



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

RODRIGO ROBERTO DE SANTANA

**PROJETO DE PROCESSO SUSTENTÁVEL E ESTIMATIVA DE ACIDENTES EM
USINAS DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL**

CARUARU

2023

RODRIGO ROBERTO DE SANTANA

**PROJETO DE PROCESSO SUSTENTÁVEL E ESTIMATIVA DE ACIDENTES EM
USINAS DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção Área de concentração: Otimização e Gestão da Produção.

Orientador: Prof. Phd. Caio Bezerra Souto Maior

CARUARU

2023

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Nasaré Oliveira - CRB/4 - 2309

S232p Santana, Rodrigo Roberto de.
Projeto de processo sustentável e estimativa de acidentes em usinas de produção de biodiesel. / Rodrigo Roberto de Santana. – 2023.
105 f.; il.: 30 cm.

Orientador: Caio Bezerra Souto Maior.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Produção, 2023.
Inclui Referências.

1. Biodiesel. 2. Avaliação de riscos. 3. Sustentabilidade. 4. Simulação. 5. Engenharia – Estimativas. I. Souto Maior, Caio Bezerra (Orientador). II. Título.

CDD 658.5 (23. ed.) UFPE (CAA 2023-120)

RODRIGO ROBERTO DE SANTANA

**PROJETO DE PROCESSO SUSTENTÁVEL E ESTIMATIVA DE ACIDENTES EM
USINAS DE PRODUÇÃO DE BODIESEL.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.
Área de concentração: Otimização e Gestão da Produção.

Aprovada em: 27/02/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Phd. Caio Bezerra Souto Maior (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Luciano Carlos Azevedo da Costa (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Profa. Dra. July Bias Macêdo (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida, por me proporcionar a oportunidade de concluir mais esta etapa em minha vida.

Aos meus pais por sempre acreditarem em mim, e por terem acreditado na realização desse sonho. Vocês são o melhor livro que eu já li na minha vida, vocês são a melhor faculdade que eu já estudei, sobre vocês eu escreveria o melhor título de trabalho de conclusão de curso, a melhor dissertação de mestrado e a melhor tese de Doutorado. Vocês são o formato de tudo que é vivo para mim. Obrigado! Eu amo vocês.

Ao meu orientador, Prof. Caio Bezerra Souto Maior, que me acompanhou nessa aventura e experiência incrível, obrigado por toda paciência, gentileza e educação de sempre. Por sempre está disponível e pronto para atender as minhas dúvidas, fica aqui registrado a minha gratidão por sempre me motivar e acreditar no meu potencial.

Ao PPGEF-CAA/UFPE Por aceitar minha candidatura no programa de Mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à todos que contribuíram para mais essa etapa, meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

O desenvolvimento de projetos em plantas de processos envolve não apenas os atributos técnicos e econômicos tradicionais, mas também aspectos como sustentabilidade, meio ambiente, saúde e segurança. De fato, questões associadas ao agravamento do efeito estufa, o desmatamento de biomas e a constante depredação ambiental contribuem para o aumento anormal da temperatura no planeta, podendo resultar em um cenário crítico de escala global. Adicionalmente, as mudanças climáticas podem desencadear problemas sanitários (ex., futura pandemia). Neste sentido, as abordagens ambientais mais seguras estão se tornando um elemento chave em projetos de processos. No entanto, métodos estabelecidos previamente impedem que as indústrias utilizem estratégias e conceitos de segurança em um contexto amplo. A produção de biocombustíveis pode ser perigosa se precauções necessárias não forem tomadas, pois envolve operações com substâncias inflamáveis operando em equipamentos sob elevadas temperaturas e pressões, manuseio e uso de várias substâncias perigosas. Este trabalho apresenta uma simulação computacional tendo em conta os aspectos ambientais provenientes da produção de biodiesel bem como, uma estimativa de riscos inerente a este seguimento. Uma ferramenta de tomada de decisão de projeto baseada em risco considerando a segurança inerente é apresentada. Essa ferramenta é chamada de índice de segurança inerente baseada em risco (RISI), a abordagem de indexação proposta é uma extensão do índice integrado de Segurança Inerente (I2SI). O cenário de acidente de explosão é estudado separadamente em termos de explosão de vapor/gás e poeira explosão. O potencial de tomada de decisão com base nos resultados quantitativos da metodologia é demonstrado evidenciando em termos numéricos os riscos associados a plantas de processos. Ainda, foi possível investigar por meio de coleta de dados em artigos científicos e bases de dados, uma avaliação desses perigos podendo assim disponibilizar dados que permitam verificar o desempenho e evitar a recorrência de contratemplos, identificando os incidentes que são mais prováveis de ocorrer. Por tanto, este trabalho tem por objetivo realizar o estudo da gestão do ciclo de vida na produção de biodiesel analisando riscos desde o projeto de processo até as demais etapas de distribuição.

Palavras-chave: biodiesel; riscos; sustentabilidade; estimativa de riscos; simulação.

ABSTRACT

The development of process plant projects involves not only traditional technical and economic attributes, but also aspects such as sustainability, environment, health and safety. In fact, issues associated with the worsening of the greenhouse effect, deforestation of biomes and constant environmental depredation contribute to the abnormal increase in temperature on the planet, which may result in a critical scenario on a global scale. Additionally, climate change may trigger health problems (e.g., future pandemic). In this sense, safer environment approaches are becoming a key element in process design. However, previously established methods prevent industries from using security strategies and concepts in a broad context. The production of biofuels can be dangerous if the necessary precautions are not taken, as it involves operations with flammable substances, operating equipment under high temperatures and pressures, handling and using various hazardous substances. This work presents a computer simulation taking into account the environmental aspects arising from the production of biodiesel, as well as an estimate of the risks inherent to this segment. A risk-based design decision-making tool considering inherent safety is presented. This tool is called Risk-Based Inherent Safety Index (RISI), the proposed indexing approach is an extension of the Integrated Inherent Safety Index (I2SI). The explosion accident scenario is studied separately in terms of steam/gas explosion and dust explosion. The decision-making potential based on the quantitative results of the methodology is demonstrated by showing in numerical terms the risks associated with process plants. Furthermore, it was possible to investigate, through data collection in scientific articles and databases, an assessment of these hazards, thus making it possible to provide data to verify performance and prevent the recurrence of setbacks, identifying the incidents that are most likely to occur. Therefore, this work aims to carry out the study of life cycle management in biodiesel production, analyzing risks from the process design to the other distribution stages.

Keywords: biodiesel; risks; sustainability; risk estimation; simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1-	Publicações anuais relacionadas à pesquisa de produção de biodiesel	21
Mapa 2-	Mapa das usinas de produção de biodiesel no Brasil	21
Gráfico 3-	Aplicação da glicerina	22
Figura 4-	Impactos ecológicos na saúde humana do biodiesel a base de óleos vegetais	24
Figura 5-	Relação por palavras-chaves dos artigos integrando Biodiesel e Sustentabilidade	26
Fluxograma 6-	Etapas para a concretização da pesquisa	34
Figura 7-	Atuação do Algoritmo WAR.....	35
Fluxograma 8-	Exemplo do monitoramento de fluxograma em COCO.....	35
Figura 9-	Fluxograma de produção do biodiesel	40
Figura 10-	Área estudada aos riscos desde a seleção ao processamento do biodiesel.....	42
Figura 11-	Perigos relacionados à operação e manutenção de uma usina de biodiesel	43
Fluxograma 12-	Estrutura para estimar o risco de projeto básico	45
Figura 13-	Estrutura para estimar o risco de segurança inerente e a seleção do projeto ideal	48
Figura 14-	Condições de ocorrência de explosão de poeira	48
Figura 15-	Estrutura para estimativa do Índice de Controle de Risco (RCI)	55
Figura 16-	Relação gráfica entre requisito de processo e índice de controle de risco x Diretriz para decidir a extensão do requisito de processo e controle de risco	56
Gráfico 17-	Relação gráfica para estimar o índice de disponibilidade de segurança inerente para redução de riscos e prevenção de acidentes.....	61
Figura 18-	Estimativa do índice de disponibilidade de segurança para redução da probabilidade e ocorrência a_1	60
Figura 19-	Projeto de processo base utilizado para a estimativa de riscos.....	62
Figura 20-	Estimativa de Impacto Ambiental.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Síntese das pesquisas.....	30
Tabela 2-	Dados do processo de produção de biodiesel	41
Tabela 3-	Diretriz para decidir o índice de aplicabilidade de opções de projeto mais seguros para redução de perigo.....	58
Tabela 4-	Resumo dos resultados do projeto básico.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MIMAH	Acidentes graves
PNE	Pena ou penalidade
Co ₂	Dióxido de Carbono
H ⁺	Íons
ACV	Análise do ciclo de vida
AP	Potencial de Acidificação ou de Chuva ácida
ATP	Potencial de toxicidade Aquática
CAPE OPEN	Plataforma de interação em COCO
CFC-11	triclorofluorometano
CHEMP	SEMP Plataforma compatível em COCO
COCO	Simulador de processos
<i>Envcat</i>	Categoria de Impacto ambiental
EPA	(Agência de proteção ambiental) dos EUA
EP	Equipamento de proteção individual
FDR	Estimativa do raio de dado de fogo
GWP	Potencial de Aquecimento Global
HTPE pele	Potencial de toxicidade Humana por Inalação ou Exposição a
HTPI	Potencial de toxicidade Humana por Ingestão
Igen	Componente
Iin	Entrada
Iout	Saída
LD50	Dose letal média
MW	Peso molecular da substância liberada

ODP	Potencial de Depleção da Camada de Ozônio
OH Hidroxila	
ORM	Gestão de Risco Operacional
OSHA, ACGIH, NIOSH	Limites de exposição permitidos
PCOP	Potencial de oxidação Fotoquímica
PM10 & PM2.5	Dados de níveis de poluição do ar ou partículas inflamáveis
RCI	índice de Controle de Risco
RISI	Estimativa de riscos em plantas de processo
RiskBD	Estimativa de risco para o projeto base
<i>Stream</i>	Categoria de Impacto ambiental
TGDR	Estimativa do raio de dano de liberação de gás tóxico
TLDR	Estimativa do raio de dano de liberação de líquido tóxico
TLV	valor limite para o gás liberado
TTP	Potencial de Toxicidade Terrestre
VCE	explosão de nuvem de vapor
WAR	Waste Reduction

LISTA DE SIMBOLOS

(L1)	Potencial de perigo devido ao flashing
(L2)	Perigo devido à evaporação
h_L	Altura do líquido acima do ponto de liberação
Ψ_{kl}^s	Potencial específico de impactos ambientais de cada produto químico
A_P	Área líquida
C_g	Concentração máxima permitida
P_L	Densidade da liberação do líquido
P_g	Pressão dentro do vaso
P_o	Pressão na fonte
T_P	Temperatura característica do líquido
T_o	Temperatura na fonte
$\frac{dp}{dt_{max}}$	Taxa máxima de aumento de pressão
f_V	Fração do líquido que irá piscar
α_l	Fator de ponderação relativo à categoria de impacto
γ_a	Taxa de capacidade de calor de ar na temperatura máxima de explosão
ΔH_c	<i>Calor de combustão (kJ/kg)</i>
A	Área da fonte
G	Penalidades atribuídas (png)
H	Ponto de fluxo de massa de uma corrente de alimentação ou produto
K	Fator de peso
k	Massa da substância
l	As unidades
M	Composições / fracções molares
X	Composição

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos.....	18
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1.1	O biodiesel.....	20
2.1.2	Sub-produtos do biodiesel.....	22
2.1.3	Óleos vegetais.....	23
2.1.4	Sustentabilidade	24
2.1.5	Análise do ciclo de vida	24
2.1.6	Softwares de Simulação computacional de processo.....	25
2.2	REVISÃO DA LITERATURA	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	Caracterização da pesquisa e etapas de desenvolvimento.....	33
3.2	Aplicação e origem dos dados	35
3.3	Algoritmo WAR	35
3.4	Cálculo de Impacto Ambiental	39
4	ESTUDO DE CASO	42
4.1	Descrição do Processo de Produção do biodiesel.....	42
4.2	Riscos inerentes a produção do biodiesel.....	43
4.3	Estimativa de riscos em plantas de processo	46
4.4	Avaliação de risco e análise de sequência de acidentes	49
4.4.1	Estimativa do raio de dano de explosão	49
4.4.2	Estimativa do raio de dano de fogo	52
4.4.3	Estimativa do raio de dano de liberação de gás tóxico	53
4.4.4	Estimativa do raio de dano de liberação de líquido tóxico	54
4.5	Estimativa de probabilidade de ocorrência de cenários de acidentes	55
4.6	Estimativa do índice de Controle de Risco	56
4.7	Estimativa do índice de aplicabilidade do design de processos mais seguros e princípios para reduzir a probabilidade de ocorrência de acidentes	59

4.8 Estimativa de risco de projeto básico.....	63
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
6 CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS.....	73
APÊNDICE A - PERIGOS RELACIONADOS À OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE UMA USINA DE BIODIESE.....	80
APÊNDICE B - PENALIDADES, FATORES DE ENERGIA E POTENCIAL DE RISCO PARA ESTIMAR O RAIOS DE DANO DE EXPLOÇÃO	89
APÊNDICE C - PONTUAÇÕES E PENALIDADES.....	96
APÊNDICE D - PENALIDADES, FATORES DE ENERGIA E POTENCIAL DE RISCO PARA ESTIMAR O RAIOS DE DANO POR INCÊNDIO	99
APÊNDICE E - PENALIDADES, FATORES DE ENERGIA E POTENCIAL DE PERIGO PARA ESTIMAR O RAIOS DE DANO DE LIBERAÇÃO TÓXICA	100
APÊNDICE F - DERIVAÇÕES DE EQUAÇÕES USADAS PARA ESTIMAR O RAIOS DE DANO DEVIDO A EXPLOÇÃO, FOGO E LIBERAÇÃO TÓXICA	102
APÊNDICE G – MEDIDAS DE SEGURANÇA SUGERIDAS PARA MELHORAR A CONFIABILIDADE DOS EVENTOS BÁSICOS DESTILAÇÃO.....	103

1. INTRODUÇÃO

O agravamento do efeito estufa, o desmatamento de biomas e a constante depredação ambiental contribuem para o aumento anormal da temperatura no planeta, podendo resultar em um cenário crítico de escala global. Adicionalmente, as mudanças climáticas podem desencadear problemas sanitários (ex., futura pandemia) uma vez que o aquecimento dos desertos e dos polos sul e norte junto ao desmatamento obrigarão os animais pertencentes determinado habitat a se movimentar para locais com grandes populações humanas (RODÓ et al., 2021).

Mundialmente, os combustíveis fósseis são empregados na produção de energia. A utilização de fontes primárias globais de energia aumentou cerca 2,9% em 2018, fazendo uma comparação com 2,2% em 2017, 1% em 2016, 0,9% em 2015, e 1% no ano de 2014. O transporte é um dos setores principais de consumo de energia primária, principalmente dependente dos combustíveis fósseis. De fato, este setor consome atualmente cerca de 30% de petróleo bruto, e isso aumentará 59% até 2050 (IEA, 2017). No entanto, seu uso excessivo leva à geração de grandes quantidades de emissões de gases de efeito estufa e seu esgotamento. Uma alternativa atraente para substituir os combustíveis fósseis é a produção de biocombustíveis a partir de diversos insumos de origem orgânica (biomassa).

A produção e utilização dos biocombustíveis como um combustível sucessor e ecologicamente limpo tem sua preferência após uma larga escala de pesquisas, discussões literaturas de pesquisas e diretrizes governamentais Allah; Bica; Tutunea, (2019). O biodiesel é normalmente produzido por transesterificação de triglicerídeos de óleos virgens, ou de fontes renováveis (refinados/óleos comestíveis) utilizando o etanol ou metanol alcalinos. Os combustíveis alternativos à base de biomassa apresentam bons resultados devido a sua eficiência e eficácia. Comparado aos combustíveis de origem fósseis, as matérias-primas do biodiesel são mais acessíveis, renováveis e economicamente viável (PATNAIK; MALLICK, 2021).

Naturalmente, a indústria de processamento de biocombustíveis necessita analisar riscos associados a questões ambientais e financeiras decorrentes de sua operação. No âmbito da segurança industrial, o aumento do processamento de biodiesel induzidos pelos problemas econômicos podem produzir um aumento significativo de riscos devido a quantidade de materiais perigosos utilizado no processo além do maior número e tamanho de equipamentos.

Essa visão importante é confirmada à primeira vista por uma análise rápida dos mais acidentes relevantes na indústria de biodiesel (SALZANO; DI SERIO; SANTACESARIA, 2010a).

Os aspectos técnicos e econômicos tradicionais não são os únicos a serem considerados para o projeto de planta de produto e processos. Nos dias atuais diferentes aspectos como, saúde e segurança também têm recentemente ganhado atenção significativa no projeto de plantas de processo e desenvolvimento. Além disso, a avaliação da segurança inerente permanece um tópico ativo de interesse da comunidade de projetos de processos (OUATTARA et al., 2012).

Devido a crescente importância do diesel, petróleo e seus derivados. Projetos de processos que abrangem aspectos técnicos e químicos para o desenvolvimento da indústria no último século, têm gerado uma série de debates devido aos efluentes petroquímicos que contribuíram significativamente para a poluição aquáticos e do solo. Pois a contaminação gerada por hidrocarbonetos pode colocar não só em risco o meio ambiente mas também aos seres humanos (ABDULLAH, 2020).

Métricas baseadas em índices foram desenvolvidas como indicadores para avaliar o nível de segurança inerente em um sistema de processos. Por isso, decisões críticas de segurança são tomadas com base nesses indicadores durante vários estágios do ciclo de vida do projeto de processo. As propriedades, limitações e aplicabilidade de segurança inerente baseadas em índices existem são amplamente discutidas conforme (PALANIAPPAN; SRINIVASAN; TAN, 2002) (RAHMAN; HEIKKILÄ; HURME, 2005) (KHAN; AMYOTTE, 2004).

Os biocombustíveis podem ser classificados em quatro gerações de acordo com a matéria-prima utilizada por Moncada b; Aristizábal m; Cardona a, (2016). A primeira geração considera os combustíveis produzidos a partir de culturas para as quais o propósito original é para alimentação (por exemplo, trigo, arroz, cana-de-açúcar, milho e canola). Na segunda geração, a matéria-prima é proveniente de culturas com diferentes finalidades, resíduos florestais, industriais e agrícolas. Os biocombustíveis de terceira geração vêm de microalgas. Finalmente, o quarto é fornecido pelo dióxido de carbono (CO_2) e plantas como o pinhão-manso, e mamona (MAT ARON et al., 2020).

Ao longo dos anos pesquisadores têm buscado identificar combustíveis alternativos, e mais de 350 safras foram identificadas como potenciais matérias-primas de biodiesel devido às suas características de óleo. O interesse nas atividades de pesquisa em biodiesel aumentou quase quatro vezes nos últimos dez anos, de 1.186 para 4.462 artigos publicados em bases de dados renomadas como é o caso da *Web of Science* e *Scopus* (ANWAR, 2021).

Fontes renováveis como óleos vegetais, gordura animal e óleos de cozinha residuais são utilizados para a produção de biocombustíveis, ou seja, biodieleses. A escolha de fontes renováveis de matéria-prima para a produção de biodiesel não é um padrão comum para todos os países ou regiões. Fatores básicos como custo, disponibilidade, fatores sociais e ambientais podem desempenhar um papel importante na seleção da matéria-prima (RAMOS et al., 2019).

Neste contexto, os biocombustíveis têm ganhado interesse devido a sua capacidade de uso como combustíveis de transporte e sua segurança energética devido à oferta diversificada, além de melhoraria dos aspectos econômicos do setor agrícola. Além disso, o uso da biomassa como combustível pode ajudar a mitigar gases de efeito estufa uma vez que o CO_2 liberado na combustão ou conversão de biomassa em produtos químicos é biogênico e quimicamente idêntico ao CO_2 removido do ambiente por fotossíntese durante a produção de biomassa (ZHANG; BAI, 2021).

Além de produzir o biodiesel, ainda é possível a extração do glicerol, subproduto resultante da reação na presença de catalisadores homogêneos, ácidos básicos heterogênea enzimáticos, ou ácidos e por meio supercrítico (FANGFANG; ALAGUMALAI; MAHIAN, 2021).

Ainda, assim, a produção do biodiesel pode consumir recursos dos mais diversos (e.g., água, fertilizantes, pesticidas e mão de obra) e gerar uma variedade de poluentes e gases de efeito estufa, o que significa que a produção do biodiesel a partir de culturas não é 100% isenta de carbono ou sustentável. A fabricação, transporte de fertilizantes e pesticidas requerem consumos energéticos e o transporte de colheitas de óleos vegetais, também requer mais insumos incluindo trabalho humano (LIM et al., 2020).

Desta forma, o presente estudo tem como objetivo realizar o acompanhamento da gestão do ciclo de vida da produção de biodiesel, levando-se em consideração as categorias de impacto ambiental atmosféricas e toxicológicas. Estas, vão desde ao potencial de aquecimento global até o potencial de toxicidade aquática conforme mencionado nas próximas seções. Explorar os riscos inerentes ao manuseio das matérias-primas, trazer dados estatísticos referentes aos acidentes/incidentes em plantas de processos tendo em conta questões relacionadas a explosões, incêndios e demais possíveis situações/condições indesejadas. Por fim, uma estimativa de riscos em uma planta de produção de biodiesel é realizada.

1.1 RELEVÂNCIA E CONTRIBUIÇÃO DO ESTUDO

A ligação entre as mudanças climáticas e transmissões viral foi analisada e descrita por pesquisadores da universidade de Georgetown, a descoberta segundo descreveu Rodó et al, (2021) haverá um compartilhamento de milhares de vírus com outros mamíferos e, assim propiciar a transmissão para humanos. As mudanças climáticas trazem maiores oportunidades para vírus como Ebola ou Coronavírus que podem imergir em novas áreas, tornando-os mais difíceis de rastrear e, em novos tipos de animais tornando mais fácil para o vírus passarem de uma espécie “degrau” para humanos (KIKSTRA et al., 2021).

Além disso, as questões associadas à limitada oferta global de petróleo, os consequentes elevados preços observados para seus derivados e as consequências do aumento dos problemas ambientais decorrentes da queima de combustíveis fósseis, uma série de debates sobre as fontes renováveis de energia tem surgido. Nesse contexto, o biodiesel constitui uma boa alternativa sob a perspectiva mais ampla de alternativas energéticas.

O alto preço do petróleo bruto, aumentos nas importações de energia, preocupações com o fornecimento de petróleo e maior reconhecimento das consequências ambientais dos combustíveis fósseis estimularam a busca por fontes alternativas de combustível. Assim, uma fonte adequada para um desenvolvimento de longo prazo, é necessário decidir qual é a mais sustentável (SILALAH; SIMATUPANG; SIALLAGAN, 2020).

O interesse pelo biodiesel cresceu significativamente nos últimos anos os materiais oleaginosos têm incentivado como auxílio as famílias agricultoras como fonte de renda proporcionando melhores condições de vida nas regiões mais necessitadas do ponto de vista econômico e ambientais (OLIVEIRA; GOUVÊA; MAYUMI, 2017).

No entanto, pesquisas recentes mostram que o biodiesel de oleaginosas não é sustentável por causa do aumento do preço dos alimentos, diminuição da área agrícola e esgotamento do solo. A demanda global por alimentos deve dobrar nos próximos 50 anos, e a demanda global por combustíveis para transporte deve aumentar ainda mais rapidamente (ANWAR, 2021).

Ainda segundo o mesmo autor, há uma grande necessidade de fontes de energia renováveis que não concorram com a oferta de alimentos uma vez que comumente são utilizadas matérias-primas comestíveis para produção de biocombustíveis, como é o caso do coco, amendoim, castanha, soja e dentre outros. Assim, busca-se um combustível verdadeiramente sustentável. Desta forma, a relevância deste estudo centra-se em contribuir

com o desenvolvimento sustentável e seguro da produção de um biocombustível por meio de uma matéria-prima não-comestível analisando seu impacto e risco.

1.1 Objetivos

1.1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em realizar o estudo da gestão do ciclo de vida na produção de biodiesel analisando riscos desde o projeto de processo até as demais etapas de distribuição.

1.1.1 Objetivos Específicos

Para o alcance do objetivo geral, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar uma revisão da literatura identificando aspectos importantes relativos ao tema;
- b) Realizar o estudo de impacto ambiental da planta de biodiesel;
- c) Realizar o estudo de riscos inerentes a este seguimento;
- d) Realizar uma estimativa de riscos na planta de processo do biodiesel;
- e) Identificar e sugerir diretrizes relativo os riscos no manuseio das matérias primas no processo;

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O Capítulo 2 trata da fundamentação teórica desenvolvida nesta dissertação. Inclui uma visão geral sobre o biodiesel, o subproduto do biodiesel e suas aplicabilidades no mercado, bem como um breve histórico das usinas de produção de biodiesel no Brasil. Também é apresentada uma revisão bibliográfica relacionada aos óleos vegetais utilizados na produção do biodiesel, gestão de riscos e gestão do ciclo de vida. O capítulo encerra com uma revisão da literatura sobre o suporte por simulação computacional para os engenheiros de processos.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia aplicada nesta pesquisa, a origem dos dados utilizados na planta de produção do biodiesel bem como, as etapas do desenvolvimento do trabalho. No mesmo capítulo ainda é abordado o algoritmo de redução de resíduos utilizado junto ao simulador de processo e as categorias de impacto ambiental estudadas no presente trabalho.

No Capítulo 4 é apresentado o estudo de caso com a descrição do processo de produção de biodiesel. Também é ilustrado os riscos inerentes a produção do biodiesel que se relacionam aos acidentes e incidentes em plantas de processos de biodiesel, uma estimativa de riscos e por fim apresentada os riscos relacionados ao uso e manuseio das matérias-primas para a confecção desta fonte de energia amplamente utilizada atualmente.

O Capítulo 5 apresenta os resultados e discussões desta pesquisa apontando os detalhes dos principais acidentes e as causas mais recorrente nesta temática. No Capítulo 6 são descritas as conclusões.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será descrita a base conceitual que sustenta esta pesquisa, sendo apresentado no primeiro momento os conceitos do biodiesel. Subsequente, o subproduto do biodiesel, os conceitos de sustentabilidade, gestão do ciclo de vida, óleos vegetais e simulação computacional. Por fim, é delineado a exposição do trabalho desenvolvido na temática com abordagem no desenvolvimento sustentável da produção de biodiesel seguindo pela análise do ciclo de vida e gestão de riscos industriais.

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1.1 O biodiesel

Desenvolvido na década de 1890 pelo inventor Rudolph Diesel, o motor a diesel se tornou o motor preferido em termos de potência, confiabilidade e alta economia de combustível em todo o mundo. De fato, os óleos vegetais puros alimentaram os primeiros motores a diesel para a agricultura em áreas remotas do mundo, onde o petróleo não estava disponível na época. O combustível biodiesel moderno, que é feito pela conversão de óleos vegetais em compostos chamados ésteres metílicos de ácidos graxos, tem suas raízes em pesquisas conduzidas na década de 1930, sendo estabelecida na Europa até o final dos anos 1980 (OLIVEIRA; GOUVÊA; MAYUMI, 2017).

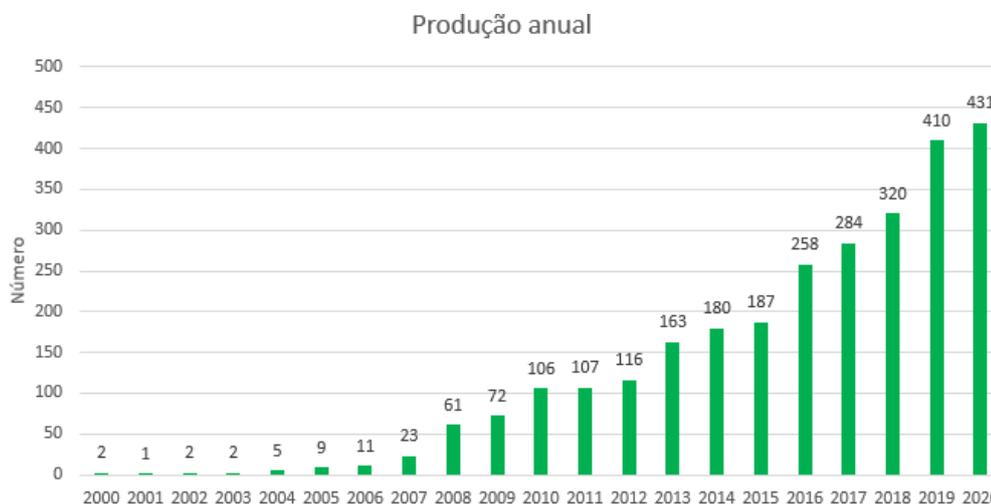
O biodiesel é o biocombustível mais promissor para substituir o diesel convencional sendo produzido a partir de uma variedade de óleos vegetais e gorduras animais. Mais especificamente, o biodiesel é uma mistura de ésteres monoalquilados de ácidos graxos, na maioria das vezes originados de matérias primas disponíveis, abundantes e renováveis, como óleos vegetais (SILALAH; SIMATUPANG; SIALLAGAN, 2020).

Os biocombustíveis são combustíveis adequados na substituição dos combustíveis convencionais de petróleo em várias aplicações. O biodiesel, como um desses biocombustíveis, pode ser usado diretamente em motores a diesel sem modificação. Pode ser produzido com melhor qualidade com vantagens ambientais adicionais, como baixa emissão líquida de carbono, não toxicidade, biodegradabilidade e baixa emissão de enxofre e partículas (PASHA et al., 2021).

As várias vantagens na utilização do biodiesel além do aspecto ambiental e sustentável a menor emissão de carbono, apresentam empregabilidade e conexões ambientais e sociais ao que se refere a importação de combustíveis derivados do petróleo. Ainda, o biodiesel brasileiro é considerado um dos mais combustíveis ecológicos disponível atualmente, em crescente

evolução Patnaik; Mallick, (2021). A Figura 1 apresenta a evolução da produção do biodiesel no Brasil.

Gráfico 1 - Publicações anuais relacionadas à pesquisa de produção de biodiesel



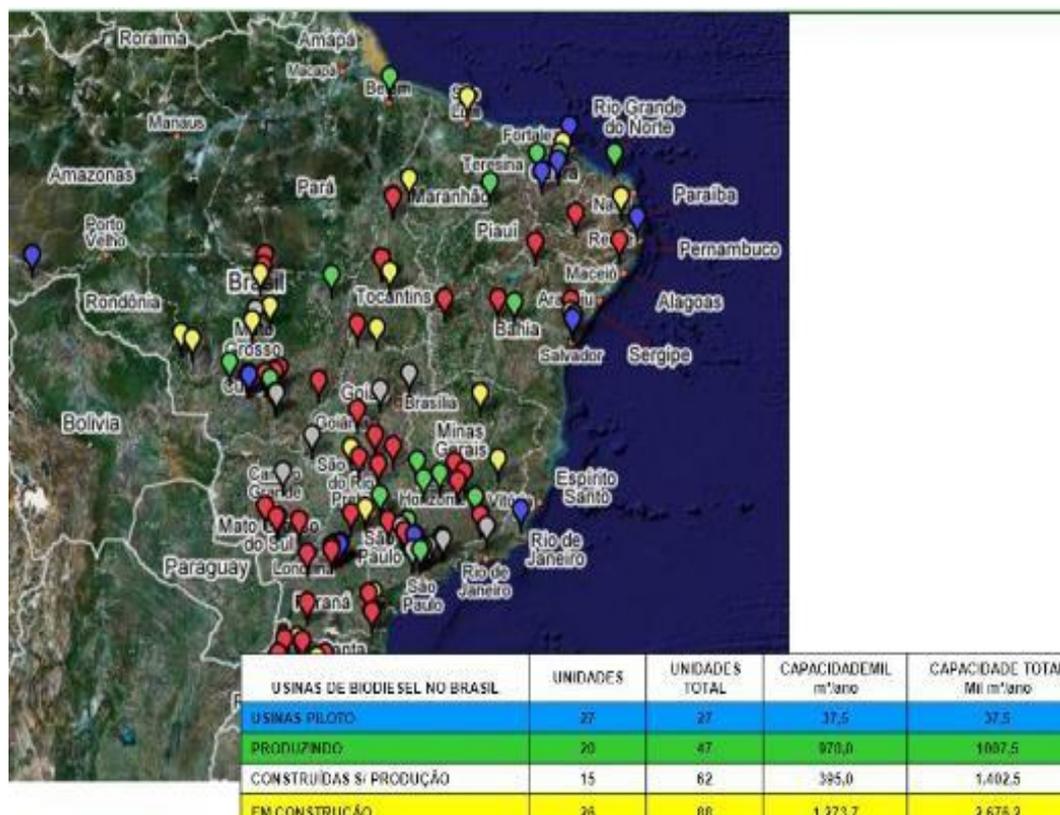
Fonte: Adaptado de Chuangbin Chen, (2021)

Vale ressaltar que, além condições técnicas, sociais e ambientais, a utilização biocombustíveis é relevante para a segurança energética de um país uma vez que poucos possuem bacias e exploração de petróleo, se valendo da utilização de biocombustível (ISHOLA et al., 2020).

O biodiesel pode ser produzido a partir de muitas fontes renováveis, sendo alternativa ao diesel de origem fóssil e isto como uma estratégia de transição. Dentre as fontes, pode-se aceitar a babaçu, canola, palma, girassol, soja, mamona Marta et al., (2019) Pode também ser feito de gordura animal, óleo de cozinha residual e algas fotossintéticas (SHEHU; CLARKE, 2020).

O Brasil tem investido razoavelmente nos programas de biodiesel desde que iniciou o seu programa no ano de 2002 (portaria MCT 702 DE 30/10/2002), com sua a produção sendo uma alternativa para substituir o diesel proveniente do petróleo Pinho; Souza, (2015). No ano de 2010, um total de 66 novas usinas de biodiesel foram autorizadas pela ANP (Agência nacional de Petróleo), apresentadas na Figura 2.

Mapa 2 - Mapa das usinas de produção de biodiesel no Brasil



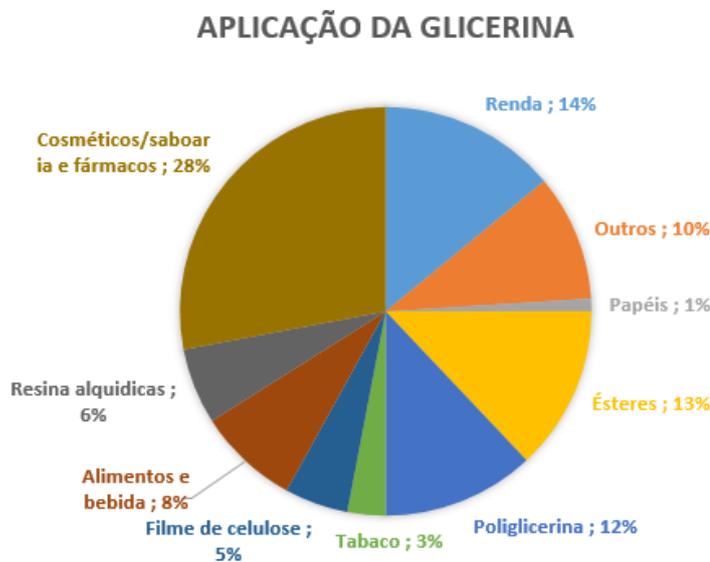
Fonte: adaptada de (Biodiesel.com 2018)

2.1.2 Sub-produtos do biodiesel

A reação do processo de transesterificação na produção do biodiesel tem como subproduto a glicerina. Entretanto o excesso de concentração desse produto contido no biodiesel tem como consequência problemas relacionados ao armazenamento, emissão de aldeídos e entupimento dos picos injetores do motor (LÔBO et al., 2009).

A glicerina é bastante utilizada em vários setores da economia mundial (ex. nas indústrias de alimentos, higiene pessoal, cosméticos, medicamentos) após processo de purificação. A glicerina extraída como subproduto na produção do biodiesel contém cerca de 80% de glicerol podendo ainda ser usada com matéria prima para confecção de lubrificantes e explosivos Mota; Gonçalves, (2009). Neste sentido, existe recente interesse em pesquisas relacionadas a utilização da glicerina nas mais diversas aplicações, como apresentado na Gráfico 3.

Gráfico 3 - Aplicação da glicerina



Fonte: Adaptado de Mota, Silva e Gonçalves, (2009)

2.1.3 Óleos vegetais

No século XVI a produção do óleo apresentava limitação para as indústrias caseira que passou a ser considerada uma atividade corriqueira, pois o setor possui ligação direta para a geração empregos na agricultura familiar Corach; Sorichetti; Romano, (2015). O óleo vegetal usado para produção do biodiesel como fonte alternativa e renovável teve início no ano de 1980 em um estudo mais aprofundado utilizando como matéria-prima o óleo de girassol na África do Sul devido ao embargo do óleo diesel Gunther, (2020). Atualmente, o óleo vegetal é usado em produtos como fertilizantes, tintas, cosméticos, alimentos e lubrificantes.

Muitos óleos vegetais foram investigados a partir de sua descoberta, incluindo o óleo de palma, óleo de soja, óleo de semente de algodão, óleo de mamona, e dentre outros. A matéria-prima para a produção de biodiesel pode ser categorizada como matéria-prima lipídica e matéria-prima alcoólica. A matéria-prima lipídica inclui óleos vegetais, gorduras animais e, mais recentemente, outros organismos semelhantes a plantas, como microalgas e cianobactérias.

O consumo anual de óleos vegetais no Brasil é aproximadamente de 3,72 milhões de toneladas, ao todo 84% usadas para alimentos e cerca de 16% para interesses industriais. a mistura ajuda na economia minimizando o nível de petróleo importado além de agregar no sentido ambiental, pois a produção do biodiesel não emite grandes quantidades de enxofre na sua queima (HADIYANTO et al., 2020).

2.1.4 Sustentabilidade

O setor industrial é uma peça-chave na implementação de inovações ambientais e novas abordagens de produção mais limpa onde a integração das considerações de sustentabilidade nas fases de produção de novos produtos é importante. As percepções sobre uma implementação eficaz em sistemas de apoio inicial são fundamentais para o desenvolvimento sustentável de um país (JANGRE et al., 2022).

As tendências atuais do crescimento da população mundial e das atividades industriais aumentaram a importância do meio ambiente e da sociedade devido a mudanças substanciais, como desgaste da camada de ozônio, esgotamento de recursos naturais, aquecimento global, erosão do solo, poluição da água, desmatamento e danos ao meio ambiente e ecossistemas (FAZAL et al., 2022).

O alto consumo de energia e os reagentes derivados de combustíveis fósseis tem causado sérios danos ao meio ambiente (ex.: água, ar, solo), prejudicando o controle da poluição Klemeš et al., (2010). De fato, há uma crescente necessidade de harmonização entre a demanda da população e o desenvolvimento industrial, buscando-se o equilíbrio ecológico e reduzindo-se a intensidade de poluição industrial através de uma produção mais limpa.

O termo sustentabilidade é um dos mais relevantes em questões políticas, sociais e científicas. Várias campanhas recentes tratam da preocupação com o desenvolvimento sustentável, que representa uso de boas práticas de fabricação em processos e serviços que não sejam agressivos ao meio ambiente e busquem minimizar resíduos, economizar o consumo de energia e água, reduzir emissão de poluentes e utilizar produtos com baixo índice de toxicidade (LI et al., 2022).

Assim, a necessidade de adaptação do uso de recursos não renováveis, especialmente aqueles de origem fóssil, a fim de sustentar sua disponibilidade para tecnologias vitais é de fundamental importância para o desenvolvimento de um país (WEISER et al., 2020).

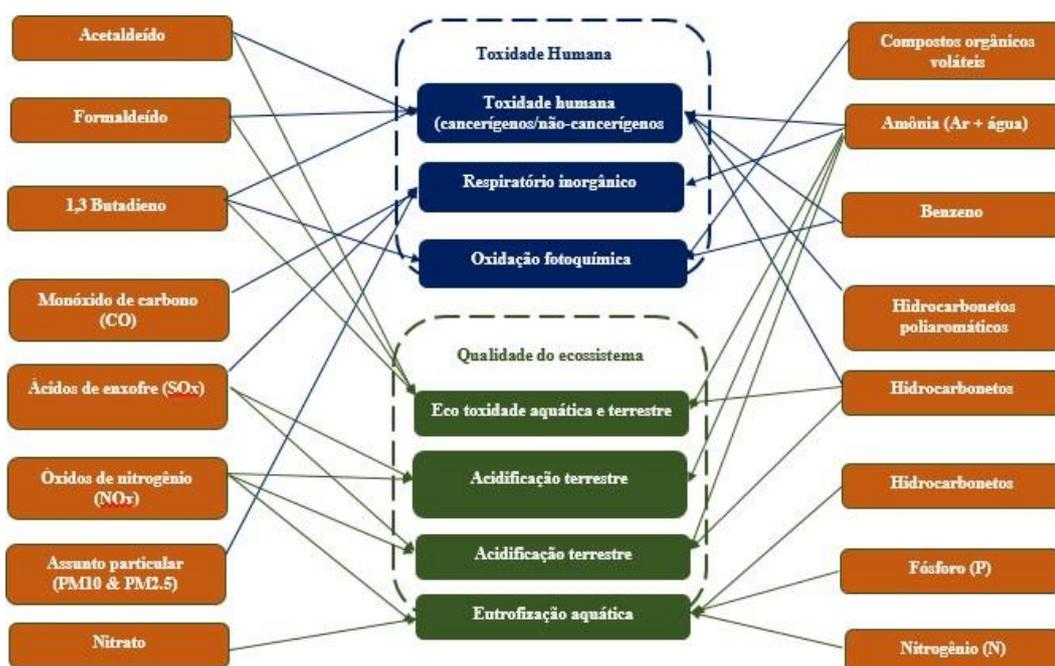
2.1.5 Análise do ciclo de vida

A análise do ciclo de vida (ACV) é uma metodologia padronizada para quantificar a pegada ambiental de produtos, processos e sistemas. A sistemática é aceita internacionalmente por destacar pontos críticos ambientais, mas não fornece orientações concretas aos profissionais (ex., designers de produtos e processos, engenheiros de materiais, gerentes industriais) para reduzir o impacto ecológico de seus produtos (UPPALAPATI et al., 2022).

ACV pode ser aplicada na posição de potenciais efeitos na saúde humana e ambientais, com estrutura padronizada nas ISO 14040 e ISO 14044 (ISO 2006). Em relação à avaliação do ciclo de impacto de impacto ambiental, a ACV tem como enfoque quantificar os potenciais impactos ambientais de todo o sistema de um ciclo de vida de um produto. Os principais componentes da avaliação de impacto do ciclo de vida são: (1) identificação das categorias de impacto, (2) indicadores de categorias, (3) modelos de caracterização, e (4) atribuição de resultados de impacto do ciclo de vida às categorias de impacto selecionadas (classificação) e (5) cálculo dos resultados do indicador de categoria caracterização (JRC, 2010).

Neste sentido, Jolliet et al., (2003) desenvolveu a estrutura apresentada na Figura 4 para integrar diferentes métodos na ACV para o biodiesel. As categorias analisadas representam impacto do ciclo de vida em 14 categorias combinadas em quatro pontos de dano, incluindo saúde humana, qualidade do ecossistema, clima mudança climáticas e recursos naturais.

Figura 4. Impactos ecológicos na saúde humana do biodiesel a base de óleos vegetais



Fonte: Adaptado de Jolliet et al. (2003)

2.1.6 Softwares de Simulação computacional de processo

Tradicionalmente, os aspectos da simulação são baseados em fluxogramas industriais que podem ser dados reais ou fictícios. Na entrada do fluxo, são adicionados os componentes que serão processados, onde existem mecanismos de detecção de erros durante a formação da planta. Adicionalmente, é comum que software de processo apresentem relatórios, mapas de

temperatura e entre outros parâmetros descrevendo todo processo realizado na modelagem do processo (PASHA et al., 2021).

O desenvolvimento de softwares nos últimos anos facilitou a criação e simulação de fluxogramas. De fato, os softwares recentes se destacam pela sua capacidade de informação gerada ao usuário ao elaborar um fluxograma de um determinado processo utilizando técnicas de otimização na busca de adequação dos parâmetros e trazendo benefícios aos engenheiros de processos Dumitrescu; Banu; Bumbac, (2019). A aplicabilidade em outras áreas de conhecimento tem como objetivo criar modelos e situações em que é muito raro ou impossível medir as várias soluções para um problema em métodos experimentais ou analíticos (DUMITRESCU; BANU; BUMBAC, 2019).

A análise técnica da simulação fornece uma previsão comportamental do fluxo operacional, enquanto os softwares fornecem informações dirigidas à solução de problemas e gargalos durante uma produção industrial, envolvendo modelos termodinâmicos em simulação. Os softwares mais utilizados neste tipo de projeto são Aspen Plus, Aspen hysys e neste caso, o COCO. Desta forma, a otimização e controle de processos na indústria é beneficiada quando a mesma utiliza software para simulação e define fortes estratégias com base a consulta computacional para a tomada de decisão da sua produtividade (PACHECO et al., 2022).

Na modelagem computacional de processo, problemas de alta complexidade são levados em consideração para a solução fazendo o uso de diversas variáveis, como por exemplo temperaturas, pressão, vazão. A manipulação desses dados permite ao usuário fazer analogia ao processo de forma a melhorar o fluxograma de acordo com o objetivo do estudo a ser realizado. A modelagem permite não apenas o desenvolvimento de métodos numéricos ou variacionais, mas também a sedimentação dos modelos ligados aos fenômenos físicos dos problemas complexos, as projeções, simulações e previsões para casos específicos no desenvolvimento de respostas para os vários problemas (LIU et al., 2021).

2.2 Revisão da Literatura

Este item apresenta uma revisão da literatura referente a produção de biodiesel com enfoque aos aspectos ambientais bem como a gestão e estimativa de riscos em plantas de processo, os resultados dessa busca estão apresentados logo a seguir.

A busca por trabalhos científicos foi realizada em duas bases de dados bibliográficos: “*Web of Science*” e “*Scopus*”. A combinação entre as palavras “*Biodiesel*” e “*sustainability*” foram encontrados 1.859 artigos nos últimos 12 anos na primeira base e 1.794 na segunda.

ligação com o *cluster* vermelho. O *cluster* vermelho tem forte ligação com o *cluster* roxo pois a produção de biodiesel tem ligação direta com sua baixa características de emissões de gases de efeito estufa na atmosfera, o *cluster* ilustra os trabalhos em relação a análise do ciclo de vida, sustentabilidade, energia, bioenergia e dentre outros.

De acordo com Geraldês Castanheira et al., (2014), a bioenergia é de fundamental importância para garantir a sustentabilidade ambiental de um país. Assim, os aspectos com enfoque na crescente demanda pelas principais matérias-primas para a produção de biodiesel no Brasil foram consideradas e constatou-se que os impactos ambientais podem ser mitigados por meio de políticas adequadas visando a otimização integrada da produção de alimentos e bioenergia e por meio do zoneamento agroeconômico-ecológico, permitindo o uso adequado da terra para cada finalidade.

O *cluster* azul liga-se fortemente ao *cluster* e vermelho, uma vez que os estudos relacionados ao biodiesel também abordam os aspectos de performance de processo, por exemplo: A característica do *cluster* azul relaciona-se a ligação entre os combustíveis, diesel, nanopartículas e energia. O *cluster* verde apresenta uma maior ênfase as publicações relacionadas a produção de biocombustíveis por meio de microalgas, lipídios, cultivo de oleaginosas e tem forte ligação com os *clusters* vermelho, roxo e azul correlacionando os aspectos de sustentabilidade, análise do ciclo de vida, performance e o próprio biodiesel.

Nesse sentido, Jingzheng et al (2015) utilizou um modelo de programação não linear mista com o objetivo de ajudar as partes interessadas/decisores a selecionar o projeto mais sustentável. No modelo proposto, o índice de sustentabilidade energética de toda a rede de abastecimento de biodiesel em uma perspectiva de ciclo de vida é empregado como medida de sustentabilidade, podendo ser consideradas múltiplas matérias-primas, múltiplos modais de transporte, múltiplas regiões para produção de biodiesel e múltiplos centros de distribuição.

No *cluster* amarelo observa-se uma fraca ligação com os demais *cluster* este, faz menção as publicações abordando as temáticas relativo ao glicerol, ácidos graxos, bio-óleo e dentre outros. Alguns trabalhos têm buscado a integração entre a produção de biodiesel e as questões de segurança inerente a esse processo, seja em plantas químicas ou até mesmo em escalas laboratoriais. De acordo com Gao et al., (2021), embora o biodiesel seja considerado uma substância segura para o meio ambiente, sua produção pode ser perigosa por envolver substâncias inflamáveis e tóxicas, como o metanol. Além dos riscos associados a incêndios e explosões, o metanol também representa um risco à saúde dos trabalhadores que inalam constantemente este produto, mesmo em baixas concentrações. o autor ainda considera que,

apesar de todos os riscos associados, a maioria das indústrias brasileiras produz biodiesel a partir do metanol.

Leoneti et al., (2017) analisou as rotas metélica e ética relativas à sustentabilidade da produção brasileira de biodiesel. O Brasil é um dos principais produtores mundiais de biocombustíveis devido à predominância do etanol combustível em sua matriz energética. No entanto, a grande maioria das usinas de produção de biodiesel usa metanol em vez de etanol como o álcool para a reação de transesterificação, diferentemente do resto do mundo. Assim, os autores identificaram que o desenvolvimento do mercado de biodiesel no Brasil ainda está voltado para um modelo de produção inconsistente com os aspectos ambientais e sociais de sustentabilidade

Com relação aos aspectos de segurança, considerando os acidentes/incidente de trabalho, Casson moreno et al., (2019) realizou uma análise da frequência e gravidade dos acidentes passados permitindo estimar um maior risco de acidentes para a indústria de biodiesel revelando o equívoco de que as tecnologias verdes ou produção verde veem a produção de biodiesel muitas vezes consideradas mais seguras. Ainda, González-delgado; garcía-martínez; barajas-solano, (2021) apresenta uma visão geral das considerações de risco tecnológico, técnico, econômico, ambiental, social, toxicológico e de saúde humana da produção e uso de biodiesel. A combinação do tecnológico com o econômico, questões sociais e ambientais aumentarão os benefícios do biodiesel e podem levar a bio-refinarias integradas capazes de produzir biodiesel sustentável e outros produtos químicos valiosos. O autor ainda relata que, as políticas governamentais serão a principal força motriz para novos aumentos na produção de biodiesel.

Ao relacionar-se a temas de produção de biodiesel, sustentabilidade, análise do ciclo de vida e riscos em plantas de processos, alguns trabalhos buscam ilustrar o cenário atual e as dificuldades. A Tabela 1 apresenta uma síntese das principais características, com destaque para os estudos de Turetta et al., (2018); Geraldde Castanheira et al., (2014); Nguyen et al., (2017); Ramos et al., (2019); Hasibuan; Thaheer; Juliza, (2018); Calvo Olivares; Rivera; Núñez mc Leod, (2014); (Casson Moreno et al., (2019); Salzano; di Serio; Santacesaria, (2010b); Akkarawatkhoosith et al., (2019). Conforme observado na revisão do estado atual da literatura, poucos são os trabalhos que dispõem informações em relação aos riscos proveniente da produção de biocombustíveis, em especial em plantas de processo. Além disso, outro fator crucial refere-se a estimativa de riscos em unidades de produção. Elementos que influenciam

diretamente acidentes de trabalhos e como eles poderiam ter sido evitados, à vista do design de processos, necessitam de ferramentas de gestão atuantes significativamente.

Tabela 1 Síntese das pesquisas

Autor	Execução por meio de	Título	Método
Ren et al. 2013	Modelagem	Análise de Energia e Análise de Eficiência de Sustentabilidade de Biodiesel de Diferentes Culturas na Perspectiva do Ciclo de Vida	Simulação computacional
Leoneti, (2017)	Simulação	A rota metílica versus a etílica: considerações sobre a sustentabilidade da produção brasileira de biodiesel	Investigação exploratória
Pasha et al. (2021)	Modelagem	Uma visão geral do projeto de processo, simulação e avaliação de sustentabilidade do biodiesel Produção	Simulação computacional
Ramos et al. (2020)	Modelagem	Processos de Produção de Biodiesel e Sustentabilidade Matérias-primas	Simulação computacional
Castanheira et al. (2014)	Simulação	Sustentabilidade Ambiental do Biodiesel no Brasil.	Investigação exploratória
Nguyen, (2017)	Modelagem	Avaliação de impacto inclusiva para a sustentabilidade de hortaliça biodiesel à base de óleo - Parte II: Avaliação de sustentabilidade de não comestíveis biodiesel à base de óleo vegetal em Ha Long Bay, Vietnã	Simulação computacional
Bautista et al. (2019)	Modelagem	Uma abordagem de dinâmica de sistemas para avaliação da sustentabilidade do biodiesel produção na Colômbia. Simulação de linha de base	Simulação computacional

Cipolletta, (2022)	Simulação	Melhorar a sustentabilidade dos combustíveis de biodiesel por ser inerentemente mais seguro em processos de produção	Investigação exploratória
Mata, (2014)	Escala laboratorial	Propriedades e Sustentabilidade do Biodiesel de Gordura Animal e óleo de peixe	Experimental
Efstathiou, (2013)	Busca bibliográfica	Análise de Emergia e Análise de Eficiência de Sustentabilidade de Biodiesel de Diferentes Culturas na Perspectiva do Ciclo de Vida	Investigação exploratória
Guerra, (2017)	Escala laboratorial	Avaliação de Indicadores de Sustentabilidade para Produção de Biodiesel	Experimental
Olivares, (2014)	Busca bibliográfica e base de dados	Banco de dados de acidentes e incidentes na indústria de biodiesel	Investigação exploratória
Moreno, (2019)	Busca estatística	Risco de acidentes graves nos processos de produção de biodiesel	Investigação exploratória
Salzano, (2010)	Busca bibliográfica e base de dados	Riscos Emergentes na Produção de Biodiesel por Transesterificação de Óleos Virgens e Renováveis	Investigação exploratória
Akkarawatkhoosith et al. (2019)	Escala laboratorial	Avaliação da segurança e exigência energética da produção de biodiesel: sistema convencional e microrreatores	Experimental
Olivares, (2015)	Busca bibliográfica e base de dados	Banco de dados de acidentes e incidentes na indústria de etanol combustível	Investigação exploratória
Pinedo et al. (2016)	Busca bibliográfica e base de dados	Alternativas de biorrefinaria de microalgas e avaliação de perigos	Simulação computacional
Guerrero, (2022)	Modelagem e Busca bibliográfica	Produção de biodiesel com etanol supercrítico: Compromisso entre segurança e custos	Simulação computacional
Parvizsedghy, (2014)	Modelagem	Modelagem de consequência de acidentes perigosos em uma usina de biodiesel supercrítica	Simulação Computacional
Abidin, (2018)	Busca bibliográfica e base de dados	Desenvolvimento do índice de benefícios inerentes à segurança para analisar o impacto de implementação de segurança inerente	Investigação exploratória
Ramaswamy, (2018)	Busca bibliográfica e base de dados	Usando dados de reclamações de acidentes de trabalho para caracterizar lesões na indústria de biocombustíveis	Investigação exploratória

É possível observar que poucos trabalhos se relacionam à segurança de processos e estimativas de riscos em plantas de processos de biodiesel, com a maior parte destes voltados para a emissão de gases de efeito estufa, custo associado a esta produção, rendimento de

matérias-primas e uma analogia entre as matérias-primas não comestíveis e comestíveis. De fato, as lesões ocupacionais na indústria de biocombustíveis receberam pouco atenção na literatura de pesquisa e a falta de uma fonte centralizada de dados investigar esses incidentes continua sendo um desafio, com ênfase na identificação das prováveis causas de acidentes, tendências e recorrência de acidentes, e implementar lições aprendidas.

A disponibilização deste tipo de informação permite às empresas identificar as causas mais prováveis dos acidentes e os elementos que levam parte em uma sequência de acidente. Além disso, isso também permitiria a troca de dados entre as indústrias de biodiesel, incentivando a transferência de experiências de outros. Finalmente, é importante comentar que as informações necessárias para cada um dos eventos registrados necessitam estar completas para que o nível de assertividade seja o mais próximo possível e assim garantir a integridade física dos colaboradores e conseqüentemente evitando desastres econômico e social.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem por finalidade apresentar os métodos utilizados neste trabalho e está dividido em quatro seções. A primeira seção dá ênfase aos dispositivos metodológicos utilizados neste estudo e às etapas metodológicas. A segunda seção é caracterizada pela apresentação da busca de matérias primas e do software utilizado para coleta de dados, enquanto a terceira seção faz um breve detalhamento do algoritmo de redução de resíduos. A quarta seção refere-se ao cálculo de balanço de massa e energia do processo estudado nesta pesquisa.

3.1 Caracterização da pesquisa e etapas de desenvolvimento

Esta pesquisa é de caráter aplicado uma vez que busca classificar a categoria de impacto ambiental com características nocivas ao meio ambiente. De acordo com Jb Turrioni, (2012), esse tipo de investigação tem como prisma a solução de problemas específicos reais.

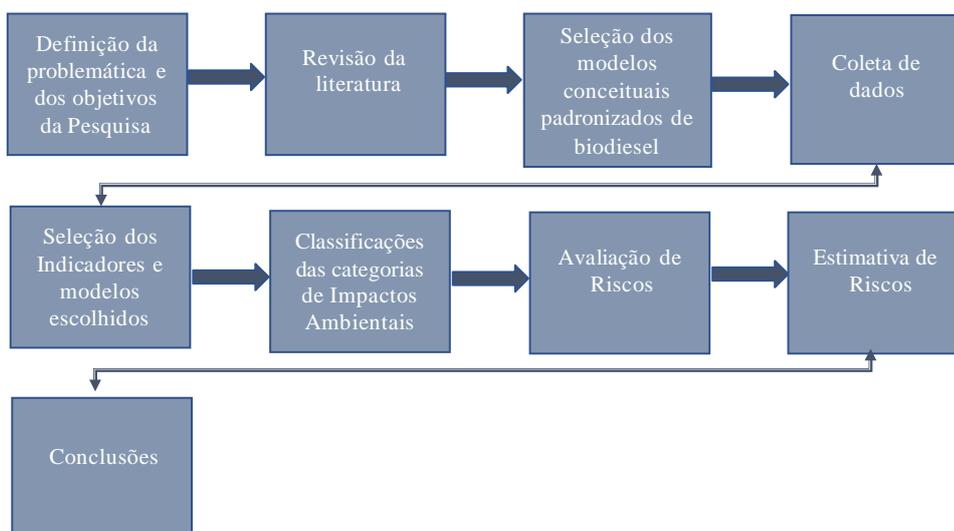
No que se refere a abordagem do problema estudado, a pesquisa utiliza um modelo misto sendo caracterizada como uma pesquisa quali-quantitativa. Para (Ma Marconi, 2003), na pesquisa qualitativa pode-se fazer uma avaliação decisiva através de uma análise rebuscada levando-se em consideração os aspectos subjetivos, por outro lado, o estudo quantitativo tem a finalidade quantificar informações com o apoio de uma estrutura axiomática bem como utiliza-se de ferramentas estatística. Logo, esta pesquisa realiza estes dois tipos de análise e por tanto recebe essa classificação.

Quanto aos objetivos considera-se que o estudo é descritivo, uma vez que se busca compreender determinadas características, conceituando e interpretando os comportamentos do processo. Esta análise pode ser realizada através de um levantamento de dados sujeitos a interpretações (quantitativos e qualitativos) (CC PRODANOV, 2013).

Os procedimentos técnicos o estudo pode ser considerado como um estudo de caso, haja vista que é direcionado para uma pesquisa minuciosa e exaustiva em relação a determinados objetivos da pesquisa, a fim de conhecer com maiores detalhes e suas características Gil, (2017). Para que esse ideal seja alcançado foi tomado como auxílio a orientação bibliográfica com a utilização de artigos de periódicos, dissertações, teses, livros e documentos que foram extremamente úteis

Adicionalmente, as etapas para o desenvolvimento do presente trabalho podem ser observadas na Figura 6 a seguir.

Fluxograma 6 - Etapas para a concretização da pesquisa



Fonte: O autor (2021)

A definição dos problemas relacionados a produção do biodiesel teve início por meio da formulação do problema de pesquisa, a utilização das ferramentas disponíveis atualmente para estudar a problemática. Uma vez escolhida a problemática buscou-se na literatura uma revisão dos assuntos conceituais relacionados a sustentabilidade, gestão do ciclo de vida, produção do biodiesel e gestão de riscos na produção do biodiesel.

A etapa seguinte buscou analisar conceituais padronizados tomando como base três vertentes: Foco em parâmetros operacionais a fim de assegurar a fidelidade do processo, foco em gestão do ciclo de vida e sustentabilidade e gestão de riscos. Esta fase foi importante para a seleção de um modelo equilibrado que conseguisse atender as dimensões da temática abordada.

Após selecionar o modelo, o próximo passo foi analisar os indicadores que poderiam ser utilizados na avaliação. A coleta dos dados se deu por meio de uma planta experimental de produção de biodiesel. Eles foram utilizados para fazer a simulação computacional de todo o processo de produção, incluindo parâmetros de temperatura, pressão, vazão tipo de reator usado no processo, números de estágios das colunas de destilação e dentre outros.

Para esse estudo ainda foi utilizado os dados de respostas do processo, conforme mencionado na seção anterior um algoritmo foi usado para a realização dos cálculos do potencial de impacto ambiental, outros esses dados são calculados conforme detalhado na seção 3.4.

No que tange a gestão e estimativa de riscos, nesta etapa foi utilizado bancos de dados e artigos científicos contendo históricos, estatística, equações de acidentes e incidentes de trabalho em plantas de processo.’

3.2 Aplicação e origem dos dados

A partir de estudo bibliográfico, buscou-se selecionar as matérias-primas a serem analisadas. Optou-se pelas matérias não comestíveis por ser minoria na produção de biodiesel, mas ainda haver grande disponibilidade e riqueza de dados, já que são provenientes de análises laboratoriais. Então, seis matérias-primas foram selecionadas para a produção do biodiesel, por meio destas foram obtidas oito categorias de impacto ambiental na planta estudada e estão detalhadas na no item 3.4 desta seção.

Para a coleta de dados, foi utilizado o software COCO disponível em: (<https://www.cocosimulator.org>) com o intuito de realizar a modelagem e simulação do processo produtivo de biodiesel. O COCO é um pacote de software de simulação amigável ao usuário que é capaz de fazer fluxos, estudos paramétricos e simular operações unitárias. Este software faz uso de pacotes termodinâmico que se baseia no CHEMP SEMP (Modelagem do processo de separação), além de ser leve gratuito e possuir uma interface gráfica intuitiva, permitindo ao usuário um desenho rápido do sistema de uma planta industrial. O fluxograma é caracterizado como CAPE OPEN são plantas industriais químicas que possuem sequencias lógicas (VIEIRA GONCALVES et al., 2019).

Além disso, um algoritmo também foi utilizado a fim de obter os dados de impacto ambiental do processo, para este fim, o algoritmo WAR já se encontra no banco de dados do COCO. O algoritmo WAR permite analisar o processo no ponto de vista ambiental, por meios de fluxogramas, utilizando dados de natureza probabilística, medida do impacto ambiental, estabelecendo uma teoria que relacione o impacto ambiental com quantidades mensuráveis (PETRESCU; CORMOS, 2015).

3.3 Algoritmo WAR

O algoritmo WAR “Waste Reduction” apresenta um método para o estudo de impacto ambiental em processos químicos. Ainda que o estudo ambiental completo do ciclo de vida inclua outras etapas (ex., distribuição, uso, reciclagem, abandono), como apresentado na Figura 7, o algoritmo WAR está voltado para o processo de transformação.

Figura 7: Atuação do Algoritmo WAR

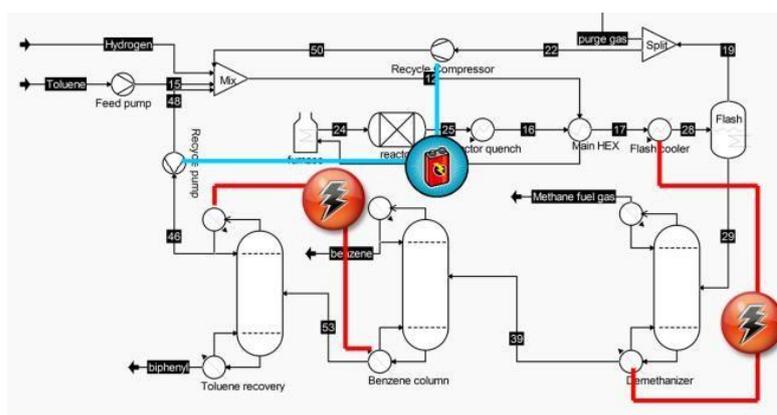


Fonte: adaptada (GONSALVES, 2011)

Neste contexto, em uma certa quantidade de material e energia, o potencial de impacto ambiental pode ser caracterizado como o efeito que esse material impactaria o meio ambiente. Logo, esse impacto contém uma natureza probabilística pois é uma estimativa conceitual que visa modelar o que estaria prestes a acontecer em determinadas situações (YOUNG; CABEZAS, 1999).

A comunicação do algoritmo WAR necessita de uma definição das categorias de impactos ambientais para sua relativização e quantificação. Estes impactos ambientais de processos são específicos para cada tipo de processo. No entanto, há aplicações na integração de um processo em que é possível analisar o fluxograma completo para descobrir a melhor forma de usar o calor ou o trabalho produzido, aplicando-o em outra parte do seu processo. Um exemplo para uma abordagem de integração de calor seria um componente de monitoramento de fluxograma, como o exemplo apresentado na Figura 8, que faz uma análise do seu processo em plantas industriais.

Fluxograma 8 Exemplo do monitoramento de fluxograma em COCO



Fonte: (COCOsimulador.org)

Já o impacto ambiental potencial global dos produtos químicos k , Ψ , pode ser mensura através da soma do potencial de impacto ambiental da substância química k , Ψ_k^s sobre todas as possíveis categorias de impacto temos a Eq. 1.

$$\Psi_k = \sum_l \alpha_l \psi_{kl}^s \quad (1)$$

A expressão α_l corresponde o fator de ponderação relativo à categoria de impacto l , as unidades para as unidades deles especificadas o índice de impacto ambiental tem que ser o potencial do PEI individual das substância k / massa em substância K . onde o seu fator de peso é demencial (CARDONA; MARULANDA; YOUNG, 2004).

Logo, os fatores de ponderação relativos, α_l , são utilizados a fim expressar a importância das categorias de impactos ambientais. Tipicamente, os fatores de ponderação devem variar entre 0 e 10 no entanto, esta não é uma regra firme. O usuário deve atribuir os fatores de ponderação de acordo com condições específicas do processo. Os fatores de ponderação devem enfatizar ou não enfatizar preocupações específicas que são relevantes ou irrelevantes para suas condições de processo e localidade (BARRETT; VAN BATEN; MARTIN, 2011a).

Como o principal objetivo deste algoritmo é determinar o ambiente relativo índices de impacto de um projeto de processo que, em última instância, comparados a projetos alternativos, os valores reais de os fatores de ponderação não são tão importantes valores relativos. Os fatores de ponderação são essenciais para esta metodologia na medida em que permitem a combinação de as categorias de impacto.

Para fazer a comunicação do algoritmo WAR, o potencial específico de impactos ambientais de cada produto químico na base de dados, ψ_{kl}^s precisava ser determinado. O banco de dados de processos químico da ChemCad 4.0 precisa ser acionado, nesse banco de dados existem cerca de 1.600 substâncias químicas, valores ψ_{kl}^s são normalizados dentro cada categoria de impacto. Há duas razões para isso, primeiro, a normalização garantirá que valores de diferentes categorias contêm as mesmas unidades para permitir a sua combinação (LUYBEN, 2013).

Em segundo lugar, uma normalização adequada irá garantir que os valores de diferentes categorias terão em média pontuações equivalentes, sem a segunda condição os fatores de

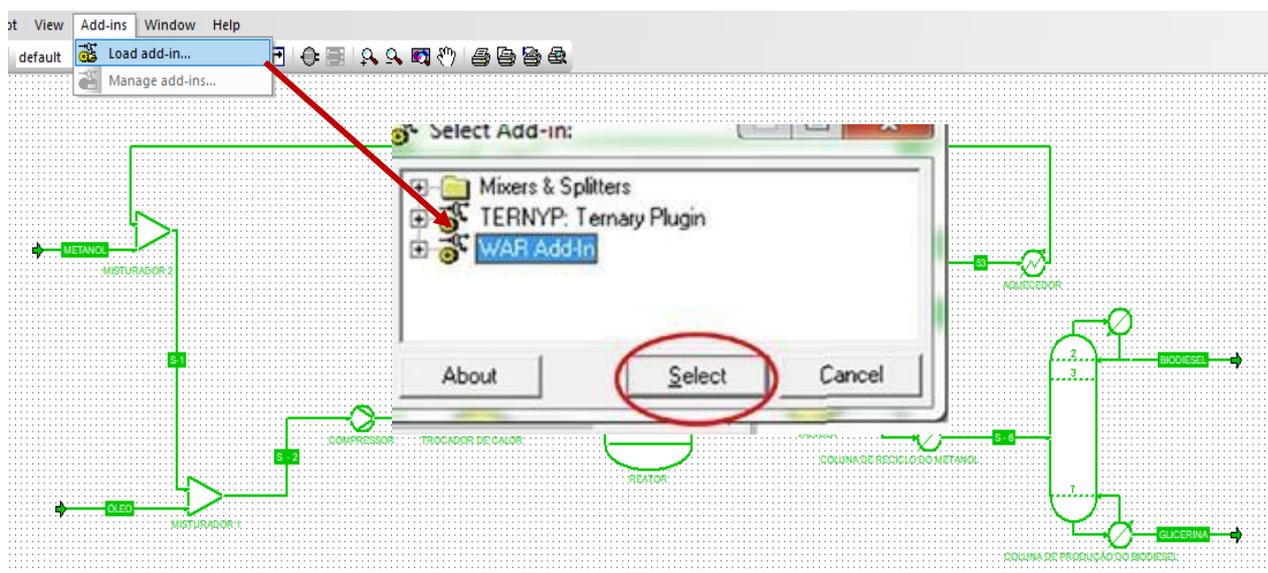
ponderação implícitos presente no banco de dados químicos causando não intencional viés no cálculo dos índices PEI. Os escores utilizados no algoritmo WAR serão calculados usando o seguinte esquema de normalização:

$$\psi_{kl}^s = \frac{(Score)_{kl}}{\langle (Score)_k \rangle_l} \quad (2)$$

$(Score)_{kl}$ corresponde o valor das substâncias k em uma escala aleatória na categoria l e o $\langle (Score)_k \rangle_l$ representa o valor da média de todas as substâncias químicas levando em consideração a categoria l .

O algoritmo WAR foi escolhido para a realização do estudo de compatibilidade ambiental da planta pois trata-se de um aplicativo gratuito já disponível junto ao simulador COCO. A Figura 9 ilustra o momento em que pode solicitar a comunicação do WAR após realizar a simulação completa do processo.

Figura 9 Comunicação do WAR em COCO



Fonte: Esta Pesquisa (2023)

Martcorena, (2010) Desenvolveu um trabalho semelhante ao utilizar o algoritmo WAR para investigar o potencial impacto ambiental no processo de produção de biodiesel, na ocasião a recuperação do metanol foi realizada na simulação do processo. No entanto, sabe-se que existem diferentes processos (obtenção) de biodiesel e, conseqüentemente todos eles com maior ou menor impacto ambiental uma comparação dos resultados é exposta na pesquisa.

(Ouattara et al., 2013) Também faz a utilização do algoritmo WAR para investigar operações ecologicamente corretas e economicamente viáveis, no conhecido processo de hidrodealquilação do tolueno para produzir bezeno (HDA) a hidrodealquilação do tolueno é o processo utilizado para a produção do benzeno a principal reação no processo é: *Tolueno* +

$H_2 \rightarrow \text{Benzeno} + \text{CH}_4$ o estudo desenvolvido tem enfoque no quesito ambiental mas também aos custo envolvendo os resíduos proveniente deste processo.

A utilização do WAR tem sido amplamente utilizada na literatura nos projetos que envolvem estimativa de índices de impacto ambiental em plantas de processo, no entanto a sua utilização não limita-se apenas ao COCO, o algoritmo WAR pode ser utilizado em qualquer outro simulador de processos como por exemplo Aspen plus e Asen hysys e dentre outros. Uma explanação em um contexto mais amplo relativo a esta temática pode ser encontrado em (Santana et al., (2021) e (Barrett; VAN Baten; Martin, 2011).

3.4 Cálculo de Impacto Ambiental

O algoritmo WAR é baseado no conceito de que potenciais impactos podem ser gerados ou consumidos em um processo, EPA (Agência de proteção ambiental) dos EUA propôs um modelo de PEI (energia consumida), conforme ilustrado na equação Eq. (3). Neste caso, a alteração do PEI de um processo é o PEI de entrada menos o PEI de saída mais o PEI gerado (consumido) pelo processo. Isso é, conceitualmente semelhante a um material ou balanço de energia em torno de uma planta de processo.

$$\frac{dl \text{ sistema}}{dt} = I_{in} - I_{out} + I_{gen} \quad (3)$$

$$I_{in} = \sum_i^{EnvCat} \sum_j^{Streams} \sum_k^{Component} a_i M_j^{(in)} x_{k,j} \psi^s_{k,j} \quad (4)$$

$$I_{out} = \sum_i^{EnvCat} \sum_j^{Streams} \sum_k^{Component} a_i M_j^{(out)} x_{k,j} \psi^s_{k,j} \quad (5)$$

Com efeito, as equações de entrada e de saída acima mostram o material flui - pontos M - e composições / fracções molares x - valores para k componente no fluxo de j - fazem parte da equação de equilíbrio. O fator de PEI específico para k componente na categoria i é o valor de k de sub ψ vírgula i .

X é composição, H é o ponto de fluxo de massa de uma corrente de alimentação ou produto. O S sobrescrito para os valores de PEI indicam que os valores são valores específicos, que resultam do valor de um produto químico particular, normalizado pela média sobre o valor de muitos produtos químicos. $Envcat$ e $Stream$ correspondem as duas áreas das categorias de impacto ambiental.

As categorias de impacto ambiental utilizadas neste trabalho foram baseadas no estudo de impacto ambiental de por Heijungs; Guinée, (1992). Esse estudo foi desenvolvido a fim de analisar os impactos ambientais em processos químicos e identificou oito categorias divididas em duas áreas:

- **Atmosférica:**

- GWP - Potencial de Aquecimento Global;
- ODP - Potencial de Depleção da Camada de Ozônio;
- AP - Potencial de Acidificação ou de Chuva ácida;
- PCOP – Potencial de oxidação Fotoquímica.

- **Toxicológica:**

- HTPI – Potencial de toxicidade Humana por Ingestão;
- HTPE – Potencial de toxicidade Humana por Inalação ou Exposição a pele;
- ATP – Potencial de toxicidade Aquática;
- TTP – Potencial de Toxicidade Terrestre.

O GWP é definido em comparação com a dilatação em que a unidade de massa em que uma substância química recebe radiação infravermelho sobre o tempo de vida na atmosfera, com a amplificação em que o CO_2 assimila radiação infravermelho em seu tempo de vida útil na atmosfera. A meia-vida de cada um desses produtos químicos foi fatorado no cálculo para determinar o GWP desde então, os produtos químicos têm diferentes meias-vidas atmosféricas o período de tempo durante o qual a comparação é feita mudará o GWP de um produto químico, para este banco de dados, 100 anos foi escolhido como o período de tempo base.

O ODP é definido pelo confronto entre a taxa em que uma massa unitária de produto químico reage com o ozônio para formar oxigênio molecular para a taxa na qual uma unidade de massa de CFC-11 (triclorofluorometano) reage com ozono para formar oxigênio molecular. Para um produto químico ter ODP, ele deve existir na atmosfera longa o suficiente para alcançar a estratosfera, também deve conter um átomo de cloro ou bromo.

O PCOP ou potencial de formação de smog é definido quando comparando a taxa em que uma unidade de massa unitária de química reage com um radical hidroxila (OH) à taxa em que uma unidade de massa de etileno reage com OH.

O AP ou potencial de chuva ácida é determinado por comparando a taxa de liberação de H^+ na atmosfera como promovido por um produto químico para a taxa de liberação de H^+ na atmosfera como promovido por CO_2 . Para a estimativa da categoria da potência de toxicidade humana, ingestão e inalação duas categorias foram determinadas.

O HTPI foi calculado para um produto químico existente de um líquido ou sólido a uma temperatura de $0^\circ C$ atmosférica, e um potencial de exposição a estes produtos. O HTPE, foi definido para esse produto químico foi por meio de um gás em essas condições. Alguns produtos químicos, no entanto, foram atribuídos valores para ambas as categorias, se fosse garantido. Como primeira aproximação, a dose letal produzida de morte em 50% dos ratos por ingestão oral (LD50) foi utilizado como uma estimativa para o HTPI.

Nesses esses produtos químicos para os quais não estava disponível um valor de DL50 ratadal, um valor foi estimado por métodos moleculares LD50 são tipicamente relatados em unidades de mg de produto químico. A inspeção desta balança, é bastante aparente que um produto químico com uma maior LD50 representa um produto químico com menor toxicidade (VIEIRA GONÇALVES, 2011).

Para estimar o HTPE, as médias ponderadas pelo tempo dos valores-limite foram utilizados. Estes valores obtidos da OSHA, ACGIH, NIOSH e representam a exposição à segurança ocupacional limites. Esta foi considerada uma medida adequada para comparação de produtos químicos que colocaria em ameaça a saúde humana através da inalação e rotas de exposição. Lembre-se, apenas uma comparação relativa dentro das categorias é necessária para esta metodologia.

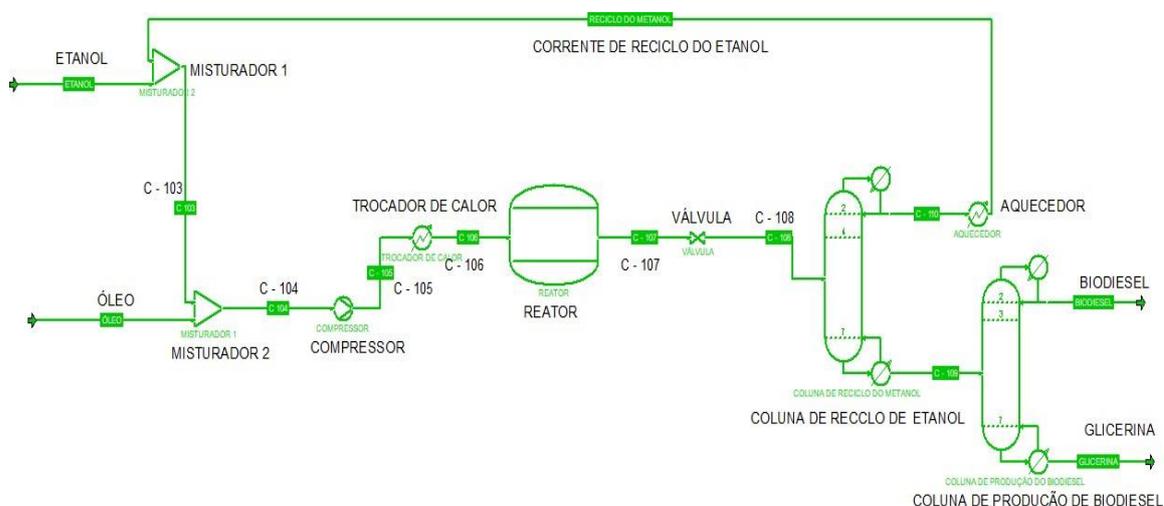
O ATP foi estimado usando dados toxicológicos para uma única e representativa espécie de peixe, esta espécie foi escolhida novamente por causa de sua aceitação como um aquático universal indicador e prevalência de dados. Os dados para estes ensaios vêm sob a forma de uma LC50, uma concentração letal que causa a morte em 50% dos espécimes de teste.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Descrição do Processo de Produção do biodiesel

Os dados utilizados neste trabalho correspondem em dados industriais reais de uma planta experimental de pequeno porte situada no Estado de Pernambuco. O processo de produção do biodiesel inicia-se com a corrente de álcool e óleo misturados no misturador 1 e 2. O reator de conversão opera a uma temperatura de 80°C utilizando uma conversão de 95,9%. A corrente de saída do reator foi direcionada para a coluna de destilação com o intuito de separar e fazer a recuperação do etanol não reagido no processo e para fazer o reciclo. A corrente 103, formada pela mistura do etanol do processo junto com a corrente de reciclo com 99,12% de etanol, foi misturada junto com a corrente de óleo formado e corrente 104, sendo bombeada para pré-aquecimento antes de ser inserida ao reator, com conversão de 95,9%. A Tabela 2 apresenta os dados (parâmetros de entrada e saída) de cada corrente (tubulação) da planta estudada.

Figura 9 – Fluxograma de produção do biodiesel



Fonte: O autor (2021)

A corrente 103, formada pela mistura do etanol do processo junto com a corrente de reciclo com 99,12% de etanol, foi misturada junto com a corrente de óleo formado e corrente 104, sendo bombeada para pré-aquecimento antes de ser inserida ao reator, com conversão de 95,9%. A Tabela 2 apresenta os dados (parâmetros de entrada e saída) de cada corrente (tubulação) da planta estudada.

Tabela 2 Dados do processo de produção de biodiesel

Correntes de fluxo	C 104	C105	C108-1	C108	Biodiesel	Glicerina
Temperatura	290	350	78,7	236,1	205,	293,1
Pressão (kPa)	20000	20000	101,3	105,4	101,3	112,3
Fluxo molar (Kmol/h)	40,99	40,99	37,12	3,854	2,853	1
Etanol	0,67529	0,62715	0,9999	0,00019	0	0,33578
Trioleína	0,32462	0,01623	0	0,04354	0	0
Glicerol	0	0,03208	0	0,08604	0,00001	0,99475
Água	0,00003	0,00003	0,00006	0	0	0
Oleato de Etila	0,00006	0,3245	0,00004	0,87026	0,9998	0,00067

Fonte: Esta Pesquisa (2022)

Ao ocorrer a reação, a corrente de saída do reator passa pela válvula a uma pressão de 101.3 KPA. Logo depois, a corrente é direcionada para a primeira coluna de destilação C - 108 para fazer a recuperação do etanol. Neste equipamento, foram utilizados seis estágios com uma taxa de refluxo de 2,0, sendo recuperado 85,37% do etanol como um produto de topo após resfriamento. Para o processo a corrente de fundo da coluna de destilação tinha como produto o biodiesel e a glicerina.

A corrente de fundo da primeira coluna vai para a segunda coluna de destilação a fim de fazer a separação do biodiesel e a glicerina, utilizando 16 estágios. Quase todo o biodiesel é recuperado como produto de topo com uma taxa de 99,98% e o glicerol saiu como produto de fundo da coluna com 99,47%. A Figura 9 ilustra o processo de produção do biodiesel a partir do software COCO utilizando o etanol.

4.2 Riscos inerentes a produção do biodiesel

A análise de risco utilizada neste trabalho é baseada no Gerenciamento de Risco Operacional. As principais ações desta pesquisa podem ser categorizadas em duas etapas, propostas segundo a contribuição de (KAMENOPOULOS; TSOUTSOS, 2015).

A etapa I baseia-se na identificação dos perigos que podem resultar em um potencial evento adverso, essa análise pode ser observada nas Tabelas do apêndice A. Uma revisão das estatísticas de acidentes/incidentes para identificar os perigos é recomendada por a Calvo Olivares; Rivera; Núñez mc Leod, (2014) e Salzano; di Serio; Santacesaria, (2010a) A identificação dos perigos foi baseada na literatura atual (bancos de dados de acidentes/incidentes, classificação das substâncias utilizadas no processo de produção do biodiesel).

Já na etapa II refere-se à avaliação de perigos, é o processo que descreve a probabilidade de que algo possa dar errado bem como o cenário mais catastrófico que poderia acontecer em termos de probabilidade e gravidade. A avaliação dos perigos foi realizada pelas partes interessadas do processo de produção de biodiesel à base de óleos residuais existem quatro categorias de stakeholders: “Indústria”, “Academia”, “Setor Público”, “Recolha e Transporte de óleos residuais”. Em cada categoria há duas respostas, exceto “Indústria” onde há três respostas.

Os códigos de avaliação de riscos podem auxiliar na hierarquização das prioridades de controle colocando valores no nível de risco. Os riscos com código 4 ou 5 apresentam o maior perigo e não são aceitos. Neste sentido, Casson Moreno; Cozzani, (2015). Analisaram dados de grandes riscos na produção de bioenergia, relatando um aumento de acidentes e destacou a importância da conscientização sobre os riscos e da cultura de segurança na produção de bioenergia. Os riscos com um código 3 precisam ser reprojitados, riscos com um código 1 ou 2 mostram o menor risco e são aceitos.

O ORM é definido como o processo de responsabilizar-se com os riscos inerentes em qualquer tipo de operação, que inclui avaliação de risco, tomada de decisão de risco e implementação de controles de risco eficazes. O processamento de biodiesel envolve cinco etapas conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 área estudada aos riscos desde a seleção ao processamento do biodiesel



Fonte: adaptado de Yatzisymeon (2019)

Os perigos no presente estudo possuem origens a partir das propriedades físicas e químicas de substâncias comumente utilizadas como matéria-prima, produtos químicos utilizados na transesterificação, biodiesel e subprodutos, bem como de alguns equipamentos. Os acidentes/incidentes envolvem cenários de incêndio e explosão, falhas de equipamentos, liberação de vapor, descarrilamento por vazamentos inerentes ou não a incêndios, explosões e poluição ambiental (SALZANO; DI SERIO; SANTACESARIA, 2010a).

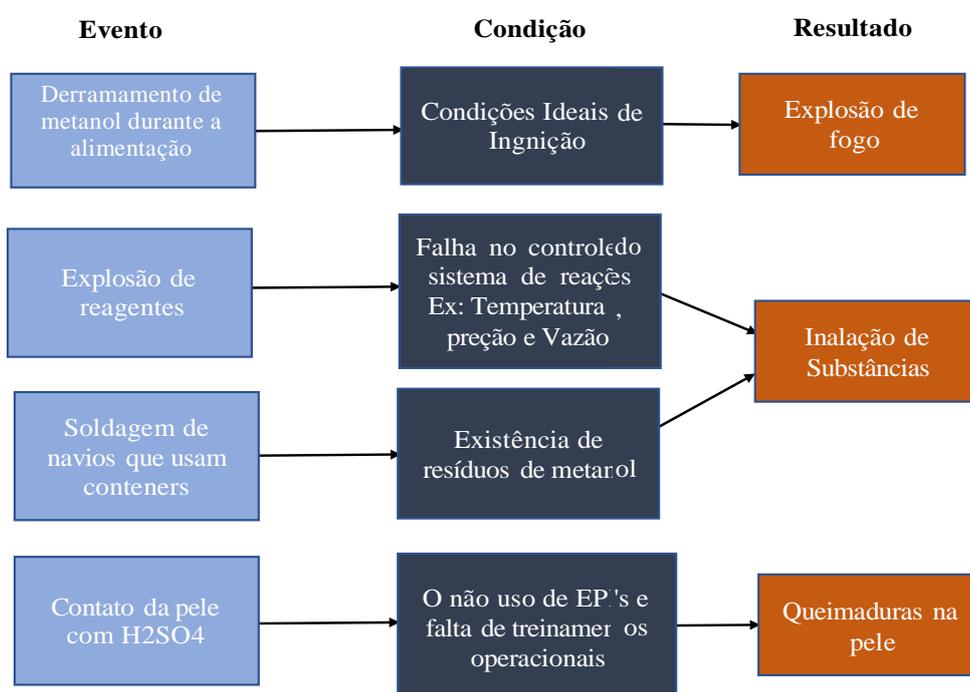
As instalações de biocombustíveis geralmente são planejadas e operam sob o comando de pessoas muitas vezes não devidamente treinadas, qualificadas e experientes para a função requisitada. A ausência desta capacitação, conscientização e supervisão rigorosa geralmente

levam a um julgamento ruim, tomada de decisão precipitada que podem conduzir o processo a danos materiais ou incidentes.

As causas diretamente ligadas aos acidentes na indústria de biodiesel ou as refinarias de uma maneira geral são equipamentos, falha mecânica, fator humano, erro do operador, evento externo, ignição por faísca elétrica, combustão espontânea, as consequências de acidentes e incidentes são a ruptura das comunidades, danos ecológicos, lesões, fatalidades, perda material parcial (CALVO OLIVARES; RIVERA; NÚÑEZ MC LEOD, 2015).

Para cada estágio e categoria, um evento, condição e gráfico de resultado foi construído, conforme apresenta a Figura 11, combinando os eventos adversos com as condições que os causam e os resultados indesejáveis que induzem acidentes de trabalho. Esta combinação é crucial pois atualmente existem poucos dados disponíveis sobre as causas que resultaram em acidentes fatais neste seguimento.

Figura 11 Perigos relacionados à operação e manutenção de uma usina de biodiesel



Fonte: Esta pesquisa

Para cada evento, condição e gráfico de resultado um “Evento, probabilidade matriz” foi criada. A Tabela 2 (Apêndice A) apresenta uma amostra da matriz e ilustra os perigos relacionados à operação e manutenção da usina de biodiesel. Espera-se que esses perigos

apresentem pontuações finais mais altas em comparação com o manuseio de óleos residuais, de acordo com a literatura relatada. A identificação de perigos foi realizada por uma série de partes interessadas envolvidas na produção de biodiesel à base de óleos residuais disponíveis atualmente na literatura com base em relatos.

Os dados encontrados foram avaliados a fim de obter a probabilidade, a gravidade e o peso para cada alternativa entre as colunas 4, 5 e 6 da matriz da tabela A1 no apêndice A. O peso é um fator adicional criado para melhor expressar a importância de cada cenário, sendo representado por um número entre 0 e 1, com um passo de peso em 0,05, que foram fornecidos por meio de artigos selecionados tendo como enfoque o tema investigado.

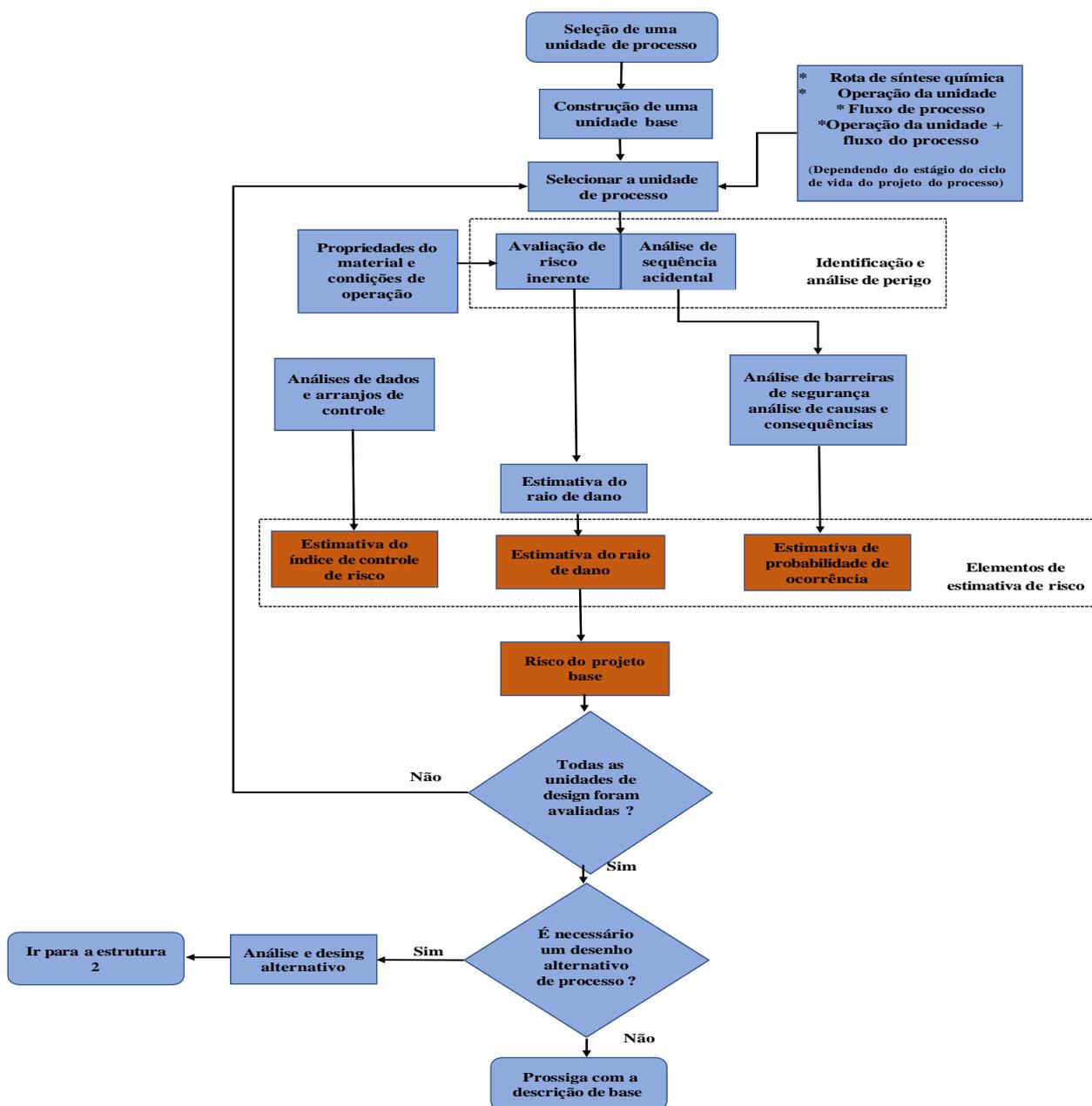
A pontuação média final por cenário foi calculada como a média de todas as respostas encontrada, o escopo deste estudo não foi um resultado estatístico, mas uma avaliação de linha de base de provável óleo residual usado com base em perigos do biodiesel a partir de dados mais atuais disponíveis.

4.3 Estimativa de riscos em plantas de processo

O risco em plantas de processo (*RISI*) inclui duas estimativas de risco distintas conforme apresentado graficamente a estimativa do *RISI* na Figura 12 e 13. O *RISI* é definido como a razão da segurança inerente ao risco da alternativa selecionada para o risco do projeto básico, sendo estimada pela Eq. 6. A estimativa de risco leva-se em consideração o tipo de equipamento que é utilizado no processo com valores que assumem o grau de risco do equipamento, como por exemplo: trocadores de calor, reatores e colunas de destilação. O procedimento começa com a estimativa de risco para o projeto base (*RiskBD*) e, posteriormente, o risco de segurança inerente ao processo para projetos alternativos (*ISRisk*). Ambos os riscos são eventualmente integrados para desenvolver a segurança inerente baseada em risco de índice (*RISI*).

$$RISI = \frac{ISRisk}{RiskBD}; 0 \leq RISI \leq 1 \quad (6)$$

Fluxograma 12 Estrutura para estimar o risco de projeto básico



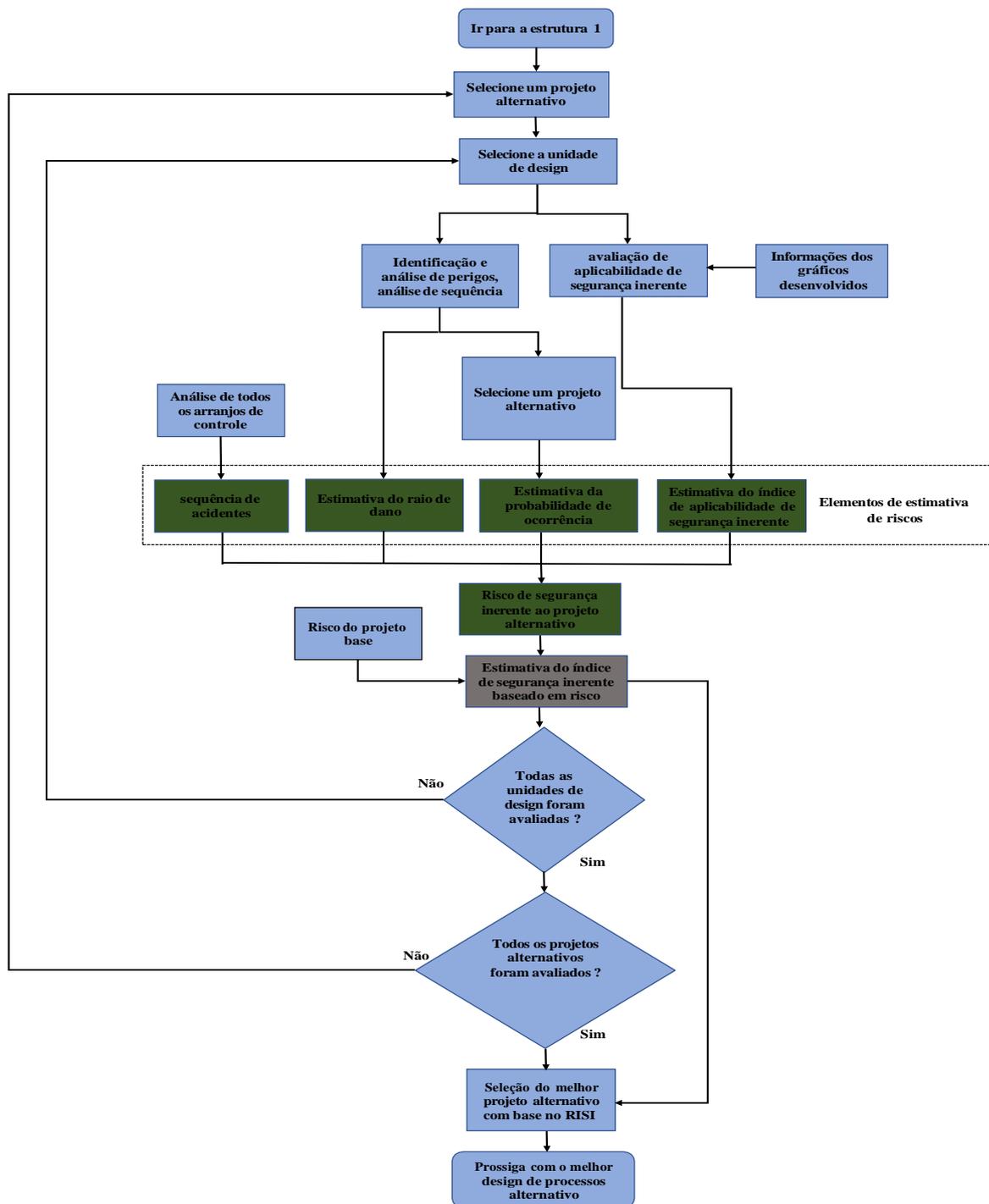
Fonte: Adaptado de Rathnayaka, (2014)

O RISI é então utilizado como o principal parâmetro de tomada de decisão para selecionar o design ideal com a máxima segurança do processo escolhido. O ISRisk pode também ser usado a fim de tomar decisões considerando projetos específicos, (critérios de exigência). O valor do RISI varia de 0 a 1 quanto mais a medida em que o RISI se aproxima de 0, a alternativa é chamada de design “perfeito”, ou seja, mais seguro. No entanto se a abordagens for 1, a alternativa é chamada de “inoperante” inerentemente projeto mais seguro.

A melhoria do projeto de uma alternativa com relação ao projeto base pode ser estimado usando a Eq. 7.

$$\% \text{ Melhoria da segurança sobre o processo} = 100 \times (1 - RISI) \quad (7)$$

Figura 13 Estrutura para estimar o risco de segurança inerente e a seleção do projeto ideal



Portanto, os termos *ISRisk* e *RISI* podem ser utilizados para a tomada de decisão de design de processos durante as diferentes fases do processo do ciclo de vida do projeto.

4.4 Avaliação de risco e análise de sequência de acidentes

Antes da estimativa de risco, o estágio de projeto deve ser especificado. Como a etapa de projeto possui atividades, atributos e critérios de projeto diferentes, as informações necessárias para avaliar a segurança dependerão da fase e a natureza do processo. Este é um processo que envolve uma combinação de síntese, análise e avaliação de alternativas de processos.

Uma vez concluído o projeto inicial, a identificação do perigo é realizada para identificar todos os perigos potenciais associados com o projeto básico e, posteriormente, projetos alternativos são desenvolvidos. Os perigos podem estar associados a materiais, equipamento e o próprio processo produtivo (Hendershot, 1997).

Nesse projeto é estudado incêndios, explosões e liberações tóxicas gasosas e líquidas pois são considerados os cenários de acidentes mais credíveis associados às indústrias de processo. Esses cenários de acidentes são posteriormente analisados para construir uma sequência de acidentes. Além disso, os parâmetros que afetam a segurança inerente, como estoque, temperatura, pressão, toxicidade e inflamabilidade, também são listados e analisados durante a etapa do projeto em construção.

Delvosalle et al., (2006) desenvolveu uma metodologia para a identificação de riscos de acidentes graves (MIMAH) que pode ser utilizado para realizar a identificação de perigos. O MIMAH usa a técnica do laço para representar a lógica da causa-consequência relação de acidentes graves, portanto, os cenários de acidentes podem ser gerados. Para identificar os perigos atípicos que podem surgir em um sistema, uma metodologia chamada DyPASI (procedimento dinâmico para identificação de cenário) (Paltrinieri et al., 2013) pode ser usado junto com MIMAH.

4.4.1 Estimativa do raio de dano de explosão

A equação para estimar o raio de dano de explosão é calculada usando um método multienergia. As principais premissas consideradas são a combustão deflagrativa e a explosão explosiva, compostas por uma série de sub-blastos correspondentes ao número de blastos potenciais fontes identificadas dentro da nuvem de vapor. O coeficiente da força da explosão é considerado como seu máximo (10) e a sobre pressão máxima gerada por a deflagração é

considerada como 2 atm (200 kPa). Considerando estes fatos, Eq. (8) é desenvolvido para estimar a estimativa do raio de dano de explosão (ASSAEL, 2010).

$$EDR = 0.90 (\text{Potencial de perigo de fogo})^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

Onde o potencial de perigo é a energia total liberada durante a explosão e é expressa em kilo Joules. O potencial de perigo para explosão é formulado utilizando dois elementos: fator de energia (F) e pena (pne). Quatro fatores de energia, F1, F2, F3 e F4 são definidos para estimar o potencial de perigo de uma explosão de nuvem de gás/vapor pré-misturada, que leva em consideração a energia química, física energia (expansão isentrópica do gás e expansão do líquido abaixo do ponto de ebulição) e energia liberada devido à reação química, respectivamente (KHAN; HUSAIN; ABBASI, 2001).

As unidades de processo são divididas em cinco categorias: unidades de armazenamento, unidades envolvendo operações físicas como absorção, adsorção, destilação, evaporação, unidades envolvendo reações químicas, unidades de transporte e outras unidades perigosas como fornos, caldeiras e outras unidades semelhantes. As penalidades são atribuídas a abordar o impacto dos vários parâmetros operacionais e de processo. As equações para fatores de energia, potencial de risco e penalidades atribuídas para diferentes unidades de processo estão listadas no Apêndice B.

Existem semelhanças de características entre uma explosão de gás/vapor e explosão de partículas de poeira. Isso ocorre quando um combustível é queimado rapidamente em um curto espaço de tempo em um recipiente fechado uma vez que, combinadas ao oxigênio, as partículas minúsculas (finas) podem ser inflamadas ao entrar em contato com uma faísca, brasa de metal ou alguma outra fonte de ignição. A Figura 14 apresenta as condições para que este evento ocorra.

Figura 14 Condições de ocorrência de explosão de poeira



Fonte: O autor, (2022)

Os riscos de explosão de poeira combustível são comuns em vários setores industriais, como alimentos, plásticos, madeira, borracha sintética, móveis, ladrilhos têxteis, pesticidas, produtos farmacêuticos, corantes, carvão, metal (por exemplo, alumínio, ferro, magnésio e zinco) e geração de energia de combustíveis fósseis. A poeira combustível pode ser formada pela maioria dos compostos orgânicos naturais e material sintético, bem como por vários metais.

A indústria petroquímica é um componente crucial da economia; no entanto, suas atividades envolvem processos potencialmente perigosos, como combustão, corrosão, explosões e liberação tóxica (Lim et al., 2020). Neste sentido, diferentes trabalhos têm abordado esta temática com mais afinco em forma de estudo de caso como é o caso de: (WU; LAIWANG; SHU, 2021); (COPELLI et al., 2019); (BAROZZI et al., 2020); (WEISER et al., 2020) e (PÓLKA, 2020).

A norma regulamentadora NR 33 estabelece os requisitos para a caracterização dos espaços confinados, os critérios para o gerenciamento de riscos ocupacionais em espaços confinados e as medidas de prevenção, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que interagem direta ou indiretamente com estes espaços.

As equações desenvolvidas para estimar o raio de dano de uma explosão de gás/vapor pode ser usado para estimar o raio de dano da explosão de partículas de poeira, Para uma explosão de poeira, dois fatores de energia FD1 e FD2 são introduzidos para energia e energia física, respectivamente Abbasi; Abbasi, (2007) e Eckhoff, (2006). A energia liberada devido ao processo de combustão (FD1) é computada usando o calor de combustão de partículas de poeira (DH_c), explosivos concentração de poeira (C), e o volume do confinamento (VC) conforme mostrado na Eq. (9) FD2 estima a liberação de energia física devido ao aumento adiabático na pressão da energia da explosão. É calculado usando a Eq. (10)

$$FD1 = \Delta H_c \times C \times H_c \quad (9)$$

$$FD2 = (2 \times 10^{-4}) \frac{P_{max} - P_{atm}}{\gamma_a - 1} \quad (10)$$

onde P_{max} e P_{atm} é a explosão máxima e a pressão atmosférica, respectivamente, e γ_a representa a taxa de capacidade de calor de ar na temperatura máxima de explosão.

As operações perigosas comuns envolvidas em uma explosão são listadas segundo Abbasi; Abbasi, (2007). Usando essas informações, as unidades de processo envolvendo reação

química e operação física, como absorção, adsorção, destilação, não são um candidato para a avaliação de segurança inerente de um pó explosivo, mas sim, três outras unidades de processo: unidades de armazenamento, transporte unidades e outras unidades perigosas, como fornos e caldeiras têm que ser minuciosamente estudado.

O comportamento dos fatores de explosão de partículas de poeiras como pressão máxima de explosão P_{max} e taxa máxima de aumento de pressão $\frac{dp}{dt_{max}}$ com os parâmetros que afetam a segurança inerente são estudados usando as informações disponíveis na literatura Khan; Amyotte, 2004); Eckhoff, (2005); Sam mannan, (2005). As conclusões deste estudo são amplamente utilizados para decidir as penalidades e as diretrizes para estimar penalidades, os dados estão listados no Apêndice C.

4.4.2 Estimativa do raio de dano de fogo

A estimativa do raio de dano é utilizada em um modelo de fonte pontual. As suposições consideradas neste trabalho são (1) o fluxo de calor do centro do fogo para o alvo está no solo nível e o efeito do vento é insignificante; (2) a transmissão da atmosfera é aproximadamente igual a 1; (3) todos os receptores alvo são considerados como corpos negros; (4) danos devido ao fogo são uma consequência direta do fluxo de calor.

Semelhante à estimativa do raio de dano de explosão, o limite de intensidade de radiação térmica é escolhido como 37,5 kW m² considerando o projeto para o pior cenário. Este limite de intensidade pode causar danos materiais e 100% de letalidade em 1 min (1% de letalidade em 10s) (ASSAEL, 2010).

$$FDR = 0.05 \times (\text{Potencial de perigo})^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

onde o potencial de risco é a taxa total de liberação de calor durante o incêndio e é expresso em KW. O raio de dano para fogo a jato é determinado especificamente tomando metade do valor obtido pela Eq. (11).

Semelhante à estimativa do raio de dano da explosão, a energia potencial é estimada usando o fator de energia E, e penalidade para cada unidade de processo. Considerando as premissas acima mencionadas, apenas um fator de energia é definido para tomar a taxa de liberação de calor radiativo em conta.

Quatro equações distintas são definidas para estimar o fator de energia de um incêndio em poça, bola de fogo, fogo de jato e fogo relâmpago. O cenário de incêndio mais provável

associado às condições de operação e unidades de processo são consideradas para fins de projeto. As penalidades também são definidas para levar em consideração o impacto dos fatores de influência. Usando a literatura disponível Assael, (2010); Sam mannan, (2005); Roberts, (1981), fatores de energia e penalidades são desenvolvidas e listadas no Apêndice D.

4.4.3 Estimativa do raio de dano de liberação de gás tóxico

O raio de dano de liberação de gás tóxico é definido como a distância ao nível do solo da fonte de liberação para um receptor no qual a concentração tóxica é a favor do vento e está no valor limite do limiar (TLV). Para estimar o raio de dano, o modelo de pluma de Pasquill–Gifford possui as seguintes suposições:

1. A classe de estabilidade é escolhida como ligeiramente estável porque representa as condições atmosféricas medianas (KHAN; HUSAIN; ABBASI, 2001);
2. Os coeficientes de dispersão são escolhidos com base na estabilidade ligeiramente classe de estabilidade;
3. As características do modelo consideradas são: pluma, contínua liberação, estado estacionário, fonte ao nível do solo na direção de vento;
4. A velocidade a favor do vento é de 2 m/s.

A equação desenvolvida para estimar o raio de dano devido a liberação contínua de gás tóxico é:

$$TGDR = 5.86 \times C_g \times (\text{Potencial de perigo})^{0.6} \quad (12)$$

O potencial de perigo é definido como a liberação de gás tóxico (vapor) taxa que é estimada pelo fator de liberação G e penalidades atribuídas (p_{ng}). C_g definida como a concentração máxima permitida que é estimado usando a Eq. (13).

$$C_g = \left(\frac{1}{TLV}\right)^{0.6} \quad (13)$$

Onde o TLV é o valor limite para o gás liberado.

Dois cenários principais de liberação de gás prevalecem nas unidades de processo: (1) fluxo de gás/vapor através de furos e (2) fluxo de vapor através de tubos. Isso é assumiu que o fluxo através de um tubo é controlável e acidental liberação é através de um buraco. Supõe-se que o gás liberado se comporte como gás ideal e a descarga é classificada como expansão livre

isentrópica; o fator de liberação é então estimado usando a Eq. (14) (CROWL; LOUVAR, 2002).

$$G = 7.5 \times 10^3 \times A \times P_o \times \left(\frac{MW}{T_o}\right)^{0.5} \quad (14)$$

onde A é a área da fonte, P_o é a pressão na fonte, T_o é a temperatura na fonte e MW é o peso molecular da substância liberada.

Nesse caso, as penalidades são atribuídas para lidar com o impacto da parâmetros como temperatura de operação, pressão, densidade de vapor, toxicidade do produto químico, características do local, fatores ambientais externos e vulnerabilidade da área. As expressões para decidir as penalidades são obtidas consultando a literatura: Crowl; Louvar, (2002) Khan; Husain; Abbasi, (2001) e incorporando autores conhecimento. As penalidades aqui desenvolvidas estão listadas no Apêndice E.

4.4.4 Estimativa do raio de dano de liberação de líquido tóxico

No caso de liberação de líquido tóxico, o líquido tóxico pode atingir o solo e formar uma piscina que se espalha de acordo com o terreno. Se o vaso é cercado por um dique, o líquido geralmente flui para a parede do dique, e a dimensão da piscina é então igual a dimensão do dique. Em outros casos, assume-se que a piscina é circular. A liberação de líquido pode causar danos ao solo e à água no caso de fluxo irrestrito e falta de barreiras. Para tais cenários, é difícil estimar o raio de dano usando uma matemática equação e tal incidente deve ser analisado independentemente.

Em vez disso, este trabalho se concentra nos danos causados por uma substância tóxica transportada pelo ar. substância que evaporou de uma poça de líquido e/ou flashing do líquido. O raio de dano devido à liberação de líquido é definido como a distância da piscina líquida ou unidade intermitente até o limite concentração do valor limite (TLV) e é derivada usando a Eq. (15) (AICHE TECHNICAL MANUAL, 1994).

$$TLDR = 6.51 \times C_l \times (\text{Potencial de perigo})^{0.5} \quad (15)$$

Onde

$$C_l = \left(\frac{1}{TLV}\right)^{0.5} \quad (16)$$

O potencial de perigo representa a quantidade tóxica transportada pelo ar devido a liberação tóxica líquida. Como mencionado anteriormente, a quantidade no ar pode ser produzida por evaporação líquida e flashing de líquido, e depende da temperatura de operação da unidade.

Um impulso a balança é usado para modelar o fluxo de líquido através de um orifício Crowl; Louvar, (2002) e assume-se que a liberação de líquido continue por pelo menos cinco minutos antes que a liberação possa ser interrompida Manual técnico AIChE, (1994). O potencial de perigo devido ao flashing (L1) é estimado usando a Eq. (17), enquanto o potencial de perigo devido à evaporação (L2) é estimado usando a Eq. (18).

$$L1 = 6.0 \times 10^{-6} \times A_{piFv} \times \sqrt{\frac{1000P_g}{P_L} + 9.81h_L} \quad (17)$$

$$L2 = 9.0 \times 10^{-4} \times A_P^{0.95} \times \left(\frac{MW \times VP}{T_P} \right) \quad (18)$$

Onde P_L é a densidade da liberação do líquido, f_V é a fração do líquido que irá piscar, P_g é a pressão dentro do vaso, h_L é a altura do líquido acima do ponto de liberação A_P é a área líquida e T_P é a temperatura característica do líquido.

Semelhante à liberação de gás tóxico, sete penalidades são atribuídas em consideração os fatores de influência. A diretriz para determinar as penalidades e seus respectivos valores é apresentado no Apêndice E.

4.5 Estimativa de probabilidade de ocorrência de cenários de acidentes

A segurança do processo não é a principal consideração no projeto básico. O evento iniciador ou o evento principal é a liberação de gás ou líquido nas condições de operação pré-definidas. A probabilidade de falha da barreira de prevenção de dispersão depende de diversos eventos. Por atribuir probabilidades com base em dados industriais específicos ou estatísticas disponíveis, a probabilidade de falha da barreira de prevenção de dispersão é estimada multiplicando as probabilidades de falha de barreiras individuais. A sequência de eventos varia de acordo com a condição do processo de liberação (alta pressão ou baixa pressão) e o estado físico do material (líquido ou gasoso). Assim como, o tipo de ignição decide o tipo de cenário de acidente. A probabilidade de ocorrência de ignição retardada ou imediata depende da natureza e disponibilidade da fonte de ignição, sendo também atribuído com base em dados

industriais específicos. Três principais barreiras de segurança adicionais: sistema de sprinklers contra incêndio/explosão, parede de incêndio/explosão e combate a incêndio são sugeridos para prevenção de escalada.

A falha probabilidades são atribuídas para cada barreira com base em dados industriais específicos. A probabilidade de ocorrência do evento principal depende da probabilidade de falha da barreira de prevenção de liberação. Quatro principais causas imediatas de falha da barreira de prevenção de liberação são apresentadas no modelo gravata borboleta. Uma falha mais abrangente análise da barreira de prevenção de liberação pode ser encontrada em outro lugar (RATHNAYAKA; KHAN; AMYOTTE, 2011)

O autor ainda destaca as probabilidades de falha, uma análise simples da árvore de evento é realizada para estimar o fim probabilidade do evento. Observou-se que o cálculo de probabilidade pode conter um certo grau de incerteza. No entanto, isso seria evitado devido à análise relativa. Durante a fase conceitual, as informações para as unidades de processo, parâmetros operacionais, instrumentação e utilidades são escassas, enquanto as informações sobre as reações químicas e propriedades está amplamente disponível portanto, o cenário do acidente ser determinado com base nas propriedades químicas e físicas e probabilidade é obtida diretamente através de fontes disponíveis: a literatura e os dados industriais.

4.6 Estimativa do índice de Controle de Risco

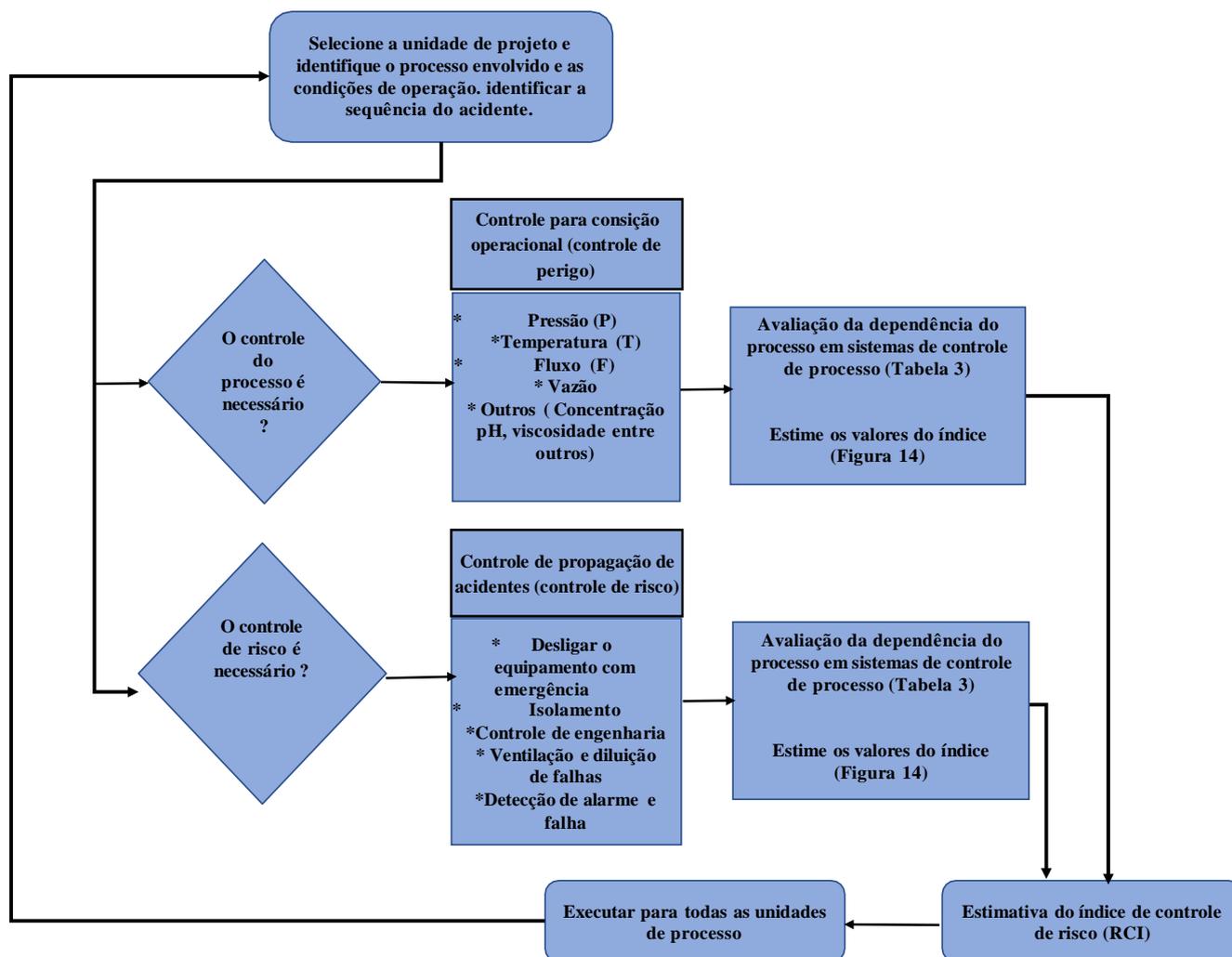
A segurança inerente não é a única abordagem para redução de riscos já que o arranjo hierárquico das estratégias de gerenciamento de risco também destaca a segurança adicional como segunda camada de proteção. A segurança adicional implica a aplicação de ativos e passivos para proteções, sendo necessário quantificar seu efeito sobre a redução dos riscos através de um índice de controle de risco (RCI).

O RCI é uma análise objetiva que tenta quantificar a dependência do processo na redução de riscos por meio de medidas de segurança complementares Figura 15. A análise é realizada de forma semelhante ao índice de controle de processos e perigos no desenvolvimento proposto anteriormente por (KHAN; AMYOTTE, 2004).

A avaliação é realizada considerando a aplicação de medidas de controle complementares ao controle de processos e controle de riscos. O requerimento do controle do processo é avaliado pela primeira vez por medidas de controle de processo, estes são aplicados para manter os parâmetros do processo dentro do padrão.

Qualquer desvio pode causar a criação de uma condição perigosa que eventualmente leva a um acidente grave. Temperatura, pressão, vazão e nível são considerados quatro processos principais parâmetros e o resto são considerados uma categoria. Os controles de risco são aplicados para reduzir os danos subsequentes ou gravidade devido a um evento anormal que é causado por um processo desvio.

Figura 15 Estrutura para estimativa do Índice de Controle de Risco (RCI)



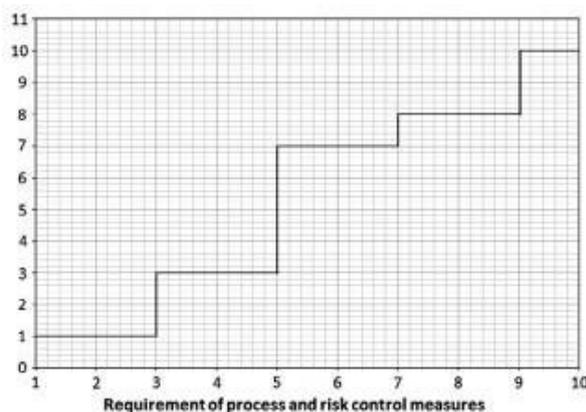
Fonte: Adaptado de Rathnayaka, (2011)

Os controles de risco reduzem a probabilidade de ocorrência de um determinado acidente. Por exemplo, o desligamento de emergência é instalado para ativar sob demanda para isolar a liberação daí o a taxa de liberação é controlada ou cortada e a probabilidade de um acidente catastrófico será reduzida, evitando que os eventos se transformem em um acidente catastrófico. As medidas de controle de risco são categorizadas em cinco grupos distintos para analisar seus requisitos e dependência. Eles são sistema de desligamento de emergência,

isolamento, controle de engenharia, ventilação e diluição, e alarme e falha detecção como conforme proposto por (RATHNAYAKA; KHAN; AMYOTTE, 2011)

A dependência do processo e a exigência de ambos os processos e controle de risco são medidos usando uma escala subjetiva. As palavras-chave para decidir a extensão do requisito de controle e escala associada são apresentados na Figura 16 (KHAN E AMIOTE, 2004, 2005).

Figura 16 Relação gráfica entre requisito de processo e índice de controle de risco x Diretriz para decidir a extensão do requisito de processo e controle de risco.



Guia de palavra	Extensão do requisito
Essencial	1,2
Muito importante	3
Requeridos	4
A exigência é moderada	5
Não muito importante, mas necessário	6
Bom se disponível	7
Requisito não afeta o processo	8
Não requerido	9
	10

Adaptado de Khan and Amyotte (2004)

Os demais dos valores são atribuídos com base no julgamento do analista sobre o requisito dos arranjos de controle. A escala máxima 10 é atribuída se o sistema está equipado com todos os arranjos de controle necessários e a palavra-guia é denominada Não obrigatório, as escalas 1 e 2 são atribuídos se o sistema tiver pouco ou nenhum arranjo de controle.

A escala máxima “10” é atribuída se o sistema está equipado com todos os arranjos de controle necessários e a palavra-guia é denominada “Não obrigatório”. As escalas 1 e 2 são atribuídos se o sistema tiver poucos ou nenhum arranjo de controle. O a palavra-chave para este cenário é “Essencial”. O resto dos valores são atribuídos com base no julgamento do analista sobre o requisito dos arranjos de controle.

A relação entre a extensão do requisito e o índice é desenvolvido. Isso é mostrado graficamente usando a Figura 14. Se o sistema está totalmente equipado com todos os arranjos de controle, isso significa que o sistema não requer mais medidas de segurança adicionais. Portanto, o valor mais alto do índice é atribuído. O mais baixo índice é atribuído se houver pouco ou nenhum arranjo de controle em o sistema. Se isto ocorrer, o sistema requer de aprimoramentos significativo e medidas de segurança para estabelecer a segurança da operação.

4.7 Estimativa do índice de aplicabilidade do design de processos mais seguros e princípios para reduzir a probabilidade de ocorrência de acidentes

A probabilidade de ocorrência de um acidente depende do desempenho e disponibilidade de barreiras de segurança, com uma disposição lógica de barreiras de segurança e possíveis consequências são implantadas para alterar a probabilidade do evento final (acidentes ou incidentes)

Com base nas sequências de acidentes, Rathnayaka; Khan; Amyotte, (2011) menciona quatro estágios principais: liberação, dispersão, ignição e escalonamentos. Então, opções de prevenções podem ser aplicadas para prevenir, mitigar e controlar cada uma dessas etapas, reduzindo a probabilidade de ocorrência. Essas opções de design também reduzem a gravidade das consequências. No entanto, a redução na probabilidade de ocorrência pode variar em cada estágio da sequência do acidente. Portanto, cada fase é avaliada separadamente e, conseqüentemente, combinada.

A significativa aplicabilidade da opção de prevenção de riscos a um sistema de processo é denotada pela palavra-guia 'Aplicável'. Após aplicação da opção escolhida, o usuário decide sobre uma dessas opções de redução de risco casos: perigos moderadamente reduzidos, perigos significativamente reduzidos, e perigos podem ser eliminados. As palavras-chave 'reduzido', 'significativamente reduzido' e 'pode ser eliminado' denotam esses cenários com as pontuações 6, 7 e 8 atribuídas, respectivamente.

A pontuação de aplicabilidade é atribuída respondendo a duas perguntas: (i) até que ponto um determinado princípio prevenção de acidentes e pode ser aplicado ao sistema e (ii) qual redução da probabilidade de ocorrência pode ser obtida. Com base nessas palavras-guia, o usuário desenvolve o cenário para a aplicabilidade e decide a pontuação numérica conforme ilustrado na Tabela 3.

Tabela 3 Diretriz para decidir o índice de aplicabilidade de opções de projeto mais seguros para redução de perigo

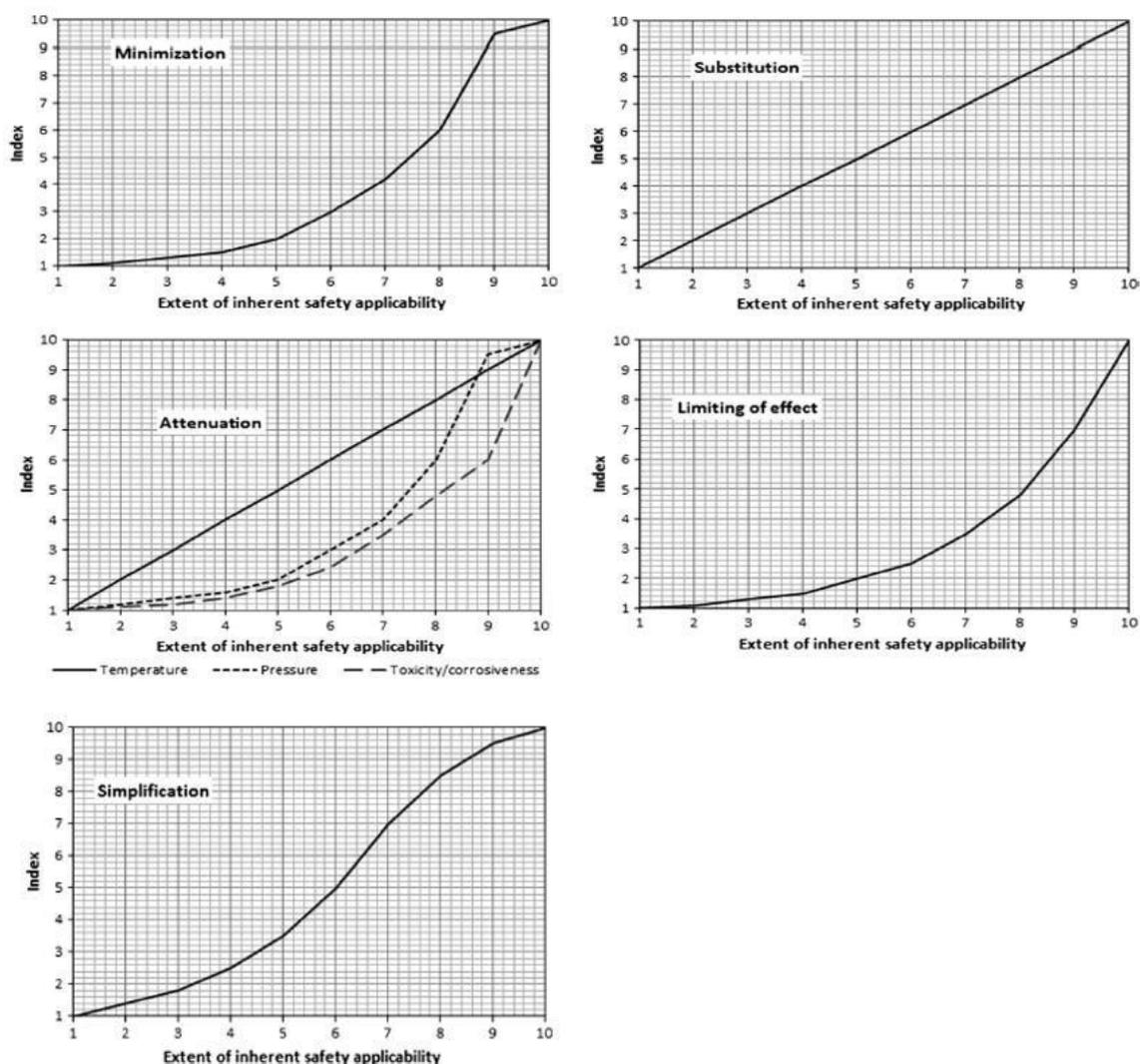
Guia de palavra		Score
Extensão	Perigo	
Não aplicável	Nenhum perigo reduzido ou eliminado	1
Pode ser aplicável	Reduzido 3 Pode ser reduzido	2
Aplicável, mas processo aplicável	Reduzido 5 pode ser reduzido	3
Aplicavel		4
	Pode ser eliminado 8 Significativamente reduzido 7 reduzido	5
		6
		7
Completamente aplicável	Eliminado 10 Significativamente reduzido	8
		9
		10

Fonte: Khan and Amyotte (2004)).

Ainda, a representação gráfica pode ser usada para ilustrar os princípios de prevenção de acidentes em plantas de processo: minimização, substituição, atenuação e limitação de efeitos, além da simplificação, conforme apresentado na Figura 17. Uma vez que a pontuação de aplicabilidade é decidida, as características inerentes relevantes e índices de aplicabilidade de segurança para redução de riscos é localizado. O índice varia de 1 a 10. Índice 1 é o valor mínimo que representa o caso de nenhum processo melhoria ou nenhuma redução de risco no sistema devido à aplicação de opções de aplicação de um Design Inerente Seguro (ISD). Os índices de 2 a 9 representam a gradual incremento da segurança inerente do sistema à medida que os perigos são reduzidos. Índice 10 indica que o sistema está completamente melhorado (por exemplo, o processo é minimizado em grande parte) em termos de segurança inerente e perigos não estão mais presentes no sistema. O índice geral de aplicabilidade de segurança inerente para a i -ésima alternativa é então estimada combinando todos os índices de aplicabilidade usando a Eq. 19

$$a_{H,i} = [(a_{mi})^2 + (a_{su})^2 + [a_{at} \times a_{li}] + (a_{si})^2]^{1/2} \quad (19)$$

Figura 17 Relação gráfica para estimar o índice de disponibilidade de segurança inerente para redução de riscos e prevenção de acidentes



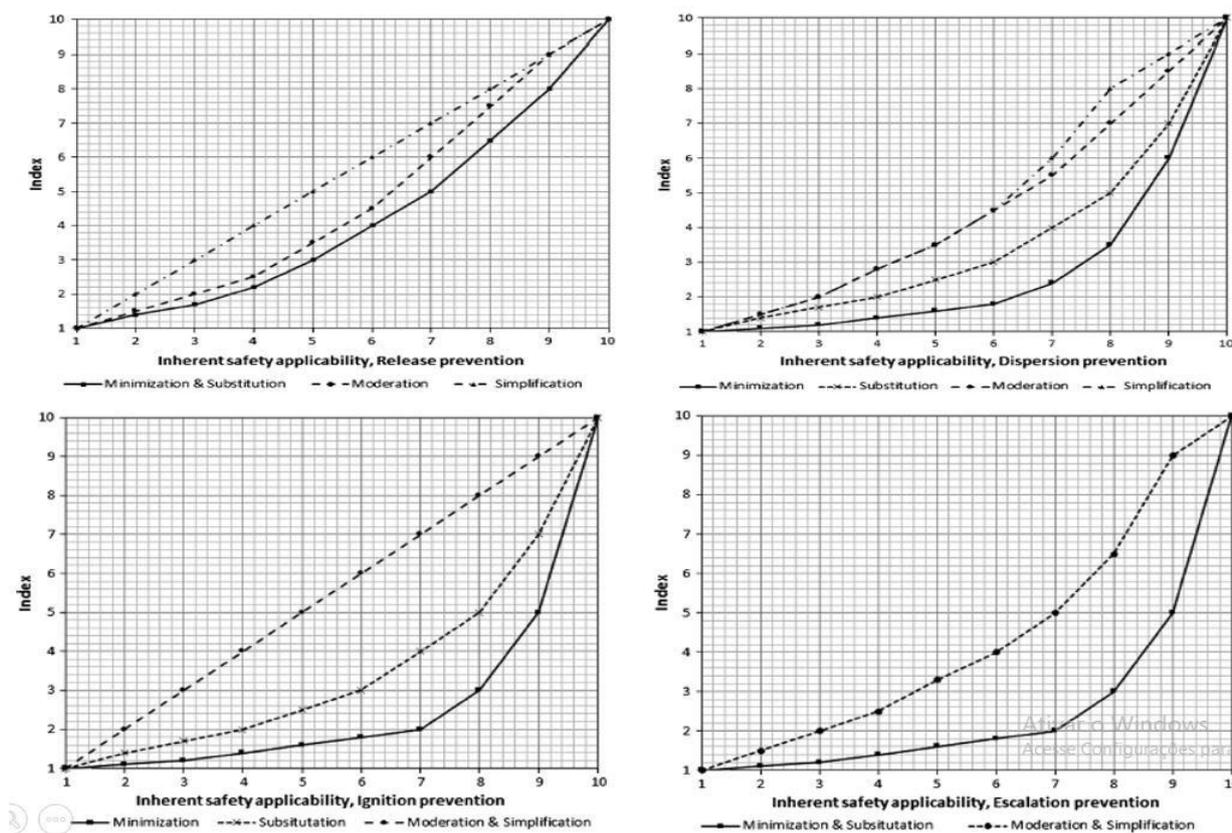
Fonte: Adaptado de Khan and Amyotte (2004).

Semelhante a um cálculo de índice de aplicabilidade de segurança inerente, variando de 1 a 10, gráficos podem ser criados para representar de forma semelhante à estimativa de redução de riscos e índice de aplicabilidade (Figura 18). O valor do índice é decidido considerando como os princípios prevenção reduzem a probabilidade de ocorrência e equilibram o trade-off e conflitos de perigos.

Portanto, mesmo com uma maior pontuação atribuída à um determinado princípio e prevenção de acidentes, o índice inerente de segurança ainda pode ser baixo. Cada índice é interpretado de forma semelhante à estimativa de redução de riscos e índice de aplicabilidade. Para os cálculos, a limitação de opções de projeto mais seguras de efeitos e atenuação são estudados juntos sob o a relação de prevenção. A ‘atenuação’ é o uso de substâncias perigosas

e materiais em condições operacionais mínimas que já foram incorporados durante o processo de redução de riscos, logo, tem insignificante aplicabilidade para redução da probabilidade de ocorrência.

Figura 18 Estimativa do índice de disponibilidade de segurança para redução da probabilidade de ocorrência a_l



Fonte: Adaptado de Khan and Amyotte (2004).

Nas fases posteriores, os autores consideram uma opção de design inerentemente mais segura de moderação para representam a atenuação e a limitação dos efeitos. O índice de aplicabilidade de segurança é estimado para cada cenário de acidente distintamente. A título de ilustração da aplicabilidade de estimativa, o cenário de acidente “fogo” é usado aqui.

Etapa 1: Decida a pontuação para a extensão da aplicabilidade da prevenção do risco de acidentes a opção para reduzir a sequência de acidentes usando palavras-guia (Tabela 3).

Passo 2: Leia os índices de aplicabilidade de cada palavra-guia para reduzir a probabilidade de lançamento (onde $k = 1, 2, 3, 4$ que representam minimização, substituição, moderação e simplificação respectivamente) conforme a Figura (18)

Etapa 3: Estimar o índice de aplicabilidade de segurança inerente para reduzir a probabilidade de ocorrência de liberação das substâncias inflamáveis que podem ser uma das causas prováveis para a prevenção de acidentes usando a Eq. (20).

$$a_{L,re} = [(a_{re})^2 + (a_{re,su})^2 + (a_{re,mo})^2 (a_{re,si})^2]^{1/2} \quad (20)$$

Passo 4: Execute os passos 2 e 3 para todas as fases do acidente sequências: dispersão, ignição e escalada. Etapa 5: Considerando que pelo menos três etapas (liberação, dispersão e ignição) precisam existir para causar um incêndio, o índice geral de aplicabilidade para reduzir a probabilidade de ocorrência de incêndio é derivado tomando a média geométrica dos índices estimados para cada etapa do a sequência do acidente Eq. (21).

Figura 18 Estimativa do índice de disponibilidade de segurança para redução da probabilidade de ocorrência a_l

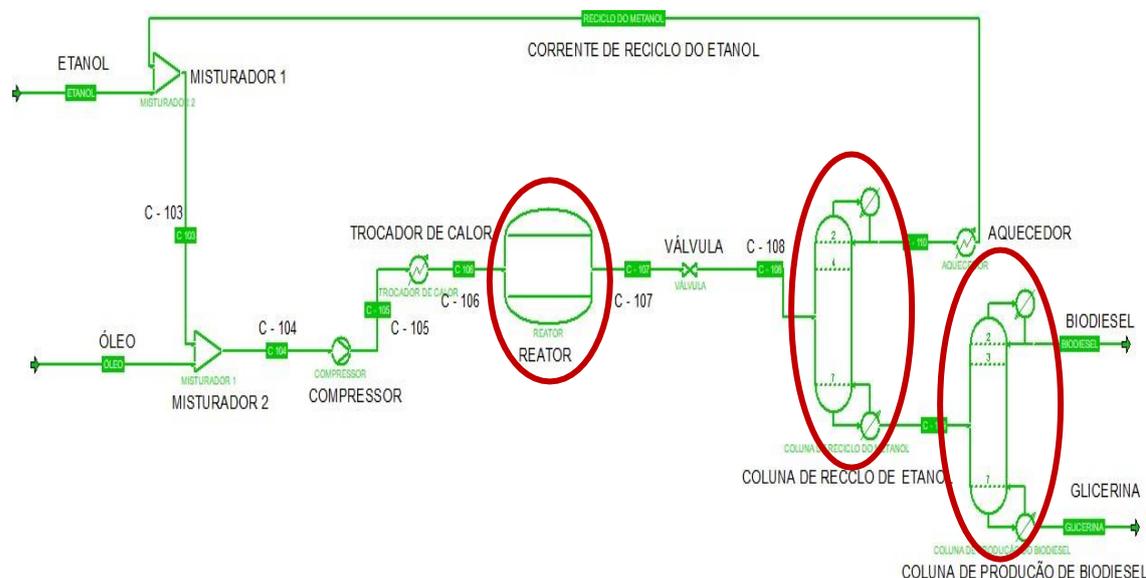
$$a_{L,i} = \left[\prod_{j=1}^{j \geq 3} a_{l,j} \right] \quad (21)$$

onde $j = 1, 2, 3, 4$ representam quatro estágios da sequência do acidente: liberação, dispersão, ignição e escalada, respectivamente.

4.8 Estimativa de risco de projeto básico

No projeto básico, o reator de fluxo é usado para a reação de transesterificação, uma destilação à pressão atmosférica na coluna de destilação é usada para separar o etanol do biodiesel. A Figura 19 ilustra o projeto base com os equipamentos escolhidos (circulados em vermelho). O cenário de acidente credível associado a cada unidade é determinado com base nas condições de operação, propriedades e estado dos materiais. O reator é operado sob alta pressão e temperatura, a concentração de biodiesel, etanol liberado a qualquer momento com a taxa de conversão da reação. A explosão de nuvem de vapor (VCE) é determinado como o mais credível cenário de acidente.

Figura 19 Projeto de processo base utilizado para a estimativa de riscos



Fonte: Esta pesquisa (2022)

Tabela 4 Resumo dos resultados do projeto básico

Descrição	Tipo da Unidade	Cenário de Acidente	Dano do raio (m)	Probabilidade de ocorrência	Índice de controle de risco	Risco (m)
Reator	Unidade envolvendo reações químicas	VCE	265.3	1,34E+00	69	5,17E+00
Coluna de destilação 1	Unidades envolvendo operação física	VCE	66.6	1,53E+00	68	1,49E+00
Coluna de destilação 2	Unidades envolvendo operação física	Incêndio	4.7	1,40E+00	68	9,54E-02

Fonte: Esta Pesquisa (2022)

A explosão de nuvem de vapor é determinado como o cenário mais provável de acidente associado ao reator, A Tabela 4 resume os resultados da análise dos raios de dano para o projeto básico. Para o cálculo do raio de dano para incêndio, o diâmetro é considerado como 5 m. As condições de operação necessários para o cálculo detalhado são obtidos principalmente por meio da simulação do processo realizado no simulador COCO.

Para estimar a probabilidade de ocorrência, o evento principal é escolhido como a liberação de material inflamável. As probabilidades básicas de falha de eventos são estimadas usando o *Offshore Reliability Data Handbook* (OREDA, 2002), (CROWL; LOUVAR, 2002); (UK HSE, 2012), (SAM MANNAN, 2005), (RATHNAYAKA; KHAN; AMYOTTE, 2011).

Considerando a complexidade da operação do processo e as condições de operação, a extensão dos requisitos do processo e as medidas de controle de risco são analisadas

subjetivamente. Por exemplo, assumindo que o reator que está operando sob alta pressão e alta temperatura não tem pressão suficiente e controle de temperatura, a extensão do requisito é descrita como essencial e muito importante.

As recomendações são o resultado mais importante de uma investigação de acidentes. Eles são feitos para evitar a recorrência do acidente específico, mas também são feitos para evitar acidentes semelhantes dentro da empresa e dentro da indústria. O resultado final das investigações de acidentes é a eliminação das causas subjacentes de famílias inteiras de acidentes. Um bom acidente investigação pode evitar centenas de acidentes.

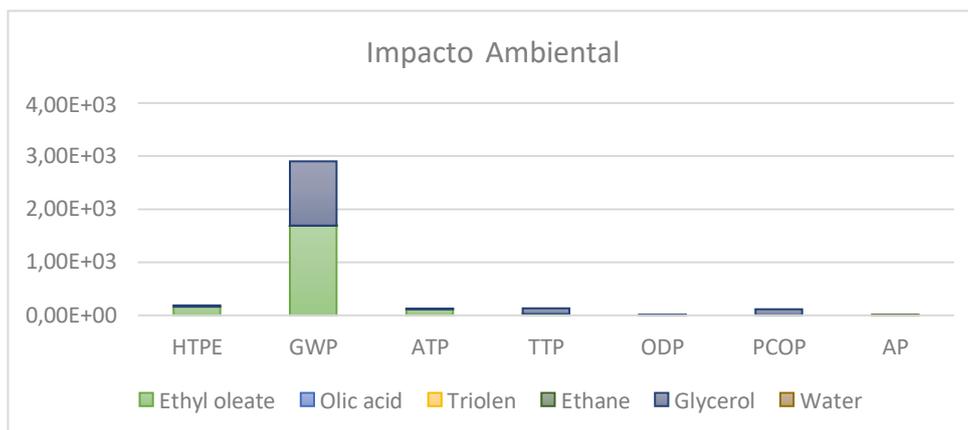
Existem quatro princípios fundamentais que são usados para influenciar a investigação de acidentes recomendações:

1. Faça investimentos em segurança com base no custo e no desempenho. Avalie cada investimento (dinheiro e tempo) para garantir que haja uma verdadeira melhoria de segurança proporcional ao investimento. Se o projetista não for cuidadoso, mudanças no sistema ou novos procedimentos podem adicionar complexidades que resultem em uma situação mais perigosa ao invés de uma melhoria.
2. Desenvolver recomendações para melhorar o sistema de gestão para evitar a existência de riscos de segurança, incluindo treinamento, listas de verificação, inspeções, revisões de segurança e auditorias,
3. Desenvolver recomendações para melhorar a gestão e o suporte da equipe de segurança com o mesmo entusiasmo, atenção, qualidade, planos e organização usados na produção programas.
4. Desenvolver recomendações em camadas com ênfase apropriada nas recomendações eliminar as causas subjacentes dos acidentes.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após analisar os dados estimados pelo WAR Algorithm (Figura 20), observou-se que a categoria que apresenta maior características nocivas ao meio ambiente foi o potencial de aquecimento global, enquanto as matérias primas que mais poluem são o oleato de etila e a glicerina.

Figura 20 Estimativa de Impacto Ambiental



Fonte: Esta Pesquisa (2022)

Em seguida, buscou-se determinar os mecanismos apropriados pelo qual os escores podem ser avaliados para cada um dos 1.600 produtos químicos em cada uma das categorias de impacto. Dados para as quatro categorias globais de impacto atmosférico foram extraídos dos valores publicados por (Heijungs; Guinée, (1992)). Este componente inclui a classificação e modelagem de intervenções ambientais com base dos seus potenciais efeitos ambientais. Aqui o efeito ambiental significa uma consequência das intervenções ambientais devido a processos, conforme observado Na Figura 19 o potencial de aquecimento global possui maior evidência que por sua vez é um exemplo clássico e responsável pelo aumento do efeito estufa na atmosfera.

Exemplos de efeitos ambientais incluem o aumento do efeito estufa, a destruição da camada de ozônio, a acidificação e danos aos ecossistemas. Muitas vezes os efeitos ambientais não podem ser atribuídos inequivocamente a intervenções específicas. A ligação entre as intervenções ambientais e os efeitos ambientais são descritos com modelos que (Heijungs; Guinée, (1992)) ilustra em sua obra publicada em (1992).

Esse modelo é utilizado para interpretar as intervenções ambientais de um produto (ou melhor, uma unidade do produto). Esses modelos indicam como as intervenções ambientais acabam levando a potenciais efeitos ambientais. Os efeitos ambientais descrevem a

contribuição de uma unidade funcional do produto e traz para os problemas ambientais. Isso inclui problemas ambientais como acidificação, destruição da camada de ozônio, etc. Eventualmente, isso resulta no perfil ambiental do produto sob consideração.

Quanto os riscos inerentes a produção do biodiesel o intervalo das pontuações médias por perigo examinado está entre 0 e 5, sendo 5 o pior cenário na tabela A2 (Apêndice A). As pontuações para cada perigo junto com as pontuações do perigo identificado sendo relativamente mais alto e estão ilustrados (Tabelas B1 – B5 apêndice A).

Os perigos que apresentam um maior grau de pontuações nas tabelas B1 – B5 foram identificadas durante o armazenamento de materiais perigosos e o seu uso (manuseio) durante a operação em plantas de produção de biodiesel (3,54 e 3,47) nesses casos, a pontuação alta correspondem ao derramamento de metanol que influencia diretamente na propagação do fogo por se tratar de uma substância inflamável.

Quanto a fase de operação e manuseio em plantas de produção de biodiesel o cenário com a maior pontuação é o de derramamento de metanol por falhas mecânicas no momento de reações no reator o que implica em explosões e inalações de substâncias tóxicas, estes resultados estão de acordo conforme orientação da literatura relativos aos principais tipos de acidentes que foram identificados com incêndios e explosões que podem acontecer durante o processo de produção do biodiesel (CALVO OLIVARES; RIVERA; NÚÑEZ MC LEOD, 2014) e (SALZANO; DI SERIO; SANTACESARIA, 2010a).

À vista disso, Calvo et al. (2014) contribui com esse raciocínio, de que além da etapa de produção do biodiesel, a maiores riscos também que podem ocorrer em áreas de armazenamento, o que está de acordo com o que foi investigado no presente trabalho.

Conforme mencionado anteriormente, a propagação do fogo é muito comum, devido à presença de substâncias inflamáveis. Portanto, altos padrões de segurança devem estar no local durante o armazenamento/transporte de produtos inflamáveis e substâncias perigosas, como o metanol, bem como durante a sua utilização no processo de produção de biodiesel.

Outro cenário que sujeitaram uma pontuação relativamente alta (2,74/5) durante a fase de operação está relacionada aos perigos do contato da pele com H₂SO₄, que pode causar queimaduras se o EPI apropriado não for corretamente utilizado pelo colaborador. Por isso, o uso adequado de EPIs o equipamento também parece ser de grande importância e todos os funcionários devem ser treinados sobre a sua utilização correta.

No que tange à recolha de óleos residuais, as suas pontuações foram menores do que os perigos mencionados, mas ainda assim, eles podem ser considerados alto. Especificamente, a recolha e transporte de óleos residuais rendeu pontuações gerais altas, 2,64 e 2,67, respectivamente. A recolha de óleos residuais pode ser perigosa se ocorrer um incêndio na área de coleta. Este incidente pode acontecer devido ao seu armazenamento em navios não resistentes ao fogo o que pode agravar o incêndio.

No que diz respeito aos perigos relacionados com os fenómenos meteorológicos, o caso atingiu a pontuação máxima de 2,07, que foi o mais baixo em comparação com os escores anteriormente mencionados. Ainda assim, foi realizada uma comparação com os perigos relacionados ao petrodiesel indústria. Ambas as indústrias têm uma produção semelhante, ou seja, biodiesel e diesel, mas não seguem processos semelhantes. No entanto, ambas as indústrias estão enfrentando os mesmos perigos principais, ou seja, incêndios e explosões (Tiwari e Chouske, 2015).

Uma vez que a indústria de petrodiesel é substancialmente mais antiga do que a indústria “nascente” de biodiesel, as políticas e medidas de segurança que foram introduzidas em o primeiro a mitigar esses perigos também poderia ser adotado pelos biocombustíveis (CASSON MORENO; COZZANI, 2015); (SEAY et al., 2017).

Para (DEN HAAN, 2016) ao longo dos anos a indústria de petrodiesel tem enfrentado vários acidentes graves, incluindo a explosão de Toulouse em 2001, o incêndio de Buncefield em 2005 e a explosão da refinaria do Texas em 2005, o que levou a uma maior atenção às causas da tais eventos. Como resultado, várias iniciativas foram tomadas (por exemplo, a Diretiva Europeia Seveso), que resultou em uma alta cultura de segurança e altos padrões de segurança no sector da indústria petrolífera (Parlamento Europeu e Conselho Diretiva, 2012).

Por outro lado, o setor de biocombustíveis é relativamente novo e, portanto, há amplo espaço para melhorias que podem ser implementadas. O seu desenvolvimento quanto aos seus padrões de segurança, perigos identificados neste trabalho mostram que há um risco na produção de biodiesel utilizando como matéria prima óleos residuais bem como, na coleta desse tipo de matéria-prima.

O transporte, armazenamento e uso de produtos perigosos e substâncias inflamáveis como por exemplo o metanol durante a etapa do processamento da matéria prima (produção) esses perigos sugerem que, embora o biodiesel seja menos nocivo que o diesel, a rápida

ascensão da tecnologia dos biocombustíveis não pode lidar com os regulamentos de segurança que estão atualmente em vigor.

Com isso, preocupações quanto aos riscos associados ao rápido aumento de tais tecnologias e a necessidade de introduzir segurança mais robusta, cultura e manejo, semelhantes ao petrodiesel na indústria (CASSON MORENO; COZZANI, 2015).

As probabilidades de falha são usadas para realizar a análise quantitativa. Para ilustração, os eventos básicos para a coluna de destilação 1 da planta analisada o fator causal que leva à nuvem de vapor explosão na coluna de destilação 1 estão listados no apêndice G. As opções de projeto mais seguras que podem ser usadas para reduzir a probabilidade de ocorrência de acidente ou para prevenir ou controlar a propagação de processo de acidente também estão listados na coluna (2) do mesmo apêndice.

A probabilidade de ocorrência de acidente depende muito da falha de barreiras de segurança que se aplicam para prevenir e controlar o acidente aplicação de medidas de segurança inerentes a melhorar o desempenho das barreiras de segurança levam os autores a pensar em uma visão mais ampla das medidas de segurança inerentes, em vez de considerar a definição formal das opções de projetado e processual medidas de segurança necessárias para melhorar a confiabilidade do sistema também estão listados na coluna três ainda no Apêndice G.

A coluna de destilação 2 aumentou ligeiramente mesmo após a aplicação de medidas de segurança. A temperatura de operação da destilação da coluna 2 aumentou significativamente em comparação com o desenho básico. Isso leva ao aumento da penalidade devido a temperatura, portanto o raio de dano é aumentado.

Os resultados indicam claramente que a aplicação de medidas de segurança reduziu a probabilidade de ocorrência de VCE e incêndios associado a unidades estudada, os índices de controle de risco da é estimado de forma semelhante ao projeto base. É notado que os RCIs são estimados em 62, 73 e 73 para o Reator, destilação coluna 1 e coluna de destilação 2, respectivamente.

Uma ferramenta adequada é necessária para avaliar a segurança inerente de um sistema, e, posteriormente, para melhorar a segurança do processo usando os princípios prevenção durante todo o ciclo de vida do projeto do processo. O inerente integrado *Safety Index* (I2SI), desenvolvido pela primeira vez por Khan e Amyotte (2004, 2005), suporta efetivamente a implementação de segurança inerente como uma ferramenta quantitativa.

No entanto, o I2SI está limitado a executar apenas testes de redução de riscos. Como os princípios ISD podem ser aplicados a perigos e probabilidades redução, o Índice de Segurança Inerente Baseado em Risco (RISI) é proposto, incorporando a capacidade de redução de riscos usando recursos inerentemente mais seguros opções de projeto. O RISI consiste em duas estimativas de risco: projeto base risco e risco de segurança inerente. A estimativa de risco envolve tanto estimativas subjetivas e objetivas. A indexação proposta é uma abordagem demonstrada pela aplicação a um estudo de caso.

6 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, uma planta de produção de biodiesel foi avaliada por meio de simulação computacional utilizando o software COCO para a modelagem e design do processo. Neste caso, a avaliação ambiental foi realizada a partir do algoritmo WAR para monitorar (estimar) o desempenho do processo estudado. Adicionalmente, foram estimados os riscos inerentes a este processo através de dados atuais disponíveis na literatura, demonstrando a importância em monitorar e acompanhar de maneira preventiva as operações industriais que detêm alto riscos operacionais e perigosas.

Do ponto de vista de gestão, as políticas públicas desempenham um papel importante no desenvolvimento da bioenergia e comércio. Em vários países o uso de biomassa é promovido por políticas e incentivos nacionais. A demanda por bioenergia é crescente devido às políticas climáticas de vários países que buscam estratégias para a redução das emissões de gases de efeito estufa. A expansão dos biocombustíveis é uma das ações resultantes dessas políticas para o cumprimento acordos internacionais.

De modo geral, observa-se que no ambiente e, especialmente no social, as dimensões da sustentabilidade são mal avaliadas em relação à produção de combustíveis fósseis. De fato, muitas análises focam na substituição dos derivados fósseis por um biocombustível biodegradável a fim de mitigar ou minimizar as poluições atmosféricas. Entretanto, a utilização de oleaginosas comestíveis é sensível levando-se em consideração os aspectos econômicos e sociais, pois o mercado é vulnerável a oscilações onde os preços dos alimentos afetam a produção de biocombustíveis e ambos afetam as pessoas. Ainda, as partes interessadas deste processo envolvem pequenos e grandes agricultores, em no caso da soja, girassol, algodão, amendoim, onde nem todos possuem o mesmo interesse, sendo representados por diferentes ministérios e vontade política por meio de incentivos. Portanto, a aplicação de indicadores de sustentabilidade social envolve inevitavelmente decisões políticas. O objetivo é desenvolver um processo democrático essencial para a sustentabilidade e estabelecer um conjunto de critérios de sustentabilidade para as matérias primas que, possivelmente, suprem a necessidade de alimentos as famílias mais carentes.

Quanto aos riscos de acidente/incidentes em plantas de processos, observa-se que os dados podem ser adotados de forma útil por um seguimento de saúde e segurança do trabalho para desenvolver avaliação de risco qualitativa ou quantitativa. O conjunto completo de dados de acidentes mostra que o risco do processo de biodiesel está relacionado principalmente a incêndios e explosões de metanol ou etanol. Logo, diversas operações que envolvem grande uso de produtos

químicos e grande consumo de energia são necessários para a purificação de produtos de transesterificação. Esses problemas são principalmente relacionados ao uso de catalisadores homogêneos, que não são fáceis de remover dos produtos da reação. No entanto, em uma análise mais aprofundada, é necessária a comparação da segurança de processos a fim de garantir uma operação mais confiável e consequentemente prevenindo a integridade física dos colaboradores bem como, desastres catastróficos do ponto de vista ambiental com fortes reagentes e produtos químicos inflamáveis. Ainda, é importante destacar que existem também outras ferramentas disponíveis na mídia e na internet podem ser utilizadas e que bancos de dados público ou comerciais não necessitam ser a única fonte de informação relacionadas às lições aprendidas e as análises do histórico de casos.

Finalmente, comenta-se que grande parte dos acidentes analisados poderiam ter sido evitados ou mitigados, melhorando cultura de segurança e, em particular, a competência de segurança e o treinamento de operadores. A transferência do conhecimento existente sobre os processos perigosos e a preparação de diretrizes específicas para gerenciamento de segurança e projeto seguro de instalações de produção de biodiesel podem contribuir para apoiar a melhoria da cultura de segurança.

REFERÊNCIAS

ABBASI, T.; ABBASI, S. A. **Dust explosions-Cases, causes, consequences, and control.** *Journal of Hazardous Materials*, 9 fev. 2007.

AICHE TECHNICAL MANUAL. **Dow's Chemical Exposure Index Guide, first ed. Published by the American Institute of Chemical Engineers.**

AKKARAWATKHOOSITH, N. et al. Evaluation on safety and energy requirement of biodiesel production: Conventional system and microreactors. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 132, p. 294–302, 1 dez. 2019.

ALLAH, F. U. M.; BICA, M.; TUTUNEA, D. Biodiesel Production and Sustainability Challenge. Em: [s.l: s.n.]. p. 217–224.

ANWAR, M. Biodiesel feedstocks selection strategies based on economic, technical, and sustainable aspects. **Fuel**, v. 283, 1 jan. 2021.

ASSAEL, K. E. K. **By Marc J. Assael, Konstantinos E. Kakosimos.** [s.l: s.n.].

BAROZZI, M. et al. Application of an enhanced version of recursive operability analysis for combustible dusts risk assessment. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 9, 1 maio 2020.

BARRETT, W. M.; VAN BATEN, J.; MARTIN, T. Implementation of the waste reduction (WAR) algorithm utilizing flowsheet monitoring. **Computers and Chemical Engineering**, v. 35, n. 12, p. 2680–2686, 14 dez. 2011a.

BARRETT, W. M.; VAN BATEN, J.; MARTIN, T. Implementation of the waste reduction (WAR) algorithm utilizing flowsheet monitoring. **Computers and Chemical Engineering**, v. 35, n. 12, p. 2680–2686, 14 dez. 2011b.

CALVO OLIVARES, R. D.; RIVERA, S. S.; NÚÑEZ MC LEOD, J. E. Database for accidents and incidents in the biodiesel industry. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 29, n. 1, p. 245–261, 2014.

CALVO OLIVARES, R. D.; RIVERA, S. S.; NÚÑEZ MC LEOD, J. E. Database for accidents and incidents in the fuel ethanol industry. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 38, p. 276–297, 1 nov. 2015.

CARDONA, C. A.; MARULANDA, V. F.; YOUNG, D. Analysis of the environmental impact of butylacetate process through the WAR algorithm. **Chemical Engineering Science**, v. 59, n. 24, p. 5839–5845, dez. 2004.

CASSON MORENO, V. et al. Major accident hazard in biodiesel production processes. **Safety Science**, v. 113, p. 490–503, 1 mar. 2019.

CASSON MORENO, V.; COZZANI, V. Major accident hazard in bioenergy production. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 35, p. 135–144, 1 maio 2015.

CC PRODANOV, E. D. F. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico.** 2^o ed. Rio Grande do Sul : [s.n.].

COPELLI, S. et al. A predictive model for the estimation of the deflagration index of organic dusts. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 126, p. 329–338, 1 jun. 2019.

CORACH, J.; SORICHETTI, P. A.; ROMANO, S. D. Electrical and ultrasonic properties of vegetable oils and biodiesel. **Fuel**, v. 139, p. 466–471, 1 jan. 2015.

CROWL, D. A.; LOUVAR, J. F. **Chemical process safety : fundamentals with applications**. [s.l.] Prentice Hall PTR, 2002.

DELVOSALLE, C. et al. ARAMIS project: A comprehensive methodology for the identification of reference accident scenarios in process industries. **Journal of Hazardous Materials**, v. 130, n. 3 SPEC. ISS., p. 200–219, 31 mar. 2006.

DEN HAAN. **Concawe's Science Executive, Downstream Oil Industry Safety Statistics for**. [s.l: s.n.].

DUMITRESCU, A. M.; BANU, I.; BUMBAC, G. Process modeling and simulation for butanol removing from fermentation broth by extraction with biodiesel. **Renewable Energy**, v. 131, p. 137–143, 1 fev. 2019.

ECKHOFF, R. K. **Explosion hazards in the process industries**. [s.l.] Gulf Pub, 2005.

ECKHOFF, R. K. Differences and similarities of gas and dust explosions: A critical evaluation of the European “ATEX” directives in relation to dusts. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 19, n. 6, p. 553–560, nov. 2006.

FANGFANG, F.; ALAGUMALAI, A.; MAHIAN, O. Sustainable biodiesel production from waste cooking oil: ANN modeling and environmental factor assessment. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 46, 1 ago. 2021.

FAZAL, M. A. et al. Biodiesel degradation mechanism upon exposure of metal surfaces: A study on biodiesel sustainability. **Fuel**, v. 310, 15 fev. 2022.

GAO, X. et al. Developing friendlier biodiesel production process via systematic inherent safety interventions. **Journal of Cleaner Production**, v. 308, 25 jul. 2021.

GERALDES CASTANHEIRA, É. et al. Environmental sustainability of biodiesel in Brazil. **Energy Policy**, v. 65, p. 680–691, fev. 2014.

GIL, A. C. **Como elaborar projeto de pesquisa**. 6^o ed ed. São Paulo : [s.n.].

GONZÁLEZ-DELGADO, A. D.; GARCÍA-MARTÍNEZ, J. B.; BARAJAS-SOLANO, A. F. Evaluation of algae-based biodiesel production topologies via inherent safety index (Isi). **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 6, 2 mar. 2021.

GUNTHER, M. **Wildlife populations around the world see ‘catastrophic’ falls**. [s.l: s.n.].

HADIYANTO, H. et al. Multi-feedstock biodiesel production from esterification of Calophyllum inophyllum oil, castor oil, palm oil, and waste cooking oil. **International Journal of Renewable Energy Development**, v. 9, n. 1, p. 119–123, 1 fev. 2020.

HASIBUAN, S.; THAHEER, H.; JULIZA, H. **Life Cycle Impact Assessment of Palm Biodiesel Production towards the Sustainability of Downstream Industry of**

Indonesia Palm Oil. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **Anais...**Institute of Physics Publishing, 29 nov. 2018.

HEIJUNGS, REINOUT.; GUINÉE, J. B. **Environmental life cycle assessment of products.** [s.l.] Centre of Environmental Science, 1992.

HENDERSHOT, D. C. **PII:SO950-4230(%)00055-1 Inherently safer chemical process design*Process Ind.** [s.l.] Elsevier Science Ltd, 1997.

IEA. **International Energy Agency.**

ISHOLA, F. et al. Biodiesel production from palm olein: A sustainable bioresource for Nigeria. **Heliyon**, v. 6, n. 4, 1 abr. 2020.

JANGRE, J. et al. Sustainability assessment of waste cooking oil-based biodiesel plant in developing economy based on F-DEMATEL and F-ISM approaches. **Waste Management and Research**, v. 40, n. 11, p. 1645–1659, 1 nov. 2022.

JB TURRIONI, C. M. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção: estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas.** Unifei, 2012 ed. Itajubá: [s.n.].

JOLLIET, O. et al. **IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology.** **International Journal of Life Cycle Assessment**Springer Verlag, , 2003.

JRC, D. **Analysis of existing environmental impact assessment methodologies for use in life cycle assessment.** [s.l: s.n.].

KAMENOPOULOS, S. N.; TSOUTSOS, T. Assessment of the safe operation and maintenance of photovoltaic systems. **Energy**, v. 93, p. 1633–1638, 2015.

KHAN, F. I.; AMYOTTE, P. R. Integrated inherent safety index (I2SI): A tool for inherent safety evaluation. **Process Safety Progress**, v. 23, n. 2, p. 136–148, jun. 2004.

KHAN, F. I.; HUSAIN, T.; ABBASI, S. A. Safety weighted hazard index (SWeHI). A new, user-friendly tool for swift yet comprehensive hazard identification and safety evaluation in chemical process industries. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 79, n. 2, p. 65–80, 2001.

KIKSTRA, J. S. et al. Climate mitigation scenarios with persistent COVID-19-related energy demand changes. **Nature Energy**, v. 6, n. 12, p. 1114–1123, 1 dez. 2021.

KLEMEŠ, J. et al. **Sustainability in the Process Industry: Integration and Optimization (Green Manufacturing & Systems Engineering).** [s.l: s.n.].

LEONETI, A. B. et al. The methylic versus the ethylic route: considerations about the sustainability of Brazilian biodiesel production. **Environment, Development and Sustainability**, v. 19, n. 2, p. 637–651, 1 abr. 2017.

LI, P. et al. Sustainability evaluation of microalgae biodiesel production process integrated with nutrient close-loop pathway based on emergy analysis method. **Bioresource Technology**, v. 346, 1 fev. 2022.

LIM, C. H. et al. A diverse and sustainable biodiesel supply chain optimisation model based on properties integration. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 20, p. 1–18, 2 out. 2020.

LIU, Y. et al. Economic evaluation and production process simulation of biodiesel production from waste cooking oil. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, v. 4, 1 jan. 2021.

LÔBO, I. P. et al. **BIODIESEL: PARÂMETROS DE QUALIDADE E MÉTODOS ANALÍTICOS**Quim. Nova. [s.l: s.n.].

LUYBEN, W. L. Control of a train of distillation columns for the separation of natural gas liquid. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 52, n. 31, p. 10741–10753, 7 ago. 2013.

MA MARCONI. **Fundamentos de metodologia científica**. 5^o ed. São Paulo, 2003: [s.n.].

MARTA, H. et al. **The election of edible and non edible crop for biodiesel feedstock in Indonesia with AHP-BCR and GC analysis** Separation and identification of fatty acid in triacylglycerol isolated from *Calophyllum inophyllum* oil View project Rumen Microorganism View project **The election of edible and non edible crop for biodiesel feedstock in Indonesia with AHP-BCR and GC analysis/ Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/336847556>>.

MARTICORENA, A. A.; MANDAGARÁN, B. A.; CAMPANELLA, E. A. Análisis del impacto ambiental de la recuperación de metanol en la producción de biodiesel usando el algoritmo de reducción de desechos WAR. **Informacion Tecnologica**, v. 21, n. 1, p. 23–30, 2010.

MAT ARON, N. S. et al. Sustainability of the four generations of biofuels – A review. **International Journal of Energy Research**, v. 44, n. 12, p. 9266–9282, 10 out. 2020.

MONCADA B, J.; ARISTIZÁBAL M, V.; CARDONA A, C. A. Design strategies for sustainable biorefineries. **Biochemical Engineering Journal**, v. 116, p. 122–134, 15 dez. 2016.

MOTA, C. J. A.; GONÇALVES, C. X. A. C. **Gliceroquímica: novos produtos e processos a partir da Glicerina de produção de biodiesel**Quim. Nova. [s.l: s.n.].

NGUYEN, T. A. et al. Inclusive impact assessment for the sustainability of vegetable oil-based biodiesel - Part II: Sustainability assessment of inedible vegetable oil-based biodiesel in Ha Long Bay, Vietnam. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 173–188, 1 dez. 2017.

OLIVEIRA, T.; GOUVÊA, E. P.; MAYUMI, A. **UM ESTUDO DE MATÉRIAS-PRIMAS PARA FABRICAÇÃO DE BIODIESEL**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.faceq.edu.br/regs>.

OREDA. **Offshore Reliability Data Handbook**. SINTEF Industrial Management. Det Norske Veritas, Norway. [s.l: s.n.].

OUATTARA, A. et al. Economic and environmental strategies for process design. **Computers and Chemical Engineering**, v. 36, n. 1, p. 174–188, 10 jan. 2012.

OUATTARA, A. et al. Economic and environmental impacts of the energy source for the utility production system in the HDA process. **Energy Conversion and Management**, v. 74, p. 129–139, 2013.

PACHECO, J. R. et al. Biodiesel production through Non-Conventional supercritical Routes: Process simulation and technical evaluation. **Energy Conversion and Management**, v. 251, 1 jan. 2022.

PALANIAPPAN, C.; SRINIVASAN, R.; TAN, R. Expert system for the design of inherently safer processes. 1. Route selection stage. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 41, n. 26, p. 6698–6710, 25 dez. 2002.

PALTRINIERI, N. et al. Dynamic Procedure for Atypical Scenarios Identification (DyPASI): A new systematic HAZID tool. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 26, n. 4, p. 683–695, jul. 2013.

PASHA, M. K. et al. **An overview to process design, simulation and sustainability evaluation of biodiesel production**. **Biotechnology for Biofuels** BioMed Central Ltd, , 1 dez. 2021.

PATNAIK, R.; MALLICK, N. **Microalgal Biodiesel Production: Realizing the Sustainability Index**. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology** Frontiers Media S.A., , 28 maio 2021.

PETRESCU, L.; CORMOS, C. C. Waste reduction algorithm applied for environmental impact assessment of coal gasification with carbon capture and storage. **Journal of Cleaner Production**, v. 104, p. 220–235, 1 out. 2015.

PINHO, T.; SOUZA, C. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA P P E Q PPEQ-Programa de Pós-graduação em Engenharia Química PRODUÇÃO DE BIODIESEL VIA ROTA ETÍLICA POR DESTILAÇÃO REATIVA, EXTRATIVA E ABSORTIVA: UMA COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL**. [s.l: s.n.].

PÓŁKA, M. An analysis of flammability and explosion parameters of coke dust and use of preliminary hazard analysis for qualitative risk assessment. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 10, 1 maio 2020.

RAHMAN, M.; HEIKKILÄ, A. M.; HURME, M. **Comparison of inherent safety indices in process concept evaluation**. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**. **Anais...** jul. 2005.

RAMOS, M. et al. **Biodiesel production processes and sustainable raw materials**. **Energies** MDPI AG, , 20 nov. 2019.

RATHNAYAKA, S.; KHAN, F.; AMYOTTE, P. SHIPP methodology: Predictive accident modeling approach. Part I: Methodology and model description. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 89, n. 3, p. 151–164, maio 2011.

ROBERTS, A. F. **Thermal Radiation Hazards from Releases of LPG from Pressurised Storage** **Fire Safety Journal**. [s.l: s.n.].

RODÓ, X. et al. **Changing climate and the COVID-19 pandemic: more than just heads or tails.** *Nature Medicine* Nature Research, , 1 abr. 2021.

SALZANO, E.; DI SERIO, M.; SANTACESARIA, E. Emerging risks in the biodiesel production by transesterification of virgin and renewable oils. *Energy and Fuels*, v. 24, n. 11, p. 6103–6109, 18 nov. 2010a.

SALZANO, E.; DI SERIO, M.; SANTACESARIA, E. Emerging risks in the biodiesel production by transesterification of virgin and renewable oils. *Energy and Fuels*, v. 24, n. 11, p. 6103–6109, 18 nov. 2010b.

SAM MANNAN. **Lee's Loss Prevention in the Process Industries.** [s.l: s.n.]. v. 3^o vol

SANTANA, R. R. et al. FLOWCHART MONITORING FOR THE DEVELOPMENT OF SUSTAINABLE PROCESSES USING THE WASTE REDUCTION ALGORITHM IN A NATURAL GAS PRODUCTION PLANT. *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, v. 15, n. 1–2, p. 25–36, 25 jun. 2021.

SEAY, J. et al. Analysis of accident data for the bioenergy sector based on second generation feedstocks. *Chemical Engineering Transactions*, v. 57, p. 781–786, 2017.

SHEHU, B. G.; CLARKE, M. L. **Successful and sustainable crop based biodiesel programme in Nigeria through ecological optimisation and intersectoral policy realignment.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Elsevier Ltd, , 1 dez. 2020.

SILALAH, F. T. R.; SIMATUPANG, T. M.; SIALLAGAN, M. P. **Biodiesel produced from palm oil in Indonesia: Current status and opportunities.** *AIMS Energy* AIMS Press, , 2020.

TURETTA, A. P. D. et al. **Corrigendum to “A framework proposal for sustainability assessment of sugarcane in Brazil” [Land Use Policy 68 (2017) 597–603] (S0264837717304118) (10.1016/j.landusepol.2017.08.011).** *Land Use Policy* Elsevier Ltd, , 1 mar. 2018.

UK HSE. **Failure Rate and Event Data for Use Within Risk Assessment.** [s.l: s.n.].

UPPALAPATI, S. et al. A comparative assessment on life cycle analysis of the biodiesel fuels produced from soybean, Jatropha, Calophyllum inophyllum, and microalgae. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, v. 44, n. 2, p. 3253–3272, 2022.

VIEIRA GONÇALVES, R. **PROJETO AUXILIADO POR COMPUTADOR DE PROCESSOS INDUSTRIAIS SUSTENT´AVES SUSTENT´AVES USANDO OS SOFTWARES COCO E SCILAB.** [s.l: s.n.].

VIEIRA GONCALVES, R. et al. Optimization of a Computer Simulated Styrene Plant by Surface Response and Environmental Impact Evaluation. *Chemical Product and Process Modeling*, 2019.

WEISER, A. et al. Towards a more sustainable metal use – Lessons learned from national strategy documents. *Resources Policy*, v. 68, 1 out. 2020.

WU, Y. C.; LAIWANG, B.; SHU, C. M. Process loss prevention of petrochemical process: A case study of the flashing accident of the storage tank on acrylonitrile-butadiene-

styrene powder in Taiwan. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 69, 1 mar. 2021.

YOUNG, D. M.; CABEZAS, H. **Designing sustainable processes with simulation: the waste reduction (WAR) algorithm** **Computers and Chemical Engineering**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/compchemeng>.

ZHANG, L.; BAI, W. Sustainability of crop-based biodiesel for transportation in China: Barrier analysis and life cycle ecological footprint calculations. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 164, 1 mar. 2021.

APÊNDICE A - PERIGOS RELACIONADOS À OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE UMA USINA DE BIODIESEL

Tabela A 1 Amostra do evento, matriz de probabilidades - Perigos relacionados à operação e manutenção de uma usina de biodiesel

Evento (1)	Condição (2)	Resultado (3)	Probabilidade (4) A, B, C, D	Gravidade (5) I, II, III, IV	Peso (6) de 0 a 05
Derramamento de metanol durante a alimentação do reator	Condições ideais de ignição	Explosão de fogo			
Deposição de glicerol/águas residuais (metanol, catalisador) em água e explosão de reagentes	Sistema insuficiente de de tratamento de efluentes, falha no sistema de controle de reações (ex: Temperatura, pressão) o não uso de EPI's falta de treinamento adequado para os operadores e falha no reator.	Poluição ambiental, riscos para a saúde humana, queimaduras na pele e danos em equipamentos			
Contato da pele com H ₂ SO ₄		Queimaduras na pele			
Derramamento de metanol durante a reação	Falta de capacitação dos operadores na utilização de extintores	Explosão de fogo			
Potencial incêndio em instalações de biodiesel		Incêndio se alastrando em casas e meio ambiente			
Soldagens de vasos que contem inflamáveis (Metanol)	Presença de metanol e resíduos	Explosão, inalação de compostos e substâncias tóxicas			

APÊNDICE A - PERIGOS RELACIONADOS À OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE UMA USINA DE BIODIESEL

Tabela A2 Scores dos perigos alternativos

	Evento	Condição	Resultado	Média (n = 9)	Desvio padrão	Tabela
Coleta de óleos residual	Indícios de incêndio ao redor da área	Armazenagem em embarcações não resistente ao fogo	Agravamento de Incêndios	2.64	1.50	B 1
Transporte de óleo residual	Acidênte de carro durante a transferência do óleo	Violação das regras de transito	Deposição de óleos nas ruas	2.67	1.20	B 2
Substância	Explosão e derramamento de metanol	Presença de muitas substância inflamáveis	Propagação do fogo	3.54	1.33	B 3
Armazenagem	Derramamento de metanol durante a alimentação do reator			3.47	1.27	B 4
Operação da usina de biodiesel	Contato da pela com H2SO4	Falha mecânica, Falta de treinamento dos operadores e falta de utilização de Epi's	Explosão, inalação de substâncias tóxicas e queimaduras na pele	2.74	1.28	B 4
Tremores	Relâmpago	Sistemas de proteção inadequado das condições meteorológicas	Destruição das instalações	2.04	1.73	B 5

APÊNDICE A - PERIGOS RELACIONADOS À OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE UMA USINA DE BIODIESEL

Tabela B1 Perigos relacionados a coleta de óleos residuais

Significância	2.64	1.8	0.84	1.79	1.86	1.51
9	0.1	1.2	0.3	0.30	0	0
8	4.5	4.25	0.45	1	0.2	0.5
7	2.4	2.4	0.8	3	2.4	4
6	1.5	2.1	2.5	2.8	1	1.2
5	2.5	2.5	2	1.5	2.5	2.5
4	1.5	0.9	0.1	1	0.2	1
3	4	2	1	4	5	3
2	4.5	0.3	0.3	2.4	3.2	0.6
1	2.8	0.6	0.3	2.4	3.2	0.6
Resultados	Agravamento do potencial de incêndios devido a inflamáveis	Feridos devido a deslizamentos	Contatos com roupas/pele	Água da terra/poluição	Causas de fogo	Problemas no tratamento do óleo
Condição	Armazenar em inflamáveis recipientes (por ex. lixeiras)				Falta de conscientização do Público	Falta de conscientização do Público
Evento	Fogo na área	Vazamento de óleo dos recipientes de coleta			Descarte de materiais inflamáveis no depósito de lixo	Descarte de materiais perigosos no depósito de lixo

APÊNDICE A - PERIGOS RELACIONADOS À OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE UMA USINA DE BIODIESEL

Tabela B2 Perigos relacionados ao transporte de óleos residuais

Significância	1.96	2.67	1.62	1.92	1.55
9	0.10	4.50	0.60	0.60	0.60
8	3.75	4.00	1.50	0.60	0.30
7	2.40	2.40	2.40	2.40	3.00
6	0.80	1.60	1.60	2.40	0.70
5	2.00	2.00	2.00	2.00	1.50
4	1.00	2.50	2.00	1.50	2.00
3	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
2	1.80	1.20	0.20	1.00	0.40
1	1.80	1.80	0.30	2.80	1.50
Resultados	Agravamento de um potencial incêndio devido a óleos inflamáveis	Despejamento de óleos em ruas	Acidente de carro	Acidente de carro devido a estradas escorregadias	Armazenamento de óleo no aquífero
Condição	Qubrando as regras de transito		Carga grande no veículo	Desvio de conduta do caminhão	
Evento	Acidente de carro durante a transferência de óleo		Curva acentuada no veículo	Vazamento de óleo no caminhão	

APÊNDICE A - PERIGOS RELACIONADOS À OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE UMA USINA DE BIODIESEL

Tabela B3 - Perigos relacionados ao armazenamento de substâncias

Significância	2.42	2.94	3.38	3.54	2.86	2.30	2.69
9							
8	2.75	2.20	3.75	4.75	1.00	0.01	1.01
7	4.50	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
6	2.10	2.70	2.70	0.90	0.80	0.60	0.90
5	2.00	2.00	2.00	2.50	2.50	2.00	2.00
4	2.80	1.50	3.60	2.40	2.40	2.10	2.10
3	3.00	4.00	3.00	4.00	4.00	4.00	4.00
2	1.80	4.00	4.00	4.00	4.00	2.10	3.30
1	0.4	2.10	3.00	3.20	3.20	3.20	3.20
Resultados	Lesão de funcionários	Agravamento de fogo	Inalação de substâncias tóxicas	Propagação do fogo	Explosão por fogo	Explosão por fogo	Explosão por fogo
Condição	Vazamento de óleo de cozinha usado	Existência de perigo por substâncias inflamáveis		Presença de substâncias inflamáveis	Fonte de combustão (Por ex: carga estática)	Longo período de storin	Danos no tanque de armazenamento
Evento	Local escorregadio	Incêndio no local de armazenamento		Explosão por vazamento de metanol	Vazamento de metanol	Mudança na composição do biodiesel e liberação de composições inflamáveis	Vazamento de vapor de substâncias inflamáveis

APÊNDICE A - PERIGOS RELACIONADOS À OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE UMA USINA DE BIODIESEL

Continuação Tabela B3

Significância	2.16	2.19	2.86
9			
8	0.80	0.80	4.25
7	4.00	4.00	3.20
6	0.90	0.90	2.00
5	2.00	2.00	2.50
4	1.80	1.00	3.60
3	3.00	4.00	3.00
2	2.40	2.40	1.50
1	2.40	2.40	2.80
Resultado	Explosão	Explosão	Queimaduras
Condição	Vazamento de NaOH e equipamentos inadequados	Vazamento de H ₂ SO ₄ e equipamentos inadequados	Falha no uso ou P.P.E.
Evento	Liberação de hidrogênio devido ao contato de NaOH no metal	Liberação de hidrogênio devido ao contato de H ₂ SO ₄ no metal	Contato de cáusticos (NaOH, KOH) com a pele

APÊNDICE A - PERIGOS RELACIONADOS À OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE UMA USINA DE BIODIESEL

Tabela B4 Perigos relacionados à operação e manutenção em plantas de biodiesel

Significância	3.47	2.50	2.74	2.50	2.54	2.24	3.12
9							
8	4.75	1.60	4.75	1.50	5.00	3.40	2.85
7	4.00	4.00	3.60	4.00	4.00	4.00	4.00
6	1.00	1.00	1.00	0.80	0.80	0.60	1.80
5	2.00	2.00	2.00	2.00	1.50	2.00	2.00
4	4.00	1.00	3.60	2.70	0.40	0.60	4.00
3	4.00	4.00	3.00	3.00	4.00	3.00	5.00
2	4.00	3.20	1.20	2.80	1.80	1.50	3.20
1	4.00	3.20	2.80	3.20	2.80	2.80	2.10
Resultado	Incêndio, explosão	Queimaduras na pele, Danos por equipamentos	Queimaduras na pele	Incêndio, explosão	Explosão, Inalação de compostos tóxicos	Queimaduras na pele	Ferimentos
Condição	Condições ideais de ignição	Falha no sistema de controle de condições de reações ex: (pressão, temperatura).	Falta de treino para os operadores e falta de uso de EPI's	Falha no reator	A presença de metanol e resíduos	Ausência da utilização de EPI's	Quedas de operadores de tanques
Eventos	Derramamento de metanol durante a alimentação no reator	explosão de reagentes	Contato d pele com H2SO4	Derramamento de metanol e vapor durante a reação	Saldagens de vasosque continuam inflamáveis	Contato com NaOH durante a manutenção do reator	Quedas de operadores de tanques

APÊNDICE A - PERIGOS RELACIONADOS À OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE UMA USINA DE BIODIESEL

Continuação Tabela B4

Significância	2.26	2.60	1.56	1.88	1.91	2.63	2.41
9							
8	0.75	0.75	0.05	0.05	0.05	0.40	0.20
7	5.00	5.00	4.00	5.00	5.00	5.00	4.00
6	1.00	1.00	0.80	2.10	1.60	2.10	2.10
5	2.00	2.00	1.00	2.00	1.00	1.00	1.00
4	0.80	1.80	1.40	1.60	2.00	3.00	0.90
3	4.00	4.00	3.00	3.00	4.00	4.00	3.00
2	3.20	4.00	0.40	0.30	0.60	4.50	4.50
1	1.40	2.25	1.80	1.00	1.00	1.00	1.80
Resultado	Propagação do fogo nas casas e meio ambiente	Explosão	Danos em equipamentos	Má qualidade do gás e emissões durante a combustão do biodiesel	Dano ao motor de veículos	Poluição ambiental e riscos a saúde humana	Local de trabalho escorregadio
Condição	Falta de treinamento dos operadores quanto utilização de extintores	Sistema de controle de temperatura inapropriado	Projeto inadequado de produção de biodiesel	Sistema Insuficiente de tratamento de água poluída	Inalação de compostos tóxicos		

Significância	3.47	2.50	2.74	2.50	2.54	2.24	3.12
Condição	Falta de treinamento dos operadores quanto utilização de extintores		Sistema de controle de temperatura inapropriado	Projeto inadequado de produção de biodiesel	Sistema Insuficete de tratamento de água poluída		Inalação de compostos tóxicos e baixa escolaridade dos funcionários
Evento	Potencial incêndios em instalações de biodiesel		Solidificação de biodiesel	O prodto final pode não atender aos requisitos		Deposição de glicerol/água residual	Derramamento de coostos líquidos

APÊNDICE B - PENALIDADES, FATORES DE ENERGIA E POTENCIAL DE RISCO PARA ESTIMAR O RAIO DE DANO DE EXPLOSÃO

Unidade de processo	Penalidade	Fator de Energia	Potencial de Perigo
Unidade de armazenamento	<i>pne1</i> - Temperatura de Operação (TO)	Explosão de gás/vapor	
	Se ponto de incêndio > TO > ponto de fulgor, <i>pne1</i> = 1.34		$(F1 \times pne\ 1 + F \times pne\ 2) \times pne\ 3 \times pne\ 4$ $\times pne\ 5 \times pne\ 6 \times pne\ 7 \times pne\ 8$
	Se AIT > TO > ponto de disparo, <i>pne1</i> = 1,55 Caso contrário, <i>pne1</i> = 1.10	$F1 = 0.1\ M \times \Delta H_c / K$	
	<i>pne2</i> - Pressão de Operação (PO)		
	Se (VP > AP)	$F2 = 1.0 \times 10^{-3} \times \left(\frac{V \times P_0}{\gamma - 1} \right)$	
	Se (PO > VP)	$F3 = 5 \times 10^{-4} \beta_c \times (PO - VP)^2$	
	F = F2 + F3		
	<i>pne2</i> = f(Pressão de operação)		
	se não		
	F = F2		
	<i>pne2</i> = f(Pressão de operação)		
	se não		
	F = F3		
	<i>pne2</i> = f(Pressão de operação)		
	Estimativa conforme mostrado no método SWeHI (Khan et al., 2001)	$F4 = (M/mm) \times \Delta H_f$	

**CONTINUAÇÃO APÊNDICE B - PENALIDADES, FATORES DE ENERGIA E POTENCIAL DE RISCO PARA ESTIMAR O
RAIO DE DANO DE EXPLOSÃO**

***pne3* - Localização da unidade perigosa mais próxima**

Estimativa conforme mostrado no método SWeHI (Khan et al., 2001)

***pne4* - Capacidade da unidade**

Estimativa conforme mostrado no método SWeHI (Khan et al., 2001)

***pne5* - Características (inflamável ou reatividade)**

$$pne5 = \max(1, 0.30 \times (NR + NF))$$

NR e NF são classificações NFPA para reatividade e inflamabilidade do produto químico

***pne6* - Região obstruída**

$$pne6 = 1.1 + \frac{\text{volume da Região obstruída}}{\text{Volume total 56520}}$$

***pne7* - Fatores ambientais externos**

Se ocorrer todos os anos, *pne7* = 2,0

Se ocorrer uma vez em 5 anos, *pne7* = 1,5

Se ocorrer uma vez em 20 anos, *pne7* = 1,1

***pne8* - Vulnerabilidade do ambiente**

Se altamente propenso a acidentes, *pne8* = 2

Se não for propenso a acidentes, *pne7* = 1,1

**CONTINUAÇÃO APÊNDICE B - PENALIDADES, FATORES DE ENERGIA E POTENCIAL DE RISCO PARA ESTIMAR O
RAIO DE DANO DE EXPLOSÃO**

Unidade de processo	Penalidade	Fator de Energia	Potencial de Perigo
Unidade envolvendo operações físicas	<p><i>pne1</i> - Temperatura de Operação (TO)</p> <p>Se ponto de incêndio > TO > ponto de fulgor, <i>pne1</i> = 1.45 Se AIT > TO > ponto de disparo, <i>pne1</i> = 1.75 Se TO > 0,75 AIT, <i>pne1</i> = 1,95 Caso contrário, <i>pne1</i> = 1.10</p> <p><i>pne2</i> - Pressão de Operação (PO)</p> <p>se (VP > AP e PO > VP) <i>pne 2</i> = <i>fp1</i> (PO, AP, VP) $F = F2 + F3$</p> <p>Então <i>pne 2</i> = <i>fp2</i> (OP, AP, VP) $F = F2$</p> <p>se (AP > VP and PO > AP) <i>Pne 2</i> = <i>fp3</i> (PO, AP, VP) $F = F3$</p> <p>Então <i>pne 2</i> = 1.1 $F = F3$</p> <p>$fp1 = 1 + ((PO - VP)/OP) \times 0.6$ $fp2 = 1 + ((PO - VP)/OP) \times 0.4$ $fp1 = 1 + ((PO - VP)/OP) \times 0.2$</p>		$F1 \times pne 1 + F \times pne2) \times pne3 \times pne4 \times pne5 \times pne6$ $\times pne7 \times pne8$

**CONTINUAÇÃO APÊNDICE B - PENALIDADES, FATORES DE ENERGIA E POTENCIAL DE RISCO PARA ESTIMAR O
RAIO DE DANO DE EXPLOSÃO**

Unidade de processo	Penalidade	Fator de Energia	Potencial de Perigo
Unidade envolvendo operações físicas	<p><i>pne1</i> - Temperatura de Operação (TO)</p> <p>Se ponto de incêndio > TO > ponto de fulgor, $pne1 = 1.45$ Se AIT > TO > ponto de disparo, $pne1 = 1.75$ Se TO > 0,75 AIT, $pne1 = 1,95$ Caso contrário, $pne1 = 1.10$</p> <p><i>pne2</i> - Pressão de Operação (PO)</p> <p>se (VP > AP e PO > VP) $pne2 = fp1$ (PO, AP, VP) $F = F2 + F3$</p> <p>Então $pne2 = fp2$ (OP, AP, VP) $F = F2$</p> <p>se (AP > VP and PO > AP) $pne2 = fp3$ (PO, AP, VP) $F = F3$</p> <p>Então $pne2 = 1.1$ $F = F3$</p> <p>$fp1 = 1 + ((PO - VP)/OP) \times 0.6$ $fp2 = 1 + ((PO - VP)/OP) \times 0.4$ $fp3 = 1 + ((PO - VP)/OP) \times 0.2$</p>		$F1 \times pne1 + F \times pne2) \times pne3 \times pne4 \times pne5 \times pne6 \times pne7 \times pne8$

**CONTINUAÇÃO APÊNDICE B - PENALIDADES, FATORES DE ENERGIA E POTENCIAL DE RISCO PARA ESTIMAR O
RAIO DE DANO DE EXPLOSÃO**

	<p>Obs: Se o processo estiver sob pena de vácuo é atribuído um valor que varia de 1,2 a 1,65 dependendo da extensão do vácuo Estimativa conforme mostrado no método SWeHI (Khan et al., 2001)</p> <p>pne 3 – Localização da unidade perigosa mais próxima Estimativa conforme mostrado no método SWeHI (Khan et al., 2001)</p> <p>pne 4 – Capacidade da unidade Estimativa conforme mostrado no método SWeHI (Khan et al., 2001)</p> <p>pne 5 – Características (inflamável ou reatividade) $pne5 = \max (1, 0.30 \times (NR + NF))$</p> <p>pne 6 para pne 8 Estimativa semelhante à unidade de armazenamento</p> <p>pne 1 – pne 8</p>	
Unidade envolvendo reação química	<p>Estimativa semelhante a unidades envolvendo operação física</p> <p>pne 9 – Natureza da reação Estimativa conforme mostrado no método SWeHI (Khan et al., 2001)</p> <p>pne 10 – Impacto da reação lateral Estimativa conforme mostrado no método SWeHI (Khan et al., 2001)</p>	$(F1 \times pne\ 1 + F \times pne2 + pne9 \times pne10) \times pne3 \times pne4 \times pne5 \times pne6 \times pne7 \times pne8$
Unidades de transporte	<p>pne 11 – Temperatura de transporte (TT) Estimativa semelhante às unidades de armazenamento</p>	$(F1 \times pne\ 1 + F \times pne2) \times pne3 \times pne4 \times pne5 \times pne6 \times pne7 \times pne8 \times pne11$

**CONTINUAÇÃO APÊNDICE B - PENALIDADES, FATORES DE ENERGIA E POTENCIAL DE RISCO PARA ESTIMAR O
RAIO DE DANO DE EXPLOSÃO**

Unidade de processo	Penalidade	Fator de Energia	Potencial de Perigo
	<p><i>pne2 - Pressão de transporte (PT)</i> <i>If</i> ($3 \times AP > TP > AP$), $pne2 = 1.2$ <i>If</i> ($5 \times AP > TP > 3 \times AP$), $pne2 = 1.4$ <i>If</i> ($TP > 5 \times AP$), $pne2 = 1.6$ Se o transporte estiver sob pressão subatmosférica, $pne2 =$ de 1.2 para 1.8</p>		
	<p><i>pne3 - Localização da unidade perigosa mais próxima</i> Estimativa semelhante às unidades de armazenamento</p>		
	<p><i>pne4 - Capacidade da unidade</i> Se o transporte a granel, $pne4 = f(\text{quantidade em toneladas})$ A estimativa é semelhante à unidade de armazenamento Se o transporte através do gasoduto, $pne4 = 1 + \frac{\text{Qualidade transporte km/min}}{1000}$</p>		
	<p><i>pne5 - Características (inflamabilidade ou reatividade)</i> $pne5 = \max(1, 0.20 \times (NR + NF))$</p>		
	<p><i>pne6 – pne8</i> Estimativa semelhante às unidades de armazenamento</p>		
	<p><i>pne11 – Estado físico do produto químico</i> Gasoso, $pne11 = 1,45$ Gás liquefeito, $pne11 = 1,65$ líquido, $pne11 = 1,25$ Partículas sólidas, $pne11 = 1,20$</p>		

**CONTINUAÇÃO APÊNDICE B - PENALIDADES, FATORES DE ENERGIA E POTENCIAL DE RISCO PARA ESTIMAR O
RAIO DE DANO DE EXPLOSÃO**

<p>Outras unidades perigosas <i>pne1 e pne3</i> Estimativa semelhante a unidades envolvendo operações físicas</p> <p><i>pne4 – Capacidade da unidade</i> $pne4 = 1.0^{\frac{NF}{1400}} \times \text{taxa (toneladas/h)}$</p> <p><i>pne5 – Características (inflamabilidade ou reatividade)</i> $pne5 = \max (1, 0.35 \times (NR + NF))$</p> <p><i>pne6 – região obstruída</i> Estimativa semelhante a unidades envolvendo operações físicas</p> <p><i>pne7 e pne8</i> Estimativa semelhante às unidades de armazenamento</p> <p><i>pne11 – Estado físico do produto químico</i> Tamanho de partícula de poeira sólida > 150 μm, $pne11 = 1,25$ Tamanho de partícula de poeira sólida <150 μm, $pne11 = 1,40$ Gás liquefeito, $pne11 = 1,80$ Líquido, $pne11 = 1.35$ Gasoso, $pne11 = 1,65$</p>	$F1 \times pne1 + F \times pne2) \times pne3 \times pne4$ $\times pne5 \times pne6 \times pne7 \times pne8$
---	---

APÊNDICE C PONTUAÇÕES E PENALIDADES

Unidade de processo	Penalidade	Fator de Energia	Potencial de Perigo
Unidade de armazenamento (produção depósitos, estoques de processos intermediários, silos e silos)	<p><i>pnd1 - Temperatura de operação (TO)</i></p> <p>$pnd1 = f(MIT, TO)$</p> <p><i>If</i> TO > MIT, $pnd1 = 1.55$ <i>If</i> TO < MIT, $pnd1 = 1.10$</p> <p><i>pnd2 - Tamanho da partícula de poeira</i> Estimativa usando a Fig. B1</p> <p><i>pnd3 - Teor de umidade</i> $Pnd3 = f(\% \text{ do teor de umidade})$ Se 10% < teor de umidade < 30%, $pnd3 = 1,60$ Se o teor de umidade < 10%, $pnd3 = 1,30$ Se o teor de umidade > 30%, $pnd3 = 1,1$</p> <p><i>Pnd4 - Pressão inicial da câmara</i> Estimativa usando a Fig. B2</p> <p><i>pnd5 - Tipo do processo equipamento</i></p>	<p>$FD1 = \Delta Hc \times C \times Vc$</p> <p>$FD2 = 2 \times 10^{-4} \left(\frac{Pmax \times Patm}{\gamma o - 1} \right)$</p>	<p>$(FD1 \times pnd1 \times pnd2 \times pnd3 \times pnd4 \times pnd5 + FD2 \times pnd4) \times pnd3 \times pnd6 \times pnd7 \times pnd8$</p> <p>Obs: As penalidades pne3 a pne8 são obtidos do apêncide B</p>

CONTINUAÇÃO APÊNDICE C - APÊNDICE C PONTUAÇÕES E PENALIDADES

<p>Unidades de transporte (transportadores pneumáticos, transportadores de correia, transportadores de caçambas de guindastes, movimentação manual e elevadores de grãos)</p>	<p>Estimativa usando a Tabela B1 <i>pnd1 – pnd5</i> estimativa semelhante à unidade de armazenamento</p>	<p>$(FD1 \times pnd1 \times pnd2 \times pnd3 \times pnd4 \times pnd5 \times pnd6) \times pne3 \times pne6 \times pne7$ $\times pne8$</p>
<p>Outras unidades perigosas (triagem, classificação, separações, redução de tamanho, unidades auxiliares como secadores, aquecedores e transportadores e unidades de embalagem)</p>	<p><i>pnd6 – Turbulência inicial</i> $pnd6 = f(\text{grau de turbulência})$ Alta turbulência inicial, $pnd6 = 1,5$ Turbulência inicial moderada, $PND6 = 1,3$ Baixa turbulência, $pnd6 = 1$.</p> <p><i>pnd1 – Temperatura de operação (TO)</i> Se $TO \leq 0,3$ MIT, $pnd1 = 1,25$ Se $0,3 < TO \leq 0,7$ MIT, $pnd1 = 1,45$ Se $0,7 < TO \leq 6$ MIT, $pnd1 = 1,65$ Se $TO > 6$ MIT, $pnd1 = 1,8$</p>	<p>Obs: As Penalidades <i>pne3</i> a <i>pne8</i> são obtidos do apêndice B</p> <p>$FD1 \times pnd1 \times pnd2 \times pnd3 \times pnd4 \times pnd5 \times pnd6 + FD2 \times pnd4) \times pne3$ $\times pne6 \times pne7 \times pne8$</p>
	<p><i>Pnd2 – Pnd5</i> Estimativa semelhante à unidade de armazenamento</p>	<p>Obs: As penalidades <i>pne3</i> a <i>pne8</i> são obtidas no Apêndice A</p>
	<p><i>Pnd6 – Turbulência inicial</i> Alta turbulência inicial, $pnd6 = 2,0$ Turbulência inicial moderada, $pnd6 = 1,5$ Baixa turbulência, $pnd6 = 1,1$</p>	

Tabela B1**Diretriz para atribuir a penalidade devida ao tipo de equipamento de processo.**

Categoria	Operação do Processo	Unidades de processo envolvidas	Penalidades
1	Triagem e separação	Ciclones, unidades de manuseio de poeira, câmaras de decantação, filtros, precipitador eletrostático, dispositivos de peneiramento e peneiramento separação pneumática	2.00
2	Redução de tamanho (operação a seco)	Trituradores, moinhos de martelos, moinhos de rolos, moinhos de bolas, moinhos de placas	1.80
3	Secadores, aquecedores e transportadores	Fornos, secadores de bandeja, secadores rotativos, secadores de leito fluidizado, secadores por pulverização, secadores a vácuo, transporte manual, transporte pneumático, correias, transportadores de balde	1.75
4	Embalagem	Alimentadores de parafuso, máquinas de enchimento pneumáticas e manuais, máquina de embalagem	1.55
5	Mistura e Misturando	Misturadores, liquidificadores	1.45
6	Unidades de armazenamento	Armazéns, silos, caixas	1.35
7	Outras unidades	Reatores, evaporadores, destilações	1.10

Tabela C1**Penalidades devido ao estado físico dos produtos químicos para estimar o raio de dano devido ao fogo**

Categoria	Estado físico	Penalidades
1	Gasoso liquefeito	1.85
2	Gasoso	1.65
3	Líquidos altamente voláteis	1.55
4	Líquidos de baixa volatilidade	1.35
5	Pó sólido	1.25
6	Outras	1.10

APÊNDICE D - PENALIDADES, FATORES DE ENERGIA E POTENCIAL DE RISCO PARA ESTIMAR O RAIOS DE DANO POR INCÊNDIO

Unidade de processo	Incêndio	Perigos relacionado ao fogo	Fagulhas de fogo	Fogo relâmpago
Unidades de armazenamento	<i>pnf1, pnf5, pnf8, pnf9</i> Estimativa semelhante ao EDR	<i>pnf1, pnf5, pnf9, pnf9</i> Estimativa semelhante ao EDR	<i>pnf1, pnf5, pnf8, pnf9</i> Estimativa semelhante ao EDR	<i>pnf1, pnf5, pnf8, pnf9</i> Estimativa semelhante ao EDR
Unidades envolvendo operações físicas	<i>pnf2</i> O efeito da pressão é insignificante	<i>pnf2</i> Caso 1: VP < AP	<i>pnf2</i> Estimar usando Fig C3	<i>pnf2</i> O efeito da pressão é insignificante
	<i>pnf3</i> If u/uc ≤ 1, pnf3 = 1.1	If OP < VP, pnf2 = 1.1 If AP > OP > VP	<i>pnf3</i> O efeito do vento é insignificante	<i>pnf3</i> Estimar usando Fig C4
Unidades envolvendo reação	If u/uc > 1, pnf3 = u/uc	pnf2 = 1.1 + $\left(\frac{PO-VP}{OP}\right) \times 0.2$ Caso 2: VP > AP If VP > OP P AP, pnf2 = 1.1 + $\left(\frac{PO-VP}{OP}\right) \times 0.4$ If OP > VP,	<i>pnf4</i> Estimar usando Fig C1	<i>pnf4</i> Efeito insignificante
Unidades de transporte	$\frac{u}{uc} = \left(\frac{gm'D}{\rho_a}\right)^{1/3}$	<i>pnf2</i> = 1.1 + $\left(\frac{OP-VP}{OP}\right) \times 0.6$		
Outras unidades perigosas	<i>pnf4</i> Estimar usando Fig C1 <i>pnf6</i> $pn6 = \left(1.1 + \frac{V_u}{56520}\right)$ <i>pnf7</i> Estimar usando a tabela C1	<i>pnf3</i> O efeito do vento é insignificante <i>pnf4</i> Estimar usando Fig C2 <i>pnf6</i> $pn7 = \left(1.1 + \frac{V_u}{56520}\right)$ <i>pnf7</i> Estimar usando a tabela C1	<i>pnf6</i> $pn7 = \left(1.1 + \frac{V_u}{56520}\right)$ <i>pnf7</i> Estimar usando a tabela C1	<i>pnf6</i> Efeito insignificante <i>pnf7</i> Estimar usando a tabela C1
Fator de Energia Potencial de perigo	$E_{pf} = 0.785 \times D^2 \times m' \times \Delta H_C$ $E_{pf} \times pnf1 \times pnf3 \times pnf4$ $\times pnf5 \times pnf6 \times pnf7$ $\times pnf8 \times pnf9$	$E_{fb} = 2.2 \times \Delta H_C \times M^{0.67}$ $E_{pf} \times pnf1 \times pnf3 \times pnf4$ $\times pnf5 \times pnf6 \times pnf7$ $\times pnf8 \times pnf9$	$E_{jf} = m' \times \Delta H_C$ $E_{jf} \times pnf1 \times pnf2$ $\times pnf4 \times pnf5 \times pnf6$ $\times pnf7 \times pnf8 \times pnf9$	$E_{ff} = M \times \Delta H_C \times \left(\frac{S}{CB}\right)$ $E_{ff} \times pnf1 \times pnf3 \times pnf5$ $\times pnf6 \times pnf8 \times pnf9$

Obs: As estimativas neste apêndice relativos a C1, C2, C3, C4 e C5 utilizar conforme de Rathnayaka, (2014)

**APÊNDICE E - PENALIDADES, FATORES DE ENERGIA E POTENCIAL DE PERIGO PARA ESTIMAR O RAIO DE DANO DE
LIBERAÇÃO TÓXICA**

Unidade de processo	Liberação de gás tóxico	Liberação de líquido tóxico
Unidades de armazenamento	<i>png1 – Temperatura de operação</i>	<i>pnl1 – Temperatura de operação</i>
Unidade envolvendo operação física	If(OT > 4 × AT), png1 = 1.55 If(OT > 2 × AT), png1 = 1.35 Caso contrário, png1 = 1.11	
Unidades envolvendo reação	<i>png2 - Pressão de Operação</i> Estimativa usando a Fig. D1	Caso 1: TO ≤ BP, então $f_v = 0$ $L2 = L1$ $pnl1 = 1.1 + \left(\frac{BP-OT}{BP}\right)$
Unidade de transporte	<i>png3 – Densidade da substância liberada</i> $png3 = 1.2 \times \frac{\text{densidade do vapor}}{\text{densidade do ar}}$	Caso 2: TO > BP If $0.2 > f_v > 0$, $L = L1 + L2$
Outras unidades perigosas	<i>png4 – Toxicidade do produto químico liberado</i> <i>png4 = 1,0 + 0,6 × NH</i>	$pnl1 = 1.1 + \left(\frac{OT-BP}{OT}\right)$ If $f_v > 0.2$, $L = L1$
	<i>png5 – Características da proximidade da planta</i> Área urbana com alta densidade populacional = 1.55	

**CONTINUAÇÃO APÊNDICE E - PENALIDADES, FATORES DE ENERGIA E POTENCIAL DE PERIGO PARA ESTIMAR O
RAIO DE DANO DE LIBERAÇÃO TÓXICA**

	<p>Área suburbana com população de densidade moderada = 1.35 Área rural com população de baixa densidade = 1.11</p> <p><i>png6 – Fatores ambientais externos</i> Consulte o Apêndice B (como semelhante à estimativa EDR)</p> <p><i>png7 – Vulnerabilidade da área</i> Consulte o Apêndice B (como semelhante à estimativa EDR)</p> <p>$G = 7.5 \times 10^3 \times A \times P_0 \times \left(\frac{MW}{T_0}\right)^{0.5}$</p>	<p>If $f_v > 0.2$, então não há nenhum pool é formado. É lógico que a quantidade de aerotransportado deve ser menor ou igual a taxa de liberação de líquido. Portanto, no caso de $f_v > 1,0$, o valor é configurar para um.</p> <p><i>pnl2 – Pressão de operação</i> Estimativa usando a Fig. D2</p> <p><i>pnl3 – pnl7</i> Estimativa semelhante à liberação de gás tóxico</p> <p>$L1 = 6.0 \times 10^{-6} \times A \rho_l f_v \times \sqrt{\frac{1000P_s}{\rho_l} + 9.81h_L}$ $L2 = 9.0 \times 10^{-4} \times A_p^{0.95} \times \left(\frac{MW \times VP}{T_p}\right)$</p>
Fator de liberação		
Perigo Potencial	<p>$G \times png1 \times png2 \times png3 \times png4 \times png5 \times png6 \times png7$</p>	<p>Potencial de perigo devido à evaporação da piscina de líquido puro: $L2 \times pnl1 \times pnl2 \times pnl3 \times pnl4 \times pnl5 \times pnl6 \times pnl7$</p> <p>Potencial de perigo devido ao flash puro $L1 \times pnl1 \times pnl3 \times pnl4 \times pnl5 \times pnl6 \times pnl7$</p> <p>Potencial de perigo devido ao flashing puro Potencial de perigo devido à evaporação e flashing da piscina de líquido $(L1 + L2 \times pnl2) \times pnl1 \times pnl3 \times pnl4 \times pnl5 \times pnl6 \times pnl7$</p>

APÊNDICE F - DERIVAÇÕES DE EQUAÇÕES USADAS PARA ESTIMAR O RAIOS DE DANO DEVIDO A EXPLOSÃO, FOGO E LIBERAÇÃO TÓXICA

A equação para estimativa do raio de dano foi derivada com base no método conforme correlações e equações que são referenciadas por Assael e Kakosimos (2010). A relação entre a sobre pressão da explosão e a distância do centro da explosão que é considerado como raio de dano pode ser escrita usando as equações:

$$E = x \cdot (P_a)^{-1/3}$$

Nesta equação, x representa o raio de dano e E representa o potencial de perigo. A equação pode ser rearranjada como:

$$EDR = \frac{r'}{(P_a)^{1/3}} (\text{Potencial de Perigo})^{1/3}$$

Onde P_a é a pressão ambiente (100 KPa) e r' é a distância em escala que pode ser estimada usando $P_s = 10^{-b \log_{10} r'^{-c}}$ onde P_s é a sobrepressão causada pela explosão, e a sobrepressão máxima gerada pela deflagração é considerada como 2 atm (200 kPa). Os coeficientes b e c são escolhidos considerando o coeficiente máximo da força da explosão que é 10. P_a são atribuídos de acordo com:

$$EDR = (\text{Potencial de Perigo})^{1/3}$$

Para a estimativa do raio de dano de fogo usando o modelo de fonte pontual, a equação para o fluxo de calor gerado pelo fogo pode ser escrita conforme a orientação de (Assael e Kakosimos, 2010) $q' = \frac{1}{4\pi x^2} nm_k \Delta H_c$ onde g é a eficiência de combustão que é assumida como 100% para simplicidade, e o limite de intensidade de radiação térmica, q_0 é escolhido como 37,5 kW m² considerando o projeto para o pior cenário. Depois de substituindo esses valores, o raio de dano pode ser Expresso como: $EDR = 0.05 X (\text{Potencial de Perigo})^{1/2}$

Considerando as características do modelo de liberação contínua, estado estacionário e fonte no nível do solo na direção do vento, a concentração a favor do vento pode ser escrita como $C_x = \frac{Q_m}{\pi \sigma y \sigma z u}$ Assumindo a classe de estabilidade como "ligeiramente estável", os coeficientes de dispersão

podem ser escritos como: $C_x = 0.082 X^{0.82}$ A velocidade a favor do vento é considerada como 2 m/s.

E é simplificado após a substituição dos coeficientes de dispersão e velocidade a favor do vento $X = 5.86 \frac{(1)}{C_x} 0.6 / Q^{0.6} X^m$

Raio de dano x é a distância onde a concentração atinge o TLV, que é o valor limite do gás liberado. Q_m é considerado como potencial de perigo logo,

$$\text{Raio de dano de gás tóxico} = 5.86 X C_G X (\text{Potencial de Perigo})^{1/3}$$

A equação desenvolvida para estimar a quantidade em suspensão no ar para liberação de líquido no manual técnico AICHE (1994) é usado diretamente e reorganizados para desenvolver a equação do raio de dano de gás tóxico (TLDR)

$$\text{TLDR} = 6.51 X C_L X (\text{Potencial de Perigo})^{0.5}$$

$$C_L = \left(\frac{1}{TLV}\right)^{0.5}$$

APÊNDICE G - MEDIDAS DE SEGURANÇA SUGERIDAS PARA MELHORAR A CONFIABILIDADE DOS EVENTOS BÁSICOS DE DESTILAÇÃO

Evento	Fatores causais (ou evento básico)	Medida de segurança inerente à prevenção do acidente propagação ou redução de probabilidade	Outras medidas de segurança
1	Falha da válvula de segurança de pressão		Realize testes funcionais periódicos de alívio de pressão válvulas, realizar a calibração regular, definir a segurança
2	Falha no isolamento automático	Substituir instrumentos de controle existentes que apresente uma substancial probabilidade de acidente	Use projeto de sistema redundante; realizar provas regularestestando sem interromper a operação
3	Falha do indicador de pressão da torre	Use o selo diafragma para manômetros (moderação); substituir medidores de pressão existentes por manômetros digitais (substituição)	Incorporar padrões industriais internacionais e atualize de acordo
4	Falha na pressão do produto aéreo transmissor	Substituir instrumentos de controle existentes que apresente uma substancial probabilidade de acidente	
5	Falha na pressão do produto aéreo falha no gravador	Use registradores de pressão digital (substituição)	
6	Cobertura inadequada do detector		Instalar sensores adequados; conduzir área adequada classificação
7	Resposta atrasada	Simplifique a planta reduzindo a tubulação adicional e válvulas para que os operadores possam alcançar facilmente a válvula de isolamento (simplificação)	Aplicar um eficiente sistema visual de numeração e sinalização, realizar treinamento regular do operador por meio de um ambiente, bem como ambiente real; medir tempo de resposta versus taxa de alarme diferente e operador características para estabelecer um
8	Falta de acessibilidade	Simplifique a planta reduzindo tubulações e válvulas adicionais e equipamentos (simplificação)	
9	Falha na identificação do alarme de alta pressão ou má interpretação	Simplificar o sistema de alarme existente para evitar que o operador sobrecarregue os alarmes (simplificação)	Estabelecer procedimentos adequados de gerenciamento de alarmes, realizar treinamento regular do operador; melhorar o painel de controle para identificar os alarmes de forma fácil e oportuna, use diferentes sistemas de ênfase do operador
10	Perda de abastecimento de água de resfriamento para o condensador		

APÊNDICE G - MEDIDAS DE SEGURANÇA SUGERIDAS PARA MELHORAR A CONFIABILIDADE DOS EVENTOS BÁSICOS DE DESTILAÇÃO

11	Falha do condensador devido a ruptura	Altere o projeto usando construção de um material altamente confiável	
12	Sujeira ou bloqueio dos tubos do condensador		Instale a unidade de pré-tratamento de água de resfriamento para remover impurezas, materiais de dureza, sais, etc... instalar um dispositivo para medir a resistência geral à transferência de calor (OHTR) e prever micro e macro incrustações usando esses dados, introduzir mecanismo de limpeza adequado e oportuno
13	Falha da válvula de controle de fluxo de refluxo	Substitua os posicionadores convencionais por altamente posicionadores digitais avançados (substituição)	Realizar manutenções preventivas para evitar vazamentos externos das válvulas, aplicar revestimento resistente nas ligações para que as ligações fiquem menos susceptíveis a vibração, certifique-se de que não há suprimento de ar de
14	alimentação descontrolada		Aplique o sistema de controle para controlar adequadamente a alimentação
15	Falha da válvula de controle de nível do fundo produtos	Substitua os posicionadores convencionais por altamente posicionadores digitais avançados (substituição)	Realizar manutenções preventivas para evitar vazamentos externos das válvulas; aplicar revestimento resistente à articulação; certifique-se de que nenhum suprimento de ar de processo sujo
16	Falha do transmissor de controle de nível de torre	Substituir instrumentos de controle existentes que apresente uma substancial probabilidade de acidente	
17	Falha do transmissor de temperatura da torre	Substituir instrumentos de controle existentes que apresente uma substancial probabilidade de acidente	
18	Falha na válvula de controle de vapor da caldeira	Substituir os posicionadores convencionais por outros altamente digitais avançados (substituição)	Realizar manutenções preventivas para evitar vazamentos externos das válvulas; aplicar revestimento resistente à articulação
19	Falha do controlador do indicador de temperatura	Avance o controlador com melhor algoritmo de controle, coloque o sensor em local apropriado	
20	Falha do indicador de temperatura	Substituir instrumentos de controle existentes que apresente uma substancial probabilidade de acidente	
21	Falha de conexão anexada para a coluna de destilação	Minimizar o número de conexões (minimização)	Realizar monitoramento regular da degradação da solda; use altomaterial de vedação confiável

APÊNDICE G - MEDIDAS DE SEGURANÇA SUGERIDAS PARA MELHORAR A CONFIABILIDADE DOS EVENTOS BÁSICOS DE DESTILAÇÃO

22	Vazamentos por bombas		Instale tubulações e tubulações de acordo com as recomendações do fabricante; evite beliscar, armar ou instalação incorreta
23	Defeitos materiais		Promova inspeção externa (antes da compra) para fazer certeza de qualidade adequada do material
24	Resistência inadequada do material		Estime as propriedades do material necessárias para construir
25	manutenção errada	Aplicar design à prova de falhas	Estimar o número ideal de intervalos de manutenção através do processo de manutenção baseado em risco
26	Falha na manutenção preventiva de válvulas/bom	Simplifique o projeto reduzindo o número de pontos/intervalos de manutenção	Implemente o gerenciamento de manutenção baseado em risco do sistema
27	Programa de manutenção inadequado		Implementar uma boa cultura de segurança
28	Falha na inspeção regular de corrosão		Identificar os pontos mínimos de inspeção, implemento métodos para prever a taxa de corrosão
29	Falha no protocolo de teste de vazamento	Substitua os detectores existentes por detectores de alta sensibilidade detectores de vazamento (gás)	Realize detecção de vazamento baseada em área regular; conduta classificação de área adequada
30	Falha no monitoramento da degradação da solda	Reduza a conexão o máximo possível (simplificação)	Determinar o número ideal de pontos de degradação, desenvolver modelos teóricos para prever a degradação, utilizar o método de soldagem adequado
31	Programa de inspeção inadequado		Implementar inspeção baseada em risco (RBIM) com boa cultura de segurança
32			Fornecer conscientização regular sobre novas tecnologias e métodos operacionais; implementar ambiente de trabalho orientado para a segurança
33	Falta de supervisão ou treinamento		
33	Negligência ou erros do operador	Sistema à prova de erros	Implementar ambiente de trabalho orientado para a segurança
34	Nenhum procedimento de trabalho seguro		Estabelecer um padrão industrial recomendado internacionalmente Melhor prática; realizar revisão periódica e atualização
35	Vazamentos durante a inicialização e desligamento		Execute o desligamento de inicialização com base no prática recomendada
36	Tempo de CIP elevado da planta	Realizar o CIP da planta periodicamente	Estabelecer parâmetros viáveis para a execução do CIP da plan
37	Explosões em máquinas e equipaentos em poeira combustível	Verificar as disposições e orientações gerais na NR 33	Executar as medidas e treinamentos de prevenções conforme orientação da NR 33