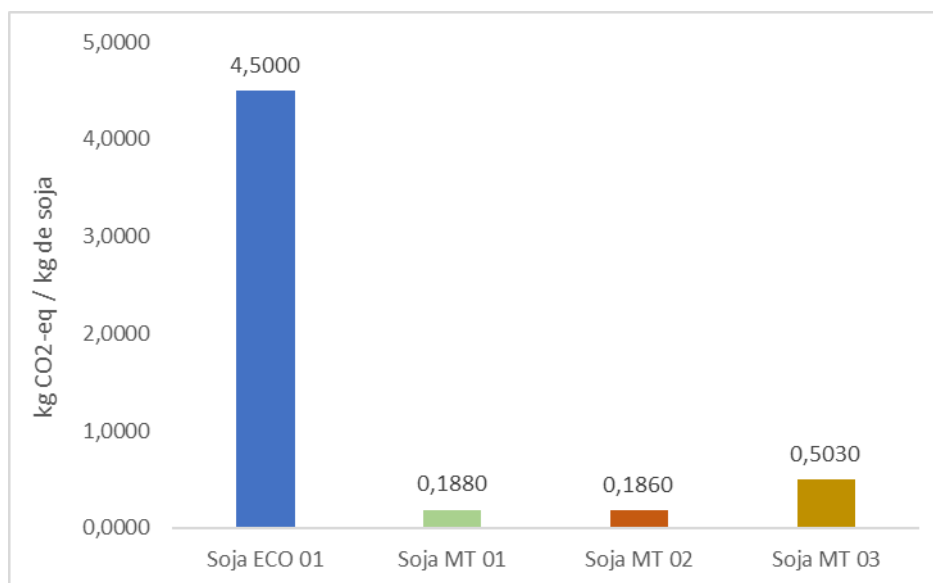
4.1.1.1 Análise de glicerol proveniente da soja

Considerou-se as emissões de kg de CO₂-eq para a atmosfera da produção de acrilonitrila a partir de glicerol desde o berço (*cradle*) através da obtenção da soja, até o portão da planta (*gate*) da produção de acrilonitrila.

- Produção da soja no Brasil

Os dados existentes no banco de dados *Ecoinvent* foram comparados com dados existentes na literatura para verificar a divergência entre as abordagens e resultados. A macrorregião do estado de Mato Grosso (MT) foi selecionada para o estudo comparativo. A Figura 21 ilustra as emissões de kg de CO₂-eq por kg de soja produzida para as diferentes rotas.

Figura 21- Emissões de kg de soja produzido para diferentes rotas.



Fonte: Autoria Própria.

Nota-se as emissões para obtenção da soja a partir são mais expressivas nas rotas Soja ECO 01 e Soja MT 01. A rota Soja ECO 01 são dados provenientes do banco de dados *Ecoinvent* que, como relatado por Raucci et al, 2015, apresentam resultados excedentes em relação a pesquisas desenvolvidas por especialistas no campo.

As rotas Soja MT 01, safras de 2018 e 2019, e Soja MT 02, safras de 2007 e 2010, são as rotas com menores emissões de kg CO₂-eq por kg de soja produzida. Ambos os estudos foram a partir da análise criteriosa dos insumos utilizados durante os períodos de safras e energia. Além disto, debate-se sobre a malha de transporte para escoamento da produção, tendo em vista a variedade de opções para o tamanho do estado e suas condições de infraestrutura, sendo um fator diferencial para emissões de CO₂.

A rota da Soja MT 03, safras de 2018 e 2019, mostra uma análise mais atual, considerando os diferentes insumos e variedades de rotas de transporte para as diferentes regiões do estado mato-grossense. Como diferencial, os autores identificaram a influência do aumento do calcário e herbicidas no plantio da soja.

Os dados existentes no *Ecoinvent* não são validados pelos resultados de estudos específicos para as rotas da soja baseadas publicações existentes na literatura. Tal variação impacta significativamente nas emissões da acrilonitrila.

Verifica-se através da análise comparativa dos dados do estado de Mato Grosso, que as informações contidas no banco de dados *Ecoinvent*, representando safras de 2012 a 2018, não são validadas pelos resultados de estudos específicos para a macrorregião do Brasil. Os resultados são invariavelmente maiores, e impactam negativamente estudos globais sobre a produção da soja brasileira. As divergências dos valores podem ser justificadas por:

1- Faixa muito ampla de valores: As informações foram carregadas no banco de dados a partir de 2012 e atualizações foram feitas ao longo dos anos até 2018. No entanto, ao avaliar safras de 2012 a 2018 tem-se uma amplitude muito elevada que favorece análises menos precisas. Ao considerar faixas muito amplas na análise, o estudo em questão pode desconsiderar melhorias relevantes que influenciam diretamente nos resultados como condições de transporte, redução de desmatamento, encolhimento de atividades da pecuária entre outros. Para validar um determinado processo pode-se utilizar uma faixa temporal condizente com o cenário abordado, avaliando o balanço de carbono do sistema. Espera-se que novas atualizações de insumos brasileiros venham a integrar o banco de dados *Ecoinvent*, tendo em vista a participação da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Agropecuária) em ceder dados desde 2016 e sendo um dos participantes no desenvolvimento da versão mais atualizada do banco de dados (EMBRAPA, 2022);

2- Alocação territorial: As alocações territoriais existentes no banco de dados das regiões de cultivo de soja no Brasil atrelam dados de desmatamento e uso da pecuária em suas ponderações. Tal informação depende do ponto de vista e da abordagem empregada. Estudos indicam que entre os anos de 2005 e 2018, embora tenha aumentado a área de cultivo da soja, o desmatamento foi reduzido, demonstrado coeficiente de correlação negativo entre as curvas (GAZZONI; DALL'AGNOL, 2018).

3- Abatimento estratégico: A substituição de cultivo de soja e coprodutos do seu cultivo (milho por exemplo) abatem a utilização de áreas utilizadas anteriormente pela pecuária. O processo de integração da pecuária com o agronegócio iniciado na década de 80, é utilizada com a proposta de que ambas atividades podem coexistir, gerando benefícios na redução de emissões, maior produtividade e ciclagem de nutrientes a depender do tamanho da fazenda e quantidade de animais (DE ALBUQUERQUE NUNES *et al.*, 2021). No entanto, em algumas regiões que utilizam modelos tradicionais de pecuária, o agronegócio se expande com maior expressividade, fazendo com que haja o recuo da pecuária. Como exemplo, estudos estatísticos

realizados no sul do país, entre 2000 e 2019, mostram que a medida que se expande o plantio de soja, ocorre a redução de animais para abate na pecuária (VIANA *et al.*, 2022).

Portanto, é evidente a necessidade de investigações mais criteriosas para qualificar e quantificar impactos ambientais existentes na cadeia produtiva da soja no cenário brasileiros que abordem emissões de gases causadores do efeito estufa. Neste contexto, estudos de qualidade do solo, redução de rejeitos e novas rotinas de cultivo são testados com o auxílio da técnica ACV para verificar os balanços de carbono no sistema. Casos recentes em solos arenosos, avaliando de forma comparativa a retenção de carbono no solo para diferentes tipos de plantio e cultivo são atuais e estratégicos para auxiliar na construção de bancos de dados estratégicos para mensurar as emissões com precisão (BOGIANI *et al.*, 2020). O objetivo e escopo bem definidos atrelados às premissas do autor podem promover uma visão precisa para estruturas as fontes de emissões, quantidade de mitigação e áreas onde pode-se implementar melhorias.

- Expectativas de mercado nacional da soja

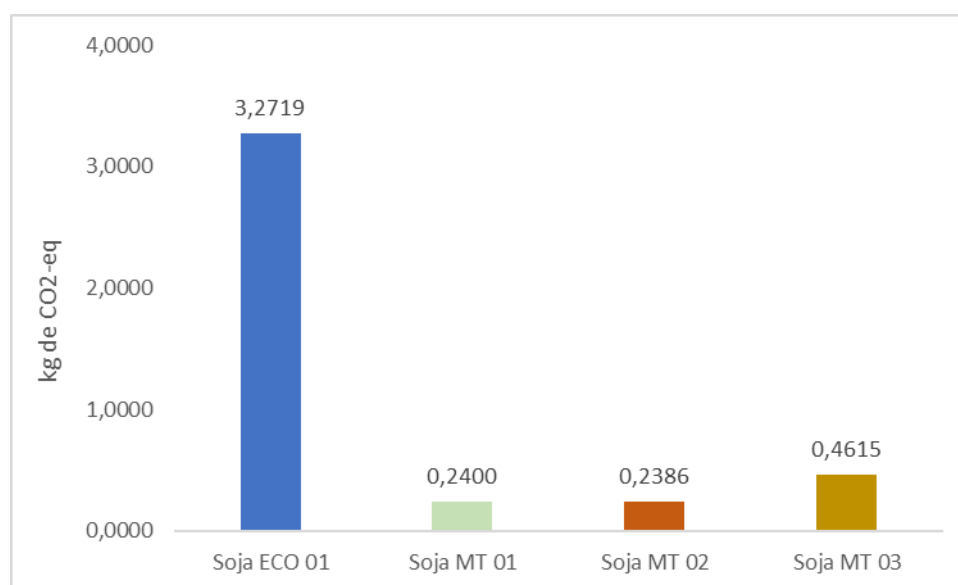
As expectativas do mercado brasileiro têm sido fortalecidas através da ampla pesquisa e desenvolvimento de metodologias de negócio para aumento de produção e redução de perdas. Outro fator importante que eleva o valor de mercado da soja brasileira é a repercussão da importância das atividades agrícolas no atingimento das metas globais de descarbonização estipuladas e divulgadas em eventos como COP26 (WFO, 2021).

Estudos como da Fundação Getúlio Vargas (FGV, 2022), por sua vez, ratificam a busca por soluções de melhores práticas visando a mitigação de gases de efeito estufa no cenário agrícola. O estudo estimou emissões e abatimento de CO₂-eq envolvidos no processo produtivo da soja, acumulados de 2020 a 2030, chegando à conclusão de que através da integração Lavoura-Floresta (ILF) pode-se obter balanço de carbono positivo muito superior à produção neutra. Adicionalmente, o estudo inferiu que o comportamento do plantio e suas emissões é diretamente ligado a qualidade do plantio aplicado. Atualmente, a cultura da soja já apresenta uma cultura de baixo carbono, emitindo cerca de 9 Mt CO₂-eq por ano e, futuramente, pode representar um dos grandes sumidouros de emissões do tipo GEE no cenário global. Caso as fazendas não desenvolvam melhorias que equilibrem os métodos adequados de plantio, atividades de colheita e realizem produções sustentáveis pode-se retardar o avanço da transição para a matriz positiva.

As intensidades das emissões de kg de CO₂-eq para obtenção de glicerol foram calculadas para cada rota de produção. O inventário para a produção do glicerol a partir da soja está presente no Anexo A.

A Figura 22 ilustra o comparativo de emissões de GEE na produção de 1 kg de glicerol, considerando as rotas Soja ECO 01, Soja MT 01, Soja MT 02 e Soja MT 03.

Figura 22 - Comparativo de GEE na produção de glicerol.



Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 11 mostra as intensidades das emissões provenientes da matéria-prima proveniente da soja, óleo vegetal refinado e o processo de transesterificação.

Tabela 11- Distribuição de emissões na obtenção de glicerol

Fontes de emissão	Unidade: Kg de CO ₂ -eq			
	Soja ECO 01	Soja MT 01	Soja MT 02	Soja MT 03
Óleo vegetal refinado	3,1808	0,1489	0,1475	0,3704
Transesterificação	0,0911	0,0911	0,0911	0,0911
Glicerol	3,2719	0,2400	0,2386	0,4615

Fonte: Autoria própria.

O processo de transesterificação é o menor contribuinte de emissões para o processo. Justifica-se a maior emissão proveniente do óleo vegetal residual devido à elevada quantidade de soja para obtenção de 1 kg de glicerol.

4.1.1.2 Análise do glicerol proveniente de óleo vegetal residual

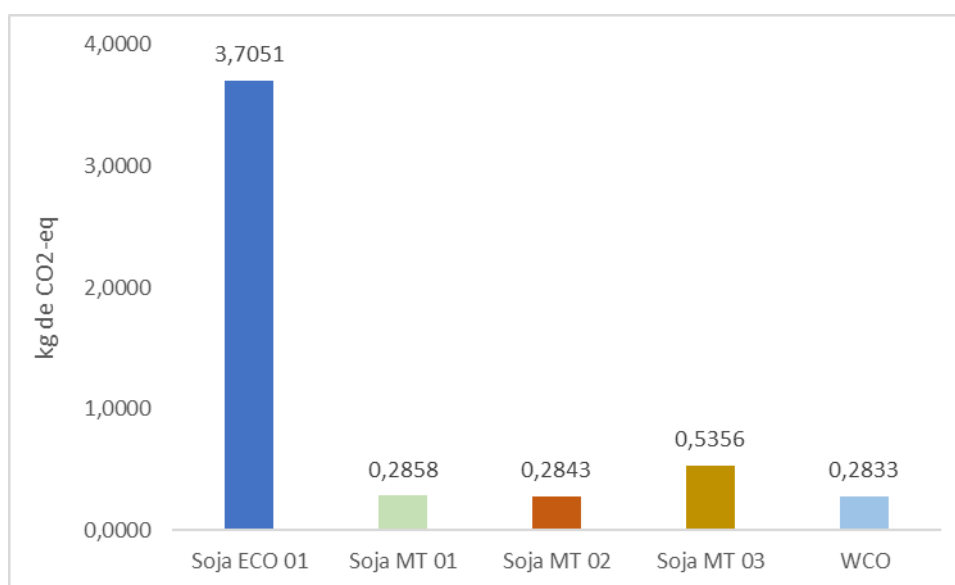
- Fase de produção do glicerol a partir de óleos vegetais residuais

Utilizou-se os dados provenientes no banco de dados *Ecoinvent* para descrever a produção de 1kg de glicerol a partir de óleos vegetais residuais, obtendo 0,2376 kg de CO₂-eq (Rota WCO). Os insumos, produtos e emissões referentes ao processo de produção de biodiesel a partir do glicerol podem ser consultados no Anexo B deste trabalho.

- Purificação do Glicerol

O glicerol produzido foi purificado a partir do processo descrito por Braga *et al.* (2021). A Figura 23 e Tabela 12 ilustram as emissões para cada cenário.

Figura 23 - Comparativo para GEE da produção de glicerol purificado.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 12 - Comparativo de emissões GEE para a purificação de glicerol.

Fontes de emissões	Soja ECO 01	Soja MT 01	Soja MT 02	Soja MT 03	WCO
Glicerol Bruto	3,6899	0,2706	0,2691	0,5204	0,2681
Processo de purificação	0,0152	0,0152	0,0152	0,0152	0,0152
Glicerol purificado	3,7051	0,2858	0,2843	0,5356	0,2833

Fonte: Autoria Própria.

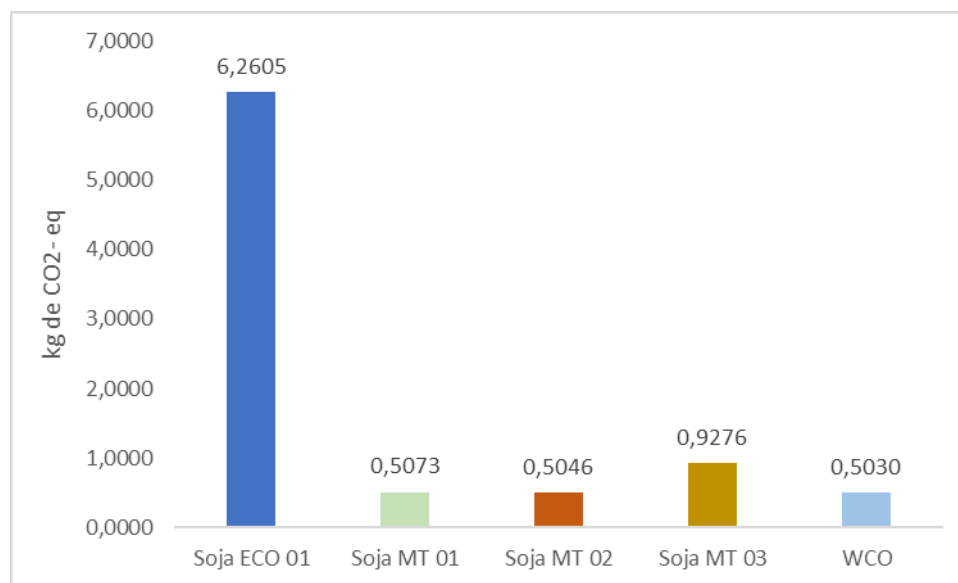
Os dados mostram que esta etapa do processo contribui minimamente para o acréscimo das emissões da produção do glicerol purificado, podendo ser justificado pela presença de ácido sulfúrico, gás natural e resíduo do processo de purificação.

As rotas Soja MT 01 e Soja MT 02 apresentaram menores intensidades de emissões devido à menor contribuição por kg de grão de soja utilizado. Logo, como os resultados são proporcionais e acumulativos, quanto maior a emissão do grão utilizado, maior será a emissão do produto a ser obtido.

4.1.1.3 GEE para a fase Acroleína

O processo de avaliação de impacto da acroleína, componente produzido a partir da desidratação do glicerol, foi obtido a partir do esquema proposto por Braga *et al.*, (2021). A acroleína não é comercializada como produto, no entanto, foi criado um inventário intermediário para alocar devidamente suas contribuições de emissão para o processo. A Figura 24 e a Tabela 13 apresentam os impactos medidos em kg de CO₂-eq por kg de acroleína produzida para cada rota.

Figura 24 - Comparativo de emissões de GEE para a produção da acroleína entre as rotas



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 13 - Comparativo de emissões GEE para a produção de acroleína

Fontes de emissões	Soja ECO 01	Soja MT 01	Soja MT 02	Soja MT 03	WCO
Glicerol Bruto	6,2341	0,4809	0,4782	0,9012	0,4766
Processo de desidratação	0,0264	0,0264	0,0264	0,0264	0,0264
Glicerol purificado	6,2605	0,5073	0,5046	0,9276	0,5030

Fonte: Autoria Própria.

A necessidade de utilizar cerca de 1,69 kg de glicerol purificado para produzir 1 kg de acroleína justifica o comportamento dos impactos semelhantes ao ocorrido na etapa de purificação.

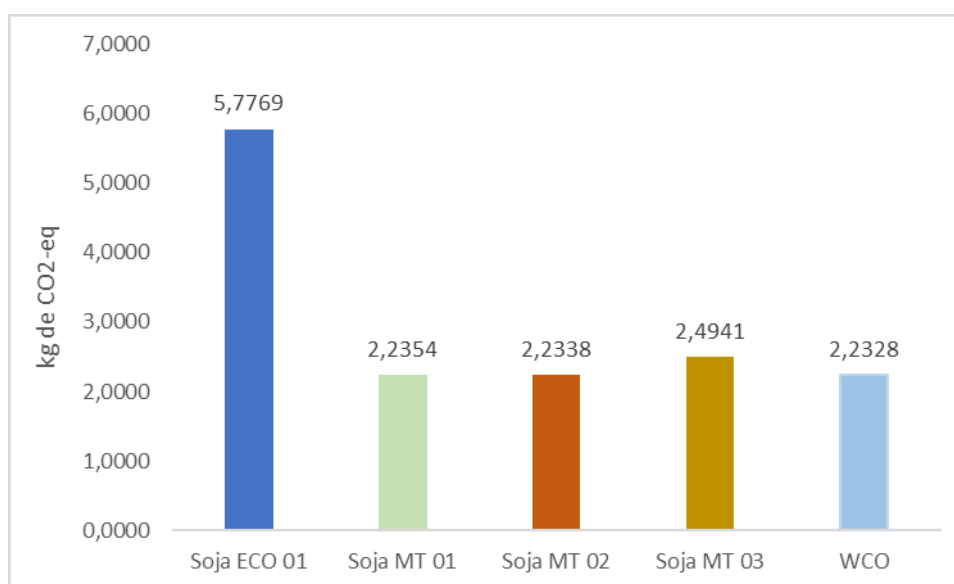
A fase de obtenção da acroleína é a etapa mais crítica para a produção de acrilonitrila a partir de glicerol. Na rota a partir de glicerol, a desidratação a acroleína é endotérmica e carece do consumo de gás natural para prover a energia térmica necessária para atender a demanda da unidade. Diferentemente, a produção a partir do propeno ocorre em um único reator com reações simultâneas extremamente exotérmicas. Estas reações suprem as necessidades térmicas da unidade principal e adjacentes. Por fim, a contribuição do processo de desidratação a acroleína é baixo, pois a parcela de resíduos gerados em sua purificação é enviada para queima

juntamente à corrente resultante da acrilonitrila, sendo somadas e consideradas na etapa final do processo.

4.1.1.4 GEE para a fase Acrilonitrila

As emissões de GEE para as rotas foram avaliadas em conjunto para a obtenção de 1kg de acrilonitrila a partir do esquema proposto por Braga *et al.* (2021). A Figura 25 e Tabela 14 mostram as emissões de kg de CO₂-eq para cada kg de acrilonitrila produzida.

Figura 25 - Comparativo das emissões de GEE para a produção da acrilonitrila.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 14 - Comparativo de emissões de GEE para a produção de acrilonitrila

Fontes de emissões	Soja ECO 01	Soja MT 01	Soja MT 02	Soja MT 03	WCO
Acroleína	3,8538	0,3123	0,3107	0,5710	0,3097
Amoxidação a acrilonitrila	1,9231	1,9231	1,9231	1,9231	1,9231
Acrilonitrila	5,7769	2,2354	2,2338	2,4941	2,2328

Fonte: Autoria Própria.

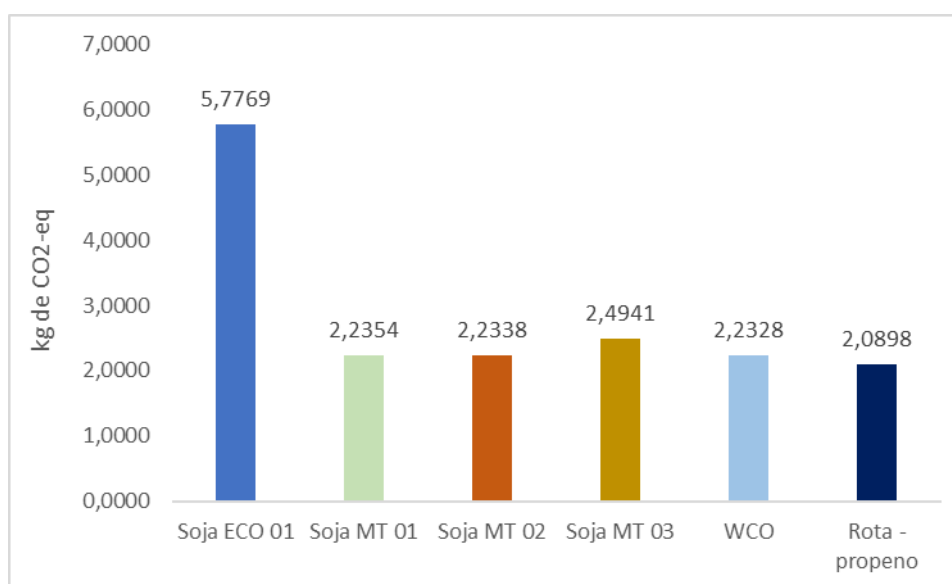
Nota-se que a etapa de amoxidação a acrilonitrila apresenta a maior intensidade de emissão entre os processos existentes na rota de obtenção a partir de glicerol.

Primeiramente, a amônia, adicionada no reator juntamente ao ar, e o ácido sulfúrico, adicionado após o reator para converter a amônia não reagida em sulfato de amônio, são insumos de grandes emissões por kg utilizados. Em seguida, existe a necessidade da adição de gás natural para alimentar as colunas e *reboilers* no processo purificação da acrilonitrila. Este insumo é necessário, pois a reação endotérmica da desidratação do glicerol afeta todo o sistema de produção e causa dependência em múltiplos estágios. Por fim, esta etapa do processo une todas as correntes a serem incineradas, contendo os resíduos da etapa de purificação, desidratação a acroleína e amoxidação a acrilonitrila.

4.1.1.5 Acrilonitrila a partir de propeno

As rotas de produção de acrilonitrila a partir de glicerol foram comparadas com a rota predominante comercialmente, a partir do propeno. Está comparação mostra uma visão preliminar de resultados, pois, neste trabalho, optou-se por utilizar dados globais provenientes do propeno, caracterizando um resultado superficial no contexto de ACV. A Figura 26 ilustra o resultado comparativo das emissões de kg de CO₂-eq entre as diferentes rotas.

Figura 26 - Comparativo entre acrilonitrila (Glicerol) e acrilonitrila (comercial).



Fonte: Autoria Própria.

A rota do propeno apresenta notória maturidade tecnológica, repercutindo em aproveitamento de insumos e redução de emissões. O principal aspecto que valida a redução de

emissões é a reação extremamente exotérmica da amoxidação do propeno que extingue qualquer utilização de combustíveis fósseis adicionais para obtenção de energia térmica. No entanto, vale destacar que as emissões atreladas a utilização do propeno são minimizadas pela quantidade de sua produção em comparação aos demais derivados de petróleo que movimentam uma cadeia extensa de emissões para atmosfera.

A intensidade de emissão de kg de CO₂-eq para cada kg de acrilonitrila produzida, a partir dos dados do *Ecoinvent* para o estado mato grossense - Soja ECO 01, em uma primeira análise apresenta-se com pouca ou menor probabilidade de ser implementada, considerando unicamente a categoria de impacto *Global Warming* (aproximadamente três vezes superior ao valor da rota comercial).

Soja MT 01, Soja MT 02 e WCO foram as rotas a partir de glicerol com menor intensidade de emissão (valores entre 6,97% e 6,84% superiores). Este resultado não inviabiliza a implementação futura do processo e pode induzir a estudos mais aprofundados, visando modificações no processo, localidade ou matéria-prima.

A rota WCO destaca-se como oportunidade futura com grande disponibilidade global. Estudos indicam que o biodiesel proveniente de óleos vegetais residuais pode reduzir até 30% de emissões das emissões anuais de GEE e reduzir em 36,79% os custos anuais em produção, sugerindo que a alternativa tem viabilidade ambiental e econômica (SANTANA *et al.*, 2021). No entanto, alguns desafios estratégicos impedem a implementação de projetos em grande escala como, por exemplo, a ausência de sistemas estratégicos de logística e falta de projeção para a economia circular.

4.1.2 Consumo de água

O consumo de água da produção de acrilonitrila a partir do glicerol oriundo da soja foi dividida em 3 fases: colheita da soja, produção do glicerol e produção da acrilonitrila. Para o processo baseado em óleos vegetais residuais, dividiu-se em 2 fases: obtenção do glicerol e produção de acrilonitrila.

4.1.2.1 Consumo de água da produção oriundo da soja

O volume de água utilizado na colheita da soja e seu transporte foram baseados no banco de dados *Ecoinvent* existente no SimaPro[®]. O estudo mostrou que aproximadamente 2,29 L de

água são necessárias para produzir 1 kg de soja disponibilizada no mercado. Sendo assim, os impactos associados ao consumo de água para a soja foram distribuídos proporcionalmente ao longo da cadeia para a obtenção da acrilonitrila.

Os processos de extração do óleo de soja, purificação e produção de biodiesel e biodiesel, baseados nos estudos de Castanheira *et al.*, (2015), não possuem correntes de água pura na entrada e correntes de contaminantes na saída. A água existente no processo está presente na diluição de outros insumos (ácido clorídrico, hidróxido de sódio, ácido cítrico e metanol). O estudo mostrou que o volume de 4,17 L de água foi consumido para cada kg de glicerol produzido a partir do grão da soja comercializado no Brasil.

4.1.2.2 Consumo de água da produção de glicerol oriundo de OVR

Os volumes de água utilizados na obtenção de óleo vegetal residual e sua purificação estão contidos no banco de dados *Ecoinvent* existente no SimaPro[®] e o processo para a produção de glicerol foi baseado no trabalho de Ripa *et al.*, (2014). O estudo mostrou que a cada kg de glicerol produzido a partir de OVR, o volume de 2,45 L de água foi consumido para atender às necessidades do processo.

4.1.2.3 Consumo de água do conjunto de processos da produção de acrilonitrila

Toda água existente no processo de purificação do glicerol é proveniente do reaproveitamento das colunas de separação da acrilonitrila após purificação e pressurização das correntes de saída. No entanto, mesmo sem utilizar uma corrente de água deionizada na alimentação do processo, outros insumos oferecem acréscimos na categoria de impacto de consumo de água. O estudo mostrou que é necessário consumir aproximadamente 4,79 L de água para cada kg de glicerol purificado.

Similarmente à etapa de purificação do glicerol, não há entradas de correntes de água deionizada na etapa da acroleína e outros insumos presentes nas correntes de alimentação do sistema proporcionam acréscimos na categoria de impacto de consumo de água. O estudo mostrou que é necessário o consumo de aproximadamente 8,07 L de água para produzir 1kg de acroleína a partir do glicerol purificado.

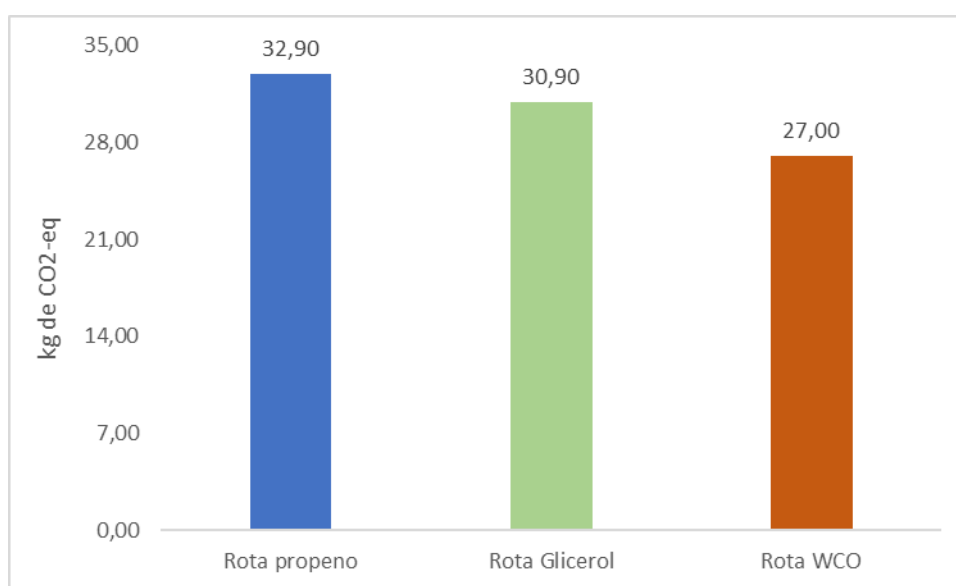
O consumo de água para obtenção da acrilonitrila apresentou características distintas das demais. Primeiramente, nesta etapa de produção existe uma corrente de alimentação de

água deionizada de aproximadamente 1,29 L por kg de acrilonitrila produzida. Deste volume de água, 1,26 L de água são enviados para estação de tratamento para reutilização nas fases anteriores. Tal comportamento é explicado pela necessidade de alimentar as colunas de separação nas quais a acrilonitrila é purificada até a especificação comercial. O estudo mostrou que para produzir 1 kg de acrilonitrila a partir do glicerol foi necessário consumir aproximadamente 30,9 L de água.

4.1.2.4 Comparativo do consumo de água

O estudo comparativo do consumo de água foi desenvolvido estimar a diferença entre a produção de acrilonitrila a partir do propeno e a produção mais sustentável da acrilonitrila baseada a partir de glicerol (oriundo da soja e OVR). A Figura 27 mostra a comparação do consumo de água, em litros, para a produção da acrilonitrila a partir do propeno, acrilonitrila a partir de glicerol oriundo da soja e acrilonitrila a partir do glicerol oriundo de OVR.

Figura 27 – Comparativo do consumo de água para a produção da acrilonitrila.



Fonte: Autoria Própria.

Nota-se que a alternativa de acrilonitrila a partir do glicerol oriundo da soja apresentou consumo de 2 litros a menos de água por kg de produção. Esta diferença é justificada pelo reaproveitamento da água no processo de desidratação do glicerol e obtenção a partir da reação

de amoxidação. Ao considerar o processo de produção da acrilonitrila a partir de óleos vegetais residuais foi possível obter acrilonitrila com menor consumo de água, aproximadamente 27 L. Este melhor resultado pode ser justificado pela utilização de um resíduo que consome menor quantidade de água para sua obtenção.

4.1.3 Consumo de derivados fósseis

A categoria de impacto de escassez de recursos fósseis é de suma importância para validação do processo mais sustentável para produção de acrilonitrila, pois a substituição do propeno pelo glicerol inevitavelmente proporciona menor dependência de derivados fósseis. No entanto, a fase de desidratação de glicerol a acroleína, reação endotérmica, gera um déficit de calor em toda cadeia de valor do processo que precisa ser compensada com a queima de gás natural.

Ao evitar o propeno como matéria-prima principal para a produção da acrilonitrila a categoria de impacto para escassez de recursos fósseis reduziu significativamente. A queima das diferentes proporções de gás natural fornece a energia necessária para colunas, refeedores e trocadores de calor existentes nos processos de separação e purificação. A Tabela 15 mostra as quantidades de gás natural inseridas no sistema para cada etapa do processo.

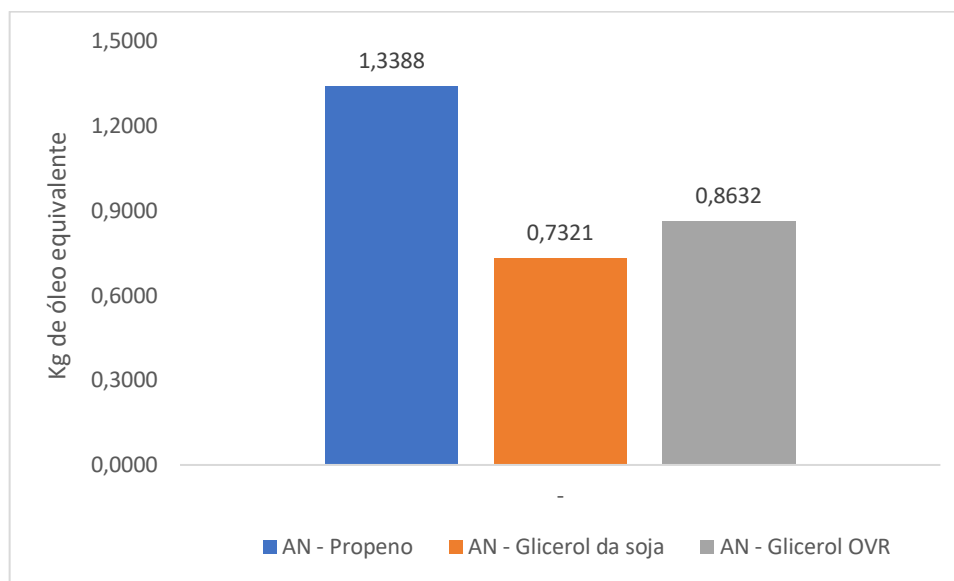
Tabela 15- Adição de gás natural por kg de acrilonitrila em cada etapa

Etapa de processo	kg de gás natural
Purificação do glicerol	0,0151
Desidratação em acroleína	0,0904
Produção da acrilonitrila	0,2103

Fonte: Autoria própria.

A Figura 28 mostra o resultado comparativo das simulações entre a acrilonitrila a partir do propeno, acrilonitrila a partir do glicerol oriundo da soja e oriundo de OVR.

Figura 28- Escassez de recursos fósil.



Fonte: Autoria Própria.

Observa-se que a alternativa de produção de acrilonitrila a partir da rota da soja é menos agressiva para o meio ambiente, apresentando menor consumo na categoria de impacto, escassez de recursos fósseis, tendo o potencial de reduzir em 45,32% a escassez de recursos. Salienta-se que o consumo desta rota representa, não somente o gás natural queimado, mas os combustíveis utilizados para obtenção e comercialização dos insumos contidos na cadeia de processos.

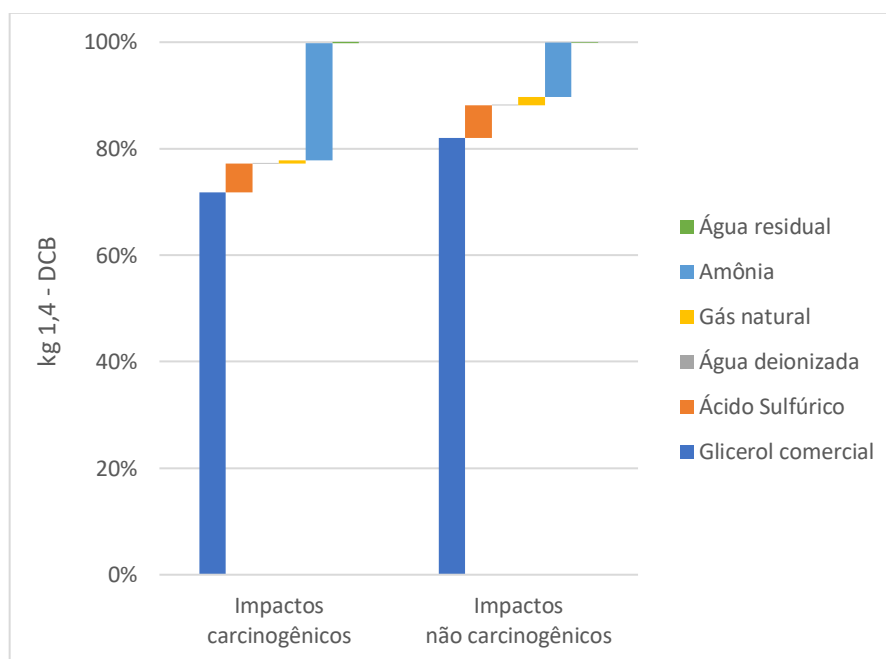
Por sua vez, produção de acrilonitrila a partir de glicerol oriundo de OVR tem o potencial de reduzir em 35,52% a categoria de escassez de recursos fósseis. O comportamento levemente mais acentuado em comparação à produção oriunda do glicerol da soja pode ser justificado por fatores relacionados à utilização do óleo residual, condições de tratamento e os demais insumos interferem nesta categoria devido ao processo logístico de distribuição.

4.1.4 Toxicidade humana

Foi avaliada a toxicidade humana para a produção de acrilonitrila a partir de glicerol oriundo de soja, OVR e propeno. Este tópico é dividido em abordagens: toxicidade humana carcinogênica e toxicidade humana não carcinogênica. A Figura 29 mostra os resultados percentuais simulados das categorias de impacto carcinogênicas e não carcinogênicas do

processo de produção de acrilonitrila a partir de glicerol de biodiesel oriundo da soja medidos em kg de 1,4 diclorobenzeno por kg de acrilonitrila produzida. Adicionalmente, a Tabela 16 apresenta as emissões em kg de 1,4 diclorobenzeno (kg 1,4 - DCB) por kg cada insumo utilizado no processo.

Figura 29- Distribuição de impactos carcinogênicos e não carcinogênicos (oriundo da soja).



Fonte: Autoria própria.

Tabela 16 - Distribuição de impactos carcinogênicos e não carcinogênicos (Oriundo da soja).

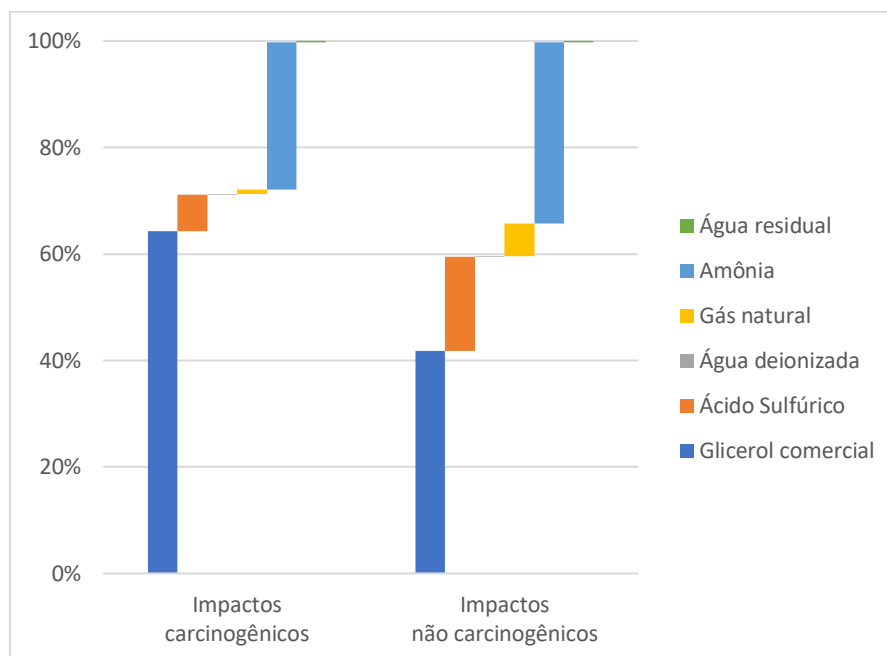
	Glicerol comercial	%	Ácido Sulfúrico	%	Água deionizada	%
Impactos carcinogênicos	0,0316	71,78%	0,0024	5,41%	3,50E-05	0,08%
Impactos não carcinogênicos	2,7400	82,06%	0,2020	6,05%	7,97E-04	0,02%
	Gás natural	%	Amônia	%	Água residual	%
Impactos carcinogênicos	0,0002	0,54%	0,0097	21,97%	0,0001	0,23%
Impactos não carcinogênicos	0,0524	1,57%	0,3410	10,21%	0,0029	0,09%

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que a maior contribuição para as abordagens de toxicidade humana carcinogênica e não carcinogênica são provenientes do glicerol proveniente da soja que, por sua vez, agrega todos os processos de plantio (uso de agrotóxicos, herbicida, pesticida, tratamento de resíduos e suas queimas são percursos comumente relacionados aos impactos carcinogênicos e outros).

Similarmente, as abordagens de toxicidade humana carcinogênica e não carcinogênica foram analisadas para a produção a partir de OVR. A Figura 30 e Tabela 17 apresentam os resultados para as categorias de impacto de carcinogênicos e não-carcinogênicos para acrilonitrila oriunda de OVR.

Figura 30- Distribuição de impactos carcinogênicos e não carcinogênicos (oriundo de OVR)



Fonte: Autoria própria.

Tabela 17 - Distribuição de impactos carcinogênicos e não carcinogênicos (Oriundo de OVR).

	Glicerol comercial	%	Ácido Sulfúrico	%	Água deionizada	%
Impactos carcinogênicos	0,0225	64,23%	0,0024	6,94%	4,50E-05	0,13%
Impactos não carcinogênicos	0,42	41,84%	0,1770	17,63%	9,50E-04	0,09%
	Gás natural	%	Amônia	%	Água residual	%
Impactos carcinogênicos	0,0002	0,82%	0,0097	27,60%	0,0001	0,28%
Impactos não carcinogênicos	0,062	6,18%	0,3410	33,97%	0,0029	0,29%

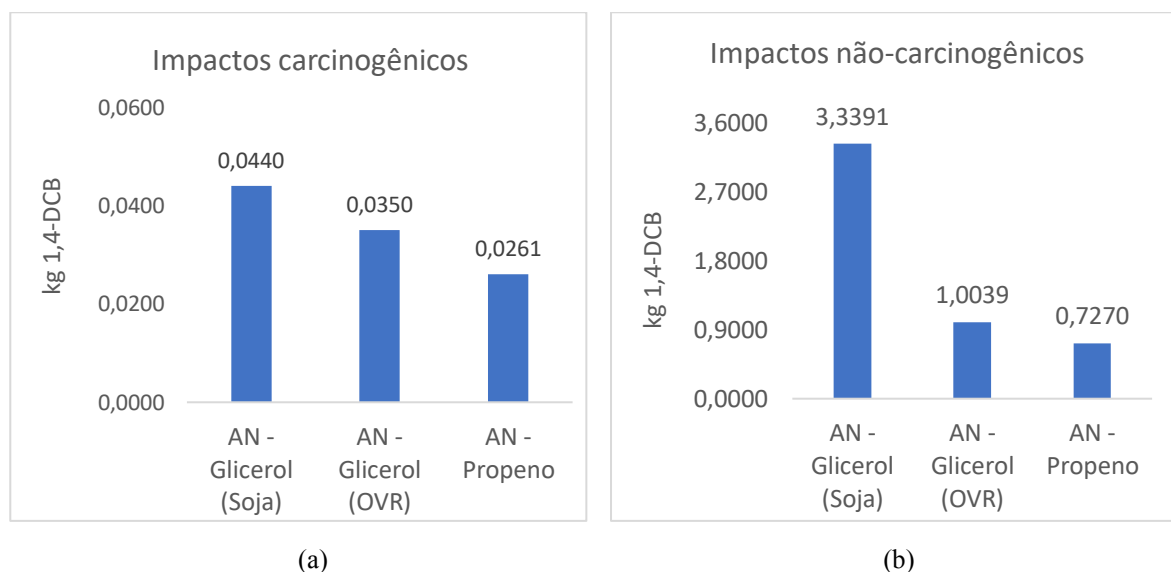
Fonte: Autoria própria.

Nota-se que comparado a processo baseado na rota da soja, o glicerol apresentou menor contribuição percentual para a rota OVR. Além disto, a categoria de não carcinogênicos é menor, pois a coleta seletiva e utilização de óleos residuais pode reduzir a necessidade de processos de recuperações de áreas impactadas, custos e serviços.

A parcela associada ao impacto da amônia é diretamente ligada ao segundo reator do processo de produção da acrilonitrila para ambos a partir de glicerol, sendo inevitável sua existência. A contribuição do ácido sulfúrico mostrou-se expressiva devido a sua participação nas etapas de processo de purificação de glicerol e processo de amoxidação. Ambos os insumos apresentam características de produção de elevada toxicidade humana, envolvendo cadeias de óleo e gás, geração de hidrogênio e logística.

A Figura 31 compara as categorias de impacto carcinogênica e não-carcinogênica baseadas na produção da acrilonitrila a partir do glicerol oriundo da soja, de OVR e da acrilonitrila a partir do propeno.

Figura 31 - Comparativo de impactos carcinogênicos (a) e de impactos não carcinogênicos (b).



Fonte: Autoria Própria.

As rotas utilizando glicerol de ambas as rotas, soja e OVR, apresentaram maior intensidade na categoria toxicidade humana com acréscimos entre 68,58% e 34,10% para a abordagem carcinogênica e 459% a 38,9% para a abordagem não carcinogênica.

A rota de produção de acrilonitrila a partir de glicerol não pode ser descartada por estes resultados, pois a sua implementação não proporcionará a necessidade de aumento de produção da matéria-prima, tendo em vista a sua disponibilidade excedente no mercado e que a maior parte dos fatores que interferiram nestas categorias de impacto foram identificadas fora da cadeia produtiva da acrilonitrila como colheita da soja, transporte, tratamento de óleos residuais, agrotóxicos e produção de biodiesel.

4.1.5 Uso da terra

A categoria de uso da terra foi analisada para 3 cenários de produção: rota soja, rota OVR e rota do propeno. Os dados foram gerados a partir do banco de dados *Ecoinvent* junto a ferramenta *SimaPRO*®.

Segundos os resultados de ACV, para obter 1 kg de acrilonitrila são necessários 0,0063 m²a crop-eq para a rota do propeno. Já a produção de acrilonitrila a partir de glicerol requer 6,33 m²a crop eq por kg de produção. Por fim, a rota OVR requer 0,016 m²a crop-eq por kg de produção. O valor mais expressivo na categoria uso da terra ao considerar o glicerol como

matéria-prima é justificado pelo plantio da soja e avanço do desmatamento. A rota a partir de OVR justifica-se pela sua área de contaminação e coleta, armazenamento e produção.

4.2 Estudo de Viabilidade Econômica

O estudo do valor presente líquido para a produção da acrilonitrila foi realizado a partir de dados de uma unidade teórica de produção a ser implementada em território norte americano (Estados Unidos). Adicionalmente, considerou-se a capacidade de produção de cem mil toneladas de acrilonitrila por ano. O custo fixo e investimento total foram baseados em dados da literatura e suas premissas podem ser consultadas no Anexo D.

A receita do projeto foi obtida a partir dos preços de mercado da acrilonitrila e acetoneitrila. Foram desprezados o ácido cianídrico e o sulfato de amônio no estudo de viabilidade econômica. O Ácido cianídrico foi desprezado pela sua alta periculosidade na comercialização e baixa produção. O sulfato de amônio foi desprezado pela baixa produção e baixo valor de mercado. O cálculo da receita foi descrito na equação (5).

$$Receita = Vol. AN * U\$ AN + Vol. AC * U\$ AC \quad (5)$$

Onde:

Vol. AN – volume de acrilonitrila

Vol. AC – volume de acetoneitrila

U\$. AN – Preço da acrilonitrila

U\$. AC – Preço da acetoneitrila

Os custos variáveis foram desenvolvidos a partir dos custos e quantidades dos insumos inseridos no sistema proposto. Assumiu-se que não existiram parcerias que fornecessem preços diferenciais para a obtenção de qualquer insumo. O glicerol bruto, por exemplo, foi considerado como cotação única e global com 80% de pureza, não dependendo da sua fonte de obtenção.

Os valores de cada corrente utilizada foram obtidos a partir dos estudos modelados existentes na literatura e podem ser consultados no Anexo D. A equação de custos variáveis (6) é descrita por:

$$\sum_{i=0}^n \text{Produto}_i * \text{Preço}_i \quad (6)$$

Os preços atualizados para a produção de acrilonitrila em 2022 podem ser consultados na Tabela 18.

Tabela 18 – Levantamento de preços de matérias-primas e produtos.

Matéria-Prima / Produto	Preço (U\$\$) por unidade)	Referência
Acrilonitrila	2035,00 $\frac{U\$\$}{t}$	(COMEX, 2022a)
Acetonitrila	3295,00 $\frac{U\$\$}{t}$	(CHEMANALYST, 2022)
Glicerol Bruto	634,78 $\frac{U\$\$}{t}$	(COMEX, 2022b)
Água de resfr.	0,0148 $\frac{U\$\$}{t}$	(TURTON R; BAILIE R.C.; WITHING W.B., 2003)
Água fresca	0,0544 $\frac{U\$\$}{t}$	(CONSULTING - SPECIFYING ENGINEER, 2020)
Eletricidade	0,066 $\frac{U\$\$*kW}{h}$	(EIA, 2021)
Gás Natural	287,50 $\frac{U\$\$}{t}$	(COMEX, 2022c)
Amônia	1022,00 $\frac{U\$\$}{t}$	(MORGAN, 2022)
Ácido sulfúrico	323,00 $\frac{U\$\$}{t}$	(FRED.STLOUISFED, 2022)

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 19 apresentam o custo fixo, investimento total, custo variável e a receita.

Tabela 19- Resultados de custos e receita para produção da acrilonitrila

Investimento, custos e receita	
Investimento total (Milhões de dólares)	66.400.000,00
Custo variável (Milhões de dólares)	256.661.405,09
Custo fixo (Milhões de dólares)	8.000.000,00
Receita (Milhões de dólares)	215.979.669,75

Fonte: Autoria própria.

A depreciação anual (perda de valor dos ativos ou bens de uma empresa ao longo do tempo) para este projeto foi de 10%, seguindo as sugestões da receita federal. Foi considerado o tempo útil de operação em 25 anos. A equação da depreciação (7) é descrita por:

$$\text{Depreciação anual} = \frac{(\text{investimento total} - 0,01 * \text{investimento total})}{\text{tempo útil}} \quad (7)$$

Com o resultado da depreciação anual foi possível calcular a perda monetária ao longo dos 25 anos e estimar o fluxo de caixa para a planta de acrilonitrila a partir do glicerol. A Tabela 20 apresenta os resultados obtidos para a avaliação do fluxo de caixa.

Tabela 20 – Depreciação e fluxo de caixa da produção da acrilonitrila.

Depreciação e fluxo de caixa	
Tempo útil	25 anos
Taxa percentual de depreciação	10%
Valor depreciado (milhões de dólares)	2.629.440,00
Custo fixo + depreciado (milhões de dólares)	10.629.440,00
Fluxo de caixa (Milhões de dólares)	(-51.311.175,33)

Fonte: Autoria própria.

A partir do fluxo de caixa, foi calculado o valor descontado de impostos e a geração de caixa anual. Foi considerada a taxa de 34% para impostos em território brasileiro. A Tabela 21 apresenta os resultados para a geração de caixa anual.

Tabela 21 – Taxa de juros nacional e geração de caixa

Depreciação e fluxo de caixa	
Taxa de impostos do Brasil	34%
Valor descontado de impostos	(-61.537.410,40)
Geração de caixa	(-58.943.970,40)

Fonte: Autoria própria.

O cálculo do valor presente líquido foi realizado a partir de uma taxa de juros de 10% ao ano, utilizando a geração de caixa para uma previsão dos próximos 5 anos. A equação 8 representa o cálculo do VPL.

$$VPL = \sum_0^n \frac{C_j}{(1+i)^n} - I \quad (8)$$

Onde:

n é o período de tempo; C_j é o fluxo de caixa; i é a taxa de desconto;

A Tabela 22 apresenta a previsão de VPL para a produção da acrilonitrila dos próximos 5 anos.

Tabela 22 – VPL para a produção da acrilonitrila

Valor presente líquido	
Tempo operacional	5 anos
VPL	(-317.075.384,58)
<i>VPL</i>	- 4,78
<i>Investimento total</i>	

Fonte: Autoria própria.

Os resultados mostraram que não existe viabilidade econômica para a implementação do processo de produção da acrilonitrila para o cenário de preços de 2022. Nota-se no decorrer dos cálculos que o valor dos custos variáveis foi muito expressivo perante a receita a ser obtida. Os estudos realizados por Braga *et al.*, (2021) para a implementação da planta em território norte americano (Estados Unidos) mostrou viabilidade favorável com VPL maior que 2 nos primeiros 5 anos.

A diferença entre as duas análises pode ser justificada pelo momento global no qual foram cotados os insumos do processo. Dentre os principais aumentos, destacam-se os aumentos significativos dos valores do glicerol, amônia e ácido sulfúrico. O glicerol teve aumento de US\$ 275,00 dólares por tonelada para US\$ 625,00 dólares por tonelada enquanto a amônia aumentou de US\$ 230,00 para US\$ 1022,00. Por fim, o ácido sulfúrico era negociado em 2020 a US\$ 126,00 e atualmente custa US\$ 323,00 dólares por tonelada. Sendo assim, a

viabilidade comercial deste projeto depende de cotações de insumos menos expressivas como as registradas em 2020 (momento pré-pandêmico).

Uma análise mais aprofundada, avaliando a obtenção dos insumos nas regiões de implementação da planta, pode favorecer na identificação de dados que reduzam significativamente os custos do processo. Primeiramente, investigar as diferenças de custos da obtenção de glicerol, a partir de grãos de soja e óleo residual vegetal, e estabelecer parcerias locais que facilitem a negociação podem contribuir na aquisição da matéria-prima renovável com preços mais favoráveis. Similarmente, o custo e os impactos associados à obtenção da amônia podem ser reduzidos a depender das condições estipuladas para sua produção e logística.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi analisado o ciclo de vida da produção de acrilonitrila a partir de glicerol, além de verificar a viabilidade econômica da implementação da planta através do estudo de VPL.

A análise comparativa entre emissões oriundas da produção da soja existentes na literatura e no banco de dados *Ecoinvent* para emissões de gases de efeito estufa (Global Warming), registrando variações entre 0,186 kg de CO₂-eq e 4,50 kg de CO₂-eq. A partir da seleção das colheitas de referência, foram registradas emissões de 2,23 kg de CO₂-eq à 5,78 CO₂-eq para a produção da acrilonitrila a partir do glicerol, a depender da rota analisada.

As categorias de consumo de água e escassez de combustíveis fósseis apresentaram vantagens positivas para a utilização do glicerol como matéria-prima, demandando menos água, 2 L por kg para rota da soja e 5,9 L para a rota OVR, e redução de até 45,32% no consumo de kg de óleo por kg de acrilonitrila produzida. Categorias de impactos carcinogênicos e não carcinogênicos não foram positivas devido ao aumento da utilização de ácido sulfúrico no processo, agrotóxicos existentes e outros contaminantes existentes no plantio da soja.

Os custos variáveis para a produção tiveram amplo aumento em comparação a cotações de 2020. Recomenda-se reavaliações futuras do custo de insumos e valor dos produtos gerados para identificar melhores cenários para implementação do processo a partir do glicerol, tendo em vista a utilização de uma matéria-prima de grande disponibilidade no mercado.

Salienta-se que do ponto de vista técnico-econômico os resultados indicam que a implementação da produção da acrilonitrila a partir de glicerol não é competitivo economicamente com a rota comercial (VPL negativo). Além disso, sob o impacto de emissões de GEE, o processo proposto não apresentou contribuições relevantes. Por outro lado, observou-se a redução do consumo de água e escassez de combustíveis fósseis.

6 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se como trabalhos futuros estudar possíveis otimizações no processo de obtenção da acrilonitrila, a utilização do glicerol oriundo da produção biodiesel a partir de outras matérias-primas como o óleo de palma e de babaçu e aprofundamento nos estudos de viabilidade econômica.

A otimização do processo de desidratação em acroleína e a amoxidação em acrilonitrila pode proporcionar melhoria de rendimento e aproveitamento energético global da planta. A possível redução no consumo de gás natural para compor a necessidade energética da planta e a melhor eficiência reacional na amoxidação da acroleína em acrilonitrila.

Outro fator que pode otimizar o processo é a substituição do gás natural por glicerol para a queima e, conseqüentemente, geração de energia para a cadeia de produção de acrilonitrila. Além de eliminar a dependência de combustíveis fósseis no processo através do consumo de um insumo renovável de excessiva disponibilidade no mercado, a substituição tem o potencial de abater emissões de GEE.

Pesquisas sobre a utilização destes insumos para a produção de biocombustíveis e comparativos de rendimento já são desenvolvidas e seus resultados podem contribuir para redução de custos, melhores índices de emissões e desenvolvimento de outras macrorregiões de referência em produção.

Por fim, o desenvolvimento do estudo de viabilidade econômica, definindo parâmetros de geolocalização, condições de produção e adquirindo preços de insumos e equipamentos locais podem proporcionar uma visão mais ampla do estudo de caso para a implementação do processo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOVE. **Coleta e destinação correta do óleo de cozinha usado traz benefícios sociais, econômicos e ambientais**. Disponível em: <<https://abiove.org.br/destaque/coleta-e-destinacao-correta-do-oleo-de-cozinha-usado-traz-beneficios-sociais-economicos-e-ambientais/>>. Acesso em: 30 jan. 2022a.

ABIOVE, A. B. DAS I. DE Ó. V. **Estatística (Biodiesel)**. Disponível em: <<https://abiove.org.br/estatisticas/>>. Acesso em: 13 set. 2021b.

ABNT 14001. Associação Brasileira de Normas Técnicas ISO 14001: Sistema de Gestão ambiental - Requisitos com orientação para uso. p. 41, 2015.

ABNT 14040. Associação Brasileira de Normas Técnicas ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. p. 21, 2014.

ACVBRASIL. **Desmistificando as Categorias de Impacto: Depleção da Camada de Ozônio**. Disponível em: <<https://acvbrasil.com.br/artigo/deplecao-camada-ozonio>>. Acesso em: 21 nov. 2021.

ACVBRASIL. **Desmistificando as Categorias de Impacto: Ecotoxicidade em ecossistemas aquáticos**. Disponível em: <<https://acvbrasil.com.br/artigo/ecotoxicidade>>. Acesso em: 23 nov. 2022.

ALIGLERI, L.; ALIGLERI, L. A.; KRUGLIANSKAS, I. Cradle to Cradle: Uma Análise dos Produtos Certificados para Limpeza Geral e Lavagem de Roupa. **Gestão.org**, v. 14, n. Spe, p. 88–96, 10 maio 2016.

ALIZADEH SAHRAEI, O. et al. A comparative study on the performance of M (Rh, Ru, Ni)-promoted metallurgical waste driven catalysts for H₂ production by glycerol steam reforming. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 63, p. 32017–32035, set. 2021.

ALVARENGA NETTO, C. A. ; LUCENTE, F. S. Análise Comparativa E Seleção Implementação De Um Laboratório Didático de Avaliação de Ciclo de Vida. **Xxxvi Encontro Nacional De Engenharia De Produção**, p. 14, 2016.

AMOAKO, G. K. A conceptual framework: Corporate environmental management activities and sustainable competitive advantage. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 31, n. 2, p. 331–347, 2020.

ANOUK GRINSVEN, EMIEL TOORN, REINIER VEEN, B. K. Used Cooking Oil (UCO) as biofuel feedstock in the EU. Rotterdam. **CE Delft**. 2020.

ARULNATHAN, V., HEIDARI, M. D., DOYON, M., LI, E. P. H., PELLETIER, N. Economic indicators for life cycle sustainability Assessment: Going beyond life cycle costing. **Sustainability**. 15(1), 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15010013>. 2022.

AWOGBEMI, O. et al. Advances in biotechnological applications of waste cooking oil. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 4, p. 100158, 2021.

BASTIÃO, D. S.; CAXIANO, I. N.; PRATA, D. M. Estudo da ecoeficiência de processos de produção de acrilonitrila. **Sistemas & Gestão**, v. 14, n. 1, p. 39–49, 2019.

BELL, A. T. Insights into the mechanism and kinetics of propene oxidation and ammoxidation over bismuth molybdate catalysts derived from experiments and theory. **Journal of Catalysis**, 19 maio 2021.

BOGIANI, J. C. et al. Sequestro de carbono em sistemas de produção de soja, milho e algodão em solo arenoso do Cerrado da Bahia. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (34). EMBRAPA**. Campinas - SP. 2020.

BOZGA, E. R. et al. Conversion of glycerol to propanediol and acrolein by heterogeneous catalysis. **Revista de Chimie**, v. 62, n. 6, p. 646–654, 2011.

BRAGA, E. R.; BRAGA, R. R.; PONTES, L. A. M. Technical and Economic Analysis for the Production of Acrylonitrile from Crude Glycerol. **Chemical Engineering & Technology**, 18 out. 2021.

BRAGA, E. R., MUSTAFA, G. S., PONTES, D. A. , PONTES, L. A. M. Economic analysis and technicalities of acrylic acid production from crude glycerol. **Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly**. DOI: 10.2298/CICEQ180111025B. 2019.

BRAZDIL, J. F. **Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology**. 4th ed. ed. New York: John Wiley: Wiley, 1991.

BRAZDIL, J. F. Acrylonitrile. In: **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012.

BRAZDIL, J. F. The legacy and promise of heterogeneous selective oxidation and ammoxidation catalysis. **Catalysis Today**, v. 363, p. 55–59, 1 mar. 2019.

CASTANHEIRA, É. G. et al. Life-cycle assessment of soybean-based biodiesel in Europe: Comparing grain, oil and biodiesel import from Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 102, p. 188–201, 2015.

CESPI, D. et al. Comparison of different chemical processes from a life cycle perspective. **Chemical Engineering Transactions**, v. 36, n. July, p. 169–174, 2014a.

CESPI, D. et al. Life Cycle Assessment comparison of two ways for acrylonitrile production: the SOHIO process and an alternative route using propane. **Journal of Cleaner Production**, v. 69, p. 17–25, 15 abr. 2014b.

CHEMANALYST. **Acetonitrile Price Trend and Forecast**. Disponível em: <<https://www.chemanalyst.com/Pricing-data/acetonitrile-1105>>. Acesso em: 30 ago. 2022.

CHILAKAMARRY, C. R. et al. Glycerol waste to value added products and its potential

applications. **Systems Microbiology and Biomanufacturing**, v. 1, n. 4, p. 378–396, 7 out. 2021.

CICLABRASIL. **ÓLEO PELO FUTURO**. Disponível em: <<https://ciclabrasil.com.br/oleo-pelo-futuro/>>. Acesso em: 20 ago. 2022.

CINTRA, M. A. M., DA SILVA FILHO, E. B., PINTO, E. C. **China em transformação: dimensões econômicas e geopolíticas do desenvolvimento**. IPEA. Rio de Janeiro - RJ. 2015.

COMEX. **Importação e exportação (Acrilonitrila)**. Disponível em: <<http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>>. Acesso em: 12 nov. 2022a.

COMEX. **Importação e exportação (Glicerol Bruto)**. Disponível em: <<http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/71928>>. Acesso em: 12 nov. 2022b.

COMEX. **Importação e exportação (Gás natural)**. Disponível em: <<http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/71930>>. Acesso em: 20 nov. 2022c.

CONSULTING - SPECIFYING ENGINEER. **Air- versus water-cooled chilled water plants**. Disponível em: <<https://www.csemag.com/articles/air-versus-water-cooled-chilled-water-plants/>>. Acesso em: 30 ago. 2022.

COSTA, M. W.; OLIVEIRA, A. A. M. Social life cycle assessment of feedstocks for biodiesel production in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 159, 2022.

DA SILVA, L. D. **Catalisadores De Óxidos Metálicos Contendo Antimônio Para a Produção Da Acrilonitrila**. Salvador-BA. Universidade Federal Da Bahia, 2014.

DE ALBUQUERQUE NUNES, P. A. et al. Livestock integration into soybean systems improves long-term system stability and profits without compromising crop yields. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1649, 18 dez. 2021.

DE CALDAS, L. F.; SCOTON, E. J.; BATTISTELLE, R. A. G. Produção e Consumo de Óleo de Soja no Brasil. **IX Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental São Bernardo do Campo/SP**, p. 1–6, 2018.

DEEPA, H. A.; ANUSHA, R.; ASHA, P. Evaluation on Production and Economics of Acrylonitrile by Sohio Process. v. 4, n. 21, p. 1–6, 2016.

DELEPLANQUE, J. et al. Production of acrolein and acrylic acid through dehydration and oxydehydration of glycerol with mixed oxide catalysts. **Catalysis Today**, v. 157, n. 1–4, p. 351–358, 17 nov. 2010.

DIMIAN, A. C. E BILDEA, C. S. **Chemical Process Design**. Weinheim: Wiley –CVH, 2008.

DIMIAN, A. C.; BILDEA, C. S. **Chemical Process Design: Computer-Aided Case Studies**. Weinheim: Wiley, 2008.

DUBOIS, J. L. **Method for the synthesis of acrylonitrile from glycerol**. USA, 2008.

Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/3b/c9/82/c283c7b24afe69/US20100019677A1.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2022.

ECOINVENT. **Database Ecoinvent**. Disponível em: <https://ecoinvent.org/glossary-terms/>. Acesso em: 10 fev. 2022.

EIA. **Electric Power Monthly-Average price of eletricity to ultimate customers**. Disponível em: https://www.eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.php?t=epmt_5_6_a. Acessado em: 20 nov. 2022.

EMBRAPA. **Embrapa contribui para a nova versão do Ecoinvent**. Disponível em: https://www.embrapa.br/noticias/-/asset_publisher/d5zeAgqx3Tw9/content/id/75159978. Acesso em: 24 nov. 2022.

EPA. **Recovery Potential Screening - Social Indicators**. Disponível em: <https://www.epa.gov/rps/social-indicators>. Acesso em: 12 jan. 2023.

EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis Ano 2019**. Rio de Janeiro: EPE, 2020.

ESTEVES, E. M. M. **Análise do Ciclo de Vida do biodiesel de soja: o impacto do Sistema de Integração Lavoura-Pecuária (SILP)**. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2016.

FGV. **Modelo de projeção e mitigação para ações de descarbonização da soja pautam nova pesquisa da FGV**. Disponível em: <https://portal.fgv.br/noticias/modelo-projecao-e-mitigacao-acoes-descarbonizacao-soja-pautam-nova-pesquisa-fgv>. Acesso em: 25 maio. 2022.

FIROUZI, E. et al. An Overview of Acrylonitrile Production Methods: Comparison of Carbon Fiber Precursors and Marketing. **Mini-Reviews in Organic Chemistry**, v. 17, n. 5, p. 570–588, 2019.

FRED.STLOUISFED. **Producer Price Index by Commodity: Chemicals and Allied Products: Sulfuric Acid**. Disponível em: <https://fred.stlouisfed.org/series/WPU0613020T1>. Acesso em: 30 ago. 2022.

GAZZONI, D. L.; DALL'AGNOL, A. **A saga da soja: de 1050 a.C. a 2050 d.C.** EMBRAPA. Brasília - DF. 2018.

GIODA, A. Comparison of the pollutant levels emitted by different fuels used for cooking and their influences on global warming. **Quimica Nova**, v. 41, n. 8, p. 839–848, 2018.

GOES, B. C., PIAZENTIN, J. C., GABRIL FILHO, L. R. A., PUTTI, F. F., GRABRIEL, C. P. C. Produção de biocombustíveis e segurança alimentar. **Enciclopédia Biosfera**. DOI: 10.18677/EnciBio_2018B67. 2018.

GOV.RS. Exportações do agronegócio do RS atingem US\$ 15,3 bi em 2021, maior valor da

série histórica. **Planejamento - Governo Federal**. Disponível em: <https://estado.rs.gov.br/exportacoes-do-agronegocio-do-rs-atingem-us-15-3-bi-em-2021-maior-valor-da-serie-historica#:~:text=No%20complexo%20soja%2C%20o%20desempenho,%3B%20%2B449%2C4%25>). Acesso em: 13 jan. 2023.

GROTTA, R. C. et al. Analysis of the affinity of the principles of corporate governance to the ISO 14001 environmental management system standard. **Gestao e Producao**, v. 27, n. 2, 2020.

GUERRA, G. N., MUSSE NETO, G. J., PONTES, L. A. M. Produção de acrilonitrila a partir de diferentes matérias-primas: prospecção tecnológica. **Cadernos de prospecção**. 13(3), 960-975). DOI: <https://doi.org/10.9771/cp.v15i3.46123>. 2022.

GUPTA, B. S.; AFSHARI, M. Polyacrylonitrile fibers. In: BUNSELL, A. R. (Ed.). **Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres**. Second ed. Duxford: Woodhead Publishing, 2018. p. 545–593.

H.N. SALWA, S.M. SAPUAN, M.T. MASTURA, M.Y.M ZUHRI, R. A. I. Life Cycle Assessment of Bio-Based Packaging Products. In: S.M. SAPUAN, R. A. I. (Ed.). **Bio-Based Packaging: Material, Environmental and Economic Aspects**. Hoboken: Wiley, 2021. p. 382–408.

HOSSEINZADEH-BANDBAFHA, H. et al. Environmental life cycle assessment of biodiesel production from waste cooking oil: A systematic review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 161, n. April, p. 112411, 2022.

HUIJBREGTS, M. A. J. et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 2, p. 138–147, 12 fev. 2017.

IBGE. Estratégias de expansão do agronegócio em Mato Grosso: os eixos da BR-163 e da BR-158 em perspectiva comparativa. (pp.33-69). **Editores IABS. Brasília – BR. 2020**.

IBICT. **Recomendação de modelos de avaliação de impacto do ciclo de vida para o contexto brasileiro**. Brasília. IBICT. Pag. 165. 2019.

IEA. **Global biofuel production in 2019 and forecast to 2025**. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-biofuel-production-in-2019-and-forecast-to-2025>. Acesso em: 7 set. 2021.

IGTPAN. Granado Institute of Polyacrylonitrile Technology. (2021). **Acrylonitrile: The Monomer**. <https://www.igtpan.com/Ingles/acrilonitrila.asp>. Acesso em 21 nov 2021.

ISOLANI, K. A.; TONIN, J. M. Produção de biodiesel no Brasil com o advento do Selo Combustível Social e os impactos na agricultura familiar Biodiesel Production in Brazil after the Advent of “ Selo Combustível Social ” and Impacts on Family Farms. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 28, p. 157–171, 2013.

ITC. **Acrylonitrile (292610)**. Disponível em:

<https://www.trademap.org/Country_SelProduct_TS.aspx?nvpm=1%7C%7C%7C%7C%7C292610%7C%7C%7C6%7C1%7C1%7C1%7C2%7C1%7C2%7C1%7C%7C1>. Acesso em: 20 out. 2021.

ITO, M. Life Cycle Assessment of PV systems. In: **Crystalline Silicon - Properties and Uses**. Edited Vol ed. Tokyo: InTech, 2011.

KLUG, LETÍCIA ; MARENGO, JOSE A. ; LUEDEMANN, G. Mudanças Climáticas E Os Desafios Brasileiros Para Implementação da Nova Agenda Urbana. In: **O Estatuto da Cidade e a Habitat III : um balanço de quinze anos da política urbana no Brasil e a nova agenda urbana / organizador: Marco Aurélio Costa**. IPEA ed. Brasília. IPEA. 2016

LAPPONI, J. C. **Matemática Financeira**. Segunda ed. Rio de Janeiro - RJ: Elsevier Editora Ltda., 2014.

LIEBIG, C. et al. Glycerol conversion to acrylonitrile by consecutive dehydration over WO₃/TiO₂ and ammoxidation over Sb-(Fe,V)-O. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 132–133, p. 170–182, 27 mar. 2013.

LIU, Y.; ZHONG, B.; LAWAL, A. Recovery and utilization of crude glycerol, a biodiesel byproduct. **RSC Advances**, v. 12, n. 43, p. 27997–28008, 2022.

LU, K. et al. Integration of life cycle assessment and life cycle cost using building information modeling: A critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 285, p. 125438, 20 fev. 2021.

MANSILHA, M. B.; FARRET, F. A.; DA ROSA, L. C. Avaliação do ciclo de vida do alumínio primário utilizando o software OpenLca. **Revista Espacios**, v. 38, n. 41, 2016.

MARIYAM, S. et al. Safety Assessment of Questionable Food Additives in the Halal Food Certification: A Review. **Indonesian Journal of Halal Research**, v. 4, n. 1, p. 19–25, 2022.

MENDES, N. C. **Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil**. Dissertação de Mestrado. São Carlos. Universidade de São Paulo (USP). 2013

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, n. 1, p. 160–175, 24 nov. 2015.

MORALES-MORA, M. A. et al. Environmental and eco-costs life cycle assessment of an acrylonitrile process by capacity enlargement in Mexico. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 90, n. 1, p. 27–37, 1 jan. 2012.

MORENO RUIZ, E. et al. **Documentation of changes implemented in the ecoinvent database v3. 4. ecoinventEcoinvent.Org**. Zürich, Switzerland. Ecoinvent. 2021.

MORGAN, T. **Natural Gas Prices Only Account for 15% of Run-Up in Anhydrous Ammonia Prices, Shows New Texas A&M Study**. Disponível em: <<https://www.agweb.com/news/crops/corn/natural-gas-prices-only-account-15-run-anhydrous-ammonia-prices-shows-new-texas-am>>. Acesso em: 30 ago. 2022.

MUTHU, S. S. Assessing the Environmental Impact of Textiles and the Clothing Supply Chain. In: EDITION, S. (Ed.). **The Textile Institute Book Series**. Elsevier, 2020. p. 106–130.

OECD. Biofuels. OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030. DOI: <https://doi.org/10.1787/agr-data-en>. 2021.

OLABISI, OLAGOKE, P ADEWALE, K. **Handbook of Thermoplastics**. Second Edition. Houston: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.

PEREIRA BATISTA, M. R. **Análise de Ciclo de Vida (ACV) de óleos refrigerantes para transformadores: comparação entre óleo mineral e óleo vegetal**. Itajubá. Universidade Federal de Itajubá, 2021.

PEYROT, C. **Avaliação do ciclo de vida (ACV) do etanol combustível com elevados teores de água**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. UFSM, Santa Maria-RS. 2018.

PIZZOL, M. et al. Eco-toxicological impact of “metals” on the aquatic and terrestrial ecosystem: A comparison between eight different methodologies for Life Cycle Impact Assessment (LCIA). **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 6–7, p. 687–698, 1 abr. 2011.

RAMOS HUARACHI, D. A. et al. Past and future of Social Life Cycle Assessment: Historical evolution and research trends. **Journal of Cleaner Production**, v. 264, p. 121506, 2020.

RAUCCI, G. S. et al. Greenhouse gas assessment of Brazilian soybean production: A case study of Mato Grosso State. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 418–425, 2015.

REZAIE, F.; PIROUZFAR, V.; ALIHOSSEINI, A. Technical and economic analysis of acrylonitrile production from polypropylene. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 16, p. 100463, 1 maio 2020.

RIBASKI, N. G. et al. Avaliação do ciclo de vida, estudo de caso aplicado ao plantio de Pinus no Paraná, Brasil. **Brazilian Journal of Technology**, v. 3, n. 1, p. 2–20, 2020.

RIPA, M. et al. Recycling waste cooking oil into biodiesel: A life cycle assessment. **International Journal of Performability Engineering**, v. 10, n. 4, p. 347–356, 2014.

ROUAULT, A. et al. Life cycle assessment of viticultural technical management routes (TMRs): Comparison between an organic and an integrated management route. **Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin**, v. 50, n. 2, p. 77–89, 2016.

S. V. DA COSTA, A.; A. F. PEREIRA, C. Análise técnica-social da produção de biodiesel no Brasil e no desenvolvimento agrícola do norte de Minas Gerais. **DRd-Desenvolvimento regional de debate**, v. 1, n. 4, p. 78–85, 2020.

SANTANA, J. C. C. et al. Clean Production of Biofuel from Waste Cooking Oil to Reduce Emissions, Fuel Cost, and Respiratory Disease Hospitalizations. **Sustainability**, v. 13, n. 16, p. 9185, 16 ago. 2021.

SCHAECHTER, M. **Encyclopedia of Microbiology**. 3rd Editio ed. New York: Academic Press, 2009.

SEVIGNÉ-ITOIZ, E. et al. Life cycle assessment (LCA): informing the development of a sustainable circular bioeconomy? **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 379, n. 2206, 20 set. 2021.

SILVA, G. A. DA et al. **Avaliação do ciclo de vida : ontologia terminológica**. Brasília: IBICT, 2015.

SILVA, L. D. et al. Catalisadores Multicomponentes Com Adição De Promotores Para Produção Da Acrilonitrila. **Engevista**, v. 18, n. 2, p. 375, 2016.

SILVA, R. B. .; KAZIMI, M. S. .; HEJZLAR, P. Nuclear fuel recycling: National and regional options for the US nuclear energy system. **Energy & Environmental Science**, v. 3, n. 8, p. 996, 2010.

TEDESCO GIROTTO, S. B. F. **Dissertação de mestrado - Avaliação de modelos de caracterização de AICV para a categoria SMOG fotoquímico considerando o contexto brasileiro**. Santa Catarina. Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, 2018.

THODE FILHO, S. et al. Efeitos associados ao descarte inadequado do óleo vegetal residual nas propriedades físico-químicas do solo. **Natural Resources**, v. 10, n. 3, p. 25–37, 12 ago. 2020.

TOLOI, M. N. V., TOLOI, R. C., BUENO, R. E., BONILLA, S. H. Análise das emissões de CO₂ dos insumos da cultura de soja nos âmbitos upstream e direto em diferentes macrorregiões do estado de Mato Grosso. **Revista Cubana de Ingeniería**. Vol. XII (3). ISSN: 2223-1781. 2021.

TURTON R; BAILIE R.C.; WITHING W.B. **Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes**. 2nd ed. ed. New Jersey: 2008.

URTADO, E. S. et al. Aplicação Do Método Do Valor Presente Líquido (Vpl) Na Análise Da Viabilidade Econômica De Projetos Na Indústria Metal Mecânica: Um Estudo De Caso. **XIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica**, p. 1–4, 2011.

VIANA, J. G. A.; SILVEIRA, V. C. P.; ANTUNES, Y. C. Soybean expansion and its impact on Livestock in the Brazilian Pampa. **Journal of Livestock Science**, v. 13, n. 2, p. 107, 30 mar. 2022.

VINHAL, L. D. **Estudo De Indicadores Ambientais De Blocos Cerâmicos Com Base Em Avaliação Do Ciclo De Vida, Considerando O Contexto Brasileiro**. Dissertação de mestrado. São Carlos. Universidade Federal de São Carlos, 2016.

VITURI, M. N. J. R. R. C. T. CO₂ Gas Emissions of Soybean Production and Transportation in the Different Macro-regions of Mato Grosso State - Brazil. In: **Advances in Production Management Systems. Production Management for the Factory of the Future**. Austin: IFIP WG 5.7 International Conference, 2019.

W. D. SEIDER, J. D. S. AND D. R. L. **Product and Process Design Principles**. 3rd Editio ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009.

WAHRLICH, J. et al. Avaliação Da Sustentabilidade Do Ciclo De Vida: Uma Revisão. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 183, 2020.

WFO. **COP 26: “We are not your problem. We are actually the only solution you have”, said WFO President**. Disponível em: <https://www.wfo-oma.org/wfo_news/cop26-farmers-are-the-solution-to-climatechange/>. Acesso em: 17 set. 2022.

YE, X. P.; REN, S. Coproduction of acrylic acid with a biodiesel plant using CO₂ as reaction medium: Process modeling and production cost estimation. **Energies**, v. 13, n. 22, 2020.

ZHANG, J. et al. Crude glycerol and glycerol as fuels and fuel additives in combustion applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 159, n. October 2021, p. 112206, 2022.

ZUR, U.; OEL-PROTEINPFLANZEN, R. V. O. N. UNION ZUR FÖRDERUNG VON OEL-UND PROTEINPFLANZEN E.V. (UFOP). Report on Global Market Supply 2017/2018. **Union Zur Förderung Von Oel- Und Proteinpflanzen E.V. (Ufop)**, p. 51, 2017.

ANEXO A- Produção de biodiesel/glicerol da soja

Tabela 1- Inventário para análise do ciclo de vida da produção de biodiesel/glicerol a partir do grão de soja (CASTANHEIRA *et al.*, 2015).

Insumos	Quantidade	Unidade
Grão de soja	5,21	kg
Elettricidade	0,18	kWh
Calor (aproveitamento de queima)	1,08	MJ
Hexano	0,0057	kg
Produtos		
Óleo de soja bruto	1,00	kg
Bagaço de soja para ração	4,17	kg

Insumos	Quantidade	Unidade
Óleo de soja bruto	1,03	kg
Elettricidade	0,01	kwh
Gás Natural	0,27	MJ
Ácido Fosfórico 85%	0,0016	kg
Hidróxido de sódio 50%	0,0045	kg
Ácido Cítrico	0,0004	kg
Produtos		
Óleo Vegetal	1,00	kg

Insumos	Quantidade	Unidade
Óleo Vegetal	1,00	kg
Elettricidade	0,03	kWh
Calor (queima de óleo)	0,11	MJ
Ácido Clorídrico 30%	0,0139	kg
Hidróxido de sódio 50%	0,0015	kg
Ácido Cítrico	0,0017	kg
Metanol	0,1099	kg
Metóxido de Sódio	0,0070	kg
Produtos		
Biodiesel	1,00	kg
Glicerol	0,13	kg

Fonte: CASTANHEIRA *et al.*, (2015).

ANEXO B- Produção biodiesel/glicerol a partir de OVR.

Tabela 2- Inventário para análise do ciclo de vida da produção de biodiesel a partir de óleos vegetais residuais obtido a partir do estudo de Ripa *et al.*, (2014).

Pré-tratamento		
Insumos	Quantidade	Unidade
Hidróxido de potássio	$1,18 * 10^{-2}$	kg
Água	$1,19 * 10^{-2}$	kg
Eletricidade	$2,47 * 10^{-2}$	kWh
Resíduo para tratamento	$4,89 * 10^{-11}$	kg
Transesterificação		
Insumos	Quantidade	Unidade
Gás natural	0,99	MJ
Metanol	0,12	kg
Ácido fosfórico (85% em água)	$4,97 * 10^{-3}$	kg
Hidróxido de potássio	$1,22 * 10^{-2}$	kg
Água	$2,92 * 10^{-2}$	kg
Óleo vegetal residual (purificado)	1,1	kg
Eletricidade	$4,08 * 10^{-2}$	kWh
Produtos		
Glicerol	0,11	kg
Biodiesel	1	kg

Fonte: (RIPA *et al.*, 2014).

ANEXO C- Produção de acrilonitrila a partir do propeno na fase gate-to-gate.

Tabela 3 – Inventário para a produção da acrilonitrila a partir do propeno (DIMIAN; BILDEA, 2008).

Dados ACV produção da acrilonitrila

Insumos	Quantidade	Unidade
Propeno	1,1028	kg * kg ⁻¹ de An
Ar	7,1834	kg * kg ⁻¹ de An
Amônia	0,5356	kg * kg ⁻¹ de An
Ácido sulfúrico	0,3837	
Água deionizada	2,2982	kg * kg ⁻¹ de An
Produtos		
Acrilonitrila	1	kg
Acetonitrila	0,0207	kg * kg ⁻¹ de An
Sulfato de amônio	0,5112	kg * kg ⁻¹ de An
Ácido Cianídrico	0,0258	kg * kg ⁻¹ de An
Eletricidade	0	kWh
Resíduos		
Água contaminada encaminhada para tratamento	0,9834	
Parcela de resíduo incinerado		
Dióxido de carbono	0,4412	kg * kg ⁻¹ de An
Nitrogênio	5,7929	kg * kg ⁻¹ de An
Água	0,0864	kg * kg ⁻¹ de An
Oxigênio	0,1298	kg * kg ⁻¹ de An
Propeno	0,0122	kg * kg ⁻¹ de An

Fonte: (DIMIAN; BILDEA, 2008; SEIDER 2009).

ANEXO D- Premissas e conceitos abordados para o estudo de valor presente líquido

As premissas para a produção de 100.000 toneladas de acrilonitrila para custos diretos e indiretos estipuladas por Braga *et al.*, 2021 foram baseados em parâmetros técnicos estipulados no livro *Plant Design and Economics for Chemical Engineers, 4rd ed* (PETERS *et al.*, 2003).

Investimentos diretos

Instalação de equipamentos adquiridos	47% de CPE
Instrumentos e controles	18% de CPE
Tubulações	66% de CPE
Parte elétrica	11% de CPE
Instalações (incluindo serviços adicionais)	18% de CPE
Melhorias do local	10% de CPE
Utilitários de suprimento	70% de CPE
Terreno (Se a compra for necessária)	6% de CPE

Onde:

CPE: Custo dos principais equipamentos.

Investimentos indiretos

Engenharia e supervisão	33% de CPE
Despesas de construção	41% de CPE
Taxas de contratantes	5% de (I.D. + I.I.)
Contingência	10% de (I.D. + I.I.)

- Premissas para investimento direto e indireto:

-Capacidade de operação: 100 000 toneladas

-Tempo útil: 25 anos

-Capital de giro: 15% do investimento total

-Total de Investimento: Investimento direto + investimento indireto + capital de giro

-Total de investimento assumido para o estudo: US\$ 66.400.000,00.

- Premissas para custo fixo:

-Número de funcionários: 35

Os custos fixos independem da quantidade de produção.

Escolhido pela capacidade de produção da planta (cem mil toneladas por ano).

-Custo fixo assumido para o estudo: US\$ 8.000.000,00

- Premissas para taxas e impostos:

-Premissa de desconto por depreciação – 10%

Considerou-se o percentual como fixado pela receita federal como taxas aceitáveis.

-Taxa de impostos Brasil – 34%

Carga tributária por classificação econômica (impostos sobre bem de consumo e serviço).

-Taxa de impostos Estados Unidos – 21%