



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Alex de Oliveira e Oliveira

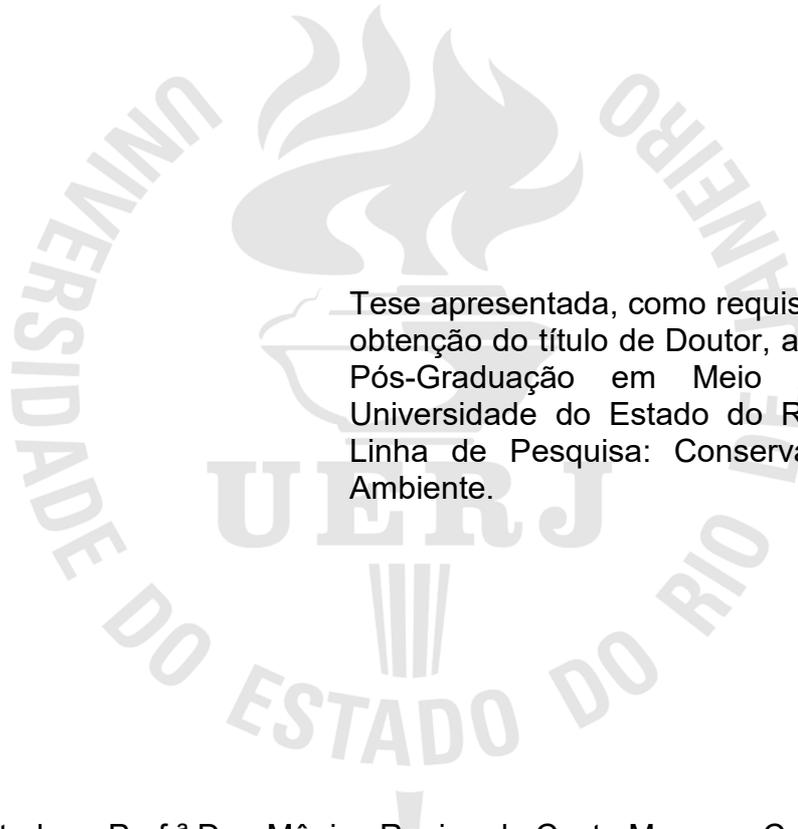
Avaliação ambiental de Plantas de Pirólise de Poliolefinas

Rio de Janeiro

2023

Alex de Oliveira e Oliveira

Avaliação ambiental de Plantas de Pirólise de Poliolefinas



Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Linha de Pesquisa: Conservação do Meio Ambiente.

Orientadora: Prof.^a Dra. Mônica Regina da Costa Marques Calderari

Rio de Janeiro

2023

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC-A

O48 Oliveira, Alex de Oliveira e.
Avaliação ambiental de plantas de pirólise de poliolefinas/
Alex de Oliveira e Oliveira. – 2023.
180 f. : il.

Orientadora: Mônica Regina da Costa Marques Calderari
Tese (Doutorado em Meio Ambiente) - Universidade do
Estado do Rio de Janeiro.

1. Pirólise - Teses. 2. Poliolefinas - Teses. 3. Química
ambiental - Teses. I. Calderari, Mônica Regina da Costa
Marques. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III.
Título.

CDU 66.092.1

Patricia Bello Meijinhos CRB7/5217 - Bibliotecária responsável pela elaboração da ficha catalográfica

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Alex de Oliveira e Oliveira

Avaliação ambiental de plantas de pirólise de poliolefina

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Linha de Pesquisa: Conservação do Meio Ambiente.

Aprovado em 07 de junho de 2023.

Banca Examinadora:

Prof.^a Dra. Mônica Regina da Costa Marques Calderari (Orientadora)
Instituto de Química - UERJ

Dr. José Carlos de Moura Xavier
Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - Cetesb

Dra. Graziela Salvan Cerveira
Instituto Nacional da Propriedade Industrial - INPI

Prof.^a Dra. Marinilza Bruno de Carvalho
Departamento de Inovação – UERJ

Prof. Dr. Marcos Antonio dos Santos Fernandez
Faculdade de Oceanografia - UERJ

Rio de Janeiro

2023

DEDICATÓRIA

A minha esposa, Andrea, que conheci quando eu ainda estava pensando em entrar no doutorado, minha eterna gratidão. Neste longo tempo, nos casamos, e sem seu amor, sua ajuda e seu incentivo eu não teria conseguido chegar até aqui.

A meus queridos pais, Arnaldo de Oliveira (*in memoriam*) e Maria José de Oliveira e Oliveira, pais maravilhosos, onde pude espelhar todo o senso de cidadania baseado no amor, respeito, generosidade.

A minha irmã, Renata, que me acolheu em seu apartamento nos primeiros meses em que passei a viver no Rio.

AGRADECIMENTOS

Num mundo em que o neoliberalismo está cada vez mais exacerbado, é provável que se diga que a conclusão de uma tese é uma realização individual. Falácia! Esta tese é também fruto da família que dá carinho e orienta, dos professores desde o ensino básico e do auxílio de amigos. Ninguém se desenvolve sozinho, seja em que campo for. Por isso quero expressar meus agradecimentos às pessoas a seguir.

A meu pai, Arnaldo de Oliveira (*in memoriam*) e minha mãe, Maria José de Oliveira e Oliveira minha eterna gratidão por terem me dado a vida e por toda dedicação e esforço para que tivesse acesso à melhor educação que podiam me dar, para que um dia eu pudesse chegar até aqui.

A meu tio, Yuri Barbosa dos Reis que para mim sempre foi um modelo de dedicação aos estudos.

Às professoras do ensino fundamental, em especial Beth Amorin, Maria Helena e Jalouise (*in memoriam*) cujos ensinamentos de matemática, ciência e língua portuguesa utilizo até hoje.

Aos professores do Senai, Silvia, Humberto, Kátia, Ana Rita, Eufemia, Marsula, Quintal pela excelência no ensino técnico em química.

Ao amigo Osório Thomaz com quem aprendi tudo que sei sobre a ciência de riscos.

Aos colegas do curso de doutorado, em especial à Elaine Cristina da Silva Ferreira, “Minha Estrela Guia”, que sempre teve a paciência de me atualizar com as datas de entrega dos trabalhos.

Aos amigos, Marcos Ferreira de Assunção e Gislaine Zulli pela contribuição na redação e estruturação do questionário.

Aos membros da banca de qualificação, Dra. Graziela Salvan Cerveira, Prof^a Dra. Marinilza Bruno de Carvalho, Prof^o Dr. Marcos Antônio dos Santos Fernandez e Dr. José Carlos de Moura Xavier, que contribuíram significativamente para as discussões, revisão crítica e sugestões ao longo do estudo.

Por fim, meu eterno agradecimento a minha orientadora e amiga, Mônica Marques, que acreditou em mim desde nossa primeira conversa. Aprendi muito sobre química ambiental e seu apoio foi fundamental para a realização deste trabalho.

Se a aparência e a essência das coisas coincidissem, a ciência seria desnecessária.

Karl Marx

RESUMO

OLIVEIRA, Alex de Oliveira e. *Avaliação ambiental de plantas de pirólise de poliolefinas*. 2023, 180 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

No Brasil gerou-se cerca de 65 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) no ano de 2019, sendo 24,3% desse montante (15,7 milhões t) são compostas por plásticos. Em 2020 o Senado aprovou o novo marco legal do Saneamento Básico (PL4.152/2019) que preconiza a extinção de lixões e aterros controlados até agosto de 2024 dando lugar a aterros sanitários ou outra tecnologia ambientalmente aceitável. Nesse contexto, uma solução que o mercado tem oferecido aos municípios é o processamento de RSUs por meio da tecnologia de pirólise, cujos fornecedores apontam como vantagens a redução do volume de resíduos com a geração de energia combustíveis, como a gasolina, além da possibilidade de gerar eletricidade. Contudo, novas tecnologias implicam em novos riscos. Assim, este trabalho analisou três aspectos que podem se constituir como fatores de riscos tecnológicos proporcionados por uma planta de pirólise de poliolefinas: o arcabouço legal, a percepção de risco predominante nos órgãos de licenciamento e os riscos envolvidos nas atividades de empreendimentos do tipo. A análise do arcabouço legal revelou que o mesmo foi pensado, na verdade, para regulamentar a tecnologia de incineração que apresenta riscos diferentes da tecnologia de pirólise, havendo, então a necessidade de criação de normas específicas. Já a avaliação da percepção de riscos presente nos órgãos licenciadores revelou que há uma tendência de seus profissionais serem menos criteriosos com a tecnologia de pirólise quando comparado com as tecnologias de tratamento térmico mais conhecidas, como a incineração e gaseificação. Por fim, a avaliação de risco de uma planta de pirólise foi avaliada a partir de um modelo em 3D, e levando-se em conta as normas vigentes revelou que esse empreendimento proporcionaria em riscos intoleráveis.

Palavras-chave: Pirólise de Poliolefinas. Legislação. Análise de Riscos. Percepção de Riscos.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Alex de Oliveira e. *Environmental evaluation of polyolefin pyrolysis plants*. 2023, 180 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

In Brazil, around 65 million tons of solid urban waste (MSW) were generated in 2019, 24.3% of which (15.7 million tons) are made up of plastics. In 2020, the Senate approved the new legal framework for Basic Sanitation (PL4.152/2019), which advocates the extinction of dumps and controlled landfills by August 2024, giving way to sanitary landfills or other environmentally acceptable technology. In this context, a solution that the market has offered to municipalities is the processing of MSW through pyrolysis technology, whose suppliers point out the advantages of reducing the volume of waste with the generation of fuel energy, such as gasoline, in addition to the possibility to generate electricity. However, new technologies imply new risks. Thus, this work analyzed three aspects that may constitute technological risk factors provided by a polyolefin pyrolysis plant: the legal framework, the prevailing risk perception in licensing agencies and the risks involved in activities of this type of enterprise. The analysis of the legal framework revealed that it was actually designed to regulate the incineration technology that presents different risks from the pyrolysis technology, thus requiring the creation of specific norms. The evaluation of the perception of risks presents in the licensing bodies revealed that there is a tendency for their professionals to be less judicious with pyrolysis technology when compared to better known heat treatment technologies, such as incineration and gasification. Finally, the risk assessment of a pyrolysis plant was evaluated from a 3D model, and taking into account the current regulations, it revealed that this undertaking would entail intolerable risks.

Keywords: Polyolefin Pyrolysis. Legislation. Risk Analysis. Risk Perception.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de Reciclagens e Processos Térmicos	22
Figura 2 - Monômero de estireno e poliestireno	33
Figura 3 - Desenho esquemático de uma planta de pirólise	40
Figura 4 - Planta de pirólise oferecida pela empresa Beston Machinery.....	40
Figura 5 - Parâmetros para determinação de amostragem para o G*Power	75
Figura 6 - Conceito de Análise de Rastreamento de Barreiras de Energia	86
Figura 7 - Vista panorâmica da maquete eletrônica da usina.....	97
Figura 8 - Vista panorâmica da maquete eletrônica da usina.....	97
Figura 9 – Vista do console de controle e câmara de combustão	98
Figura 10 - Vista da tremonha e transportador helicoidal.....	98
Figura 11 - Identificação dos equipamentos principais.....	99
Figura 12 - Sentimentos de benefícios individuais da pirólise	110
Figura 13 - Sentimentos de benefícios individuais dos demais tipos de UREs	110
Figura 14 - Sentimentos de benefícios aos municípios da pirólise.....	111
Figura 15 - Sentimentos de benefícios aos municípios de UREs.....	111
Figura 16 - Percepção de probabilidades de acidentes em Usinas de Pirólise.....	116
Figura 17 – Percepção de probabilidades de acidentes nas demais UREs	116
Figura 18 - Percepção de gravidade de acidentes para usinas de pirólise	117
Figura 19 - Percepção de gravidade de acidentes para demais UREs	118
Figura 20 - Percepção de gravidade de acidentes ambientais para usinas de pirólise	118
Figura 21 - Percepção de gravidade de acidentes para demais UREs	119
Figura 22 - Árvore de falha para ruptura catastrófica	131
Figura 23 - Árvore de falha para nuvem inflamável.....	133
Figura 24 - Árvore de falha para explosão em nuvem.....	134
Figura 25 - Árvore de falha para jato de fogo	135
Figura 26 - Árvore de falha para jato de fogo em liberação por 10 minutos Ø 50mm	137
Figura 27 - Risco social.....	138

LISTA DE FOTOS

Foto 1 - Acidente em Budennovsk (Russia) (a).....	62
Foto 2 - Acidente em Budennovsk (Russia) (b).....	62
Foto 3 - Acidente em Joensuu (Finlândia) (a)	63
Foto 4 - Acidente em Joensuu (Finlândia) (b)	63
Foto 5 - Fumaça se eleva do <i>site</i> LyondellBasell, perto de Marselha, em 14/07/2015. (Foto Boris Horvat. AFP)	64
Foto 6 - Foto de satélite do CTR- Seropédica	100
Foto 7 - Possível localização da planta de pirólise	101
Foto 8 – Emissão fugitiva de benzeno	125
Foto 9 – Dispersão de nuvem tóxica devido à ruptura catastrófica (ref. n-nonano)	129
Foto 10 - Nuvem inflamável (ref. n-nonano).....	132
Foto 11 - Explosão em nuvem (ref. n-nonano).....	134
Foto 12 - Jato de fogo (ref. n-nonano).....	135
Foto 13 - Jato de fogo	136
Foto 14 - Risco individual	139
Foto 15 – Lateral do forno de pirólise (BESTON, 2021c).....	161
Foto 16 – Dois tipos de alimentação. Alimentação contínua (esq.) e batelada (dir.)	162
Foto 17 - Alimentação por meio de um conveyor (esteira transportadora).....	162
Foto 18 - Dentes de engrenagem do forno	163
Foto 19 - Detalhe mostrando rolo e anel do reator.....	163

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Estimativa da massa de RSUs coletada por região.....	28
Gráfico 2 - Estimativa da massa de recicláveis e recuperados	30
Gráfico 3 - Estratificação dos materiais recicláveis secos recuperados	31
Gráfico 4 - Percentuais da massa coletada pelo serviço de coleta seletiva de RDO, segundo agente executor	32
Gráfico 5 – Polímeros consumidos no Brasil.....	34
Gráfico 6 - Acidentes níveis Tier 1 e Tier 2 em processos de refino de petróleo (CONCAWE, 2018, 2019, 2020 e 2021).	67
Gráfico 7 – Conhecimento sobre UREs	107
Gráfico 8 - Conhecimento sobre pirólise	107
Gráfico 9 - Nível de conhecimento por tecnologia de tratamento térmico	107
Gráfico 10 - Sentimentos de oposição às usinas de pirólise	108
Gráfico 11 - Sentimentos de oposição às demais UREs.....	109
Gráfico 12 - Frequência de Temperaturas (2000-2020).....	122
Gráfico 13 – Frequência da Umidade Relativa do Ar (2000-2020).....	123
Gráfico 14 - Frequência de Direção do Vento (2000 e 2020).....	123
Gráfico 15 - Frequência de Velocidade dos Ventos	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativa da massa coletada RSU no país, segundo macrorregião.....	27
Tabela 2 - Massa total de resíduos recebidos pelas unidades de processamento ...	29
Tabela 3 - Composição dos gases de pirólise em diferentes temperaturas	42
Tabela 4 - Excesso de risco de câncer por inalação de benzo[a]pireno ao longo da vida.....	69
Tabela 5 - Gases gerados na pirólise de PEAD	88
Tabela 6 - Frações típicas do petróleo	88
Tabela 7 - Dados climatológicos de Seropédica (2000-2020).....	122
Tabela 8 - Parâmetros de entrada para o PHAST e OPS-ST (MEESTERS, 2011, p.63 e p.66)	127
Tabela 9 - Deposição seca por distância a favor do vento em função da ascensão de pluma	128
Tabela 10 - Probabilidades e fatalidades	137

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Banco de dados de fornecedores de tecnologia de pirólise de RSU	36
Quadro 2 - Visão geral das tecnologias das características de plantas WTE	37
Quadro 3 – Estratégia de busca.....	69
Quadro 4 - Informações da Estação Meteorológica	86
Quadro 5 - Substâncias a serem utilizadas nas simulações para petróleo e derivados	89
Quadro 6 - Parâmetros da Planta de Pirólise	96
Quadro 7 - Municípios de São Paulo incluídos na pesquisa	103
Quadro 8 - Municípios de Rio de Janeiro incluídos na pesquisa.....	104
Quadro 9 - Cargos dos respondentes	112
Quadro 10 - Tecnologias de preferência	113
Quadro 11 - Aspectos considerados mais relevantes	114
Quadro 12 - Conhecimento sobre outras tecnologias	115
Quadro 13 - Planilha ETBA	120
Quadro 14 – Resumo dos parâmetros climatológicos.....	124
Quadro 15 - Dados físico químicos do benzo[a]pireno.....	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEA	Análise de Erros de Ações
AEGL	<i>Acute exposure guideline levels</i>
AICHE	<i>American Institute of Chemical Engineers</i>
APP	Análise Preliminar de Perigos
Abiplast	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno
Cetesb	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CPI	Camada de Proteção Individual
CR	Concentrações de Referência
CTR	Centro de Tratamento de Resíduos
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ETBA	<i>Energy Trace and Barrier Analysis</i>
ERPG	<i>Emergency Response Planning Guidelines.</i>
FMEA	<i>Failure Modes Effects and Criticality Analysis</i>
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
HazOp	<i>Hazard and Operability Study</i>
HPA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
HSE	<i>Health and Safety Executive</i>
IDLH	<i>Immediately Dangerous To Life or Health</i>
INCA	Instituto Nacional do Câncer
LIE	Limite Inferior de Explosividade
LOPA	<i>Layer of Protection Analysis</i>

LSE	Limite Superior de Explosividade
MP	Material Particulado
NIOSH	<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Tecnology</i>
OHSAS	<i>Occupational Health and Safety Administration Standard</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde
PAC	<i>Protective Action Criteria for Chemicals.</i>
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PELBD	Polietileno Linear de Baixa Densidade
PET	Polietileno Tereftalato
PHL	<i>Preliminary Hazard Level</i>
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PO	Poliolefinas
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de Vinila
RfC	<i>Reference Concentration for Chronic Inhalation Exposure</i>
RCC	Resíduos de Construção Civil
RDO	Resíduo Doméstico
RPU	Resíduos Públicos
RSP	Resíduo Sólido Plástico
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
Syngas	Gás de Síntese
TEEL	<i>Temporary Emergency Exposure Limits</i>
URE	Unidade de Recuperação de Energia
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>

VC

Valor Calorífico

WTE

Waste to Energy

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	20
1 PROBLEMA DE PESQUISA / JUSTIFICATIVA / QUESTÕES MOTIVADORAS DA PESQUISA	25
2 OBJETIVO	26
2.1 Objetivos Específicos	26
3 REVISÃO DA LITERATURA	27
3.1 Sobre a tecnologia de pirólise	35
3.1.1 <u>Cronologia da tecnologia de pirólise</u>	35
3.1.2 <u>Aspectos técnicos da tecnologia de pirólise</u>	37
3.1.3 <u>Medidas de Segurança em Plantas WTE</u>	43
3.1.4 <u>Desafios tecnológicos</u>	44
3.2 Arcabouço legal	46
3.2.1 <u>Aspectos de Interesse da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)</u>	46
3.2.2 <u>Normas, legislações e documentos de referência no Brasil</u>	47
3.2.3 <u>Algumas Normas e Legislações Internacionais</u>	50
3.3 Percepção de riscos	52
3.4 Riscos da tecnologia de pirólise	53
3.4.1 <u>Análises de riscos realizadas em processamentos térmicos de RSUs</u>	53
3.4.2 <u>Emissões associadas à Tecnologia de pirólise aplicada a poliolefinas</u>	55
3.4.3 <u>Histórico de acidentes em plantas de pirólise</u>	57
3.4.4 <u>Metodologias para Identificação de Perigos</u>	67
3.4.5 <u>Emissões fugitivas</u>	68
3.5 Análise de Riscos	69
4 MÉTODOS E ETAPAS DE PESQUISA	71

4.1	Método para caracterização da planta de pirólise	71
4.1.1	<u>Modelo de usina de pirólise</u>	71
4.1.2	<u>Localização da planta de pirólise</u>	71
4.2	Avaliação do arcabouço legal	72
4.3	Método para avaliação da percepção de risco	72
4.3.1	<u>Objetivo da avaliação</u>	73
4.3.2	<u>Objeto de estudo</u>	73
4.3.3	<u>Tipo de abordagem e de resultado</u>	73
4.3.4	<u>Nível de consciência e participação dos envolvidos</u>	74
4.3.5	<u>Circunstâncias de realização</u>	74
4.3.6	<u>Sujeitos da pesquisa</u>	74
4.3.7	<u>Universo e tamanho da amostra</u>	74
4.3.8	<u>Dimensão</u>	76
4.3.9	<u>Categoria</u>	76
4.3.10	<u>Indicadores</u>	76
4.3.11	<u>O questionário</u>	76
4.3.12	<u>Distribuição do questionário aos respondentes</u>	84
4.4	Análise de risco da usina de pirólise	85
4.4.1	<u>Método para identificação de perigos</u>	85
4.4.2	<u>Dados climatológicos</u>	86
4.4.3	<u>Ferramenta de modelagem de zonas de ameaças de substâncias perigosas</u>	87
4.4.4	<u>Delimitação do objeto de estudo na planta</u>	87
4.4.5	<u>Definição das substâncias a serem simuladas e cenários considerados</u>	88
4.4.6	<u>Estimativa quantitativa de probabilidades</u>	90
4.4.7	<u>Cálculos de soma e multiplicação de probabilidades</u>	91
4.4.8	<u>Método para identificação de perigos</u>	93
4.4.9	<u>Critério de tolerabilidade de riscos</u>	94

4.5 Estudo de caso do processo de licenciamento da planta de pirólise em Bento Gonçalves/RS	95
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	96
5.1 Características da usina de pirólise.....	96
5.1.1 <u>Modelo da usina de pirólise</u>	96
5.1.2 <u>Local escolhido para a localização da planta de pirólise</u>	100
5.2 Arcabouço legal.....	101
5.3 Percepção de riscos.....	103
5.3.1 <u>Resultados da amostragem</u>	103
5.3.2 <u>Perfil dos respondentes</u>	105
5.3.3 <u>Conhecimento sobre tecnologias de tratamento térmico</u>	107
5.3.4 <u>Sentimentos de oposição e aceitação das tecnologias de UREs</u>	108
5.3.5 <u>Percepção de probabilidade e gravidade de acidentes</u>	115
5.3.6 <u>Planilha ETBA</u>	119
5.3.7 <u>Resultados da pesquisa sobre dados climatológicos</u>	122
5.3.8 <u>Simulação do Alcance das Emissões Fugitivas</u>	125
5.3.9 <u>Ruptura catastrófica do forno de pirólise</u>	129
5.3.10 <u>Simulação da liberação total em 10 minutos</u>	136
5.3.11 <u>Riscos social e individual</u>	137
5.4 Caso de Planta de pirólise de Bento Gonçalves/RS	139
CONCLUSÕES.....	140
RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	144
REFERÊNCIAS	145
APÊNDICE A - Aspectos de uma planta de pirólise.....	160
APÊNDICE B - Questionário.....	164
APÊNDICE C - Taxas de falha	174

INTRODUÇÃO

Plásticos são uma ampla gama de materiais sintéticos ou semissintéticos que usam polímeros como ingrediente principal. São materiais que desempenham um papel importante no nosso cotidiano, e nossa dependência cada vez maior deles se justifica por sua versatilidade, facilidade de transporte e baixo custo de produção em relação a materiais mais tradicionais, como madeira, concreto e metal. Atualmente, os plásticos são utilizados em diversos setores, como construção, medicina, aplicações de engenharia, automotiva, aeroespacial, lazer, eletrônica, embalagens, alimentos e outros. Além disso, o crescimento econômico e o aumento da população aumentam a demanda por artigos plásticos e seus produtos químicos utilizados na produção.

O aumento da demanda por plásticos inevitavelmente leva ao acúmulo de resíduos sólidos plásticos (RSP), que ocupa grande parte dos sólidos urbanos (RSU) nos países desenvolvidos e em desenvolvimento (AL-SALEM et al., 2017). No Brasil gerou-se 65,11 milhões de toneladas de RSU no ano de 2019 (BRASIL, 2020a, p.107). Estima-se que a parcela potencialmente recuperável de resíduos recicláveis corresponde a 30% de todo o RSU (BRASIL, 2020a, p.139), ou seja, cerca de 19,5 milhões de toneladas, mas, somente 2,1% desse foram, de fato, recuperados para a reciclagem (BRASIL, 2020a, p.138) o restante sendo destinados a lixões ou aterros. Dessa parcela potencialmente reciclável, 24,3% correspondem a resíduos plásticos (BRASIL, 2020a, p.140), ou seja, **4.746.519** de toneladas de plásticos foram descartados no ano de 2019. Levando-se em conta que o percentual de resinas de poliolefinas¹ consumidas no Brasil é de 60,3% (ABIPLAST, 2019) estima-se que se gera anualmente **2.862.151** toneladas desse tipo de plástico baseados nesse tipo de resina. Essa quantidade significativa de poliolefinas consumidas se explica pela sua versatilidade em relação a muitas aplicações.

Não estão computados nos cálculos acima a massa de resíduos plásticos que são descartados no ambiente marinho e terrestre, bem como nos ecossistemas.

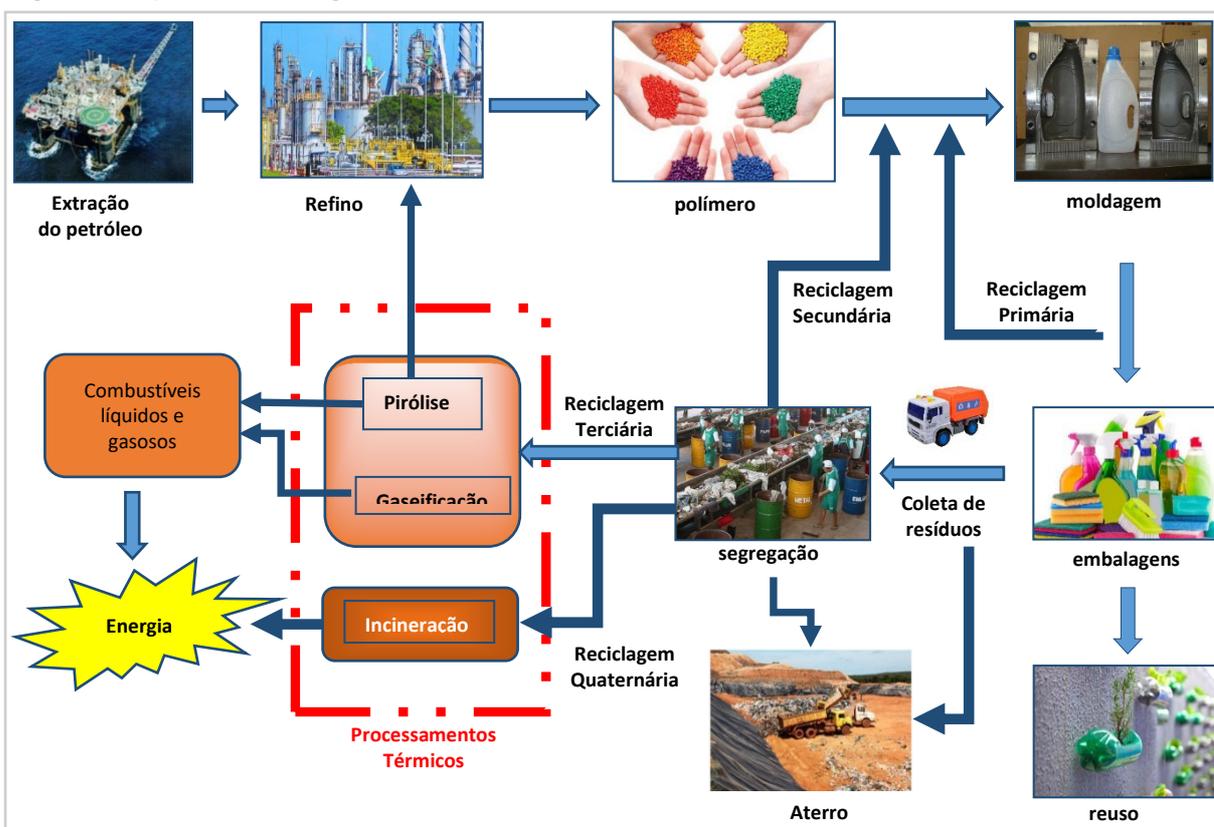
¹ As poliolefinas são polímeros que têm como monômero uma olefina simples, e com a fórmula geral C_nH_{2n} . Por exemplo, o polietileno é uma poliolefina produzida a partir da polimerização da olefina etileno. O polipropileno é outra poliolefina feita a partir da olefina propileno.

Em 15 de julho de 2020 foi sancionado o novo marco legal do Saneamento Básico (LEI Nº 14.026) que prorroga o prazo para o fim dos lixões a céu aberto e aterros controlados. Para capitais e municípios das regiões metropolitanas o prazo foi até 24 de junho de 2021. Para municípios com população de 50 mil a 100 mil habitantes o prazo será até 24 de agosto de 2024. Isso significará uma maior demanda por espaço dos poucos aterros sanitários existentes os quais tenderão a inflacionar o preço da tonelada de RSU a ser aceita. A disposição de RSU em aterros ainda é mais viável economicamente nos Estados Unidos (PSOMOPOULOS, BOURKA e THEMELIS, 2009; THEMELIS e SHIN, 2015) devido à disponibilidade de terras, fato que se repete com o Brasil. Já a União Europeia está forçando o fechamento de todos os aterros de acordo com a Diretiva de Aterros Sanitários emitida em 1999 e determinando que os aterros existentes atendam a novos e mais rigorosos padrões de controle de lixiviado e poluição, desviando assim os resíduos do aterro para a reciclagem e recuperação de energia (CHALIKI et al. 2014; EEA, 2009). Assim, a solução de descarte em aterros tradicional e amplamente utilizada está se tornando uma forma indesejável de descarte devido às pressões da legislação, aumento de custos e baixa biodegradabilidade dos plásticos à base de petróleo comumente usados (ACHILIAS et al., 2007; HE et al., 2015). Nesse cenário qualquer técnica para a redução do volume de plásticos, que ocupa um volume significativo no RSU, pode ser bem-vinda.

Os artefatos feitos de plástico podem ser reutilizados, isto é, ter um uso diferente do original, ou podem ser reciclados. As abordagens de reciclagem de RSPs comumente adotadas propõem classificar os tipos de reciclagem em quatro abordagens principais: reciclagem primária (re-extrusão de plásticos pré-consumo), reciclagem secundária (re-extrusão de plásticos pós-consumo), reciclagem terciária (pirólise e gaseificação) e reciclagem quaternária (incineração) (HORVAT e NG, 1999; ACHILIAS e KARAYANNIDIS, 2004; e KUMAR, 2020).

Esses diferentes tipos de reciclagem estão esquematizados na **Figura 1**.

Figura 1 - Tipos de Reciclagens e Processos Térmicos



Fonte: Elaborado pelo autor

Nos Estados Unidos e Europa as plantas de gaseificação e pirólise são regulamentadas como incineradores de resíduos e atribuem a essas tecnologias o acrônimo WTE - *Waste to Energy* - (GAIA, 2017).

A técnica de reutilização teria um potencial ainda menor de reduzir o volume de plásticos, e assim como no caso da técnica de reciclagem secundária, não poderia ser aplicada a materiais contaminados como frascos descartados de lubrificantes, por exemplo.

A incineração (reciclagem quaternária) pode ser aplicada a plásticos residuais contaminados, porém além de existirem poucas as plantas existentes – são 18 em todo o país (BRASIL, 2020a, p.194) – esse tipo de processamento demanda energia para funcionar, gerando custos para as prefeituras.

Um outro processo de reciclagem terciária, ainda incipiente no Brasil é o de Processo de tratamento por plasma.

A maior parte dos estudos sobre pirólise tiveram como motivação a sua aplicação para destinação de parte dos resíduos sólidos urbanos (AL-SALEM, 2017). Este processo pode ser térmico ou catalítico, em atmosfera inerte, e é uma

alternativa promissora já que permite a conversão de polímeros em hidrocarbonetos, semelhante ao que acontece com o craqueamento do petróleo. Além de proporcionar uma redução das quantidades de resíduos dispostos em aterros (JOPPERT JUNIOR, 2015) também tem a vantagem de se tratar de um processo com custo relativamente baixo a partir do qual uma ampla distribuição de produtos pode ser obtida (ALMEIDA e MARQUES, 2016).

Há no mercado diversas empresas que fornecem plantas de pirólise de resíduos plásticos pré-montadas (STANTEC, 2011).

Só em pedidos de patentes entre os anos de 1991 e 2019 foram depositados 38 pedidos no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI).

Os argumentos que os representantes dessas empresas colocam para atrair clientes são (GAIA, 2017; JORGE, 2018b; JORGE, 2018c):

- geração de “energia renovável”
- tratam de tecnologias com histórico mais de 3 décadas
- gera óleo pirolítico que substitui o óleo diesel”
- “trata-se de tecnologia de “não combustão”
- “escória pode ser vendida como material de construção
- não tem custo para a prefeitura
- uma planta de capacidade de 200 T/ dia gera 8 MW/h, suficientes para suprir cerca de 1000 residências

Algumas dessas empresas têm oferecido suas plantas para prefeituras que podem não dispor de profissionais capacitados para avaliar e decidir pela aquisição desse produto ou serviço (JORGE, 2018a).

Um aspecto importante, mas que tem sido pouco discutido são os riscos tecnológicos proporcionados por usinas de pirólise. Essa lacuna pode estar acontecendo em parte pelo fato de ser um tema ainda incipiente no Brasil, não havendo ainda demanda para o desenvolvimento da expertise necessária no assunto por parte dos profissionais ligados às secretarias municipais de meio ambiente e/ou serviços públicos. Sem prejuízo desta, uma outra possibilidade seria a baixa percepção de risco sobre o processo de pirólise que pode contribuir para negligenciar os riscos reais. Qualquer uma dessas possibilidades pode influenciar ou ser influenciada no processo de elaboração de normas.

Por outro lado, considerando que um forno de pirólise ao fim da transformação contém em seu interior uma mistura de substâncias inflamáveis e que opera a uma temperatura em torno de 500°C, a priori, já é possível identificar os perigos de dispersão de gases tóxicos, de incêndio e de explosão que podem ou não extrapolar os limites de empreendimentos do tipo. Outros perigos não tão evidentes dependem de um método estruturado para identificação de perigos.

Um melhor entendimento dos riscos percebidos e reais envolvidos nessa tecnologia seria um bom ponto de partida para desenvolver soluções e normas para mitigá-los no futuro.

1 PROBLEMA DE PESQUISA / JUSTIFICATIVA / QUESTÕES MOTIVADORAS DA PESQUISA

É notória a preocupação a nível mundial, por parte da comunidade científica e do poder público, para buscar soluções para resolver os problemas dos resíduos sólidos. O processamento de resíduos plásticos utilizando a tecnologia de pirólise traz uma série de vantagens a custos relativamente baixos. Contudo, novas tecnologias trazem consigo novos riscos.

Diante dessa problemática, com a tecnologia pirólise para tratamento de resíduos ainda incipiente no Brasil, cabe perguntar:

- 1) A legislação vigente para tratamento térmico e usinas de recuperação de energia (URE) é adequada e/ou suficiente para plantas de pirólise?
- 2) Qual a percepção que os gestores têm dos riscos ambientais inerentes à tecnologia de pirólise aplicada a resíduos sólidos urbanos (RSU)?
- 3) Quais são os riscos proporcionados pela tecnologia de pirólise de resíduos plásticos?
- 4) Quais seriam os requisitos mínimos a serem exigidos em normas ou editais de licitação para a aquisição de plantas ou serviços de pirólise de resíduos sólidos urbanos com base em conhecimentos teóricos?

2 OBJETIVO

Esta tese tem como objetivo elaborar um documento de referência que sirva de subsídio para avaliação de risco tecnológico e regulamentação de plantas de pirólise de resíduos sólidos urbanos, bem como tornar a percepção de riscos mais próxima da realidade.

2.1 Objetivos Específicos

- 1) Caracterizar uma usina de pirólise
- 2) Avaliar a percepção de riscos dos gestores de RSUs
- 3) Proceder análise de risco de uma usina de pirólise
- 4) Avaliar a legislação brasileira e de outros países.

3 REVISÃO DA LITERATURA

A geração cada vez maior de resíduos devido ao aumento do consumo da população é um dos maiores problemas ambientais da atualidade no País. A expansão e o adensamento das zonas urbanas, agravam esse problema, já que a infraestrutura sanitária da maioria das cidades brasileiras não acompanha adequadamente esse ritmo crescimento.

De acordo com um levantamento feito pelo Governo Federal estimativa de massa coletada de RSUs em 2019 foi de cerca de **65 milhões** de toneladas (BRASIL, 2020a). A **Tabela 1** mostra a evolução do total de RSUs gerados no Brasil e da geração diária por habitante no período de 2017 a 2019.

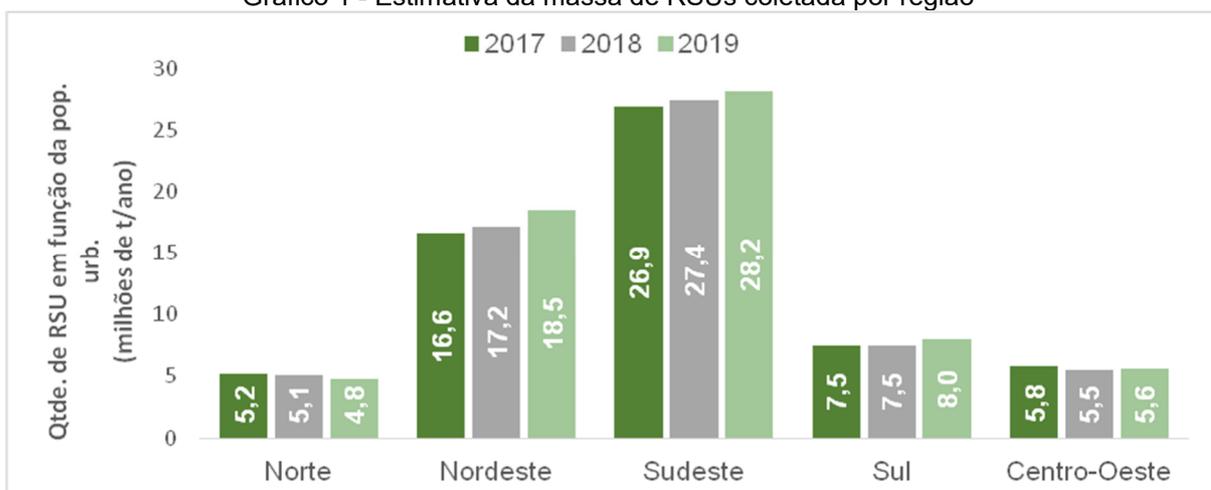
Tabela 1 - Estimativa da massa coletada RSU no país, segundo macrorregião

Macrorregião geográfica	Número de Municípios no Brasil	População urbana	Geração de RSU (kg/hab./dia)	Participação relativa da geração de RSU	Qtde. de RSU em função da pop. urb. (milhões de t/ano)	Participação Relativa da quantidade de RSU
Norte	450	13.606.102	0,97	19,3%	4,82	7,4%
Nordeste	1.794	41.971.407	1,21	24,1%	18,54	28,5%
Sudeste	1.668	82.276.710	0,94	18,7%	28,23	43,4%
Sul	1.191	25.642.279	0,85	16,9%	7,96	12,2%
Centro-Oeste	467	14.515.251	1,05	20,9%	5,56	8,5%
Total - 2019	5.570	178.011.749	1,00	100,0%	65,11	100,0%
Total - 2018	5.570	176.539.719	0,96	100,0%	62,78	100,0%
Total - 2017	5.570	175.588.503	0,95	100,0%	61,91	100,0%

Fonte: BRASIL, 2020a

O **Gráfico 1** mostra a evolução da quantidade de RSUs coletada entre os anos de 2017 e 2019:

Gráfico 1 - Estimativa da massa de RSUs coletada por região



Fonte: BRASIL, 2020a

Como pode ser observado na **Tabela 1** e no **Gráfico 1** a geração de RSUs tem crescido não só em função do aumento da população como também pelo aumento da geração diária por habitante, nas regiões mais povoadas.

Com relação ao tipo de processamento dado aos resíduos um outro levantamento, considerando resíduos domiciliares e públicos (RSUs), de saúde, entulhos, podas e outros, tem-se que em 2019 os lixões e aterros controlados e sanitários responderam por 75,2% do total recebido (ver **Tabela 2**).

Tabela 2 - Massa total de resíduos recebidos pelas unidades de processamento

Tipo de unidade de processamento	Massa recebida nas unidades de processamento (t)	Percentual da massa recebida nas unidades de processamento (%)
Lixão	7.241.589,0	9,6
Aterro controlado	6.601.335,5	8,7
Aterro Sanitário	43.167.237,6	56,9
Unidade de Triagem	4.519.162,2	6,0
Unidade de compostagem	304.637,3	0,4
Unidade de transbordo	8.101.517,2*	10,7
Unidade de tratamento por incineração	8.618,3	0,0
Unidade de Manejo de Galhadas e Podas	142.625,1	0,2
Vala específica de resíduos de serviço de saúde (RSS)	115.460,7	0,2
Unidade de tratamento por micro-ondas ou autoclave	169.984,4	0,2
Queima em forno de qualquer tipo	0,0	0,0
Área de transbordo e triagem de resíduos de construção civil (RCC) e volumosos	541.920,0*	0,7
Área reciclagem de RCC	845.933,7	1,1
Aterro de RCC	2.999.139,4	4,0
Outro	1.054.730,4	1,4
Total - 2019	75.813.890,8	100,0
Total - 2018	72.189.839,3	100,0
Total - 2017	73.335.188,0	100,0

Fonte: BRASIL, 2020a

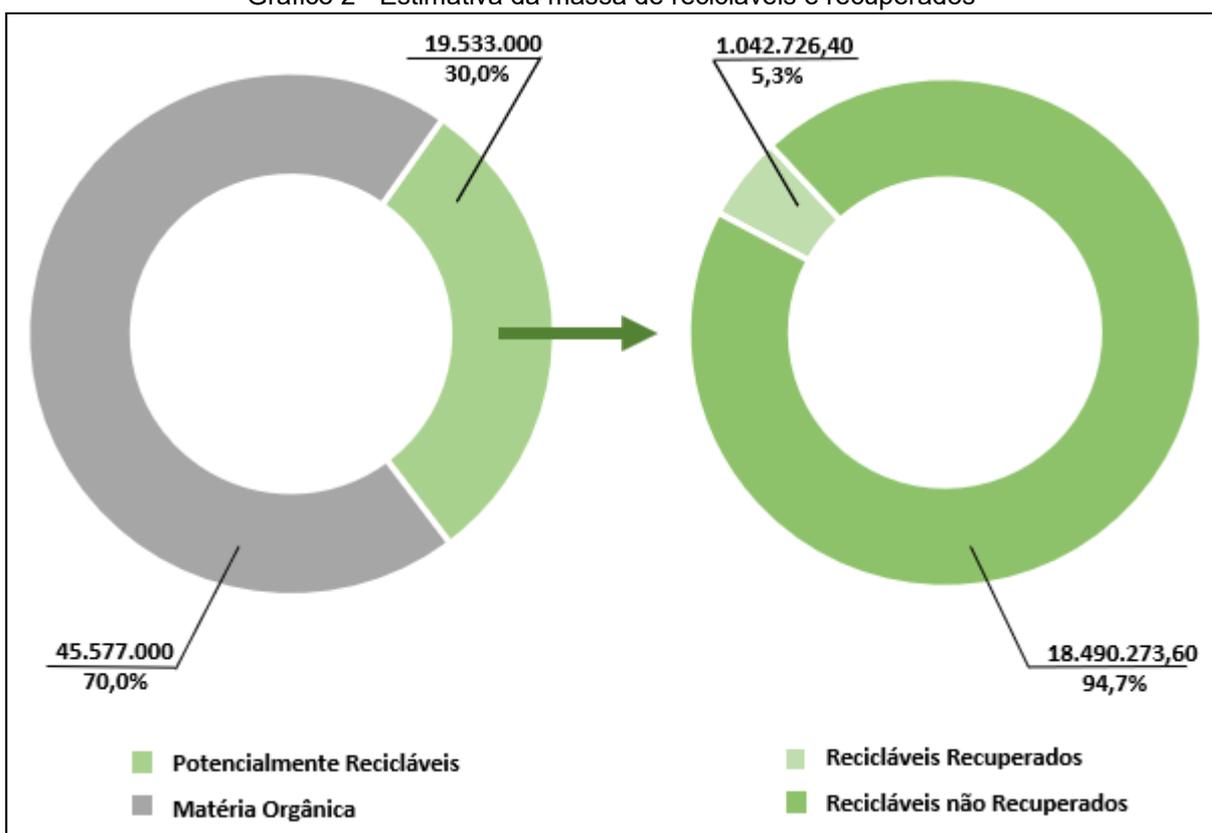
Aparentemente no levantamento feito pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) o processamento pela técnica de pirólise não está contemplado. Não é incomum estender o termo “incineração” também às técnicas de gaseificação e pirólise, possivelmente pelo fato dessas duas últimas serem menos difundidas que a primeira. A pirólise poderia também estar enquadrada na designação “Queima em fornos de qualquer tipo”. De qualquer forma, ainda que os processos de incineração e de fornos de qualquer tipo se referissem à pirólise, ainda assim teriam uma contribuição quase nula em termos percentuais.

De acordo com a USEPA (2021b) a incineração de RSU é responsável por uma pequena parte da gestão de resíduos nos Estados Unidos por vários motivos. De um modo geral, as regiões do mundo onde as populações são densas e a terra é limitada (por exemplo, muitos países europeus, Japão), têm maior adoção de combustão com recuperação de energia devido a restrições de espaço. Como os

Estados Unidos abrangem uma grande extensão de terra, as limitações de espaço não têm sido um fator importante na adoção da combustão com recuperação de energia. Os aterros sanitários nos Estados Unidos comumente são considerados a opção mais viável, a curto prazo, devido ao baixo custo econômico de construir um aterro sanitário de RSU quando comparado a uma instalação de combustão de RSU. No Brasil, por também haver disponibilidade de terras, deverá seguir a mesma tendência de utilização de aterros sanitários.

Uma fração considerável do RSU é passível de ser reciclada. A amostragem por municípios feita por Brasil (2020a) revelou que a fração “potencialmente” reciclável seca (papel, plástico, metal, vidro e outros) é de 30%. Contudo, dentro desta fração potencialmente reciclável, somente 5,3% são de fato recuperados, como pode ser visualizado no **Gráfico 2**.

Gráfico 2 - Estimativa da massa de recicláveis e recuperados

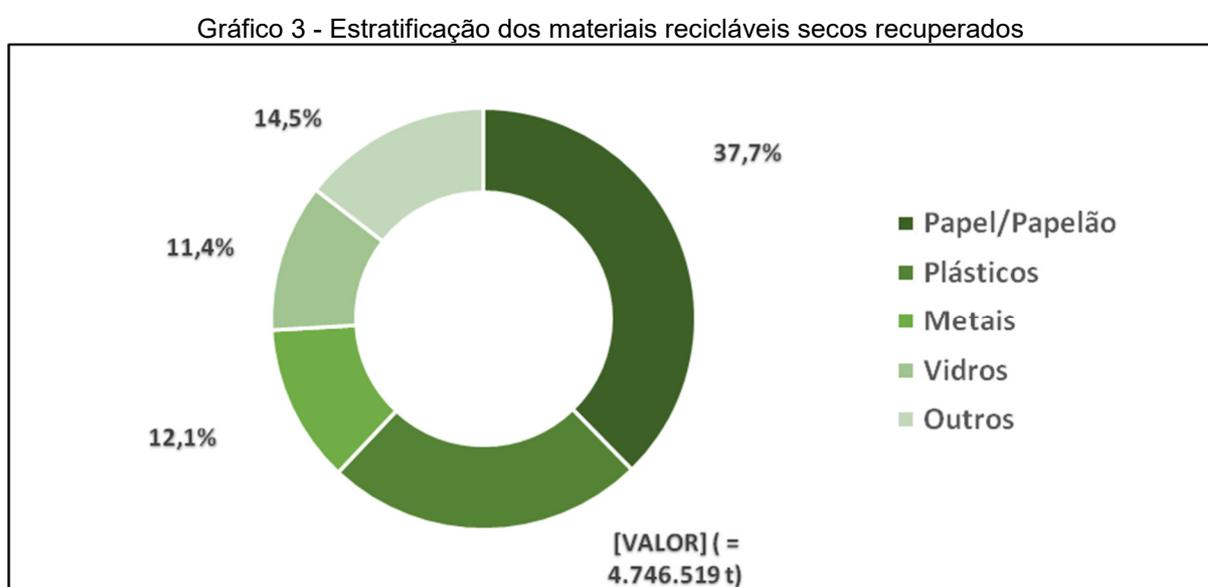


Fonte: BRASIL, 2020a

Ou seja, anualmente gera-se cerca de **19,5 milhões de toneladas** de resíduos potencialmente recicláveis, sendo que dessa quantidade pouco mais de **1 milhão de toneladas**, são recuperadas e recicladas, o que é muito baixo. Isso mostra que há ainda um enorme potencial para se reduzir o volume de RSU a ser

disposto em aterros sanitários. Um fator que poderia explicar essa baixa recuperação seria a disponibilidade de terras ainda abundante fora dos centros urbanos. Mas ainda que os grandes centros geradores possam dispor seus RSUs nesses aterros, há ainda o gasto com o transporte. A cidade do Rio de Janeiro, por exemplo, atualmente envia seus RSUs para o Centro de Tratamento de Resíduos em Seropédica/RJ a cerca de 70 Km do centro da capital, ocasionando outros impactos ambientais como o aumento da quantidade de emissões veiculares e riscos de acidentes em vias.

A estratificação dos tipos de materiais recicláveis e que foram recuperados em 2019 é mostrada no **Gráfico 3**:



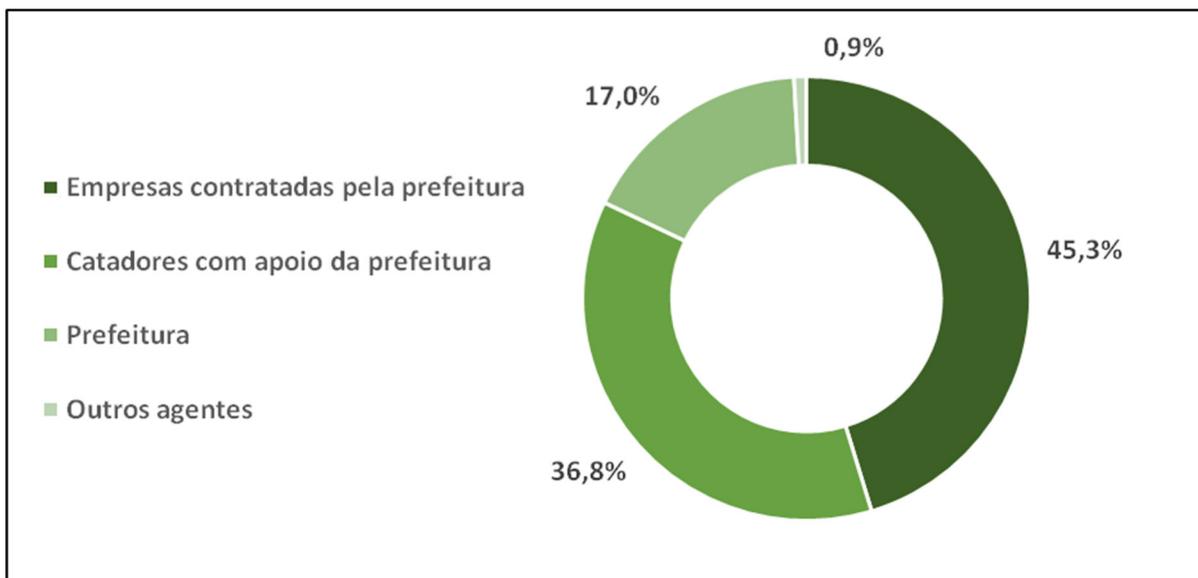
Fonte: BRASIL, 2020a

Como pode ser observado no **Gráfico 3**, papel/papelão e plásticos foram os tipos de recicláveis mais abundantes nos RSUs em 2019.

Especificamente os resíduos plásticos, que foram objetos deste estudo, contribuem com cerca de 24% de todos os resíduos recicláveis recuperados. Extrapolando esse percentual para o total de resíduos sólidos chega-se à massa de aproximadamente **4,7 milhões de toneladas** de plásticos gerados anualmente no Brasil.

Essa separação de resíduos em classes como a mostrada no gráfico acima só é possível devido a ações de “coleta seletiva”. Os agentes executores dessas operações são mostrados no **Gráfico 4**:

Gráfico 4 - Percentuais da massa coletada pelo serviço de coleta seletiva de RDO, segundo agente executor



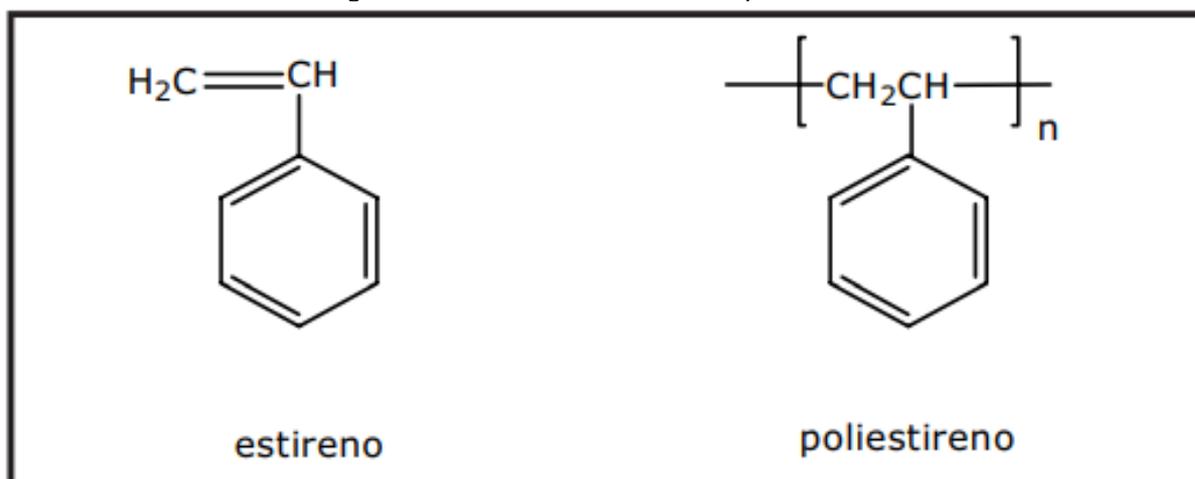
Fonte: BRASIL, 2020a

Observando-se o **Gráfico 4** percebe-se que os catadores têm uma participação muito importante contribuindo com 36,8% da separação do total reciclável, o que representa cerca de 384 mil toneladas. Os catadores nesse aspecto rivalizam com as empresas contratadas que separam 45,3% ou cerca de 472 mil toneladas.

As substâncias utilizadas como matéria-prima na fabricação de plásticos são os monômeros, que são obtidos principalmente a partir da destilação fracionada do petróleo. Mas ainda que representem um uso mais nobre do petróleo do que a simples queima na forma de combustível, os materiais plásticos causam impacto ao meio ambiente.

Os plásticos têm como principal componente o polímero. Polímeros são macromoléculas, formadas pela junção de moléculas menores denominadas monômeros. Os monômeros que formam um polímero podem ou não ser idênticos, e cada macromolécula pode conter milhares ou milhões de átomos. Polímeros de interesse comercial apresentam geralmente massas moleculares médias superiores a 10.000 (PIATTI e RODRIGUES, 2005). Na **Figura 2** estão representadas as estruturas do monômero de estireno que é utilizado para a fabricação de poliestireno:

Figura 2 - Monômero de estireno e poliestireno



O poliestireno no caso acima é representado com a unidade de repetição entre colchetes, e a letra “n” significa que esta unidade se repete n vezes formando as cadeias poliméricas.

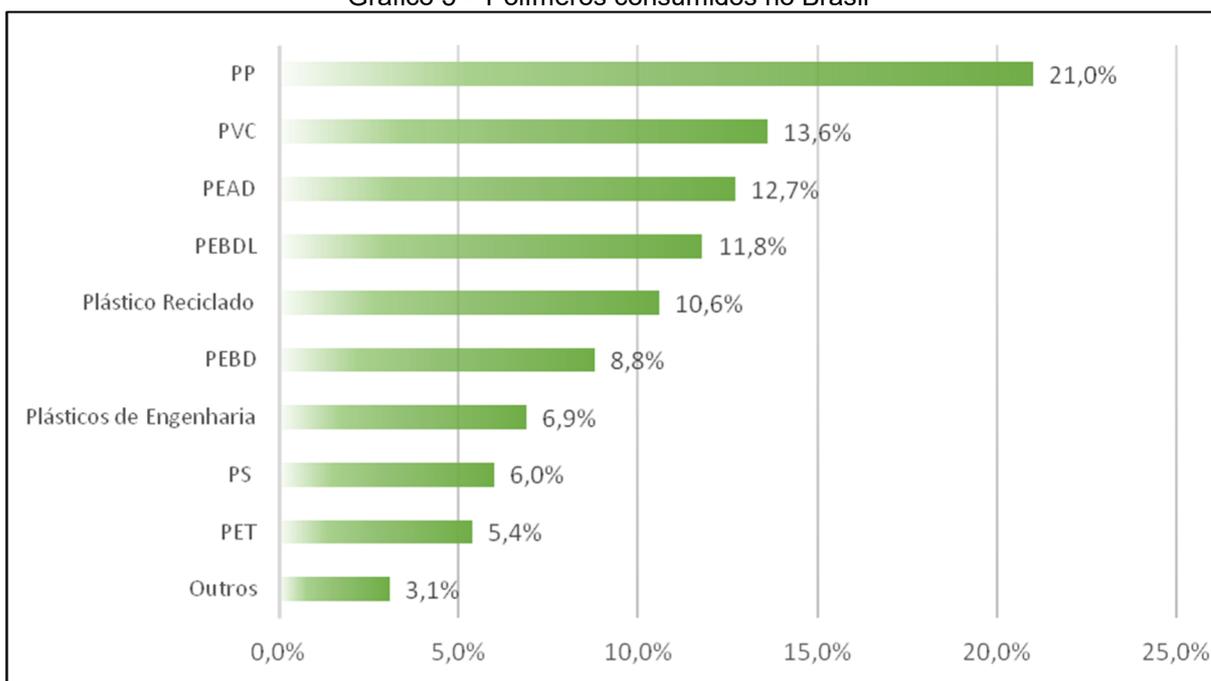
Uma das razões que fazem os plásticos serem materiais de uso cada vez mais difundido é a sua durabilidade, consequência de sua estabilidade estrutural, que lhes confere resistência aos diversos tipos de degradação. O polietileno de alta densidade (PEAD), por exemplo, é amplamente utilizado na fabricação de garrafas de leite, garrafas de detergente, recipientes de óleo, brinquedos e muito mais devido à sua alta resistência mecânica e durabilidade (AL-SALEM, 2017). Essas vantagens tornam desinteressante a busca por materiais alternativos que sejam menos agressivos ao meio ambiente.

Mas essas mesmas vantagens conferem a alguns tipos de plásticos grande resistência à degradação podendo levar séculos para se degradarem (PIATTI e RODRIGUES, 2005), causando problemas ambientais como o volume na disposição em aterros, impactos visuais e entupimento de bueiros.

Como visto acima, no

Gráfico 3, os plásticos representam 24,3% de todo o resíduo sólido descartado. De acordo com a ABIPLAST (2019, p.27) de todas os polímeros consumidos no Brasil em 2019, 54,3% (ou 2,6 milhões de toneladas) correspondem a poliolefinas que compreendem principalmente os polietilenos (de alta e baixa densidade) e o polipropileno (ver **Gráfico 5**).

Gráfico 5 – Polímeros consumidos no Brasil



Legenda: (PP) = Polipropileno; (PVC) = Policloreto de Vinila; (PEAD) = Polietileno de Alta Densidade; (PEBDL) = Polietileno de Baixa Densidade Linear; (PEBD) = Polietileno de Baixa Densidade; (PS) = Poliestireno; e (PET) = Polietileno Tereftalato.

Fonte: ABIPLAST, 2019, p.27

Além do problema do volume gerado, dados levantados por Depledge et al. (2013) e Brouwer et al. (2017) revelam que, no mundo, há uma fração considerável de resíduos plásticos que é descartada diretamente em corpos d'água ou diretamente no ambiente marinho, gerando diversos impactos ambientais, econômicos e sociais. Embora a quantidade precisa de plásticos que entram no ambiente marinho ainda seja desconhecida, reunindo dados mundiais sobre resíduos sólidos e usando densidade populacional, calcula-se uma faixa de 4,8-12,7 milhões de toneladas por ano sobre a massa de resíduos plásticos terrestres que entram o oceano (JAMBECK et al, 2015 e GREGORY, 2009). Ao entrar no ambiente marinho, produtos plásticos e detritos podem ser potencialmente fragmentados em pedaços menores, <5 mm, chamados de microplásticos (BARNES et al., 2009; KALOGERAKIS et al., 2017), e serem ingeridos por pássaros e espécies aquáticas (GREGORY, 2009 e STEER et al., 2017). Em um estudo realizado por Ragusa et al. (2021) foi constatada a presença de microplásticos em placentas humanas, sem se saber ainda quais seus efeitos.

3.1 Sobre a tecnologia de pirólise

3.1.1 Cronologia da tecnologia de pirólise

O conceito de pirólise para processamento de RSU ganhou popularidade na década de 1960, pois foi assumido que, como o RSU era composto tipicamente por cerca de 60% de matéria orgânica, seria bem adequado para tratamento pirolítico. Em meados da década de 1970, os estudos na Europa e nos Estados Unidos sobre a pirólise de RSU foram concluídos, alguns desses estudos envolveram a construção e operação de plantas de demonstração. No final da década de 1970, no entanto, surgiram dificuldades técnicas e econômicas em torno da pirólise de RSU, o que resultou na redução do interesse e das expectativas pela tecnologia. Desde então, a pirólise de RSU foi investigada, mas continua a enfrentar limitações técnicas (STANTEC, 2011).

Nos Estados Unidos a maioria das plantas de WTE, entre as quais estão incluídas as que utilizam a tecnologia de Pirólise, foram em sua maioria construídas nas décadas de 1980 e 1990 a partir de incentivos fiscais (CHERNYAKHOVSKIY et al., 2016; TEDC, 2019; WONG, 2015; MUKHERJEE et al., 2020). Essas instalações estão envelhecendo e precisam de investimentos. Algumas, apesar dos esforços, não foram capazes de atender às especificações do projeto e foram forçadas a fechar ou operar abaixo da capacidade. Esses empreendimentos enfrentaram oposição de vários grupos de cidadãos por 20 anos nenhuma nova grande instalação foi construída (MAKARICHI, JUTIDAMRONGPHAN e TECHATO, 2018; WONG, 2015). Durante esse período, com a globalização em pleno andamento, havia a facilidade de exportação de resíduos para países em desenvolvimento (principalmente a China) e novos aterros avançados foram construídos nos Estados Unidos (BROOKS, WANG e JAMBECK, 2018; MUKHERJEE et al., 2020). Uma recente proibição de importação de resíduos na China e problemas com a redução do espaço em aterros sanitários perto de centros populacionais nos EUA reavivaram o interesse em WTEs (BROOKS; WANG e JAMBECK, 2018; MUKHERJEE et al., 2020). Existem dezenas de instalações planejadas nos EUA, principalmente em territórios insulares dos EUA, como as Ilhas Virgens dos EUA, Guam, Porto Rico e

Havaí (WAITE, 2017; MUKHERJEE et al., 2020). No entanto, o processo de aprovação tem se provado difícil devido à oposição pública, o tempo que leva para avaliações de impacto e o processo de aprovação. Detratores dessas tecnologias afirmam que os investimentos em WTE prejudicam os esforços de “reduzir e reciclar” e reverter os ganhos nas melhorias da qualidade do ar. Nos EUA, os padrões nacionais de qualidade do ar podem impossibilitar a instalação de WTE em algumas áreas ou enfrentar regulamentos rigorosos de poluição do ar em outras (MUKHERJEE et al., 2020).

A planta de pirólise mais longa é a localizada em Burgau (Alemanha), e opera desde 1987 processando 36.200 toneladas por ano. A planta de maior capacidade fica localizada no Japão, e processa cerca de 150.000 toneladas por ano (STANTEC, 2011).

Um banco de dados de fornecedores da tecnologia de pirólise é mostrado no **Quadro 1**.

Quadro 1 - Banco de dados de fornecedores de tecnologia de pirólise de RSU

Empresa	Opera desde	Plantas de referência	Capacidade
Balboa Pacific Corporation	n/d	n/d	n/d
Brightstar Environmental	2001	Austrália	55000 t/ano
Compact Power	n/d	Avonmouth, Reino Unido	Resíduo hospitalar
Conrad Industries	1993	Centralia, Washington	Projetado para processar 21 a 65 t/dia
Emerald Power Corporation		n/d	Cidade de Nova York
ENER-G (acquired Waste Gas Technology)	2002	Sarpsborg 1 Plant, Noruega	75000 t/ano
Entech Renewable Energy	2006	Coréia	60 t/dia (MSW)
International Energy Solutions	2004	Romoland, Califórnia	16500 t/ano (MSW)
JND Thermal Process	n/d	Hamburg, Alemanha	Instalação de Ensaio
Mitsui Babcock	2000	Yame Seibu, Japão	219 t/dia
Mitsui R-21	2002	Toyohashi, Japão	400 t/dia
Nexus	n/d	França	10-100 t/dia
North American Power Co.	n/d	Las Vegas, Nevada	10 to 68 t/dia (Instalação de ensaio)
Recycled Refuse International	Não existente	n/d	n/d
Splainex Ecosystems Ltd.	n/d	n/d	n/d
Takuma	2005	Kakegawa, Japão	
Technip / Waste Gen	1987	Burgau, Alemanha	36200 t/ano
Techtrade	2002	Hamm, Alemanha	100000 t/ano
Thide/Hitachi	2003	Izumo, Japão	63500 t/ano
TPF Group (Serpac Pyroflam)	2005	Keflavik, Islândia	41 t/ano
WasteGen (UK)	2000	Hamm, Alemanha	100000 t/ano

Fonte: adaptado de STANTEC, 2011

3.1.2 Aspectos técnicos da tecnologia de pirólise

A tecnologia de pirólise juntamente com as de incineração, gaseificação e digestão anaeróbica formam o que pode ser denominado processamento térmico do resíduo sólido ou no jargão internacional WTE (*Waste-to-energy conversion*) ou ainda Usinas de Recuperação Energéticas, na definição de nossa legislação. As quatro técnicas utilizam o calor para tratar de resíduos, diferindo na quantidade de oxigênio introduzida, nas temperaturas de trabalho e como consequência nos produtos formados.

De acordo com um levantamento feito pela USEPA (2012), as tecnologias de pirólise normalmente processam apenas plásticos; as tecnologias de gaseificação normalmente processam plásticos e frações biodegradáveis de RSU, mas evitam inertes (por exemplo, vidro, metais, agregados); e a Digestão Anaeróbia normalmente processa frações altamente putrescíveis de resíduos de comida, de jardinagem e papel. Já a incineração, a exemplo do que ocorre com aterros sanitários, pode aceitar resíduos como estão, isto é, sem separação e podem operar com maiores capacidades do que as demais tecnologias de recuperação energética citadas anteriormente. No entanto, embora o principal produto da incineração seja a energia elétrica (e possivelmente o vapor), as outras tecnologias de recuperação energética produzem combustíveis sintéticos ou biocombustíveis que podem ser queimados para produzir energia elétrica, usados como combustível para transporte ou vendidos como um produto químico de base nos mercados regionais.

O **Quadro 2** dá uma comparação de três das tecnologias WTE.

Quadro 2 - Visão geral das tecnologias das características de plantas WTE

Tecnologias de Conversão	Pirólise	Gaseificação	Digestão Anaeróbica
Alimentação	Plásticos	RSU	Alimentos, podas e galhadas e papel
Produto final	Óleo sintético, cera de petróleo	Gás de síntese, eletricidade, etanol	Biogás, eletricidade
Eficiência de conversão	62-85%	69-82%	60-75%
Capacidade da Planta	10-30 t/dia	75-330 t/dia	10-100 t/dia
Poder Calorífico do Produto	15.000-19.050 BTU/lb	15.500-18.800 BTU/lb	6.000-7000 BTU/lb

Fonte: USEPA (2012)

A pirólise envolve a degradação térmica por meio de aquecimento em atmosfera inerte. O processo é geralmente conduzido a temperaturas moderadas entre 400-800°C e, no caso de plásticos pode resultar na formação de frações voláteis que podem ser separadas em óleo de hidrocarboneto condensável e um gás de alto valor calorífico não condensável (KAMINSKY, MENZEL e SINN, 1976; SHAH, ROCKWELL e HUFFMAN, 1999; e AGUADO et al, 2006). Esse processo requer energia térmica que normalmente é aplicada indiretamente por condução térmica através das paredes de um reator de contenção, uma vez que de forma intencional o ar ou o oxigênio não são introduzidos na reação. A transferência de calor das paredes do reator ocorre preenchendo o interior do forno com gás inerte, que também fornece um meio de transporte para a remoção de produtos gasosos (STANTEC, 2011). No interior do reator, os resíduos sofrem decomposição formando uma mistura de hidrocarbonetos líquidos e gasosos e dependendo da composição do resíduo monóxido de carbono dióxido de carbono e hidrogênio (HONUS et al, 2018b). Esses hidrocarbonetos podem ser queimados gerando energia que pode ser reaproveitada no próprio processo ou gerar eletricidade. Os hidrocarbonetos líquidos, se destilados, podem dar origem às frações correspondentes ao óleo diesel, gasolina e querosene.

A literatura e os fornecedores de tecnologia usam nomes diferentes para pirólise (por exemplo, craqueamento catalítico) e diferentes variações de processo que podem causar confusão. Esses processos tecnológicos podem ser simplificados em três tipos que são (USEPA, 2021):

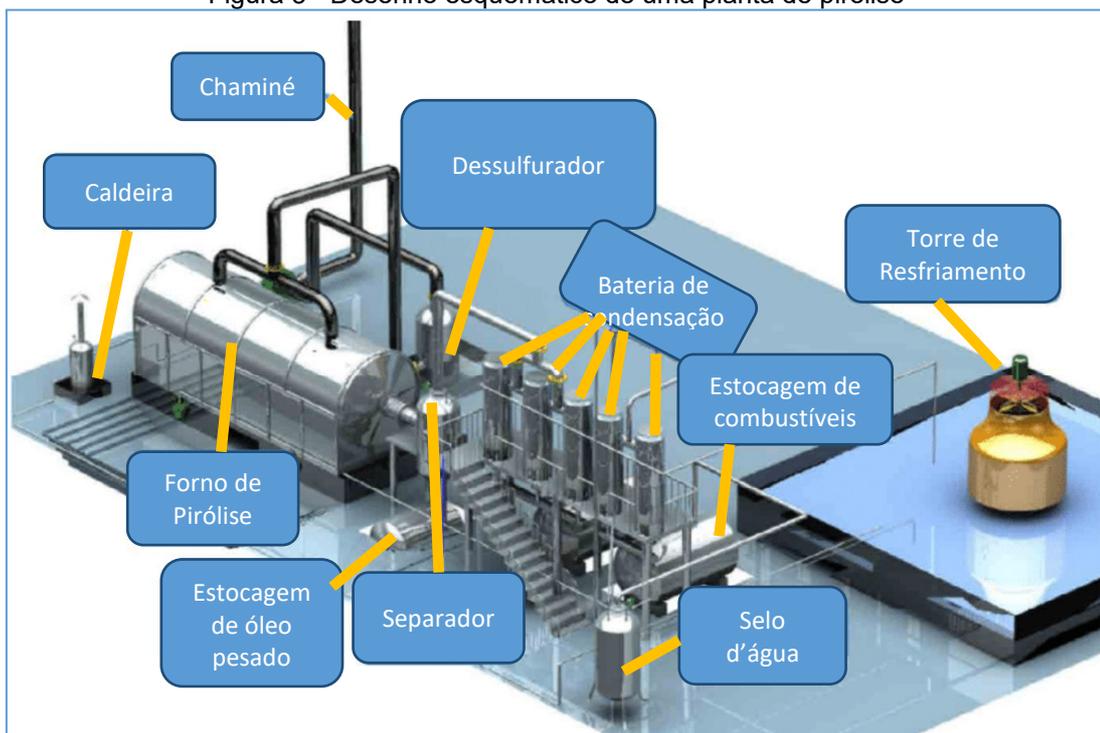
- **Pirólise térmica** - A matéria-prima é aquecida a altas temperaturas (350–900°C) na ausência de um catalisador. Normalmente, o craqueamento térmico usa plásticos mistos de fontes industriais ou municipais para produzir produtos líquidos e gasosos de baixa octanagem. Esses produtos líquidos e gasosos requerem refino adicional para serem utilizados como combustíveis.
- **Pirólise catalítica** - A matéria-prima é processada usando um catalisador. A presença de um catalisador reduz a temperatura e o tempo de reação necessários (em comparação com a pirólise térmica). Os catalisadores usados neste processo podem incluir materiais ácidos

(por exemplo, sílica-alumina amorfa), minerais zeólitos (por exemplo, HY, HZSM-5, mordenita) ou compostos alcalinos (por exemplo, óxido de zinco). Este método pode ser usado para processar uma variedade de matérias-primas plásticas, incluindo tereftalato de polietileno (PET), polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno de alta densidade (PEAD), polipropileno (PP) e poliestireno (PS). Os produtos resultantes podem incluir produtos líquidos e gasosos que requerem refino adicional para serem utilizados como combustíveis.

- **Hidrocraqueamento** (às vezes chamado de “hidrogenação”) - A matéria-prima reage com hidrogênio e um catalisador. O processo ocorre sob temperaturas e pressões moderadas (por exemplo, 150–400°C e 30–100 bar). A maioria das pesquisas sobre esse método envolveu a geração de combustíveis de gasolina a partir de várias matérias-primas de resíduos, incluindo plásticos MSW, plásticos misturados com carvão, plásticos misturados com óleos de refinaria e pneus inservíveis. Os produtos resultantes podem incluir produtos líquidos e gasosos que requerem refino adicional para serem utilizados como combustíveis.

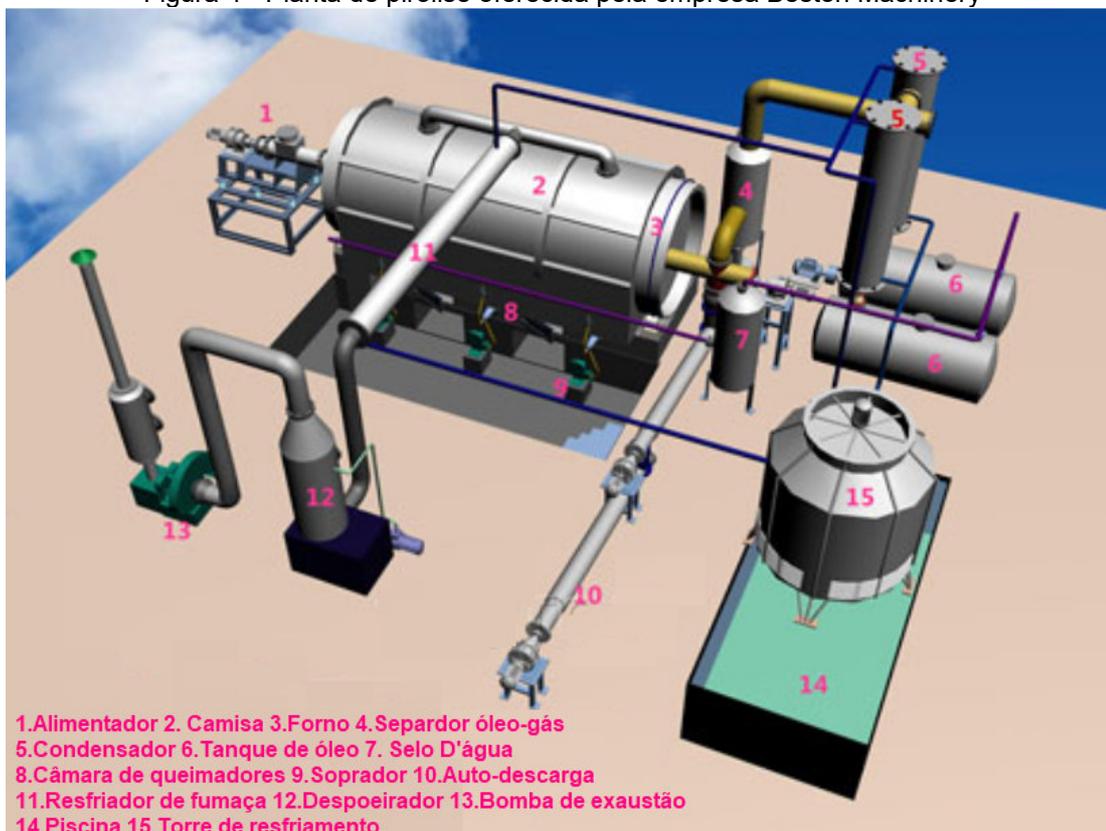
A **Figura 3** mostra o desenho esquemático de uma planta de pirólise de RSP idealizada por Barragán-Gutiérrez; López-Díaz; Krumm (2017) e a **Figura 4** uma planta típica fornecida pela Beston (2021b).

Figura 3 - Desenho esquemático de uma planta de pirólise



Fonte: Adaptado de BARRAGÁN-GUTIÉRREZ; LÓPEZ-DÍAZ; KRUMM (2017)

Figura 4 - Planta de pirólise oferecida pela empresa Beston Machinery



Fonte: Adaptado de BESTON (2021b)

Considerando a **Figura 3** e a **Figura 4** como exemplo, as etapas de processamento são as seguintes:

- 1) Os Resíduos Sólidos Plásticos (RSP) previamente separados são recebidos no local da planta de pirólise por meio de caminhões. Quando não há um sistema de tratamento de halogênios, organoclorados, dioxinas, NO_x e SO₂; como é o caso dos exemplos nas figuras acima, a planta de pirólise fica restrita ao processamento de poliolefinas;
- 2) Em processos por batelada como é o caso dos exemplos acima a alimentação dos resíduos no Forno Rotativo é feita por meio de uma empilhadeira através de uma boca de visita;
- 3) A boca de visita é fechada o ar contido no interior do forno é purgado com gás nitrogênio;
- 4) Em seguida o forno passa a ser rotacionado e aquecido por queimadores alimentados inicialmente com óleo diesel a temperaturas de aproximadamente 500°C. O forno é envolvido por uma camisa para o isolamento térmico para reduzir a perda de calor. Não há contato das chamas ou dos gases de combustão com o conteúdo do forno;
- 5) As poliolefinas sofrem o craqueamento formando frações voláteis de hidrocarbonetos (HCs) que podem ser separadas em óleo de hidrocarboneto condensável e um gás de alto valor calorífico não condensável;
- 6) A mistura de HCs passa por um separador de gases que retém a fração pesada (cadeias maiores que 18 carbonos);
- 7) Os HCs mais leves passam por condensadores que irão liquefazer a porção com tamanho de cadeias intermediários (cadeias com 5 a 17 carbonos); e
- 8) A seguir os HCs gasosos (com cadeias carbônicas de 1 a 4 carbonos) não retidos nos condensadores, são conduzidos para um gasômetro podendo ser queimados em chaminés, envasados ou recirculados (linha amarela no exemplo) para alimentar o forno, tornando o processo energeticamente autossustentado.

Os gases de combustão dos queimadores são direcionados para um lavador de gases para a retenção de material particulado, monóxido de carbono e outros gases típicos de combustão de combustíveis fósseis.

A água de resfriamento é captada de uma piscina e circulada nos condensadores e após trocarem calor direcionadas para uma torre de resfriamento. Após passar pela Torre de Resfriamento a água é devolvida à piscina fechando este ciclo.

Dependendo das temperaturas de trabalho e do número de condensadores é possível obter, frações que se assemelham à gasolina, querosene e óleo diesel; sendo, talvez, necessária uma torre de destilação para se obter essas frações separadamente.

A **Tabela 3** mostra a composição dos gases obtidos com a pirólise do polipropileno e polietileno.

Tabela 3 - Composição dos gases de pirólise em diferentes temperaturas

Componente (% vol.)	MATERIAL					
	PP			PE		
	Temperaturas (°C)					
	500	700	900	500	700	900
CO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
H ₂	14,2	9,1	15,1	17,9	7,7	14,2
CH ₄	4,4	13,7	27,5	9,3	15,6	23,6
C ₂ H ₄	1,0	12,0	20,8	7,8	29,7	37,5
C ₂ H ₆	6,7	8,2	4,3	8,0	7,0	4,0
C ₃ H ₆	36,2	36,5	18,0	10,0	15,1	10,5
C ₃ H ₈	2,1	1,4	1,0	9,9	1,9	0,6
C ₄ H ₈	6,3	16,4	8,7	10,4	10,8	5,9
C ₄ H ₁₀	0,0	0,5	0,4	8,9	1,7	0,5
C ₅ H ₈	22,0	0,9	1,5	4,2	1,1	0,3
C ₅ H ₁₀	0,7	1,2	2,1	5,5	4,7	1,8
C ₅ H ₁₂	0,0	0,0	0,6	0,0	1,1	0,6
C ₆ H ₁₂	6,5	0,1	0,0	8,1	3,7	0,5
CO ₂	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: Adaptado de HONUS et al, 2018b

Mccaffrey Cooper e Kamal. (1998, 1999) trataram a pirólise de Polietileno Linear de Baixa Densidade (PELBD) e PEAD em reatores do tipo chaleira acoplados à destilação reativa, produzindo respectivamente entre 77,5% e 85,8% de produtos líquidos do processo.

O óleo de pirólise obtido do PE, mais precisamente o PEAD, foi comparado aos combustíveis convencionais, nos quais gasolina, querosene e diesel têm um poder calorífico (PC) reportado em 43,4 MJ kg⁻¹, 43,0 MJ kg⁻¹ e 42,8 MJ kg⁻¹, respectivamente. O óleo de pirólise do PEAD tem um PC relatado de 42,9 MJ kg⁻¹ (KUMAR e SINGH, 2011; BOUNDY et al., 2011; AHMAD et al., 2014).

Sharma et al. (2014) utilizaram um reator descontínuo para pirolisar PEAD termicamente a 440°C, obtendo 74% em peso de óleo de pirólise, enquanto Buekens e Huang (1998), Beltrame et al. (1989) e Scott et al. (1990) usaram o PE como matéria-prima para pirolisar termicamente e obter óleo de pirólise a 760°C (42,4% em peso), 400°C (44% em peso) e 515°C (88% em peso), respectivamente.

Horvat e Ng (1999) obtiveram altas frações de óleo do PEAD a 460°C (90% em peso) usando um reator semi-descontínuo. Foi relatado que o produto era rico em propano (C₃, 28%). Pode-se notar que o uso de PE como matéria-prima é uma opção muito atraente para obter destilados limpos e com altos poderes caloríficos a temperaturas moderadas em torno de 500°C. Isso representa uma alternativa muito atraente em cenários de energia para desenvolver esquemas em que combustíveis convencionais podem ser substituídos por matéria-prima Resíduo Sólido Plástico ao invés de confiar no petróleo bruto e seus derivados.

3.1.3 Medidas de Segurança em Plantas WTE

Até o momento não foram encontradas muitas informações sobre os sistemas de segurança em plantas de pirólise. Mas de acordo com a IPEC (2014) suas plantas contêm como medidas protetivas controle de níveis de oxigênio, temperatura e pressão controlada pela taxa de aumento de temperatura. Além disso, o sistema contém controle da rampa de temperatura que permite uma variação de 2°C a 3°C por segundo. O desligamento de emergência é controlado pela rampa do nível de nitrogênio. Há ainda um sistema de depuração de gases de pirólise. Elsdon e Pal

(2011) lembram que a estanqueidade do sistema é uma importante medida de segurança, já que o escape de gases para a atmosfera pode levar a incêndios ou explosões externas. Por isso é preferível o uso de conexões soldadas com o mínimo de flanges. Também lembram que, para o caso de processos de gaseificação, um reator operando à pressão atmosférica deve resistir a uma pressão de explosão / deflagração de pelo menos 7 bar (ou seja, o máximo para hidrogênio).

Com relação aos gases tóxicos gerados Edelson e Pal lembram que para evitar a emissão desses gases é importante que a vedação seja eficiente e a área no entorno da planta seja bem ventilada para evitar atmosferas explosivas e venenosas para os trabalhadores.

De acordo com a NR-13 (BRASIL, 1984), norma à qual o forno de pirólise estaria submetido, esse equipamento estaria classificado como pertencente à Classe A, Grupo 1 e Categoria I. Portanto obrigatoriamente terá que ser dotado de válvula de segurança e indicador de pressão de operação no equipamento ou remoto. Além disso, na ocasião do comissionamento deve ser submetido à inspeção inicial e teste hidrostático. Também deve ser submetido à inspeção periódica externa a cada 1 ano e interna a cada 3 anos.

3.1.4 Desafios tecnológicos

Décadas de tentativas de aplicar gaseificação, pirólise e arco de plasma aos resíduos municipais expuseram as complicações subjacentes a essa abordagem, conforme evidenciado pelo número de plantas que tiveram que encerrar suas atividades. Das instalações em escala comercial que foram estabelecidas na Europa, Canadá e os EUA, muitas tiveram problemas para manter as operações regulares e produzir energia suficiente para se manter no ramo (GLEIS, 2012). As operações foram prejudicadas por razões técnicas, incluindo:

- Incapacidade de atender aos limites de controle de poluição;
- Danos corrosivos ao equipamento (como o colapso do telhado e chaminé de aço de uma planta de gaseificação de resíduos em Hamm-Uentrop, Alemanha;

- Problemas em manter temperaturas de reação satisfatórias, e
- Ineficiência energética.

Os fluxos de resíduos sólidos municipais normalmente incluem grandes proporções de resíduos alimentares, plásticos, metais, papel, eletrônicos, móveis, resíduos domésticos perigosos, etc. Eles também podem variar temporalmente: por exemplo, exibindo forte sazonalidade no teor de umidade em climas tropicais (GAIA, 2017). Como a gaseificação opera acima do ponto de ebulição da água, o alto teor de umidade reduz drasticamente a eficiência energética do processo. A composição variável e o conteúdo de umidade dos resíduos apresentam desafios para manter as operações estáveis, particularmente as temperaturas do vaso de reação. Devido à natureza desafiadora do processo, a maioria das plantas de gaseificação comerciais de grande escala falham em algum momento de suas vidas úteis. As causas de acidentes raramente são divulgadas, mas o histórico fornece algumas evidências de que poderiam ser aplicadas à tecnologia de pirólise. Nos primórdios da aplicação da gaseificação o número muitos acidentes envolvendo fogo e explosão foi reduzido na Suécia com educação e regulamentação. À medida que a experiência se desenvolveu, foi identificado que havia três requisitos gerais para manter a segurança e a integridade do processo (FAO, 1986):

- diligência operacional,
- uma compreensão abrangente do processo e dos seus riscos, e
- manter a tecnologia dentro dos seus limites operacionais estáveis.

Ambientes explosivos também são evidenciados por antecedentes históricos. Estes são causados tanto pela subpressão (entrada de oxigênio) quanto pela sobrepressão (saída de gás inflamável) tanto no reator de alta temperatura quanto nos componentes auxiliares, novamente devido aos múltiplos componentes (ROLLINSON, 2018).

3.2 Arcabouço legal

3.2.1 Aspectos de Interesse da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)

Um aspecto que pode se constituir como um fator de risco é a falta normas ou normas permissíveis.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi instituída pela lei federal nº 12.305/2010. Essa lei estabelece diretrizes de gestão compartilhada, como a formação de consórcios intermunicipais de gerenciamento de resíduos sólidos. Além disso, a PNRS define a proteção da saúde humana e a sustentabilidade como princípios norteadores de todas as ações de governo nesse âmbito, identificando metas para a erradicação de lixões e impulsionando soluções ambientalmente adequadas para disposição final de RSU (BRASIL, 2010). Há nessa lei alguns aspectos que são de interesse para esse trabalho.

No que se refere à segurança na PNRS está prevista a utilização de tecnologias de recuperação energética dos RSUs, desde que haja um programa de monitoramento de emissões tóxicas, aprovado pelo órgão ambiental (BRASIL, 2020d, art. 9). Não aborda riscos relacionados a incêndios ou explosões.

Já no que se refere no que se refere aos prazos, inicialmente essa lei previa a erradicação de lixões até 2014, substituindo-os por aterros sanitários, ou outras formas de tratamento ambientalmente responsáveis de resíduos sólidos. Contudo, em julho de 2020, o Senado aprovou o Novo Marco do Saneamento Básico em que foram estabelecidos os seguintes prazos (BRASIL, 2020d, art. 54):

- I. Capitais e Municípios integrantes de Região Metropolitana (RM) ou de Região Integrada de Desenvolvimento (Ride) de capitais: até 2 de agosto de **2021**
- II. Municípios com mais de 100.000 habitantes, e municípios cuja mancha urbana da sede municipal esteja situada a menos de 20 Km da fronteira com países limítrofes: - até 2 de agosto de **2022**
- III. Municípios com 50.000 a 100.000 habitantes: até 2 de agosto de **2023**
- IV. Municípios com menos de 50.000 habitantes: até 2 de agosto de **2024**

Ou seja, segundo a nova previsão, a extinção dos chamados lixões só estará concluída em 2024.

A disposição em aterros sanitários pode representar um custo maior de disposição de RSUs para as prefeituras, quando comparado à disposição em lixões. Então a tendência é a de que os gestores municipais passem a procurar alternativas à destinação dos RSUs em aterros sanitários, tanto devido à disponibilidade de áreas quanto para reduzir custos.

Por fim, um aspecto da PNRS que também foi relevante para este trabalho é que essa política prevê o desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais por meio da redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos, além de incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados.

3.2.2 Normas, legislações e documentos de referência no Brasil

Em **2002** Conselho Nacional de Meio Ambiente publicou a Resolução Conama nº 316 que não trata especificamente sobre o Processo de Pirólise, apenas dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de **Tratamentos Térmicos** de resíduos em geral. Essa resolução define Tratamento Térmico todo e qualquer processo cuja operação seja realizada acima da temperatura mínima de 850°C. Como medidas de segurança proíbe a instalação de plantas de tratamento térmico em áreas residenciais, exige Estudo de Impacto Ambiental, Análise de Risco, Plano de Teste de Queima, Plano de Contingência, Plano de Emergência a serem planejados e implementados por operadores capacitados. Também traz algumas exigências que não se aplicam a processos de pirólise como o monitoramento de emissões de material particulado (MP), óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono, dioxinas e furanos. Não contempla os hidrocarbonetos totais (HCT). Também considera as emissões dos inorgânicos: cádmio, tálio, mercúrio, chumbo, arsênio, cobalto, níquel, crômio, manganês, antimônio, cobre, vanádio, telúrio, selênio, cianetos, flúor, platina, paládio, ródio, clorados inorgânicos, bem como seus compostos. Essas emissões são mensuradas

na ocasião do Teste de Queima que é obrigatório para a obtenção para o licenciamento e renovação de licença ou por conta de modificações operacionais, e devem estar abaixo dos limites estabelecidos nessa resolução. Como essa resolução trata de processos que operam a temperaturas mínimas de 850°C, em tese, as plantas de processos de Pirólise que mais comumente operam a temperaturas em torno de 500°C ficariam desobrigadas a obedecer ao que preconiza essa resolução. Apesar de exigir tópicos mínimos para os planos de contingência e emergência para situações de incêndio e explosão, não define o conteúdo mínimo e métodos para a Análise de Riscos. Também não foi contemplado o monitoramento de emissões de BTEX e HPAs, apesar de que para este último exige-se o monitoramento de MP.

Em **2009** a Secretaria de Estado do Meio Ambiente de São Paulo publicou a Resolução SMA-79 que estabelece diretrizes e condições para a operação e o licenciamento da atividade de tratamento térmico de resíduos sólidos e traz o conceito de **Usinas de Recuperação de Energia – URE**. De acordo com essa resolução URE é qualquer unidade dedicada ao tratamento térmico de resíduos sólidos, com recuperação de energia térmica gerada pela combustão. De acordo com essa resolução, este conceito inclui o tratamento por oxidação térmica e outros processos como a **pirólise**, gaseificação ou processos de plasma, desde que se demonstre equivalência ao tratamento por oxidação, abrangendo toda a área, equipamentos operações do empreendimento. A exemplo da resolução Conama-316, a resolução SMA-79 exige temperaturas de operação acima de 850°C. A resolução exige a elaboração de Planos de Contingência e Emergência de acordo com Conama-316 para situações de incêndio, explosão e emissões de MP, NOx, CO, Hidrocarbonetos Totais (HCT), HCl, HF, SOx, Dioxinas e Furanos. Também considera as emissões dos metais cádmio, tálio, mercúrio, chumbo, arsênio, cobalto, níquel, crômio, manganês, antimônio, cobre, vanádio, bem como seus compostos. A SMA-79 é mais focada em monitoramento de emissões perigosas. Essas emissões são mensuradas na ocasião do Teste de Queima que é obrigatório para a obtenção da Licença de Operação para a renovação da Licença de Operação, e para toda e qualquer modificação das condições operacionais, devendo estar abaixo dos limites estabelecidos nessa resolução. O texto dessa resolução, de maneira equivocada, classifica a pirólise como um processo de combustão o que mostra caráter genérico para qualquer tipo de tratamento térmico, sem considerar as particularidades de

cada um dos processos. Dessa forma, também não especifica métodos e conteúdo mínimo para uma análise de risco. Também não foi contemplado o monitoramento de emissões de BTEX e para HPAs.

Em **2012** a CETESB emitiu um parecer Licenciamento de Instalação de uma URE no município de Barueri/SP (ORLANDO, 2018) que consiste num incinerador. De acordo com esse trabalho o licenciamento dessa URE considerou como área de influência indireta, definida por pré-simulação, um raio de 3 Km a partir da chaminé. No parecer os técnicos focaram nas emissões e consideraram como cenário de risco a presença de tanques de GLP destinados a alimentar os queimadores.

De **2017 a 2018** a Prefeitura de Bento Gonçalves emitiu um edital de licitação para uma Parceria Público Privada para uma Usina de Resíduos Sólidos Urbanos (PMBG, 2018a). No Anexo III desse documento (PMBG, 2018b) consta a exigência um plano de contingência e emergência para uma usina de pirólise. O plano foi elaborado com base nas resoluções o Conama 316/2002, e 079/2009 da Secretaria de Meio Ambiente (SMA) do estado de São Paulo. Estão contemplados os controles de emissões de MP, NOx, CO, Metais Pesados, Hidrocarbonetos Totais (HCT), HCl, HF, SOx, Dioxinas e Furanos. Também constam cuidados com tratamento e/ou descarte dos efluentes líquidos industriais e assume que os resíduos sólidos gerados são cinzas carbônicas inertes. Os licenciamentos ambientais estão sob responsabilidade da prefeitura (PMBG, 2018b). Também não contempla o monitoramento de emissões de BTEX e HPAs. O subitem “Plano de Contingência” (PMBG, 2018b) **não é um plano**, mas apenas um descritivo dos equipamentos de segurança previstos. Além disso, considera como riscos apenas os efeitos do vazamento de monóxido de carbono e hidrogênio no ambiente da planta. O subitem “Plano de Emergência” (PMBG, 2018b) **também não é um plano**, mas um descritivo dos equipamentos de segurança para situações de incêndios. Em 2018 o tribunal de contas do Estado do Rio Grande do Sul (TCE/RS) emitiu parecer desfavorável devido a fragilidades na estimativa de custos. Em seu parecer o TCE/RS acatou a conclusão do parecer emitido pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental (Fepam) que por sua vez apontou fragilidades também na Análise do Impacto Ambiental contida no edital (TCE/RS, 2018). Por se tratar de uma tecnologia “não difundida no Brasil” a Fepam apontou que o edital carecia de um projeto em escala piloto e de parceria com um instituto de pesquisa (TCE/RS, 2018). Em 2020 a

Fepam indeferiu a licença prévia do empreendimento (FEPAM, 2021). No processo de licenciamento não foi contemplado o risco associado a explosões.

Em **2019** o Ministério do Meio Ambiente publicou a Portaria Interministerial n° 274 que disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos. Utiliza a mesma definição genérica de URE da SMA-79, isto é, classificando equivocadamente a pirólise como processo de combustão e temperaturas de operação acima de 850°C. Não especifica as substâncias a serem monitoradas deixando a cargo das exigências dos órgãos ambientais competentes. Prevê a existência de planos de emergência e contingência sem estabelecer critérios. Também não define o conteúdo mínimo e métodos para a Análise de Riscos, bem como o monitoramento de emissões de BTEX e HPAs, apesar de que para este último exige-se o monitoramento de MP.

3.2.3 Algumas Normas e Legislações Internacionais

Nos Estados Unidos a estrutura regulatória aplicável às operações WTE é complexa. A nível federal, não há um corpo único de leis que regule a localização, construção e operação de WTEs. Em vez disso, cada aspecto é regido por uma série de leis e regulamentos que devem ser levados em consideração durante todas as fases de seleção de um local de instalação, construção da instalação, operação da instalação e encerramento da operação no final da vida útil (WSP, 2013). A USEPA identificou como impactos ambientais potenciais mais significativos de instalações WTE, as emissões atmosféricas (óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre, CO₂ e traços de compostos de mercúrio [e potencialmente outros metais], além de dioxinas/furanos), uso de água (resfriamento e geração de vapor), descargas de água (água de resfriamento, águas residuais e escoamento de águas pluviais), geração de resíduos sólidos (cinzas e outros resíduos) e recursos terrestres (decorrentes da ocupação do solo pela planta e dos aterros onde as cinzas serão dispostas). Existem leis federais avulsas que tratam de cada um desses impactos e outras que regulam aspectos específicos das operações da instalação, como o gerenciamento da fonte de combustível de RSU e materiais perigosos que podem ser usados no processo. A estrutura regulatória para o

gerenciamento de resíduos sólidos e perigosos é estabelecida pela Lei de Conservação e Recuperação de Recursos (RCRA - *Resource Conservation and Recovery Act*), originalmente aprovada em 1976 e alterada em 1984. Os tanques subterrâneos de armazenamento de óleos também são regulamentados pela RCRA. Os regulamentos de implementação para RCRA são encontrados no Código de Regulamentos Federais (CFR) no Título 40 Partes 239 a 259 para resíduos sólidos e (citado como 40 CFR §239 a 259) (WSP, 2013). O parágrafo que se relaciona especificamente a operações de plantas de pirólise é o 40 CFR § 240 que trata de qualidade da descarga de água de resfriamento, vazamentos acidentais (CORNELL LAW SCHOLL, 2021a), emissões de substâncias listadas no *Clean Air Act* (USEPA, 2021c) que regula as emissões de fontes estacionárias. Especificamente o parágrafo 40 CFR § 240.211-3 trata de recomendações para operações de plantas de tratamento térmico que contempla o monitoramento e registro de parâmetros de processo (CORNELL LAW SCHOLL, 2021b). Muitas leis federais são regulamentadas por leis estaduais e/ou por lei municipais, mais restritivas nos dois casos. Isso acontece com a maioria dos estados nos Estados Unidos e em municípios de grande porte como Nova York, Los Angeles e Chicago (WSP, 2013). No caso de Nova York há ainda exigência, inspeções, manutenção, treinamento de pessoal e resposta para emergências regidas de acordo com o 6 CRR-NY 360 (TRW, 2021). Não foi encontrada uma norma específica para análise de riscos em plantas de tratamento térmico.

Em 1990 o Ministério do Meio Ambiente de Ontário no Canadá divulgou o documento intitulado *GUIDELINE A-7: Air Pollution Control, Design and Operation Guidelines for Municipal Waste Thermal Treatment Facilities* (OME, 2009). Esse guia visa estabelecer exigências para usinas de tratamento térmico. De acordo com esse guia o termo “Tratamento Térmico” refere-se a processos de incineração, gaseificação, pirólise e plasma. Esse guia estabelece o monitoramento de MP, NOx, CO, Hidrocarbonetos Totais (HCT), HCl, HF, SOx, Dioxinas e Furanos matéria orgânica, cádmio, chumbo, mercúrio e opacidade.

Em 2007 a COMISSÃO EUROPEIA publicou o *Final Guideline for safe and Eco-friendly Biomass Gasification* (EUROPEAN COMMISSION, 2022). Esse Guia ensina de forma mais detalhada como elaborar uma análise de risco para a implantação do processo de **gaseificação**. A APP descrita é o *Hazop* e o Análise de Modos de Falha - FMEA (IEE, 2007).

3.3 Percepção de riscos

Além de uma legislação incipiente, um outro aspecto que pode se constituir em um fator de risco seria uma baixa percepção de risco a respeito da tecnologia avaliada. Esse aspecto pode influenciar os gestores no momento da elaboração de políticas públicas para o gerenciamento de riscos de novas tecnologias.

Adaptando a visão de Macedo (2001) para a tecnologia de pirólise pode-se dizer que o gerenciamento de riscos é um processo que se inicia quando a sociedade, ou o poder público, adquire a percepção de que as manifestações aparentes ou efetivas de um certo perigo ou ameaça, existente por uma dada tecnologia, em dado empreendimento, num determinado momento, podem provocar consequências danosas superiores ao admissível para comunidades vizinhas.

Nogueira (2002) destaca a importância dos estudos da percepção para o gerenciamento de riscos no sentido de adaptar as políticas públicas para o grau de percepção da população ou modificar essa percepção por meio dos processos de educação, informação e comunicação. Dessa forma, a percepção pode ser utilizada como uma ferramenta para delinear os processos de comunicação que serão utilizados para a criação da cultura de prevenção, autoproteção e capacidade de resposta a acidentes por parte dos operadores da usina, agentes públicos, e comunidades.

Para Rohrmann (2008) percepção de riscos são os julgamentos e avaliações das pessoas sobre os perigos aos quais elas próprias ou algo podem estar expostos. São interpretações do mundo, baseadas nas experiências e/ou crenças. Essas percepções orientam decisões de aceitabilidade dos riscos. A maneira como a importância dos riscos é avaliada, e até que ponto as pessoas estão dispostas a aceitar um risco, é dependente do tipo de perigo, das experiências pessoais, crenças e atitudes, e de diversas influências sociais (TANIMOTO, 2011). É importante lembrar que detalhes técnicos e estatísticas de risco nem sempre explicam a aceitação de riscos. O medo de viagens aéreas talvez seja um dos exemplos mais emblemáticos que ilustre esse fato.

Para Guimarães (1999) a percepção de riscos é um “conjunto de fenômenos de natureza sociológica e psicológica que criam uma hierarquia de riscos subjetivos, particular a cada indivíduo e a cada grupo social. A Percepção de Riscos coletiva

(ou social) tende a avaliar os riscos subjetivos superestimando a gravidade e subestimando as probabilidades. Considerando-se dois riscos objetivos idênticos, a percepção de riscos coletiva tende, portanto, à aversão ao risco com maior gravidade, ainda que tenha pequena probabilidade (acidentes em instalações nucleares, por exemplo), e ao conformismo ao risco com menor Gravidade, ainda que tenha alta probabilidade (acidentes rodoviários, por exemplo). A percepção individual, por sua vez, é influenciada pela avaliação ao nível psicológico e nem sempre racional quanto aos benefícios e Riscos provenientes da atividade perigosa em questão.

3.4 Riscos da tecnologia de pirólise

3.4.1 Análises de riscos realizadas em processamentos térmicos de RSUs

Os pesquisadores Abidin, Ariffin e Rusli (2011) realizaram uma análise preliminar para a identificação de perigos de um sistema de **gaseificação** em escala de bancada utilizando Hazop e o *Software* PHAST para determinar o raio de dispersão de nuvem tóxica e consequências de explosões.

Os pesquisadores Elsdon e Pal (2011) destacam que as tecnologias **WTE** ainda são consideradas novas e estão em desenvolvimento. Como resultado, há poucos exemplos de incidentes diretamente comparáveis para aprender. Segundo esses autores existem soluções de projeto “padrão / genéricas” limitadas, ao contrário das usinas de energia convencionais, onde muitas usinas de cada tipo foram construídas e uma base de projeto “padronizada” está disponível. Eles apontam como técnicas de análise de riscos a Hazop, a LOPA e a SIL.

Os pesquisadores Wang e Zhang (2018) utilizaram revisão de literatura, normas e outras pesquisas, além da opinião de experts para a identificação de perigos em plantas **WTE**. Para análise probabilística utilizou análise bayseana concluindo que se trata de um método aplicável e viável para mitigação de riscos.

Rollinson (2018) escreveu um artigo em que identifica e discute os perigos em plantas **WTE** no contexto das preferências modernas, usando estudos de caso e antecedentes históricos. A partir de estudos de caso ele identificou os perigos: de misturas de gases inflamáveis, tóxicos e corrosivos, a auto-ignição de matérias-primas armazenadas, múltiplas atmosferas explosivas devido à sobrepressão e subpressão combinadas com muitas fontes de ignição. A partida e o desligamento foram identificados como momentos de riscos significativamente intensificados de incêndio, explosão e liberação de gases tóxicos. Ele também aponta que o risco é aumentado quando os gestores impõem suas preferências por novidades, falta de compreensão das partes interessadas, desejo de operar com resultados elevados e relutância em aprender com a história. O autor demonstra, ainda, preocupação pelo fato de que na maioria dos pedidos de licença se demonstra pouca ou nenhuma consciência dos riscos e desafios associados ao conceito. Muitos também se desviam acentuadamente das características específicas do projeto que permitiram aos gaseificadores atingir uma operação segura e estável no passado.

Os pesquisadores Stolecka e Rusin (2020) realizaram uma análise de risco para processo de **gaseificação** analisando eventos de *jet fire*, explosão e formação de nuvem tóxica. A metodologia de análise de risco utilizada foi por Árvore de Eventos. Concluíram que as zonas de perigo dependem da composição do gás que geralmente é menor no caso de gaseificação de biomassa.

Documentos que discorram sobre análise de riscos de processos de pirólise são escassos. Uma tecnologia semelhante à de pirólise é a gaseificação compartilhando muitos dos cenários de risco. Assim documentos em que se discuta sobre análise de riscos para plantas de gaseificação são muito úteis para conduzir uma análise de riscos para plantas de pirólise de resíduos.

Em 2020 a empresa de consultoria AMRISK (AMRISK, 2022) submeteu para fins de licenciamento, um Estudo de Análise de Riscos para uma URE que será implantada no município de Santos/SP que, na verdade, consiste num incinerador. No estudo afirma-se que foi feita a Análise Preliminar de Perigo (APP) conforme o sugerido pela Norma Cetesb P4.261 (CETESB, 2014). O método utilizado foi a Análise por Árvore de Eventos, e modelagem matemática com o *software* PHAST. Considera como tipologias acidentais incêndios explosões dos tanques de GLP. Para o reator foi levantada a hipótese de sobrepressão e não considera a presença de substâncias inflamáveis dentro do mesmo.

Em 2020 CARDUCCI et al. (2020) analisaram a viabilidade técnica e econômica de uma planta de pirólise. O método de análise de riscos utilizado foi o Hazop.

3.4.2 Emissões associadas à Tecnologia de pirólise aplicada a poliolefinas

A tecnologia de pirólise aplicada a RSUs visa solucionar um problema ambiental que é o da disposição de resíduos capaz de proporcionar uma redução significativa de volume, mesmo que aplicada somente a poliolefinas. No entanto, novas tecnologias quase sempre incorrem em novos riscos ambientais e a pirólise não foge a essa regra.

Entre os perigos oferecidos por essa tecnologia está a emissão de gases tóxicos e material particulado. Para alguns gases, como já foi discutido anteriormente, já são previstos em legislações locais o monitoramento contínuo de:

- Material Particulado (MP);
- Óxidos de nitrogênio (NO_x);
- Monóxido de carbono (CO);
- Hidrocarbonetos Totais (HCT);
- Ácido Clorídrico (HCl);
- Ácido Fluorídrico (HF);
- Óxidos de enxofre (SO_x);
- Dioxinas; e
- Furanos

A legislação também prevê a elaboração de um plano de contingência que contempla ocorrências de fogo, explosão ou liberação de emissões perigosas.

A legislação também não especifica como identificar os perigos de fogo e explosão num processo de pirólise.

Especificamente para a tecnologia de pirólise, a literatura revela que além dos previstos na legislação há outros gases tóxicos que podem ser liberados durante o

processamento de plásticos derivados de Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Poliamidas (PA), Policloreto de Vinila (PVC) e Poliestireno (PS). O principal problema ambiental encontrado na operação desses tipos de polímeros é a geração de dioxinas e PCBs, além dos compostos orgânicos voláteis (VOCs) (HE et al., 2015). Em particular, mono-aromáticos, VOCs oxigenados (O-VOCs), VOCs clorados (Cl-VOCs) e acrilonitrila podem ser encontrados, onde mono-aromáticos derivam principalmente do tratamento térmico de ABS e PS enquanto que O-VOCs são produzidos a partir da pirólise de PVC e PA (AN et al., 2014).

A pirólise de poliolefinas como os polietilenos (PE) e polipropileno (PP) emite principalmente alcanos. Mas há outras substâncias que podem ser emitidas e que podem acarretar riscos ambientais como será discutido a seguir.

Gaurh e Pramanik (2018) estudaram as emissões originadas de um processo de pirólise catalítica de PP e a análise do óleo revelou a presença de benzeno, tolueno, etil-benzeno e xileno (BTEX).

O óleo de pirólise dos plásticos de poliolefina (PO) geralmente contém compostos alifáticos, mono-aromáticos e poliaromáticos que resultam da degradação das ligações de carbono de suas estruturas (JUNG et al., 2010; WILLIAMS e WILLIAMS, 1997).

Os gases produzidos são muito sensíveis ao tipo de matéria-prima e têm com maior valor de aquecimento (MVA) de 45-50 MJ kg⁻¹ (Jung et al., 2010; Frigo et al., 2014). Os gases produzidos por pirólise são tipicamente mínimos, com exceção do PET e PVC, que podem produzir até 87% em peso de gás (SHARUDDIN et al., 2016). Num estudo conduzido por Williams e Williams (1998) foi revelado que quando se pirolisa polímeros convencionais, há uma tendência de formação de gases mais leves, isto é, com até 4 átomos de carbono. A mistura desses gases leves contém majoritariamente de o etano seguido por propeno e por fim butano. Isso ocorre porque as moléculas gasosas menores são mais estáveis.

A pirólise de PEAD dependendo das condições operacionais e do tipo de matéria prima (AL-SALEM, 2017) pode gerar substâncias perigosas como o Benzeno, Tolueno, Xileno, Etilbenzeno, etano, propeno, butano e Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs). Em temperaturas acima de 800°C, parafinas e olefinas maiores produzidas a partir da decomposição de plásticos são quebradas em H₂, CO, CO₂, CH₄ e hidrocarbonetos mais leves (PONZIO et al., 2006). Como resultado da abstração do grupo metil a partir de compostos aromáticos e

decomposição de parafinas, C_2H_4 e C_2H_2 costumam aumentar com a temperatura (LEDESMA et al., 2000). Os grupos metila e hidroxila da abstração das estruturas aromáticas implicam que a fração aromática aumenta com a temperatura, embora a quantidade total de alcatrão diminua. A abstração de H_2 a partir de hidrocarbonetos leves e reações de reticulação também pode produzir HPAs (AL-SALEM, LETTIERI e BAEYENS, 2009).

O anel benzênico, nas condições em que ocorre o craqueamento catalítico, não sofre ruptura devido à sua alta estabilidade. Apenas as cadeias laterais são rompidas e quanto maior, mais fácil é a ruptura junto ao anel. O craqueamento de ramificações de aromáticos gera olefinas e parafinas. Cadeias aromáticas polinucleadas transformam-se em coque através das reações secundárias de condensação. Os monoaromáticos diferem dos poliaromáticos porque são importantes para a octanagem da nafta, pois geram benzeno (FAILLACE, 2017).

Em resumo de acordo com os autores descritos acima, além de HCs um processo de pirólise de poliolefinas pode gerar Benzeno, Tolueno, Etil-benzeno e Xileno (BTEX) e Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs). Cada uma dessas substâncias apresenta perigos toxicológicos e/ou de inflamabilidade que podem prejudicar tanto os trabalhadores diretamente envolvidos no funcionamento na planta quanto a comunidade vizinha ao local.

3.4.3 Histórico de acidentes em plantas de pirólise

Para se ter uma noção de magnitude de acidentes em usinas de pirólise é necessário fazer um levantamento histórico.

Informações sobre acidentes tecnológicos são tradicionalmente recolhidas, organizadas e divulgadas por instituições de pesquisa, órgãos públicos e/ou órgãos privados na forma de bancos de dados de acidentes, independentemente do entendimento sobre o termo acidente (XAVIER, 2017).

Bancos como *Emergency Events Database* (EM-DAT, 2022), EMARS (European Commission, 2022), ARIA (BARPI, 2022), *European Gas Pipeline Incident data Group* (EGIG, 2023), *Conservation of Clean Air and Water in Europe* (CONCAWE, 2022) e SIEQ (Sistema de Informações sobre Emergências Químicas

da Cetesb) trazem informações como data e local da ocorrência, substância envolvida, bens ambientais afetados, perdas financeiras, entre outros.

Em 13 de dezembro de **1990** na cidade de Tavaux (França) durante uma operação de manutenção de uma bomba, uma outra sobressalente foi acionada para manter a alimentação de mistura inflamável na seção de pirólise. A mistura inflamável era composta de dicloroetano, cloreto de vinila e cloreto de hidrogênio. Surgiu, então, um vazamento vindo de uma tubulação localizada acima dos operadores. Os operadores fugiram em direção à sala de controle pouco antes que a mistura inflamável se ignizasse pelo forno de pirólise. O Plano de Emergência Interno foi ativado, a unidade foi desligada e os meios de proteção contra incêndio foram acionados enquanto a área afetada era evacuada. Naquele momento, para evitar um mal maior, foi decidido por não extinguir o fogo para que uma nuvem explosiva se formasse; ao mesmo tempo, foi necessário providenciar proteção das estruturas expostas à radiação de calor intensa, bem como o forno de pirólise foram resfriados com cortinas d'água proporcionadas por canhões monitores fixos. As válvulas de isolamento ao redor da unidade em chamas foram fechadas para reduzir a quantidade de substâncias inflamáveis potencialmente envolvidas. No entanto, não foi possível fechar completamente uma dessas válvulas por estar passando por fase de teste no momento do acidente, o que prolongou o incêndio. Após 10 minutos, outras tubulações se romperam causando novos incêndios, que só foram extintos após 13 horas de combate. Os danos à planta ficaram restritos a uma área de 20-25 m de raio em uma plataforma que ficava a uma altura de 6 m. Uma escola próxima teve de ser evacuada quando se constatou uma concentração de cloreto de hidrogênio de 10-15 ppm nas proximidades. A água de combate a incêndios utilizada foi recolhida para tratamento nas estações de tratamento de águas residuais da central.

A causa da ruptura da tubulação foi atribuída à erosão interna causada pela ação abrasiva de partículas (4-6 g/l particulado de carvão) contidas no fluido circulante. Além disso, estudos posteriores confirmaram que a instalação de um diafragma com abertura menor do que a originalmente planejada (para obter uma medida mais precisa do fluxo do líquido) agravou a erosão (a redução do diâmetro do diafragma de 192mm para 132mm causou um aumento da velocidade do líquido de um fator de 2,1 e dos efeitos da turbulência de um fator de 4,5). A linha, numa zona à jusante 10-60cm do diafragma, apresentou erosão maior do que à montante.

Com isso, ao ligar a bomba sobressalente, o caudal de líquido foi suficiente para romper a tubulação. (EUROPEAN COMMISSION, 1991).

Em 28 de maio de **1992**, em uma planta petroquímica, ocorreu um vazamento num dos flanges da tubulação de alimentação de GLP nas imediações de um forno, resultando na descarga instantânea do conteúdo da tubulação. Após a desativação da bomba de alimentação de gás liquefeito e a despressurização da tubulação por meio de um *flare*, a tubulação foi conectada, por meio de uma mangueira, ao abastecimento interno de nitrogênio da planta para preparar a lavagem da tubulação com nitrogênio. Após iniciar o processo de limpeza por descarga, o gás liquefeito foi liberado e inflamado. O local da planta não foi informado (EUROPEAN COMMISSION, 1993).

Em 19 de julho de **1998** na cidade de Marl (Alemanha) ocorreu um incêndio durante a partida de uma planta de pirólise cuja operação havia sido interrompida no dia anterior devido a uma falha no compressor de propano. Após purga com nitrogênio e aquecimento dos tubos de reação, a alimentação do forno de pirólise com 1,2-dicloroetano foi iniciada às 10h50. O controle de alimentação foi ajustado de forma o manual que de acordo com a experiência cria as condições de alimentação previstas nas instruções de operação (manual). Ocorreram 3 interrupções na alimentação de gás de aquecimento devido a uma pressão excessiva. O fornecimento de gás de aquecimento foi reiniciado a cada vez. Às 12h33 os alarmes indicavam temperaturas excessivas paredes do reator. O operador tentou reduzir a temperatura aumentando a alimentação de DCE (1,2-dicloroetano), mas mesmo assim a linha de transferência entre o forno e resfriador rompeu liberando gás de pirólise que entrou em ignição imediatamente. Houve refluxo de DCE que ajudou a alimentar o incêndio. A brigada de incêndio resfriou o equipamento adjacente com água e eliminou a maior parte do cloreto de hidrogênio em formação com uma cortina de água. Para evitar um agravamento do acidente optou-se por queimar 1,5 t de DCE. Os danos materiais em suportes de aço, tubagens, válvulas, cabos, etc. foram estimados em 1.000.000,00 €. Acredita-se que as reações exotérmicas nos tubos de pirólise sejam a causa da ruptura do tubo (EUROPEAN COMMISSION, 1999; BARPI, 2022c).

Uma instalação em escala real (100.000 ton/ano) começou a operar em 1997 em Fürth (Alemanha). Modificações na instalação foram feitas entre 1997 e 1998, mas em agosto de **1998** sofreu uma explosão resultante de um “tampão” de

resíduos sólidos que se formou no forno causando pressurização excessiva e liberação de gás de pirólise. Um bairro inteiro teve que ser evacuado e alguns residentes da comunidade ao redor foram levados ao hospital para observação (IPEC, 2014). Mais de 50 pessoas entre elas funcionários e moradores das vizinhanças tiveram intoxicação leve pelo gás de pirólise (HACKETT et al, 2004; LEMANN, 2008). Após um investimento de €130 milhões a planta teve suas atividades encerradas em 1999. Atualmente, não existem instalações de pirólise em grande escala em funcionamento na Europa. Devido a esse acidente a Siemens se retirou do mercado europeu em 1999 (HACKETT et al, 2004).

Em 14 de agosto de **2000** um incêndio ocorreu no primeiro estágio de hidrogenação de gasolina de pirólise (*pygas*) em uma unidade de craqueamento de nafta. O incêndio foi causado pelo vazamento de uma mistura de gasolina, hidrogênio e catalisador de níquel através de uma rachadura na parede do reator. A investigação revelou que a rachadura foi causada por uma breve excursão de temperatura localizada, num determinado ponto da parede do forno. A causa atribuída a um aumento repentino na alimentação do forno (7 dias antes) o que por sua vez provocou gradientes de temperatura ao longo das paredes do equipamento iniciada por um aumento repentino na alimentação adicionada ao reator (ICHEME, 2022).

Em 13 de novembro de **2001**, uma planta de eteno operava com uma carga de 192 t/h de nafta. Às 7h30 o motor de um dos sopradores do gerador de vapor foi desligado devido a problemas de funcionamento. Quando o soprador sobressalente foi conectado, as válvulas de controle abriram, o valor lambda do processo de combustão extrapolou os valores definidos, causando o desligamento automático da caldeira de vapor. Durante as operações de partida da caldeira de vapor, ocorreu uma falta de fornecimento de vapor a 110 bar, causando o desligamento de um dos compressores de gás bruto alimentados a vapor. O excesso de vapor teve que ser direcionado para um queimador por aproximadamente uma hora. Às 14:00 h os técnicos de manutenção solicitaram a partida do motor do ventilador de ar reparado para teste de funcionamento. Não foi levado em consideração o fato de as válvulas de controle do ventilador serem controladas diretamente pela velocidade de rotação do motor em vez da velocidade de rotação do ventilador, o que provocou a recorrência da situação ocorrida pela manhã. Como a caldeira de vapor não foi iniciada a tempo, o excesso de gás bruto teve que ser direcionado novamente para o

queimador. Outros equipamentos que dependiam do fornecimento de vapor tiveram que ser desligados para estabilizar o regime de fornecimento de vapor de alta pressão, como por exemplo as bombas de água da caldeira alimentadas a vapor. Das 5 bombas de água da caldeira, apenas 2 bombas permaneceram operacionais, o que foi suficiente para a carga existente. Às 14:30 h uma das bombas de água da caldeira falhou devido a uma pane elétrica. Com apenas uma bomba funcionando, deixou de ser garantido o abastecimento de água de alimentação à última caldeira em funcionamento. O último gerador de vapor foi desligado quando o sinal "nível de água de alimentação baixo" foi exibido, ocasionando o desligamento de emergência do último forno de pirólise em operação; do *ground flare* e do *high-flare*. A operação do *high-flare* sem vapor aumentou significativamente as emissões de fuligem em relação à operação normal. O *high-flare* passou a ser alimentado com os refrigerantes evaporantes (etileno, propileno) dos circuitos de refrigeração misturados com substâncias residuais presentes na parte refrigerada da planta de etileno. Durante uma caminhada pela usina por volta das 17h30, os funcionários notaram as chamas se espalhando a partir da fornalha e alertaram o corpo de bombeiros no local.

Em 20 de abril de **2003**, na cidade de Port-Jérôme-sur-Seine (França), durante a descarga do óleo de pirólise no cais, houve um vazamento em uma tubulação subterrânea sob uma rua local (BARPI, 2022f).

Em **2009** na planta RWE-ConTherm na cidade de Hamm (Alemanha) um acidente foi causado pelo material residual de alimentação (a composição da alimentação não correspondia ao processo conforme projetado) resultando em temperaturas de processo além dos limites toleráveis.

Em 23 de dezembro de **2009**, ocorreu um vazamento de gasolina em Bílý Potok (República Tcheca). Substância de mau cheiro apareceu na superfície da água e margens. Como origem dos resíduos foi identificada a rede de esgoto pluvial do estabelecimento de gasolina. A substância foi identificada como sendo benzina de pirólise e a quantidade liberada para o meio ambiente foi estimada entre 0,7 e 2,16 t. Descobriu-se que a benzina foi bombeada do reservatório de águas residuárias para o esgoto por engano (EUROPEAN COMMISSION, 2012b).

Em 17 de agosto de **2011**, houve vazamento de óleo combustível de pirólise no refeedor da coluna de destilação principal. A quantidade derramada no solo foi

de aproximadamente 5% do volume da coluna de destilação. O local não foi informado (EUROPEAN COMMISSION, 2012a).

Em 8 de novembro de **2011**, na cidade de Panchkula (Índia), ocorreu uma explosão numa unidade de pirólise da empresa Colour Udyog, devido à fricção das estruturas aramadas de pneus no interior do forno. Outros pneus armazenados foram incendiados devido à explosão. O acidente causou queimaduras em 90% do corpo de um funcionário que se encontrava próximo ao forno. Outro trabalhador sofreu ferimentos leves no incêndio quando os resíduos de pneus pegaram fogo (WORKER, 2011).

Em **2012** uma explosão de gás de pirólise ocorreu na estação de tratamento de borra de petróleo russa em Khanty-Mansiysk (Russia). O acidente matou oito pessoas e outros oito trabalhadores foram envenenados por monóxido de carbono e queimados (IPEC, 2014).

Em 26 de fevereiro de **2014** foi registrada uma explosão na planta de produção de polietileno de alta densidade na empresa de petróleo Lukoil em Budennovsk (Russia). Ocorreu um incêndio na unidade de separação de gás de pirólise devido à despressurização do trocador de calor de alumínio. De acordo com a Lukoil (2014) 18 pessoas ficaram feridas (ver **Foto 1** e **Foto 2**).

Foto 1 - Acidente em Budennovsk (Russia) (a)



Foto 2 - Acidente em Budennovsk (Russia) (b)



Fonte: IPEC, 2014

Em 27 de março de **2014** ocorreu uma explosão em uma planta de pirólise da empresa Fortum Power and Heat Oy, em Joensuu (Finlândia). O acidente ocorreu depois que o processo foi desligado automaticamente devido à forte flutuação dos níveis do líquido. Antes da abertura da escotilha, o nitrogênio foi alimentado no

processo para criar uma atmosfera inerte. No entanto, o alto nível de líquido dentro do condensador bloqueou a rota pretendida do nitrogênio, que em vez disso fluiu para a caldeira adjacente ao forno. O vapor inflamável do processo ainda estava presente nas linhas, e quando a escotilha foi aberta, houve entrada de oxigênio que reagiu com o vapor inflamável, levando a uma explosão (ver **Foto 3** e **Foto 4**). Três pessoas ficaram feridas. Apesar de existirem algumas plantas no mundo que produzem óleo de pirólise usando um método semelhante, a planta de Joensuu é a primeira do mundo entre as plantas em escala industrial. No momento do acidente, a planta ainda estava na fase de comissionamento, então não havia pessoal com ampla experiência para operar aquela planta (EUROPEAN COMMISSION, 2020; SSCA, 2020; BARPI, 2022a).

Foto 3 - Acidente em Joensuu (Finlândia) (a)



Foto 4 - Acidente em Joensuu (Finlândia) (b)



Fonte: IPEC, 2014

Em 25 de agosto de **2014**, na cidade de Chennai (Índia), numa planta de fabricação de óleo de pirólise a partir de pneus descartados, e pertencente à empresa Mallady Speciality Pvt. Ltd, uma caldeira² [forno] explodiu sendo arremessada a 30 metros de distância. A explosão incendiou vários pneus armazenados e espalhou fumaça pela vizinhança. Um funcionário morreu queimado e outros dois tiveram queimaduras leves (BLAST, 2020).

Em 14 de julho de **2015** ocorreram duas explosões em uma planta petroquímica, na cidade de Berre-l'Étang (França), na área estocagem em que dois tanques entraram em ignição danificando seus tetos flutuantes (ver **Foto 5**). O

² Na matéria quando o jornalista utiliza o termo caldeira (*boiler*) na verdade está querendo se referir ao "forno". Isto fica claro quando escreve: "*It procures tyres in bulk and melts them in boilers,*" *an investigating officer said*" ou "Ela [a fábrica] adquire pneus a granel e os derrete em caldeiras", disse um oficial investigador" (BLAST, 2020).

primeiro tanque continha 11.300 m³ de gasolina de pirólise (cortes C5 a C9), enquanto o 2º, localizado a 300 m de distância, continha 48.000 m³ de naftaleno (cortes de hidrocarbonetos leves). Após a extinção do incêndio, durante a fase de drenagem, a evaporação de hidrocarbonetos de tanques danificados e suas bacias de retenção fez com que o ar nas imediações ficasse poluído por compostos orgânicos voláteis (VOCs) e BTEX por cerca de 10 dias. Os vizinhos reclamaram dois dias após o acidente, citando cheiros de hidrocarbonetos, dores de cabeça, coceira nos olhos, dor de garganta e coriza. Após as medidas adotadas para mitigar essa poluição, as concentrações diminuíram gradualmente por 7 dias consecutivos após o acidente, antes de cair vertiginosamente no dia 8, mantendo-se ainda acima do nível de fundo local (EUROPEAN COMMISSION, 2018a; BARPI, 2022b).

Foto 5 - Fumaça se eleva do *site* LyondellBasell, perto de Marselha, em 14/07/2015. (Foto Boris Horvat. AFP)



Fonte: LIBÉRATION, 2022

Em 18 de setembro de **2016** um acidente ocorreu durante a preparação de instalações para operações de manutenção. Durante o esvaziamento da instalação da água de têmpera (*quench water*)³, houve um aumento de pressão no sistema,

³A água de têmpera é o líquido utilizado em equipamentos denominados torres de têmpera (*quench tower*), cujo objetivo principal é resfriar os gases e vapores quentes do reator de originados do forno

devido a uma falha do *dampers* na tubulação que liga a seção de pirólise ao sistema de descarga. Hidrocarbonetos voláteis que não estavam no sistema de descarga, mas estavam acima da superfície da água de têmpera se espalharam na área do local de drenagem dessa água. Houve um aumento na concentração de hidrocarbonetos no ar e posterior ignição a partir da superfície quente de um dos equipamentos. O local não foi informado (EUROPEAN COMMISSION, 2018b). Em 25 de dezembro de **2017**, na cidade de Conternay (França) por volta das 17h30, o sistema de limpeza de gases de combustão de um forno de *debinding*⁴ de uma empresa de autopeças pegou fogo durante uma operação de pirólise. O fogo já estava controlado quando os bombeiros chegaram. Os 50 funcionários do local foram evacuados. O fogo foi extinto por volta das 19h25. Os funcionários retornaram ao local. A análise das causas do evento revelou um problema com o monitoramento e manutenção dos catalisadores do forno. Para desempenhar seu papel completo, os catalisadores devem ser aquecidos por um elemento a 400 °C. No dia do acidente, o elemento entrou em curto-circuito. A temperatura operacional insuficiente permitiu o acúmulo de depósitos de alcatrão. Estes depósitos inflamaram-se devido à propagação dos fluxos de calor da operação de pirólise em curso no forno. Embora o operador tenha notado no passado que o catalisador tinha uma temperatura anormalmente baixa, isso não o impediu de realizar operações de pirólise no forno. Além disso, os funcionários que provavelmente trabalhariam nos fornos não tinham conhecimento das leituras de temperatura porque não eram comunicadas internamente (BARPI, 2022e).

No início de fevereiro de **2019**, uma planta de pirólise de pneus da Kargro / Dutch Green Carbon em Nederweert, Holanda, sofreu um incêndio. Ninguém do pessoal da empresa, nem da área residencial adjacente à fábrica ficou ferido. O Corpo de Bombeiros assumiu o controle do incêndio e afirmou que não foram liberadas quantidades maiores de materiais perigosos. O governo holandês descreveu sua reação em uma carta, afirmando que o caso da Kargro tornou evidente a necessidade de uma regulamentação mais rígida (WEIBOLD, 2022).

de pirólise. Essa operação é necessária, pois uma vez craqueado em uma variedade de reações de pirólise, hidrocarbonetos e hidrogênio, podem se recombinar em moléculas maiores. Para evitar essas reações, os gases e vapores atravessam as torres de resfriamento para resfriar usando óleo ou água. Os maiores hidrocarbonetos são transportados com a água para o decantador ou o tambor de separação da água de têmpera.

⁴ Remoção e aglutinante.

Nos Estados Unidos não se encontrou até o momento histórico de acidentes em plantas de pirólise. Talvez o que possa explicar essa ausência de dados seja o fato de as plantas de pirólise geralmente estarem associadas com outras tecnologias de tratamento térmico de resíduos municipais, como a gaseificação e a incineração, o que causa confusão no momento de reportar um acidente. Também contribui para essa ausência de relatos o fato de existirem poucas plantas de pirólise no território estadunidense. De acordo com um levantamento feito pela USEPA (2021) atualmente existem apenas 5 plantas de pirólise em operação naquele país.

Perante esse histórico pode-se concluir que a segurança em plantas de pirólise é uma questão de segurança ambiental e de saúde, já que em caso de acidente pode ocasionar ferimentos ou morte de inúmeras pessoas.

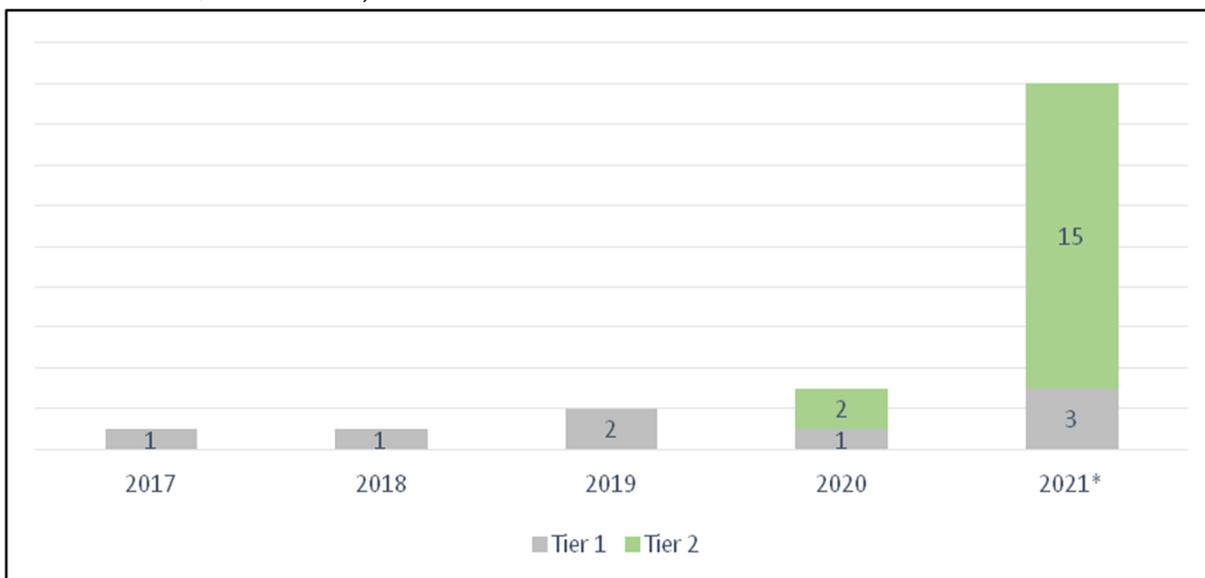
Em qualquer caso, os perigos associados ao processo de pirólise surgem da liberação de gases tóxicos e explosões. Os hidrocarbonetos liberados pela reação de pirólise são altamente inflamáveis. Sob o calor e oxigênio suficientes, uma explosão pode ocorrer (IPEC, 2014).

Explosões podem ser causadas por vazamento de gases dos fornos. Tais acidentes podem ser evitados controlando a quantidade de oxigênio contido em uma matéria-prima, aumento de pressão e temperatura durante as condições operacionais. Outras causas também estão presentes como erosão ou corrosão de linhas, fadiga de material, falhas nos flanges, obstrução de linha, fissuras no forno, treinamento incipiente, inexperiência.

A *Concawe (Conservation of Clean Air and Water in Europe)* publica anualmente relatórios sobre acidentes ocorridos na cadeia do petróleo. Embora esses relatórios não detalhem os acidentes; com descrições, datas e locais; trazem o número de acidentes que são classificados de acordo com dois dos quatro níveis Tier⁵ existentes. O **Gráfico 6** mostra o número de acidentes ocorridos entre os anos de 2017 e 2021 em processos de hidrocraqueamento e craqueamento catalítico em leito fluidizado, ambos processos de pirólise.

⁵ A classificação "Tier" define indicadores de desempenho de segurança de processo para as indústrias de refino e petroquímica. Tier 1: Eventos de consequências significantes; Tier 2: Eventos de menor consequência. O Tier 3 e Tier 4 não são reportados à Concawe (CONCAWE, 2022a).

Gráfico 6 - Acidentes níveis Tier 1 e Tier 2 em processos de refino de petróleo (CONCAWE, 2018, 2019, 2020 e 2021).



*Soma dos processos de hidrocraqueamento e craqueamento catalítico em leito fluidizado

O banco de dados da EM-DAT (2022) traz o registro de acidentes em diversos processos, inclusive em processos de refino de petróleo, mas nenhum deles se refere a processos de pirólise.

O EGIG (*European Gas Pipeline Incident data Group*) divulga relatórios com dados estatísticos de equipamentos da indústria petroquímica em geral, sem, no entanto, sistematizar as informações de modo que permitam encontrar histórico de acidentes específicos para processos de pirólise (EGIG, 2023).

3.4.4 Metodologias para Identificação de Perigos

Em alguns casos é possível para um indivíduo observar um sistema e de forma intuitiva identificar um certo número de perigos. Mas quase sempre um sistema pode esconder perigos não observáveis *a priori*. Por isso é comum utilizar-se métodos que permitam sistematizar a identificação desses perigos.

Existem diversos métodos que podem ser utilizados para a identificação de perigos e avaliação de seus efeitos, cada apresentando vantagens e desvantagens. Entre esses métodos pode-se citar o Levantamento de Histórico de Acidentes, Análise Preliminar de Perigos (APP), Análise de Modos de Falhas e Efeitos (FMEA -

Failure Mode and Effect Analysis), Análise de Árvore de Falha (FTA – *Fault Tree Analysis*), Análise de Erros de Ações (AEA), Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP – *Hazard and Operability Study*), Análise “E se” (“*What if*” *Analysis*) e Análise por Rastreamento de Energia e Barreiras (ETBA - *Energy Trace and Barrier Analysis*) (ABBASI et al, 2015).

3.4.5 Emissões fugitivas

Emissões fugitivas são emissões gasosas ou de partículas de difícil detecção que resultam de operações industriais e que escapam para a atmosfera sem passar através de um sistema de exaustão primário, como uma chaminé ou sistemas de controle (USEPA, 1975). O termo “fugitiva” advém das dificuldades associadas à captura, que em muitos casos requer equipamentos sofisticados para detecção dos gases. Como as emissões fugitivas são mais diluídas em comparação às convencionais, é necessária mais energia para reunir grandes volumes (USEPA, 1975) ou equipamentos mais caros.

Na indústria de petróleo e gás as emissões fugitivas têm um caráter predominantemente contínuo o que implica numa exposição crônica de funcionários, e, eventualmente, da população vizinha exigindo a adoção de programas de monitoramento usualmente com periodicidade de 90 dias (CARVALHO, 2016). De acordo com esse autor para monitoramento de emissões fugitivas um equipamento de medição precisa ter sensibilidade de detecção de vazamentos variando de 24 a 430 g/h.

O benzeno é uma substância carcinogênica a baixas concentrações, e que provoca leucemia mielóide aguda, torna-a crítica para avaliação de emissões fugitivas. De acordo com a IARC (2018) limite para exposição ocupacional é de 1 ppm enquanto que o limite para exposição ambiental é de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($0,005 \text{ mg}/\text{m}^3$).

Os HPAs são uma classe de contaminantes que como o nome diz apresentam em suas moléculas anéis benzênicos condensados. Dentre os HPAs o benzo[a]pireno (B[a]P) é tido como um marcador dessa classe por estar sempre presente, independente da fonte. Além disso o B[a]P é uma substância reconhecida

como carcinogênica aos humanos de acordo com o IARC (2002). A Tabela 4 mostra o excesso de risco de câncer por inalação de B[a]P.

Tabela 4 - Excesso de risco de câncer por inalação de benzo[a]pireno ao longo da vida

Nível de Risco	Concentração de BaP no ar (ng/m ³)
1 caso adicional para cada 10.000 habitantes	1,2
1 caso adicional para cada 100.000 habitantes	1,2 x10 ⁻¹
1 caso adicional para cada 1.000.000 habitantes	1,2 x10 ⁻²

Fonte: WHO (2000)

Nota: Modificado pelo autor

3.5 Análise de Riscos

O **Quadro 3** mostra a estratégia de busca de artigos acadêmicos utilizada.

Quadro 3 – Estratégia de busca

Termos de Busca				Resultados			
				Google Scholar	Scopus	CAPES	
Pyrolysis process	Risk analysis OR Risk assessment	Plastic OR Polymer		940	3	84	
Pyrolysis process	Risk analysis OR Risk assessment	Plastic OR Polymer	Fault tree	7	0	1	
Waste to Energy OR WTE	Risk analysis OR Risk assessment	Plastic OR Polymer	Fault tree	19	0	0	
Waste to Energy OR WTE	Risk analysis OR Risk assessment	Plastic OR Polymer	Fault tree	Legislation	68	0	0

Waste to Energy OR WTE	Risk analysis OR Risk assessment	Plastic OR Polymer	Fault tree	Legislation	ETBA OR Energy Trace	0	0	0
Waste to Energy OR WTE	Risk analysis OR Risk assessment	Plastic OR Polymer	Fault tree	Legislation	Pyrolysis	12	0	0
Waste to Energy OR WTE	Risk analysis OR Risk assessment	Plastic OR Polymer	Fault tree	Legislation	Explosion	12	0	0

Como pode ser visto no Quadro 3 quando se busca artigos a partir dos termos “WTE”, “*risk analysis*” e “*legislation*” o material disponível para o assunto deste trabalho é escasso na base Google Scholar ou, nos casos das bases Scopus e CAPES, inexistente. Acrescentando o termo “*pyrolysis*” ou “*explosion*”, a base Google Scholar retorna menos resultados ainda.

Até o presente momento não há plantas de pirólise para tratamento de RSU em operação no Brasil. Há apenas duas em fase licenciamento sendo uma no município de Goianinha/RN e outra em Bento Gonçalves/RS que estava prevista para ser inaugurada em 2019.

4 MÉTODOS E ETAPAS DE PESQUISA

4.1 Método para caracterização da planta de pirólise

4.1.1 Modelo de usina de pirólise

Não foi possível até o momento ter acesso a uma planta de pirólise de RSUs. Mas um modelo é necessário para que se tenha uma estimativa de número de válvulas, flanges e outros elementos de linha e segurança. Assim, foi elaborada uma maquete eletrônica em escala (modelo em 3D) utilizando o *software* SketchUp.

Os equipamentos, dimensões e parâmetros de processos foram levantados a partir de informações obtidas de artigos científicos e catálogos de fabricantes de plantas de reciclagem de resíduos. Foram escolhidos os catálogos das fabricantes Beston e Ming Jie, ambas com sede na China e já tendo fornecido seus produtos em países nos seis continentes. Alguns equipamentos típicos podem ser vistos no **APÊNDICE A**.

O tipo de alimentação do forno foi assumido como sendo semicontínuo.

4.1.2 Localização da planta de pirólise

Para realizar a modelagem de acidentes envolvendo substâncias perigosas foi necessário escolher um local para a instalação da planta de pirólise.

Não é o escopo deste trabalho realizar um estudo extensivo sobre o local em que uma planta de pirólise de resíduos poderia ser implantada. Mas seria razoável pensar que uma planta do tipo poderia localizada na área ocupada pela empresa que administra o aterro sanitário de Seropédica, também conhecido como CTR – Seropédica. Além de já possuir uma logística desenvolvida para o recolhimento de RSUs, o fato de o aterro ser um empreendimento já licenciado indica que já foram

feitos Estudos de Impactos Ambientais (EIA) com levantamento de solo, aquíferos e população, entre outros.

A visualização foi feita com o auxílio do *software* Google Earth.

4.2 Avaliação do arcabouço legal

O arcabouço legal foi avaliado quanto a sua adequabilidade às atividades de uma usina de pirólise de RSUs.

4.3 Método para avaliação da percepção de risco

Para compreender a percepção de riscos proporcionados por uma usina de pirólise, foi utilizada a Metodologia A3 que envolve a aplicação de um questionário de pesquisa de opinião.

Esse questionário foi elaborado com base na Metodologia A3 desenvolvida professora Marinilza Bruno Carvalho (CARVALHO, 2009). Essa metodologia estrutura a avaliação identificando inicialmente os elementos operacionais da avaliação conforme os tópicos a seguir:

- Objetivo da avaliação
- Objeto de estudo
- Definição da abordagem
- Nível de consciência e participação dos envolvidos
- Circunstâncias de realização
- Sujeitos da pesquisa
- Universo e amostra
- Dimensão

4.3.1 Objetivo da avaliação

O objetivo dessa avaliação é o de compreender a percepção de riscos que as pessoas têm sobre a tecnologia de pirólise.

4.3.2 Objeto de estudo

Embora o foco de estudo desta tese seja a respeito da tecnologia de Pirólise, para a avaliação da percepção de risco optou-se por estruturar o questionário de modo que iniciasse com perguntas que têm como objeto as Usinas de Recuperação Energética (UREs). Durante a elaboração do questionário de avaliação suspeitou-se que talvez os respondentes não conhecessem especificamente o termo “pirólise” e o termo URE é mais genérico e abrange todos os conceitos de tratamento térmico em que se incluem também as tecnologias incineração, gaseificação e o plasma. Conforme o nível de conhecimento demonstrado por meio das respostas dadas nas perguntas iniciais, o entrevistado era direcionado para questões mais específicas sobre pirólise.

4.3.3 Tipo de abordagem e de resultado

A abordagem desta avaliação foi técnico-científica e com isso espera-se um resultado técnico e político.

4.3.4 Nível de consciência e participação dos envolvidos

Com base nas primeiras respostas obtidas, a expectativa é que os respondentes estejam pouco interessados na avaliação proposta.

4.3.5 Circunstâncias de realização

Acredita-se que o momento em que essa avaliação está sendo realizada é a ideal, já que estão surgindo os primeiros projetos de implantação de usina de pirólise no país.

4.3.6 Sujeitos da pesquisa

Foram escolhidos como sujeitos as prefeituras na figura dos profissionais lotados nas secretarias municipais de meio ambiente e/ou serviços urbanos.

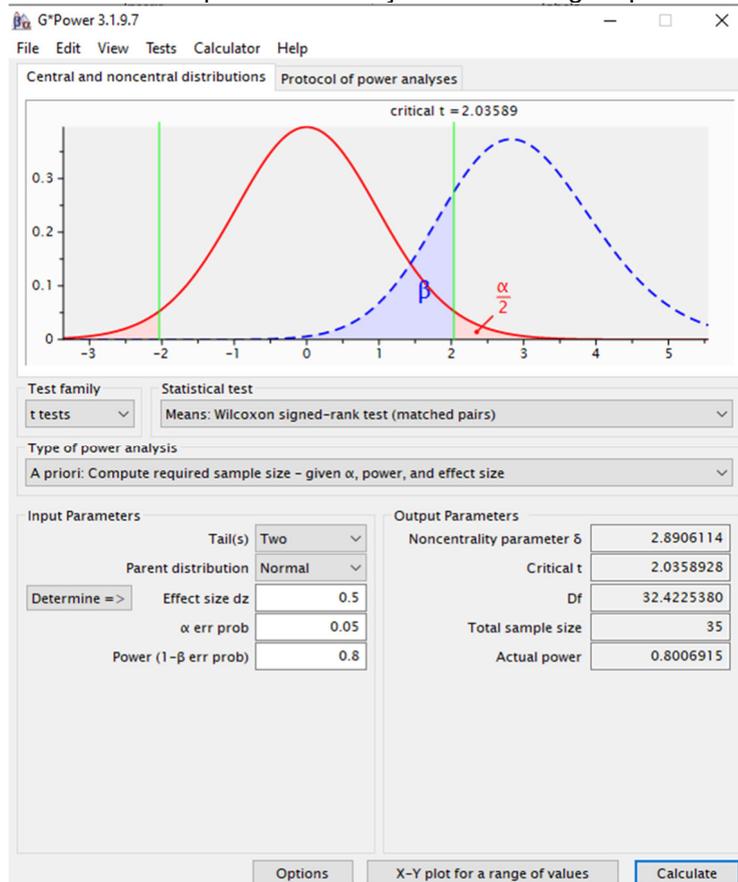
4.3.7 Universo e tamanho da amostra

O universo de secretarias municipais de meio ambiente e/ou serviços urbanos corresponde ao número de municípios no Brasil que são 5570 no total. Como se trata de um número inviável para o presente trabalho, decidiu-se trabalhar com uma amostra de municípios.

Para a determinação do tamanho de amostra foi utilizado o *software* G*Power, muito utilizado em pesquisas na área médica. O questionário como será visto na seção 4.3.8 compreende questões com variáveis dependentes qualitativas ordinais. Para esse tipo de questionário o teste de hipótese mais adequado é o de

Wilcoxon. Em pesquisas ligadas a área médica na maioria dos casos considera-se como suficiente adotar para o erro α o valor de 5% e para o erro β o valor de 20%, garantindo um poder de 80% para a análise. Assumindo um tamanho de efeito de 0,5 chegou-se a um mínimo de 35 municípios (**Figura 5**).

Figura 5 - Parâmetros para determinação de amostragem para o G*Power



Previendo uma taxa de respostas menor que o número de solicitações enviadas aos respondentes, decidiu-se trabalhar com duas regiões metropolitanas. Por compromisso com o povo do estado da federação que fundou a UERJ elegeu-se a região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), além do fato de ser a segunda mais populosa do país (IBGE, 2017). Também se elegeu a região metropolitana de São Paulo (RMSP) como amostra por ser a mais populosa. Nos municípios estabelecidos procurou-se coletar as opiniões dos profissionais das secretarias municipais de meio ambiente e/ou serviços urbanos. Além desses municípios, servidores dos municípios de Jundiaí, Santos e Peruíbe, fora da RMSP, se

voluntariaram para participar da pesquisa. Tem-se, portanto, um total de 61 municípios.

4.3.8 Dimensão

A dimensões são as áreas de interesse para o detalhamento e conhecimento dos resultados da pesquisa. A dimensão escolhida foram as prefeituras.

4.3.9 Categoria

Categorias de análise são as subáreas das áreas de interesse, com características específicas para a pesquisa. As categorias escolhidas foram as secretarias municipais de meio ambiente.

4.3.10 Indicadores

Os indicadores elementos que permitem identificar se os resultados auferidos, dentro de cada subárea, estão alinhados com os objetivos traçados. Os indicadores escolhidos foram o perfil do respondente, o nível de conhecimento sobre o assunto, os sentimentos de aprovação, os sentimentos de oposição, os riscos percebidos.

4.3.11 O questionário

O questionário foi adaptado daquele apresentado na defesa de dissertação de Tanimoto (2011), tendo a revisão de dois profissionais com ampla experiência em

pesquisa de opinião. Procurou-se com isso levantar a opinião geral sobre percepção de riscos e as atitudes em relação à tratamento térmico RSUs, e mais particularmente sobre a pirólise vigente nas secretarias municipais de meio ambiente e/ou serviços urbanos.

Para tomar o mínimo de tempo dos respondentes procurou-se introduzir o mínimo de questões necessárias. Também se evitou perguntas abertas focando em questões fechadas de múltipla escolha, de escala Likert e de escala NPS (*Net Promoter Score*). Para as escalas Likert e NPS foram dispostas sempre na ordem crescente, e tomou-se o cuidado de oferecer uma alternativa neutra.

Foi informado no cabeçalho o objetivo, os responsáveis pela pesquisa e deixando claro que dados coletados seriam unicamente tratados estatisticamente, sendo garantido, portando, total sigilo aos participantes.

O questionário foi inicialmente elaborado como mostrado **APÊNDICE B**. Foi escolhido como meio de divulgação a plataforma Google Forms.

O questionário proposto foi dividido em quatro blocos. Por entender se tratar de dados sensíveis, o primeiro bloco, por se tratar de dados potencialmente sensíveis, foi opcional ao respondente pois era direcionado a caracterizar o perfil profissional do respondente e o órgão em que atua. O questionário transposto para o Google Forms é mostrado a seguir:

1.1 Qual a sua faixa etária? (opcional)

Marcar apenas uma oval.

- 18 a 25 anos
 26 a 35 anos
 36 a 50 anos
 51 a 64 anos
 a partir de 65 anos

1.2 Qual é o seu grau de instrução? (opcional)

Marcar apenas uma oval.

- Ensino fundamental.
 Ensino médio.
 Ensino técnico profissionalizante.
 Ensino superior.
 Pós-graduação.

1.3 Qual é a instituição/empresa em que você trabalha? (opcional)

1.4 Nível hierárquico na instituição/empresa em que você trabalha? (opcional)

Marcar apenas uma oval.

- presidente, superintendente, diretor ou reitor;
 secretário executivo ou secretário geral;
 coordenador ou chefe;
 técnico ou operacional.

1.5 Qual é o seu cargo? (opcional)

1.6 Há quanto tempo você trabalha na área de gestão e/ou gerenciamento de resíduos? (opcional)

Marcar apenas uma oval.

- até 5 anos de atuação;
- de 6 a 10 anos de atuação;
- de 11 a 20 anos de atuação;
- de 21 a 30 anos de atuação;
- mais de 30 anos de atuação.

O segundo bloco foi direcionado a fazer uma triagem para identificar aqueles que tem algum conhecimento, ainda que superficialmente, sobre tratamento térmico de resíduos ou especificamente sobre pirólise:

2 Por favor, responda as questões a seguir a partir de suas opiniões baseadas em suas experiências e/ou conhecimento teórico

2.1 Na sua opinião, qual(ais) tecnologia(s) tratamento de resíduos sólidos deveria(m) ser mais pesquisada(s) nas faculdades/centros de estudos? *

2.2 Que aspectos você considerou mais importantes para fazer a indicação na resposta acima? *

2.3 Você já ouviu falar ou tem algum conhecimento sobre algum tipo de unidade de tratamento térmico de resíduos sólidos, com recuperação de energia térmica ou combustíveis gerados no processo (também conhecidas como usinas de recuperação energética – URE)?

Marcar apenas uma oval.

- Sim
- Não

2.4 Você já ouviu falar ou tem algum conhecimento sobre usinas ou processamento de resíduos sólidos, por pirólise?

Marcar apenas uma oval.

- Sim
- Não [Pular para 4.2](#)

2.5 Por favor, aponte a seguir o seu nível de conhecimento para cada tipo de URE:

Marcar apenas uma oval por linha.

	Apenas ouvi falar	Conhecimento mediano	Conhecimento aprofundado
Incineração	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Gaseificação	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Pirólise	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Plasma	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

2.6 Você conhece alguma outra tecnologia de recuperação energética?
Qual?

O terceiro bloco foi direcionado a obter a opinião somente daqueles que, no bloco anterior, afirmaram conhecer o tratamento térmico por pirólise.

3 A seguir marque a alternativa que melhor representa seu ponto de vista em relação às afirmações:

3.1 Especificamente para usinas de pirólise, e considerando os aspectos ambientais envolvidos, julgue numa escala de (1) a (7) o quanto concorda com as seguintes afirmações:

Marcar apenas uma oval por linha.

	(1) Discordo totalmente	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7) Concordo totalmente
Gera poluição do ar	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Gera poluição de águas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Produzem outros resíduos ou rejeitos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Causam poluição sonora	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Causam odores desagradáveis	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Causam impactos à saúde	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Podem sofrer explosões	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Aumenta o tráfego de veículos pesados na região	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

3.2 Especificamente para usinas de pirólise, você acha que podem ocorrer acidentes ambientais decorrentes desse tipo de atividade?

Marcar apenas uma oval.

Sim

Não

Pular para 4.2

3.7 Tendo em vista os seus conhecimentos específicos sobre usinas de pirólise, você acha que a implantação desse tipo de usina é desejável?

Marcar apenas uma oval.

- Sim
 Não

3.8 Especificamente para usinas de pirólise, por favor, julgue, numa escala de (1) a (7), o quanto concorda com as seguintes afirmações sobre os benefícios proporcionados aos municípios:

Marcar apenas uma oval por linha.

	(1) Discordo totalmente	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7) Concordo totalmen
Proporcionam aumento de arrecadação tributária municipal	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Geram empregos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Promovem desenvolvimento econômico	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Reduzem os gastos com combustíveis	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Reduzem os gastos com eletricidade	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Solucionam o problema com disposição de resíduos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

O quarto bloco visa permitir uma comparação entre a percepção de risco de uma usina de pirólise, ainda inexistente no país, com a percepção de riscos de Usinas de Recuperação Energética (UREs), já com exemplares em atividade no país. Esse bloco direcionado tanto àqueles que no segundo bloco informaram conhecer quanto àqueles que informaram desconhecer sobre pirólise:

4.1 Considerando na sua avaliação de riscos que fez para Usinas de Pirólise até aqui, você acredita que essa mesma avaliação seria diferente para os demais tipos de UREs (incineração, gaseificação ou plasma)?

Marcar apenas uma oval.

- Sim, teria uma avaliação diferente para outros tipos de UREs
 Não, minha avaliação seria a mesma para os outros tipos de UREs

4.2 Para os demais tipos de UREs (incineração, gaseificação ou plasma), e considerando os aspectos ambientais envolvidos, julgue, numa escala de (1) a (7), o quanto concorda com as seguintes afirmações sobre os impactos negativos proporcionados aos municípios:

Marcar apenas uma oval por linha.

	(1) Discordo totalmente	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7) Concordo totalmente
Geram poluição do ar	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Geram poluição de águas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Produzem outros resíduos ou rejeitos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Causam poluição sonora	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Causam odores desagradáveis	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Causam impactos à saúde	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Podem sofrer explosões	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Aumentam o tráfego veículos pesados na região	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

4.3 Para os demais tipos de UREs, você acha que podem ocorrer acidentes ambientais?

Marcar apenas uma oval.

- Sim
 Não

4.4 Para os demais tipos de UREs com que probabilidade você acha que acidentes podem ocorrer ao longo da vida útil dessas usinas?

Marcar apenas uma oval.

- improváveis, mas possíveis de ocorrer;
 é provável que ocorra;
 ocorrerá várias vezes;
 não sei.

4.5 Para os demais tipos de UREs, em sua opinião, com qual nível de gravidade acidentes decorrentes de atividades dessas usinas poderiam resultar?

Marcar apenas uma oval.

- lesões ou doenças ocupacionais que NÃO resultam em perda de dias de trabalho;
 lesão ou doença ocupacional que resultem em um ou mais dias perdidos de trabalho;
 acidentes que resultem em incapacidade parcial permanente, ferimentos ou doenças ocupacionais;
 acidentes que resultem em incapacidade total permanente;
 acidentes que resultem em morte;
 não sei.

4.9 Para os demais tipos de UREs, e tendo em vista o seu conhecimento sobre essas usinas você acha que a implantação desse tipo de usina é desejável?

Marcar apenas uma oval.

Sim

Não

Para fins de aferição de clareza e tempo de resposta, antes de divulgar aos respondentes finais, o questionário foi testado com pesquisadores químicos e engenheiros químicos do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI).

4.3.12 Distribuição do questionário aos respondentes

Inicialmente procurou-se contatar os profissionais das secretarias por contato telefônico. Em uma das prefeituras foi possível ter acesso diretamente aos servidores das secretarias de interesse, aproveitando-se da rede de contatos particular. Neste caso em particular o retorno foi relativamente rápido. Porém, nas tentativas seguintes as dificuldades em se chegar aos potenciais respondentes aliada ao pouco interesse por parte dos mesmos tornam essa tarefa demasiadamente lenta e com pouco retorno. Em virtude do tempo restrito para a pesquisa, foi necessário adotar uma nova abordagem.

Com advento da Lei de Acesso à Informação (Lei 12.527) todos os órgãos públicos estão obrigados a fornecer informações ao cidadão, desde que obedecidos alguns critérios. Também ficam obrigados a disponibilizar *sites* oficiais na internet que permitam a comunicação por via eletrônica ou telefônica. De acordo com essa lei o prazo para resposta é de até 20 dias, prorrogáveis por mais 10. Embora esse meio exija o cadastro do solicitante no *site* de em cada uma das prefeituras solicitadas, tem a vantagem de fornecer um protocolo. Assim, optou-se por esse método. As solicitações foram feitas entre os dias 23/03/2023 a 07/04/2023.

A maioria das prefeituras disponibiliza em seus *sites* oficiais o canal “e-SIC” (Serviço eletrônico de Informação ao Cidadão) que foi o preferencial para a distribuição de questionários. Para aqueles municípios que não possuíam o canal e-SIC, procurou-se enviar o questionário preferencialmente para os endereços de e-

mail das secretarias de meio ambiente e/ou serviços públicos ou para os endereços de *e-mail* das ouvidorias, sendo feito “um” *follow-up* após vencido o prazo de resposta. Em um dos casos o único canal disponível era um endereço genérico da própria prefeitura que também foi utilizado. Em todos os casos foi disponibilizado o *link* para o formulário e também uma versão em .pdf anexados.

Importante ressaltar que foi assumido que cada órgão escolheu dentro de seus quadros profissionais as pessoas com mais entendimento sobre tecnologias de tratamento térmico.

4.4 Análise de risco da usina de pirólise

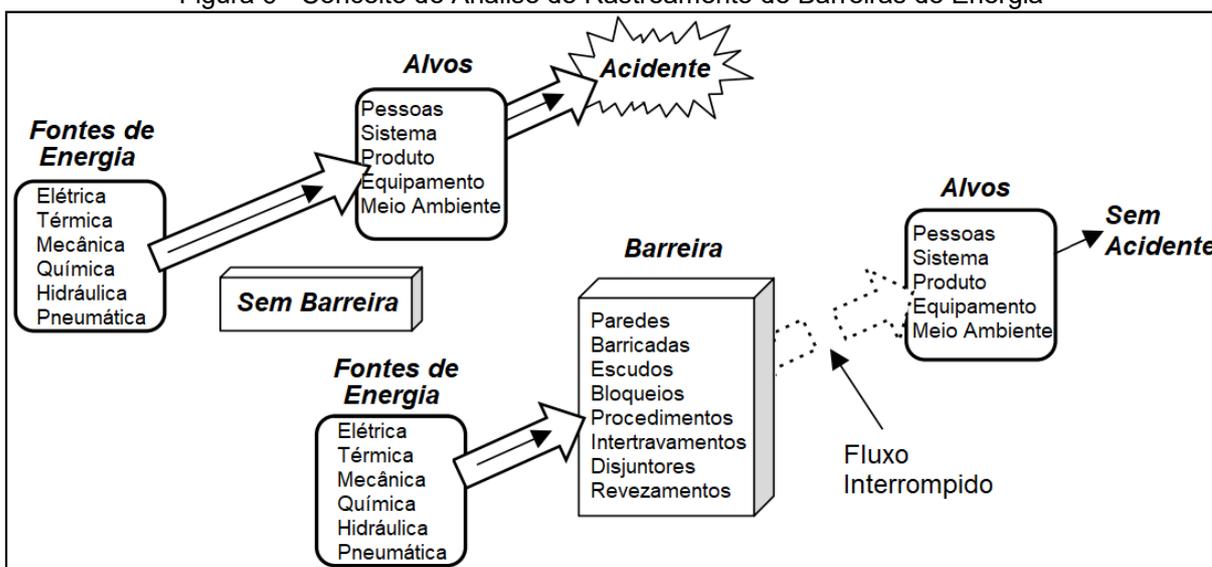
4.4.1 Método para identificação de perigos

Foi utilizado como método de identificação de perigos a “Análise por Rastreamento de Energia e Barreira” (ETBA - *Energy Trace and Barrier Analysis*). Que consiste no “caminhamento” pela usina e a identificação das energias presentes, conforme a lista abaixo:

- Química (por exemplo, explosivos, materiais corrosivos);
- Pressão (ar, água);
- Cinética (massa em movimento, ex.: um veículo, uma peça de máquina, um projétil);
- Potencial (massa em movimento, ex.: um objeto pesado suspenso)
- Ruído e vibração;
- Térmica (calor);
- Radiação (não ionizante, ex.: micro-ondas; e ionizante, ex.: radiação nuclear, raios-x); e
- Elétrica.

Na **Figura 6**, é ilustrado o conceito de ETBA.

Figura 6 - Conceito de Análise de Rastreamento de Barreiras de Energia



Fonte: Adaptado de ERICSSON, 2005

Essa técnica foi escolhida porque a identificação de energias é algo trivial para qualquer profissional de química, física ou engenharia, e torna a identificação de perigos mais objetiva, quando comparada a outros métodos. A ETBA doutrina a subjetividade do analista. Essa característica desejável quando há poucos dados disponíveis sobre os equipamentos envolvidos ou quando se conhece pouco sobre um determinado processo como é o presente caso.

4.4.2 Dados climatológicos

Os dados climatológicos foram obtidos a partir da estação meteorológica localizada em Seropédica/RJ na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. As informações sobre essa estação são mostradas no **Quadro 4**:

ESTAÇÃO:	ECOLOGIA AGRÍCOLA
CÓDIGO (WMO)	A601
LATITUDE:	-22,758
LONGITUDE:	-43,684
ALTITUDE:	35 m
ALTURA DE MEDIÇÃO*	7,5 m
DATA DE FUNDAÇÃO	07/05/2000

Fonte: BRASIL, 2021

Foi utilizada a média aritmética dos dados compreendidos no período compreendido entre os anos de 2000 a 2020.

4.4.3 Ferramenta de modelagem de zonas de ameaças de substâncias perigosas

Os possíveis impactos causados pelas substâncias perigosas levantadas foram feitos utilizando do *software* ALOHA v.5.4.7, desenvolvido pela USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) em conjunto com a NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Esse *software* permite simular algumas hipóteses acidentais. Além disso, possui em sua biblioteca os dados físico-químicos de diversas substâncias, permitindo também a inclusão manual das mesmas. Permite ainda exportar o desenho das zonas de risco em formato que pode ser reconhecido pelo Google Earth.

ALOHA é usado principalmente para resposta de emergência ou situações de planejamento, onde o objetivo é avaliar a ameaça representada ao público em geral por uma liberação de produto químico. Para liberações tóxicas, o ALOHA usa diretrizes de exposição pública preferencialmente para as Concentrações de Referência (CR), porque são projetadas especificamente para prever como o público em geral responderá a um evento de liberação única de curto prazo.

4.4.4 Delimitação do objeto de estudo na planta

Devido à complexidade esperada para uma usina de pirólise as análises foram focadas no forno, já que é o equipamento que contém a maior quantidade de substâncias perigosas e com maior temperatura de trabalho.

4.4.5 Definição das substâncias a serem simuladas e cenários considerados

O processo de pirólise de poliolefinas gera uma mistura de hidrocarbonetos, semelhante à fração mais leve do petróleo. A priori é difícil prever a composição dos hidrocarbonetos que se formariam, já que o resultado depende uma gama de condições de processo. A **Tabela 5** mostra uma composição aproximada dos hidrocarbonetos obtidos a partir da pirólise de PEAD.

Tabela 5 - Gases gerados na pirólise de PEAD

Substância	Catalisador		
	HZSM-5	H β	HY
Etileno	10%	2%	2%
Propileno	28%	7%-14%	8%
Buteno	20%	17% - 25%	16%
Propano	7%	1%	0,2% - 1%
Butano	7%	2%	1,5% - 6%
Não aromáticos (C5-C11)	8% - 20%	35% - 47%	40% - 47%
Aromáticos mononucleados	8% - 20%	5% - 11%	
Tolueno	4,5%		2,9% - 5%
Xilenos			
Benzeno			
Aromáticos com 9 carbonos	1%		0,4
Aromáticos com 10 a 11 carbonos	< 0,3%		1,9%
Aromáticos com mais de 11 carbonos	\leq 2%	3%	10%

Fonte: Elordi et al. (2009)

Como pode ser observado na **Tabela 5** os produtos obtidos por meio da pirólise de PEAD não abrange todas as frações típicas do petróleo cujas frações típicas são mostradas na **Tabela 6**.

Tabela 6 - Frações típicas do petróleo

Fração	Temperatura de Ebulição (°C)	Composição aproximada	Usos
Gás residual	\leq 40	C ₁ – C ₂	Gás combustível.
Gás liquefeito de petróleo		C ₃ – C ₄	Gás combustível engarrafado, uso doméstico e industrial.
Gasolina	40 - 175	C ₅ – C ₁₀	Combustível automotivo, solvente
Querosene	175 - 235	C ₁₁ – C ₁₂	Iluminação, combustível de aviões a jato
Gasóleo leve	235 – 305	C ₁₃ – C ₁₇	Diesel
Gasóleo pesado	305 – 400	C ₁₈ – C ₂₅	Combustível, matéria-prima para lubrificantes
Lubrificantes	400 - 510	C ₂₆ – C ₃₈	Óleos lubrificantes
Resíduo	> 510	C ₃₈₊	Asfalto, piche, impermeabilizantes

Fonte: TNO (2001)

Para não tornar este trabalho demasiadamente extenso, optou-se por escolher uma das substâncias para proceder a simulação. Para os casos em não é possível definir a substância quanto aos seus componentes, a norma Cetesb P4.261 recomenda utilizar substâncias representativas conforme **Quadro 5**.

Quadro 5 - Substâncias a serem utilizadas nas simulações para petróleo e derivados

Substância (mistura)	Substância representativa para a simulação
gás liquefeito de petróleo (GLP)	propano
gás natural	metano
gasolina automotiva	n-hexano
nafta	n-pentano
óleo combustível	n-decano
óleo diesel	n-nonano
petróleo	n-decano
querosene	n-nonano

Fonte: CETESB (2014)

Como já discutido o processo de pirólise de poliolefinas pode gerar - a depender das condições de processo ou catalisadores - gasolina, querosene e óleo diesel. Uma vez que mistura, o produto de pirólise de PEAD, não contém a fração pesada do petróleo, a substância representativa para as simulações poderiam ser, então, o n-hexano ou o n-nonano. Simulações prévias revelaram que, comparado ao n-hexano, o n-nonano produz áreas de impacto ligeiramente maiores. Assim para este trabalho foi definido o n-nonano como substância representativa para simulações de consequências de exposição aguda a nuvens tóxicas, incêndios e explosão de nuvem e jato de fogo.

Outra substância que pode ser preocupante por seu caráter carcinogênico é o benzeno. Por estar presente em concentrações relativamente baixas (no máximo 1% de acordo com a Tabela 5) para oferecer algum perigo de intoxicação aguda. Mas mesmo em baixas concentrações pode levar ao desenvolvimento de leucemia na população exposta por anos.

Para simular a dispersão de HPAs foi utilizada como substância representativa o benzo[a]pireno (B[a]P). Os parâmetros físico-químicos do B[a]P foram levantados dos portais InChem, NIST, USEPA, *Public Health England* (PHE) e IARC.

Como discutido anteriormente, o potencial destrutivo das energias diretas torna necessário o estabelecimento de hipóteses específicas. Foram consideradas as hipóteses emissões fugitivas, nuvem tóxica, explosão de nuvem e jato de fogo.

Estariam sujeitos a ameaça de morte os motoristas dos caminhões que abastecem as usinas com resíduos plásticos a serem processados. Além dos motoristas está sendo estipulado que ao longo do dia haja um fluxo de terceiros que incluiriam fornecedores, prestadores de serviços, fiscais visitantes, etc. Entre motoristas e terceiros foi assumido um número médio de 10 pessoas.

Outra população que estaria sujeita aos riscos de uma usina de pirólise seriam os funcionários da empresa vizinha, Cilclus Ambiental. De acordo com o *site* Econodata (2023) a Ciclus Ambiental, administradora do CTR Seropédica, conta com 201 a 300 funcionários e ocupa uma área de aproximadamente 36.000 m².

4.4.6 Estimativa quantitativa de probabilidades

A estimativa de probabilidades das tipologias acidentais⁶ foram feitas com base na estruturação das hipóteses acidentais⁷ na forma de árvore de falhas. A Árvore de Falhas consiste na construção de um diagrama lógico e dedutivo que, partindo de um evento indesejado pré-definido (hipótese acidental), busca as suas causas básicas, considerando os diferentes “caminhos” (combinações das falhas/erros) que contribuem para a ocorrência do evento-topo (tipologia acidental). A combinação de duas ou mais probabilidades ou frequências se dá por meio da porta lógica “OU” ou da porta lógica “E”.

⁶Tipologia acidental: denominação genérica para incêndio de poça, incêndio de nuvem, jato de fogo, bola de fogo, explosão confinada, explosão de nuvem de vapor e dispersão de nuvem tóxica.

⁷Hipótese acidental: suposição de condições que podem resultar em perda de contenção de matéria e/ou energia.

4.4.7 Cálculos de soma e multiplicação de probabilidades

Para as operações de soma e multiplicação de probabilidades a serem aplicadas na árvore de falhas. As portas “OU”, isto é, a soma foi calculada a partir da seguinte dedução:

$$P(A) \cup P(B) \cup P(C) = P(A) + P(B) + P(C) - [P(A).P(B) + P(A).P(C) + P(B).P(C)] + P(A).P(B).P(C) \quad \text{Equação (1)}$$

Tomada cada uma das probabilidades e somando e subtraindo 1, de modo a que não se altere o significado do valor, tem-se:

$$P(A) = +1 - 1 + P(A) \Rightarrow P(A) = 1 - [1 - P(A)] \Rightarrow P(A) = 1 - \alpha; \text{ onde } \alpha = [1 - P(A)]; \therefore P(A) = (1 - \alpha)$$

$$P(B) = +1 - 1 + P(B) \Rightarrow P(B) = 1 - [1 - P(B)] \Rightarrow P(B) = 1 - \beta; \text{ onde } \beta = [1 - P(B)]; \therefore P(B) = (1 - \beta)$$

$$P(C) = +1 - 1 + P(C) \Rightarrow P(C) = 1 - [1 - P(C)] \Rightarrow P(C) = 1 - \gamma; \text{ onde } \gamma = [1 - P(C)]; \therefore P(C) = (1 - \gamma)$$

Substituindo $P(A)$; $P(B)$ e $P(C)$ da **Equação (1)**, tem-se:

$$\begin{aligned} P(A) \cup P(B) \cup P(C) &= (1 - \alpha) + (1 - \beta) + (1 - \gamma) \\ &- [(1 - \alpha).(1 - \beta) + (1 - \alpha).(1 - \gamma) + (1 - \beta).(1 - \gamma)] \\ &+ (1 - \alpha).(1 - \beta).(1 - \gamma) \end{aligned}$$

Resolvendo-se a soma na parte vermelha e aplicando a propriedade distributiva onde existem multiplicações, tem-se:

$$\begin{aligned} P(A) \cup P(B) \cup P(C) &= (3 - \alpha - \beta - \gamma) \\ &- [(1 - \beta - \alpha + \alpha\beta) + (1 - \gamma - \alpha + \alpha\gamma) + (1 - \gamma - \beta + \beta\gamma)] \\ &+ (1 - \alpha - \beta - \gamma + \alpha\beta + \alpha\gamma + \beta\gamma - \alpha\beta\gamma) \end{aligned}$$

Resolvendo-se a soma dentro do colchete, tem-se o parêntesis azul escuro:

$$\begin{aligned}
 P(A) \cup P(B) \cup P(C) &= (3 - \alpha - \beta - \gamma) - (3 - 2\alpha - 2\beta - 2\gamma + \alpha\beta + \alpha\gamma + \beta\gamma) \\
 &+ (1 - \alpha - \beta - \gamma + \alpha\beta + \alpha\gamma + \beta\gamma - \alpha\beta\gamma)
 \end{aligned}$$

Eliminando-se todos os parêntesis e ajustando os sinais onde for pertinente, tem-se:

$$\begin{aligned}
 P(A) \cup P(B) \cup P(C) &= 3 - \alpha - \beta - \gamma - 3 + 2\alpha + 2\beta + 2\gamma - \alpha\beta - \alpha\gamma - \beta\gamma + 1 - \alpha - \beta - \gamma \\
 &+ \alpha\beta + \alpha\gamma + \beta\gamma - \alpha\beta\gamma
 \end{aligned}$$

Reorganizando a ordem das parcelas:

$$\begin{aligned}
 P(A) \cup P(B) \cup P(C) &= \boxed{3 - 3} \boxed{-\alpha - \alpha + 2\alpha} \boxed{-\beta - \beta + 2\beta} \boxed{-\gamma - \gamma + 2\gamma} \boxed{-\alpha\beta + \alpha\beta} \boxed{-\alpha\gamma + \alpha\gamma} \\
 &\boxed{-\beta\gamma + \beta\gamma} \boxed{+1 - \alpha\beta\gamma}
 \end{aligned}$$

Resolvendo os retângulos e cancelando nos casos em que a parcela vale zero:

$$P(A) \cup P(B) \cup P(C) = \boxed{+1 - \alpha\beta\gamma}$$

Lembrando que $\alpha = [1 - P(A)]$; $\beta = [1 - P(B)]$ e $\gamma = [1 - P(C)]$

$$P(A) \cup P(B) \cup P(C) = 1 - [1 - P(A)] \times [1 - P(B)] \times [1 - P(C)]$$

ou em nomenclatura estatística, a multiplicação de variáveis aleatórias independentes é equivalente a intersecção de probabilidades independentes.

$$P(A) \cup P(B) \cup P(C) = 1 - [1 - P(A)] \cap [1 - P(B)] \cap [1 - P(C)] \quad \text{equação (2)}$$

Já para a multiplicação de probabilidades utilizou-se a (3):

$$P(A \cap B \cap C) = P_A \cdot P_B \cdot P_C \quad \text{equação (3)}$$

4.4.8 Método para identificação de perigos

Para uma análise quantitativa de riscos (AQR), as hipóteses foram formuladas a partir de um método de identificação de perigos que para o presente trabalho foi a ETBA. Assim, foram verificados os efeitos físicos (simulações) e as frequências de ocorrência. Os fluxos de energia foram identificados dentro das caixas da árvore de falhas com os números correspondentes aos da planilha ETBA. As taxas de falha foram extraídas de literatura de referência como Lees (2005), API (2008), RIVM (2009), Cetesb (2014) e HSE (2012), além de ponderações para os casos em que não há uma probabilidade descrita nessa literatura.

Emissões fugitivas: foi assumida a temperatura de trabalho igual à do forno, ou seja, 500°C. Foram consideradas falhas em conexões, válvulas e bombas que de acordo com Carvalho (2016, p.98) para refinarias de petróleo pode chegar a 430 g/h. Como mostrado na **Tabela 5** Quando se trata de exposição crônica é difícil estabelecer umnexo causal para doenças não-carcinogênica e poluentes emitidos por uma indústria. Doenças como tosse, coceiras, e rouquidão, por exemplo podem ter causas mais prováveis do que a exposição a esses poluentes. Por esse motivo é que para cenários de emissões fugitivas foram considerados apenas os riscos decorrentes de substâncias comprovadamente cancerígenas como o benzeno e HPAs. O benzeno pode compor cerca de 1% dos gases de pirólise o que significa que para uma emissão fugitiva de 430 g/h, corresponderia a uma vazão de benzeno de 4,3 g/h. Já o B[a]P, se forem considerados os aromáticos com mais de 11 carbonos, compões até 2% dos gases de pirólise. A duração do vazamento é limitada pelo próprio *software* a no máximo 60 minutos.

Ruptura catastrófica: A CETESB (2014) e o RIVM (2009) preconizam a simulação de cenários de ruptura catastrófica com a liberação instantânea de todo o conteúdo do tanque. A ruptura catastrófica do tanque pode ocorrer devido a um aumento da pressão interna para além da capacidade do equipamento levando a uma liberação instantânea de todo o conteúdo do recipiente em estudo. De acordo com Wensing et al. (2018) um reator de pirólise de pneus estudado teria pressão máxima de trabalho 6 atm. De acordo com Guedes (2007) o fator de segurança utilizado para um projeto é de 3 vezes ao recomendado pelo fabricante. Assim, a

pressão máxima suportada por esse tipo de forno seria de até 18 atm antes de romper. Na temperatura de regime do processo de pirólise (500°C) o mais provável é que esse desvio culmine em uma explosão em pouco tempo após a liberação (*flash fire*). Para esse cenário foi assumido o tempo de ignição como “desconhecido”⁸ no *software* Aloha. O outro cenário, ainda que menos provável é o desprendimento de nuvem tóxica. Hidrocarbonetos com mais de 5 carbonos apresentam pontos de ebulição relativamente elevados iniciando em 68,6°C chegando a 195°C no caso do undecano. Dessa forma foi utilizado cenários com espalhamento de nuvens os dados físico-químicos do n-nonano conforme recomendado pela Cetesb (ver **Quadro 5**). Foram simulados os cenários de dispersão de nuvem tóxica, de nuvem inflamável e explosão em nuvem a partir de uma ruptura catastrófica do forno de pirólise que corresponde a uma avaria com diâmetro de 16 polegadas (API, 2008, p. 474). Para a ocorrência desse tipo de acidente foi assumida uma pressão que exceda a pressão máxima de trabalho ou choque mecânico de grande intensidade.

Liberação total em 10 minutos: A Cetesb (2014) preconiza que deve ser feita simulação considerando a liberação total do conteúdo do recipiente em um tempo mínimo de 10 minutos. Para essa simulação. O tamanho de orifício capaz de produzir um vazamento próximo desse tempo seria um com 50 mm de diâmetro que esvaziaria o forno em 13 minutos.

4.4.9 Critério de tolerabilidade de riscos

Os critérios de tolerabilidade de riscos a ser adotado foi o preconizado pela norma P4.261 da Cetesb (CETESB, 2014) em termos de risco social e individual.

O risco social é aquele ao qual um agrupamento de pessoas presente na vizinhança de um perigo, em período de tempo definido. Sua expressão se dá por meio da chamada curva F-N, onde F representa a frequência acumulada de ocorrência dos cenários com número de fatalidades N ou mais.

⁸ Quando se ajusta o tempo de ignição como desconhecido, o *software* automaticamente busca o tempo correspondente ao maior raio de destruição possível.

Já o risco individual refere-se àquele para uma pessoa presente na vizinhança de um perigo, em período de tempo definido. O risco individual tem caráter cumulativo e geográfico, razão pela qual sua expressão decorre da soma do risco individual de cada cenário acidental contribuinte nos pontos x,y localizados no entorno do empreendimento. Pode ser expresso por meio de contornos de risco (ou de isorrisco).

4.5 Estudo de caso do processo de licenciamento da planta de pirólise em Bento Gonçalves/RS

Foi analisado o processo de licenciamento da uma usina de pirólise em Bento Gonçalves/RS disponível na página da Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler (FEPAM).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Características da usina de pirólise

5.1.1 Modelo da usina de pirólise

Os demais dados obtidos a partir dos catálogos dos fabricantes são mostrados no **Quadro 6**.

Quadro 6 - Parâmetros da Planta de Pirólise

Parâmetros	Valores	Fonte
Diâmetro (m)	2,8	WENSING et al 2018
Comprimento (m)	6,2	WENSING et al 2018
Volume (m ³)	38,2	Calculado
Volume (L)	38.176,6	Calculado
Material	Aço carbono Q235b - 6 mm	BRAZIL TRIANGLE, 2020
Temperatura	600°C	BRAZIL TRIANGLE, 2020
Aquecimento	Carvão, gás ou óleo	BRAZIL TRIANGLE, 2020
Capacidade	25 Ton/dia	WENSING et al 2018
Rotação	0,4 RPM – 0,8 RPM	WENSING et al 2018
Pressão de Trabalho	6 atm	WENSING et al 2018
Fator de Segurança	3	GUEDES, 2007
Pressão máx. de trabalho	6 atm x 3 = 18 atm	Estimado pelo autor
Duto de saída	Aço carbono Q235b - 6 mm, Ø 10"	Estimado pelo autor
Bombas de recirculação de água	Bombas centrífugas	Identificada por meio de vídeo institucional
Operadores	Até 6	BRAZIL TRIANGLE, 2020

O maior forno de pirólise para trabalho em batelada de acordo com o levantamento feito para este trabalho tem capacidade de 16 t/dia (0,7 t/hora) enquanto que um contínuo pode ter capacidade de até 25 t/dia (MING JIE, 2021).

A maquete eletrônica detalhada está disponibilizada por Oliveira (2023) na plataforma Youtube. As diferentes vistas da maquete eletrônica são mostradas da **Figura 7 à Figura 11**.

Figura 7 - Vista panorâmica da maquete eletrônica da usina

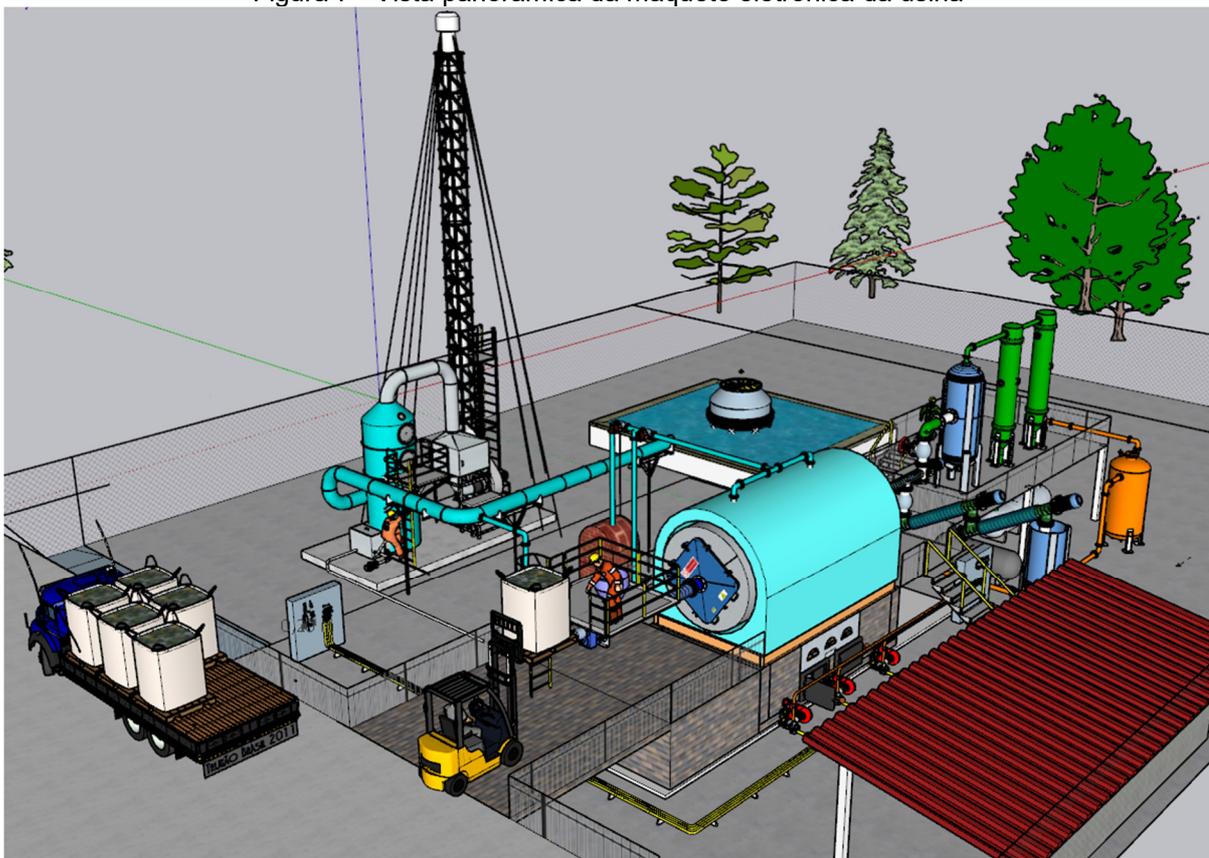


Figura 8 - Vista panorâmica da maquete eletrônica da usina

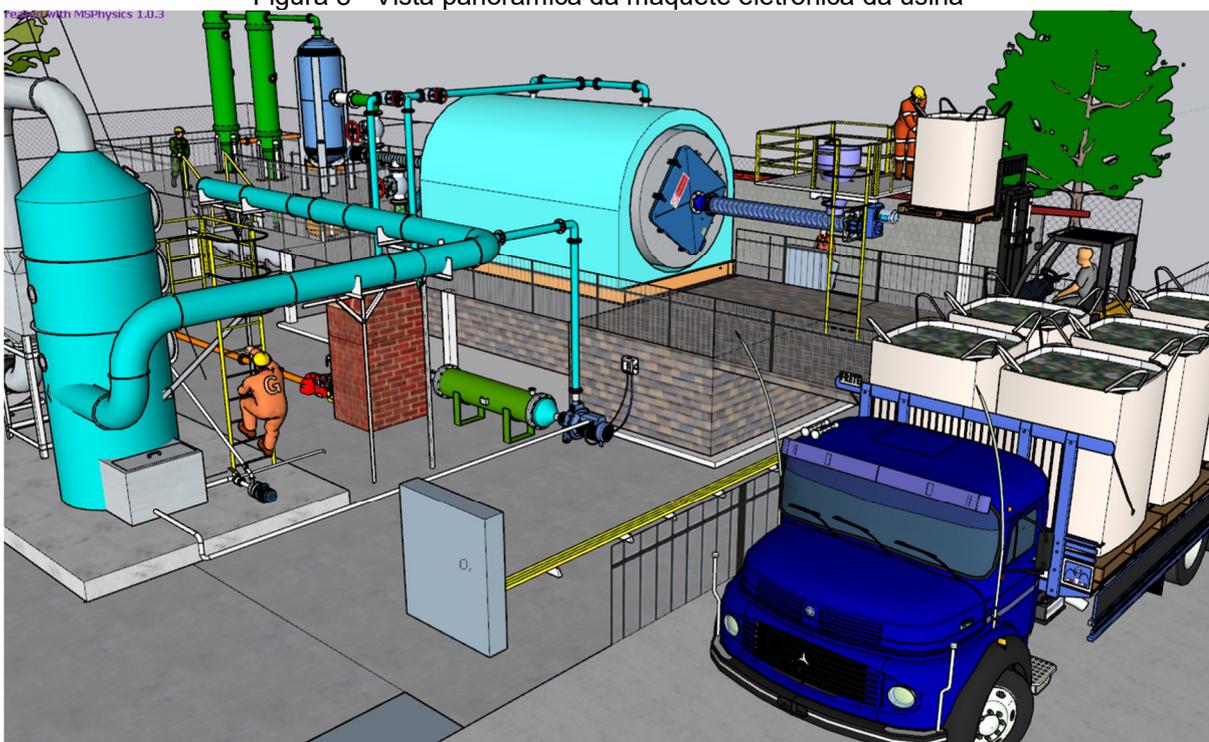


Figura 9 – Vista do console de controle e câmara de combustão

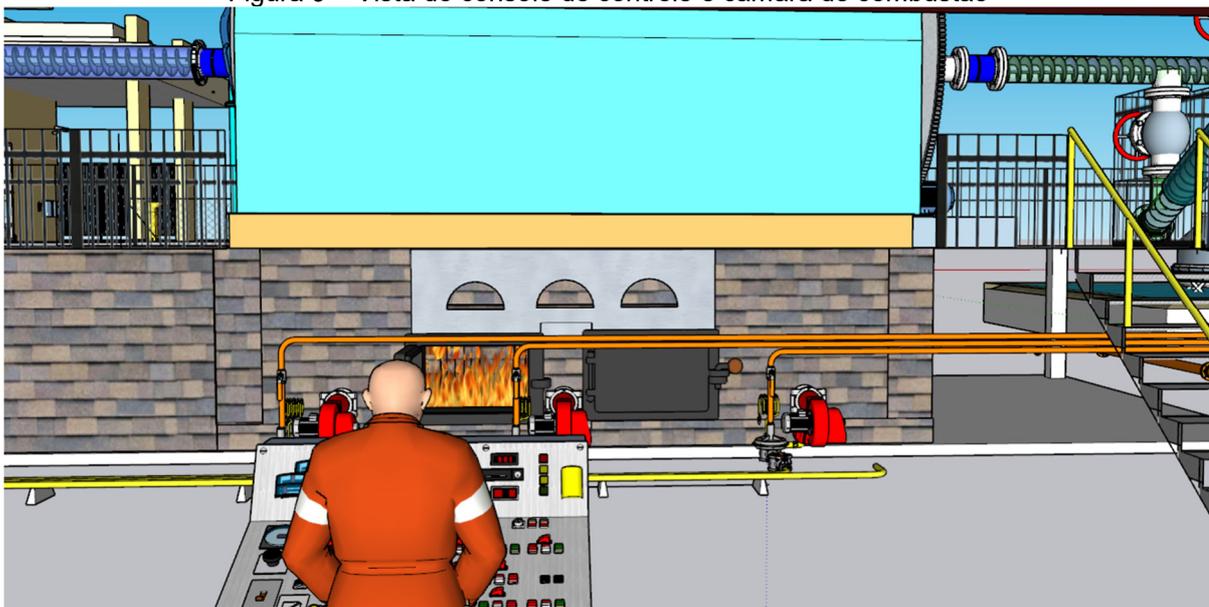


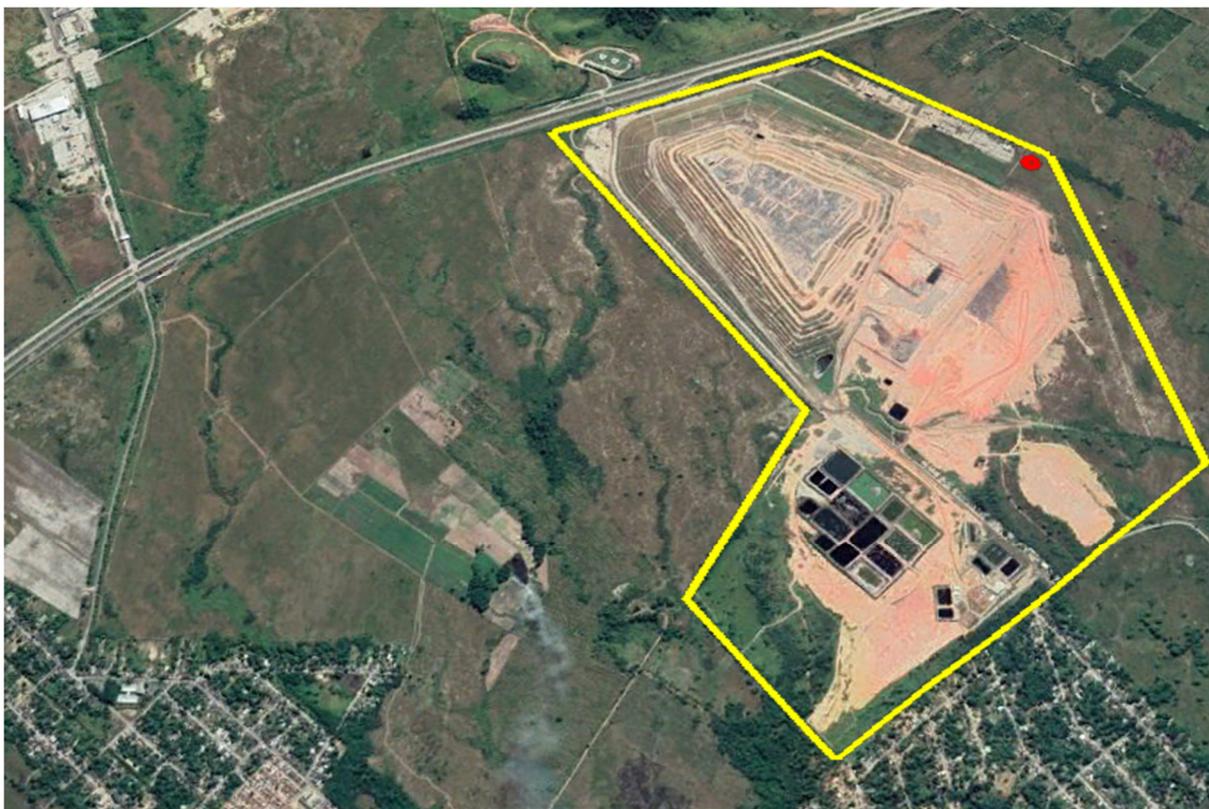
Figura 10 - Vista da tremonha e transportador helicoidal



5.1.2 Local escolhido para a localização da planta de pirólise

Como pode ser visto na **Foto 6**, o CTR – Seropédica (área amarela), administrada pela Ciclus Ambiental, fica localizado numa área rural à margem da Rodovia Raphael de Almeida Magalhães, popularmente conhecida como Arco Metropolitano do Rio de Janeiro. Ao sul e sudoeste do CTR, cortado pela divisa dos municípios de Seropédica e Itaguaí, fica localizado o bairro Chaperó. Uma parte do bairro faz parte da jurisdição Seropédica e a outra a Itaguaí. A área em vermelho foi a designada para abrigar a planta de pirólise para fazer a modelagem da análise de riscos.

Foto 6 - Foto de satélite do CTR- Seropédica



Fonte: Google Earth

Dentro da área ocupada pelo CTR, foi escolhida a área mostrada na **Foto 7**. Como pode ser visto na foto, a área escolhida fica localizada relativamente distante do bairro vizinho ao CTR, ao mesmo tempo em que fica localizada próxima à planta de tratamento de biogás, operada pela Ciclus. As coordenadas do centro dessa área são latitude 22°47'16.50"S; longitude 43°45'14.62"W.

Foto 7 - Possível localização da planta de pirólise



Fonte: Google Earth

A área escolhida é vantajosa, pois é praticamente toda cercada por pastos, sendo, portanto, pouco habitada. Os vulneráveis seriam os funcionários da Ciclus Ambiental que fica localizada na direção oeste-noroeste da usina.

Outro ponto positivo é que sendo os terrenos à volta pouco especulados, permitiria a aquisição de um terreno maior do que o necessário para a usina para estabelecer um cinturão de segurança a custos menores.

5.2 Arcabouço legal

A primeira legislação sobre tratamento térmico de resíduos no Brasil foi publicada em 2002 pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente como Resolução Conama nº 316. Essa resolução dispõe sobre procedimentos e critérios para a atividade de “Tratamento Térmico” de resíduos em geral. Nessa resolução Tratamento Térmico é definido como todo e qualquer processo cuja operação seja realizada em temperaturas acima de 850°C. Estabelece o controle de emissões de

MP, NO_x, CO, dioxinas e furanos, além de alguns metais. Apesar de exigir tópicos mínimos para os planos de contingência e emergência para situações de incêndio e explosão, não define o conteúdo mínimo e métodos para a Análise de Riscos.

Em 2009 a Secretaria de Estado do Meio Ambiente de São Paulo publicou a Resolução SMA-79 que estabelece diretrizes para a operação Usinas de Recuperação Energética (UREs). URE de acordo com essa resolução é qualquer unidade dedicada ao tratamento térmico de resíduos sólidos, com recuperação de energia térmica gerada pela “combustão”. Como no caso da Conama-316 exige temperaturas de operação acima de 850°C. Além, das emissões exigidas pela Conama-316 exige o controle de emissões de Hidrocarbonetos Totais (HCTs), HCl, HF e SO_x. Também não especifica métodos e conteúdo mínimos para análise de riscos.

Em 2012 a Cetesb emitiu um parecer a respeito da Licença de Instalação de uma URE em Barueri/SP que na realidade consiste em um incinerador (ORLANDO, 2018).

O cenário de risco considerado por aquele órgão foi relativo aos tanques de GLP que alimentam os queimadores.

Em 2019 o Ministério do Meio Ambiente publicou a Portaria Interministerial nº 274 (BRASIL, 2019) que disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos. Utiliza a mesma definição genérica de URE estabelecida na SMA-79.

As legislações acima discutidas referem-se todas a processos térmicos com temperaturas acima de 850°C, o que indica que embora busquem regulamentar plantas de Tratamento Térmico ou de Usinas e Recuperação Energética em geral, na verdade foram pensadas para processos de incineração. A SMA-79 chega utilizar o termo “combustão” para definir o que é uma URE. São parâmetros que não fazem parte conceito de pirólise, cujo processo proporciona riscos diferentes da incineração.

O caso da Usina de Pirólise de Bento Gonçalves é um exemplo de como a falta de uma norma específica pode permitir a implantação de atividades perigosas sem a avaliação de risco adequada. Não fosse irregularidades apontadas pelo TCE e no georreferenciamento, uma Usina poderia estar em funcionamento naquele município neste exato momento, sob riscos desconhecidos para os trabalhadores e o público próximo.

5.3 Percepção de riscos

5.3.1 Resultados da amostragem

O **Quadro 7** e o **Quadro 8** mostram os municípios de São Paulo e Rio de Janeiro que foram consultados para esta pesquisa. Em verde estão destacados os municípios em que houve resposta ao questionário em amarelo estão destacados os municípios que não se forneceu quaisquer respostas e em vermelho os municípios em que os servidores se recusaram a responder.

Quadro 7 - Municípios de São Paulo incluídos na pesquisa

Município	Região	Data do pedido	Observações
Arujá	RMSP	indisponível	Site https://eouve.com.br/#/sic não carrega
Barueri	RMSP	08/04/2023	
Biritiba Mirim	RMSP	09/04/2023	
Caieiras	RMSP	09/04/2023	
Cajamar	RMSP	08/04/2023	Ouvidoria orientou a contatar sec. MA
Carapicuíba	RMSP	10/04/2023	
Cotia	RMSP	08/04/2023	
Diadema	RMSP	09/04/2023	
Embu das Artes	RMSP	08/04/2023	
Embu-Guaçu	RMSP	10/04/2023	Caixa de e-mail cheia
Ferraz de Vasconcelos	RMSP	10/04/2023	
Francisco Morato	RMSP	10/04/2023	
Franco da Rocha	RMSP	10/04/2023	Canal indisponível
Guararema	RMSP	08/04/2023	
Guarulhos	RMSP	17/03/2023	
Itapecerica da Serra	RMSP	09/04/2023	
Itapevi	RMSP	08/04/2023	
Itaquaquecetuba	RMSP	10/04/2023	Ouvidoria orientou a contatar sec. MA
Jandira	RMSP	09/04/2023	
Juquitiba	RMSP	10/04/2023	
Mairiporã	RMSP	10/04/2023	
Mauá	RMSP	09/04/2023	
Mogi das Cruzes	RMSP	09/04/2023	Ouvidoria orientou a contatar sec. MA
Osasco	RMSP	08/04/2023	
Peruíbe	Litoral Central		
Pirapora do Bom Jesus	RMSP	09/04/2023	Ouvidoria orientou a contatar sec. MA
Poá	RMSP		

Município	Região	Data do pedido	Observações
Praia Grande	Litoral Central	23/03/2023	
Ribeirão Pires	RMSP	09/04/2023	
Rio Grande da Serra	RMSP	10/04/2023	
S. Bernardo do Campo	RMSP	23/03/2023	
Salesópolis	RMSP	10/04/2023	
Santa Isabel	RMSP	09/04/2023	Canal indisponível
Santana de Parnaíba	RMSP	08/04/2023	Somente via prot. físico p/ SPMA
Santo André	RMSP	23/03/2023	
Santos	Litoral Central		
São Caetano do Sul	RMSP	23/03/2023	
São Lourenço da Serra	RMSP	10/04/2023	Canal indisponível
São Paulo	RMSP	08/04/2023	
Suzano	RMSP	09/04/2023	
Taboão da Serra	RMSP	09/04/2023	Canal indisponível
Vargem Gde. Paulista	RMSP	08/04/2023	Resposta recusada

Quadro 8 - Municípios de Rio de Janeiro incluídos na pesquisa

Município	Região	Data do pedido	Observações
Maricá	RMRJ	07/04/2023	Não loga no e-sic (07/04/2023)
Niterói	RMRJ		
Itaguaí	RMRJ	07/04/2023	
Seropédica	RMRJ	07/04/2023	
Duque de Caxias	RMRJ		
Rio de Janeiro	RMRJ		
Queimados	RMRJ	07/04/2023	O site não encaminha a mensagem (07/04/2023)
Itaboraí	RMRJ	23/03/2023	
Nova Iguaçu	RMRJ	23/03/2023	
São João de Meriti	RMRJ	07/04/2023	
Guapimirim	RMRJ	07/04/2023	
Paracambi	RMRJ	07/04/2023	
Nilópolis	RMRJ	07/04/2023	
Magé	RMRJ	23/03/2023	
Tanguá	RMRJ	07/04/2023	e-Sic não funciona (07/04/2023)
São Gonçalo	RMRJ	23/03/2023	
Belford Roxo	RMRJ	07/04/2023	
Mesquita	RMRJ		
Japeri	RMRJ	07/04/2023	

Como pode ser observado nos quadros acima, dos 61 municípios para os quais foram enviados os questionários, 16, destacadas em verde, responderam às perguntas até a conclusão deste trabalho.

Do total, as ouvidorias de 10 municípios - destacados em vermelho nas tabelas a seguir – ou estão com os canais inoperantes ou se recusaram sumariamente a responder, alegando que “...o *questionário acadêmico não é pedido de informação...*”.

Outras duas ouvidorias, destacadas em amarelo, não responderam, mas reencaminharam os pedidos para as secretarias adequadas ou indicaram contatos por *e-mail* ou telefone. Outras 35 secretarias – também destacadas em amarelo - não deram retorno.

Em cinco casos os servidores que demonstraram apoio e interesse depois do contato telefônico, acabaram não respondendo provavelmente por esquecimento.

Observando os quadros acima percebe-se que o método adotado para abordar os respondentes proporcionou um retorno de 26% dos municípios considerados. Uma quantidade significativa de municípios não foi capaz de atender à solicitação no tempo exigido pela Lei de acesso à Informação (LAI).

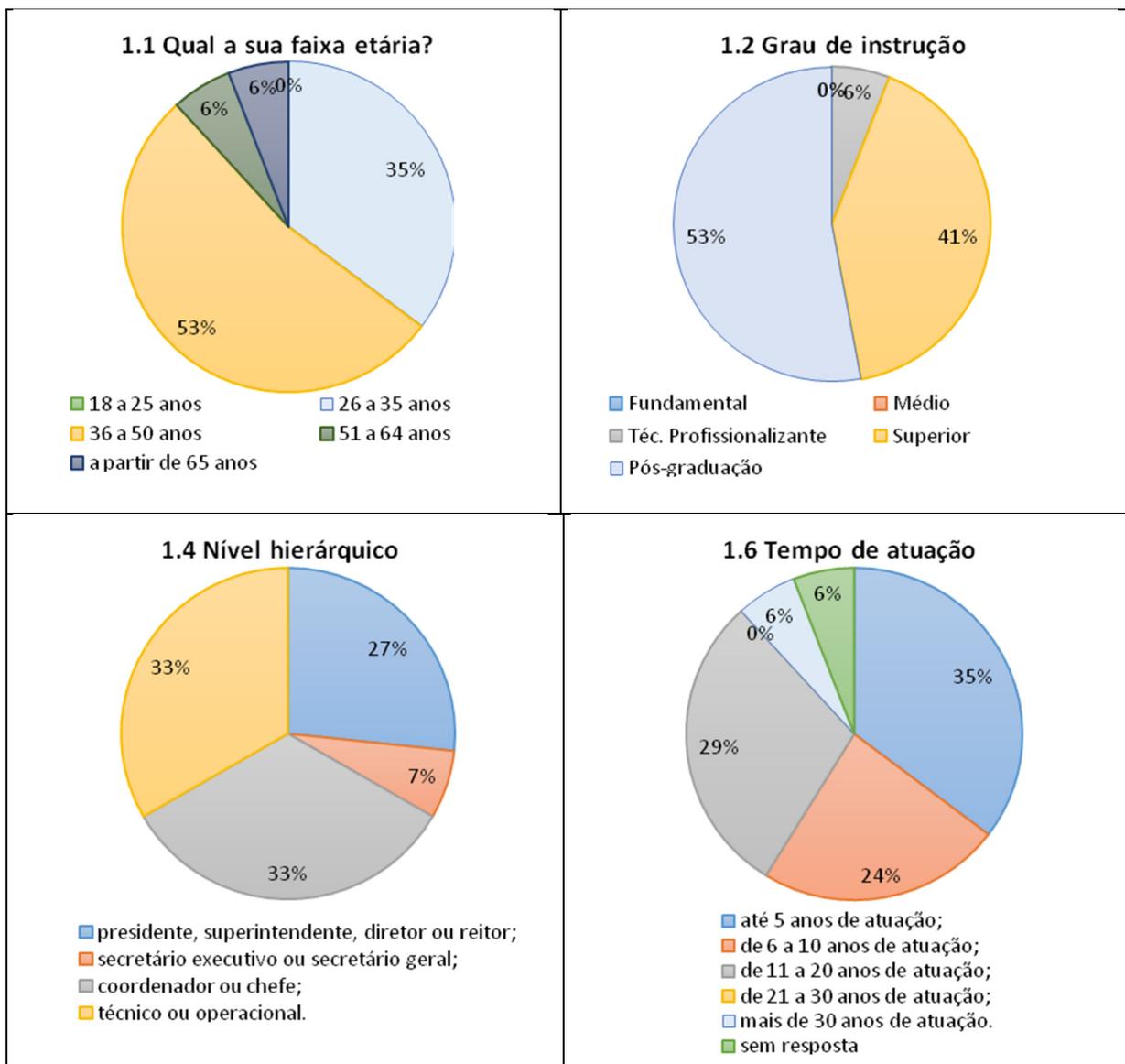
O que se observou é que as páginas de *internet* disponibilizadas pelas prefeituras não seguem um padrão. Há casos em que os respectivos canais e-Sic aparecem na primeira página, e outros são acessados somente a partir de *links* chamados “portais do cidadão, ou *links* chamados “portal de transparência”, ou *links* “leis de acesso”. Outros somente disponibilizam os canais das respectivas ouvidorias. Essa falta de padronização torna o processo de protocolização de solicitações demorado.

O fluxo de documentos também não é o mesmo para diferentes prefeituras. Em alguns casos é possível selecionar durante a protocolização a secretaria de interesse. Em outros mesmo quando se seleciona uma secretaria específica, o recebimento dos pedidos é centralizado nas ouvidorias.

Há também o fato de que algumas ouvidorias interpretam a LAI de forma a desconsiderar formulários de pesquisa acadêmica como sendo pedido de informação.

5.3.2 Perfil dos respondentes

O perfil dos respondentes é mostrado nas figuras a seguir:



Como pode ser observado a maior parte dos entrevistados apresenta uma faixa etária majoritariamente pertencente à faixa entre 36 e 50 anos, seguida da faixa de 26 a 35 anos de idade. Quanto ao tempo de atuação, a maior parte até 20 anos de atuação. Metade tem pós-graduação e 42% têm nível superior. Quanto ao cargo, metade dos respondentes têm pelo menos o cargo de chefe 30% cargo operacional e 20% tem o cargo de diretor, pelo menos. Os profissionais com ensino médio têm seu currículo associado a um curso técnico profissionalizante não havendo servidores com ensino médio regular.

5.3.3 Conhecimento sobre tecnologias de tratamento térmico

Foi perguntado se os respondentes conhecem sobre tecnologia de pirólise ou, pelo menos, as demais tecnologias de tratamento térmico. Os resultados são mostrados no **Gráfico 7** e no **Gráfico 8**:

Gráfico 7 – Conhecimento sobre UREs

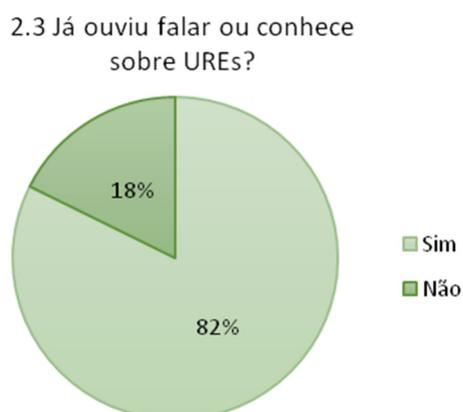
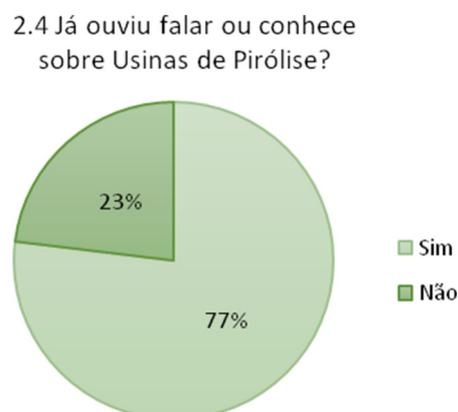
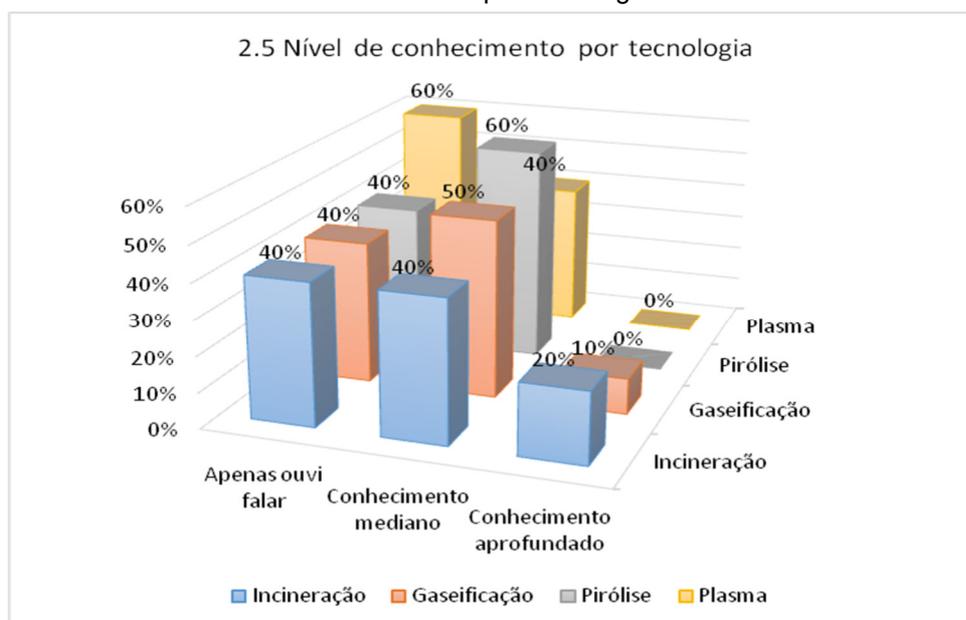


Gráfico 8 - Conhecimento sobre pirólise



Como pode ser observado, mais de 80% dos respondentes têm algum nível de conhecimento sobre usinas de recuperação energética e desses 77% tem algum conhecimento sobre pirólise, especificamente, ou seja apenas 63% dos respondentes conhecem sobre a tecnologia de pirólise.

Gráfico 9 - Nível de conhecimento por tecnologia de tratamento térmico



Como pode ser visto no **Gráfico 9** os respondentes têm um conhecimento no máximo mediano sobre pirólise, diferente do que acontece com as tecnologias de incineração e gaseificação. Considerando os resultados observados no Gráfico 8 apenas 31,5% dos respondentes teriam um conhecimento no máximo mediano sobre pirólise. Parte dessa discrepância pode ser explicada pelo fato de não existirem ainda no país plantas de pirólise em operação para fins de tratamento de RSUs. Para a incineração e gaseificação há exemplos de plantas em funcionamento que demandaram estudos para seus licenciamentos.

5.3.4 Sentimentos de oposição e aceitação das tecnologias de UREs

Os sentimentos de oposição para a tecnologia de pirólise e para as demais UREs são mostrados na **Gráfico 10** e na **Gráfico 11**:

Gráfico 10 - Sentimentos de oposição às usinas de pirólise

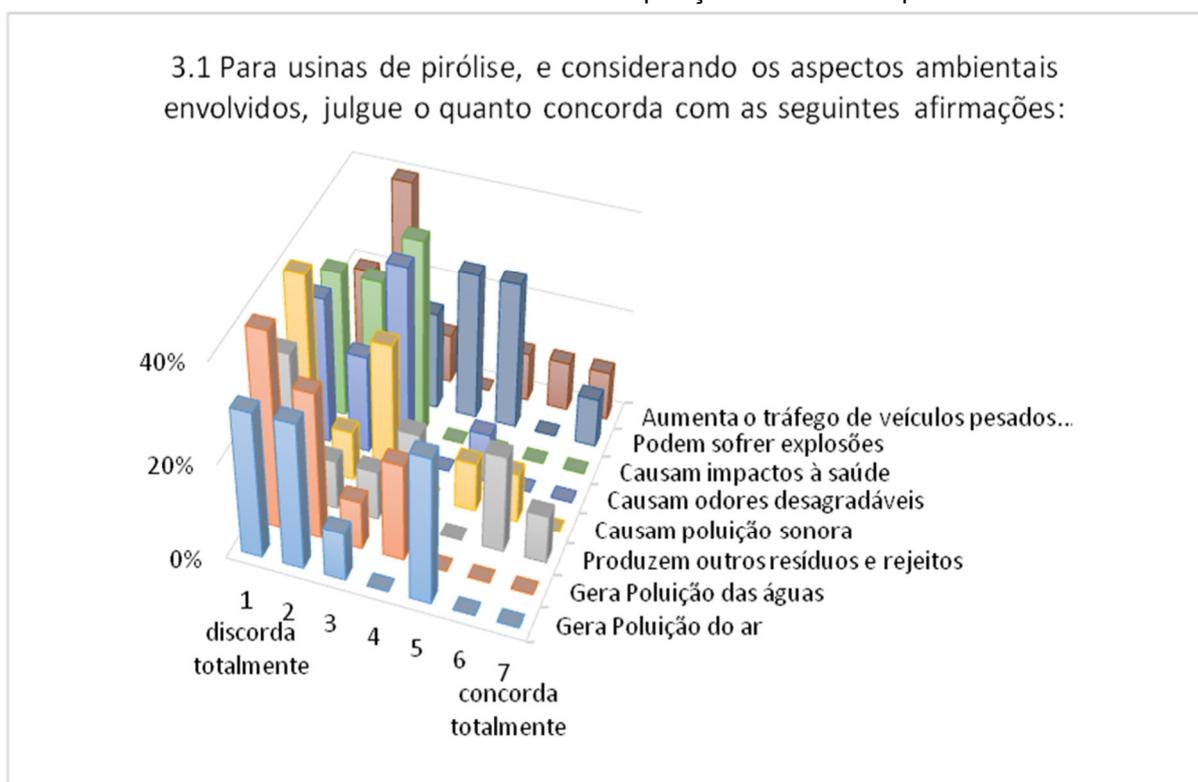
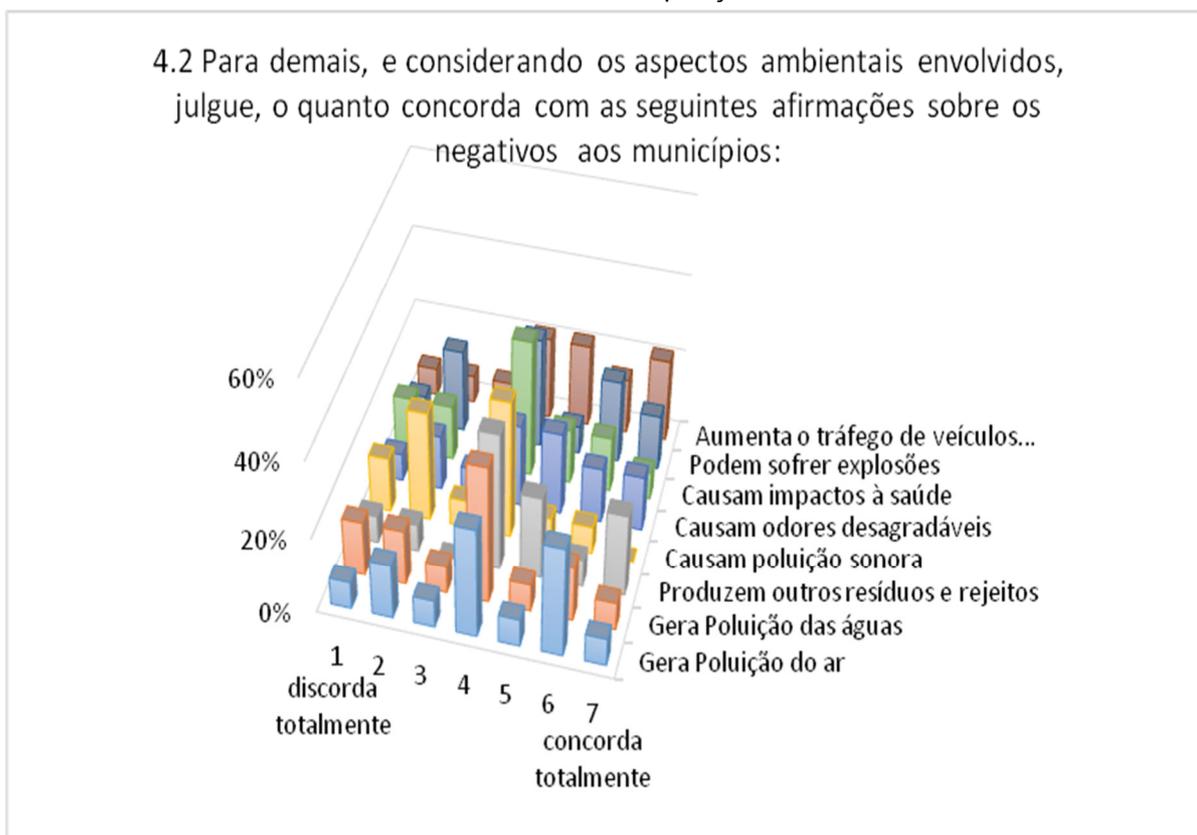


Gráfico 11 - Sentimentos de oposição às demais UREs



Como pode ser observado no Gráfico 10 e no Gráfico 11 há uma tendência de que no caso da tecnologia de pirólise os respondentes a concordem menos com as possibilidades impactos ambientais. Já quando se trata das demais UREs os respondentes tendem a dar mais importância aos impactos ambientais. Pessoas com sentimento de oposição menor tendem a perceber menos os riscos do objeto avaliado.

Os sentimentos que os respondentes têm em relação à aceitação das tecnologias de UREs, do ponto de vista pessoal, são mostrados na **Figura 12** e **Figura 13**.

Figura 12 - Sentimentos de benefícios individuais da pirólise

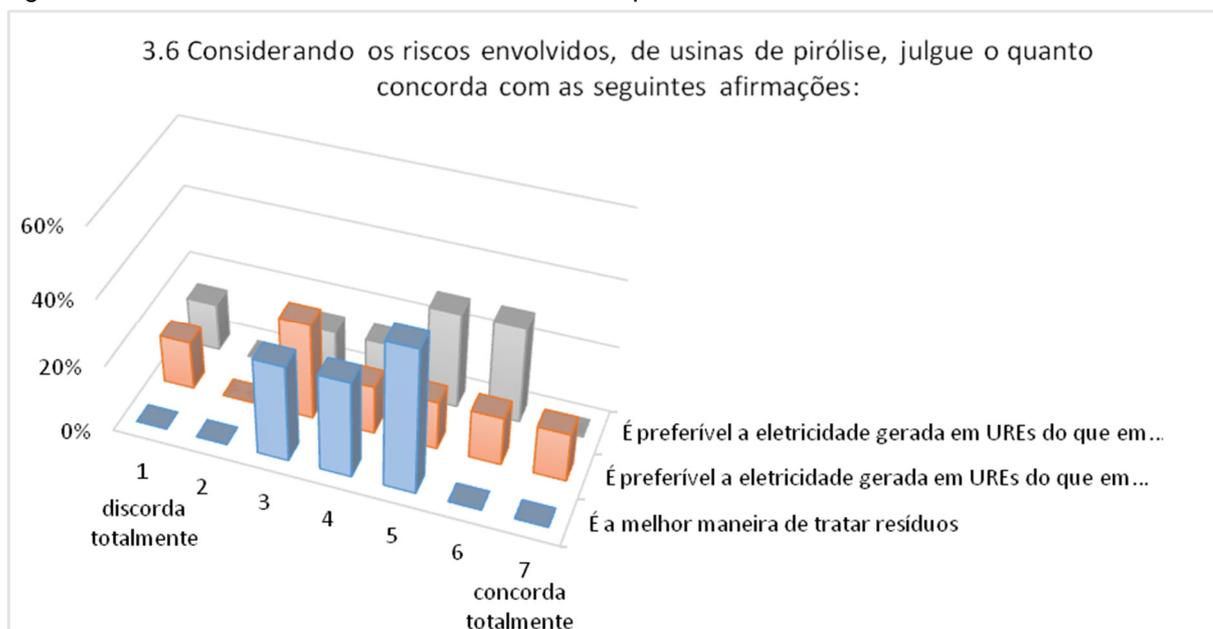
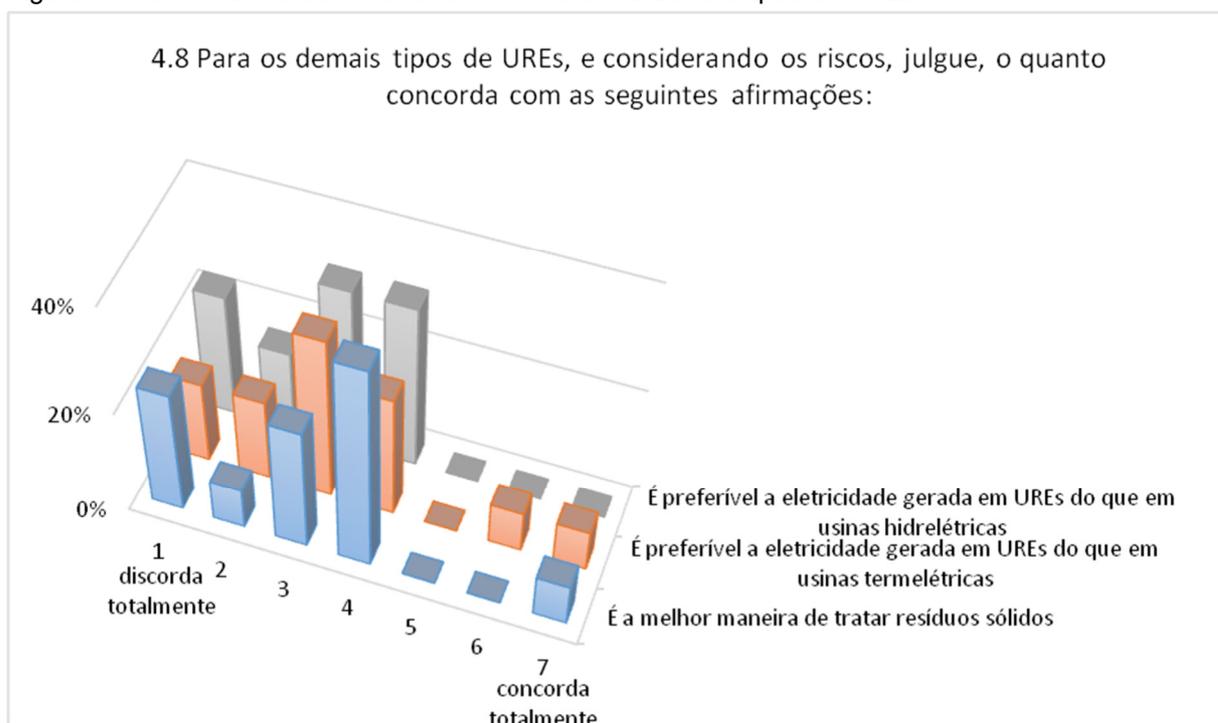


Figura 13 - Sentimentos de benefícios individuais dos demais tipos de UREs



Comparando as figuras acima percebe-se uma tendência de os respondentes enxergarem a tecnologia de pirólise como mais benéfica do que as demais UREs.

Figura 14 - Sentimentos de benefícios aos municípios da pirólise

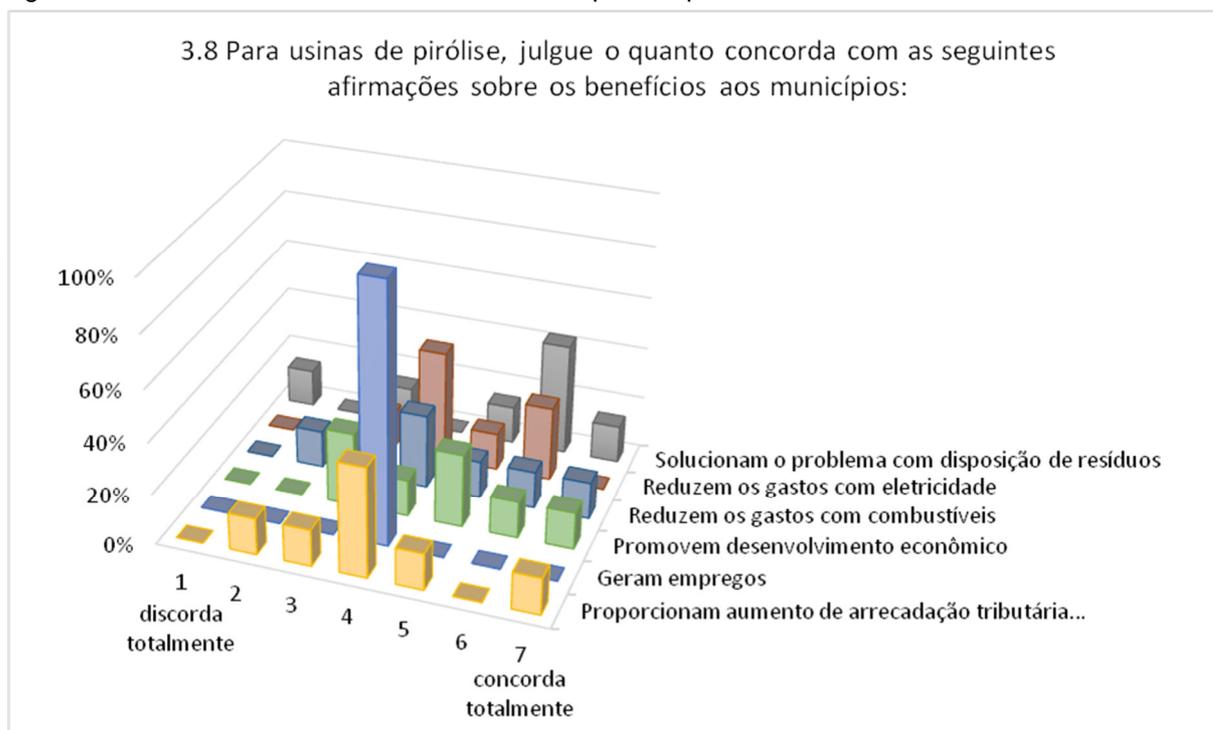
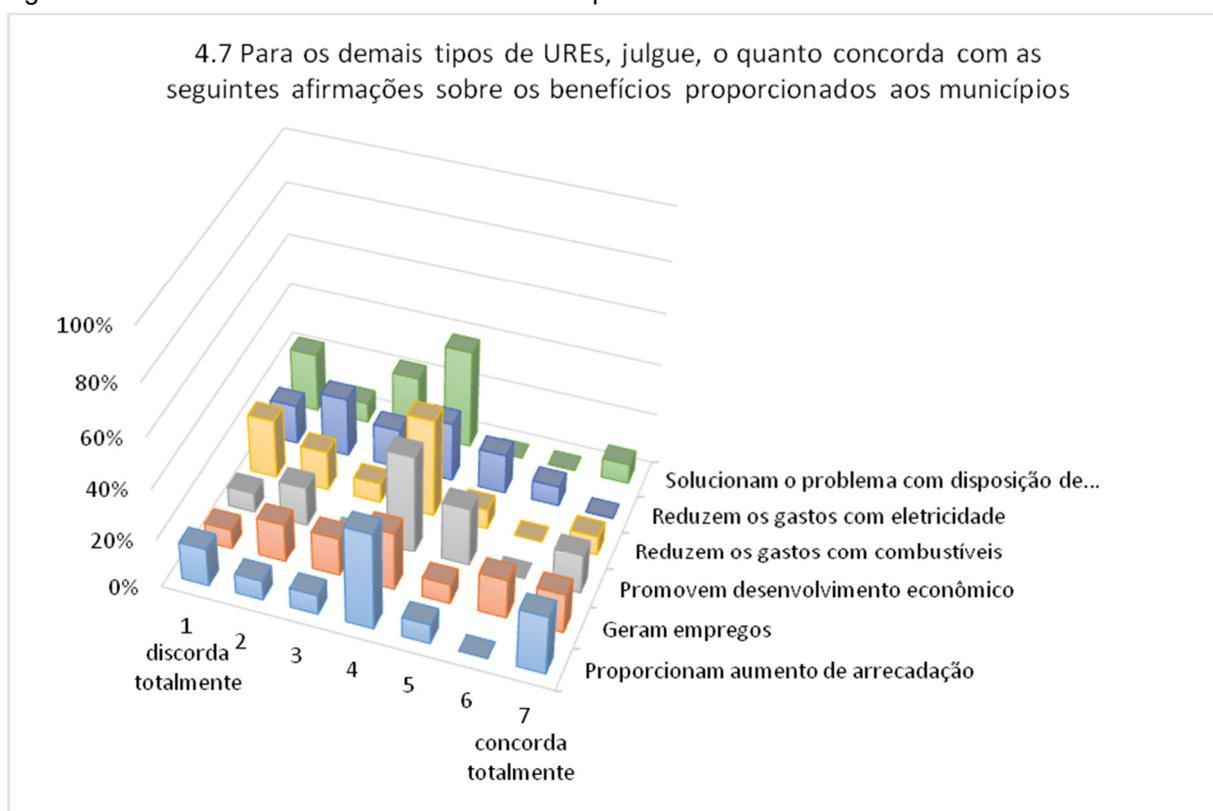


Figura 15 - Sentimentos de benefícios aos municípios de UREs



Comparando as figuras acima percebe-se uma tendência de os respondentes enxergarem a tecnologia de pirólise como mais benéfica para os municípios do que

as demais UREs. Pessoas que percebem mais os benefícios de um objeto avaliado tendem a perceber menos os riscos do mesmo.

Analisando as figuras anteriores em conjunto parece haver uma tendência dos respondentes a levar em consideração mais os pontos positivos e menos os pontos negativos para usinas de pirólise quando se compara as opiniões sobre as demais UREs. Contudo, deve ser lembrado, como já havia sido discutido na seção 0, uma amostragem com poder de pelo menos 0,8 seria necessário um tamanho de amostra de, pelo menos, 35 municípios respondentes. Como apenas 16 responderam essa amostra não permite afirmar com um grau mínimo de certeza que haja diferença entre as respostas.

As respostas para as perguntas abertas são mostradas a seguir:

Quadro 9 - Cargos dos respondentes

1.5 Qual é o seu cargo? (opcional)		
Município	Região	Resposta
Duque de Caxias	RMRJ	-
Mesquita	RMRJ	Coordenador de Educação para Resíduos
Niterói	RMRJ	Chefe de Serviço - Eng. Ambiental e Sanitária
Nova Iguaçu	RMRJ	Diretor Técnico
Rio de Janeiro	RMRJ	Engenheiro especialista
Peruíbe	Litoral Central	-
Santos	Litoral Central	Inspetor Ambiental
Cajamar	RMSP	Secr. Ajunto de M.A.
Guararema	RMSP	-
Itapevi	RMSP	professora
Itaquaquecetuba	RMSP	Diretor de Departamento de defesa do Meio Ambiente
Mauá	RMSP	Auxiliar Técnico - Resíduos Sólidos
Mogi das Cruzes	RMSP	Diretora de limpeza pública
Poá	RMSP	Chefe de Divisão
Ribeirão Pires	RMSP	Analista de Planejamento e Meio Ambiente
Salesópolis	RMSP	Diretor de Meio Ambiente
Jundiaí	Interior de SP	Agente de Fiscalização de Posturas Municipais

Quadro 10 - Tecnologias de preferência

2.1 Na sua opinião, qual(ais) tecnologia(s) tratamento de resíduos sólidos deveria(m) ser mais pesquisada(s) nas faculdades/centros de estudos?

Município	Região	Resposta
Duque de Caxias	RMRJ	Reversa [logística]
Mesquita	RMRJ	Reciclagem de RCC
Niterói	RMRJ	Tratamento da matéria orgânica através da tecnologia de biodigestão
Nova Iguaçu	RMRJ	Incineração
Rio de Janeiro	RMRJ	-
Peruíbe	Litoral Central	Usinas de reciclagem geral e construção civil
Santos	Litoral Central	Combustão com recuperação de energia, Pirólise
Cajamar	RMSP	Disposição final
Guararema	RMSP	Compostagem
Itapevi	RMSP	Tecnologia de incineração.
Itaquaquecetuba	RMSP	Unidade de Recuperação Energética
Mauá	RMSP	Sim, com certeza.
Mogi das Cruzes	RMSP	opções com baixo impacto e geração de resíduos poluentes.
Poá	RMSP	Reciclagem e Compostagem
Ribeirão Pires	RMSP	Incineração sem a utilização de recicláveis
Salesópolis	RMSP	A geração de energia através dos resíduos sólidos,
Jundiaí	Interior de SP	Recuperação energética

Observando as respostas acima tem-se que dos 14 respondentes, 7 apontam os tratamentos térmicos merecem ser mais estudados. As tecnologias de reciclagem e compostagem são apontadas como preferência de dois respondentes cada uma.

Quadro 11 - Aspectos considerados mais relevantes

2.2 Que aspectos você considerou mais importantes para fazer a indicação na resposta acima?			
Município	Região	Resposta	
Duque de Caxias	RMRJ	Falta de empresas para esse serviço	Econômicos
Mesquita	RMRJ	Os custos que a municipalidade tem com a disposição final do RCC além da potencialmente nocivo ao meio ambiente impulsionando as enchentes em toda a cidade.	Econômicos
Niterói	RMRJ	A solução do tratamento da matéria orgânica para findar a destinação em aterros sanitários	Volume de resíduos
Nova Iguaçu	RMRJ	Redução na densidade do Resíduo/Aproveitamento Energético e subproduto como matéria Prima.	Volume de resíduos
Rio de Janeiro	RMRJ	O potencial de aplicação em cidades de pequeno e médio porte.	Econômico
Peruíbe	Litoral Central	volume e destinação correta	Volume de resíduos
Santos	Litoral Central	Produzir eletricidade; recuperação energética. Completamente estéril, destrói compostos orgânicos incluindo resíduos perigosos. Resultante de saída: cinzas estéreis. Degradação térmica na ausência de ar ou outro agente oxidante, reduzir resíduos convertendo em combustíveis líquidos.	Energia limpa
Cajamar	RMSP	Otimização de áreas de aterro	Volume de resíduos
Guararema	RMSP	Pois é uma demanda já existente na gestão pública dos municípios e uma alternativa viável financeiramente.	Econômicos
Itapevi	RMSP	o grande volume de resíduos sólidos gerados pela sociedade	Volume de resíduos
Itaquaquecetuba	RMSP	Os aproveitamentos dos potenciais energéticos dos resíduos.	Energia limpa
Mauá	RMSP	A questão ambiental tem sido um tema de muitas discussões ao longo dos últimos anos devido à preocupação com a conservação dos recursos naturais e com a degradação provocada pelo ser humano ao meio ambiente. E um dos aspectos que mais tem chamado a atenção é a elevada geração de resíduos. Por isso é importantíssimo essa discussão até para formar profissionais e soluções para o futuro, pensando em preservar e reduzir e tratar de maneira adequada os resíduos sólidos urbanos de maneira geral.	Volume de resíduos
Mogi das Cruzes	RMSP	tendo em vista a grande quantidade de lixo e o aumento populacional e de produção de lixo.	Volume de resíduos
Poá	RMSP	Reutilização dos Resíduos	Volume de resíduos
Ribeirão Pires	RMSP	Restam dúvidas quanto aos tipos de resíduos devem ser incinerados	Energia limpa
Salesópolis	RMSP	cheiro e por ser auto limpável.	Energia limpa
Jundiaí	Interior de SP	Menor impacto ambiental	Energia limpa

Observando as respostas acima a preocupação com volume de resíduos gerados é a mais frequente. A possibilidade de obter energia limpa é o segundo aspecto mais frequente. Os aspectos econômicos são os menos levados em consideração nesse universo.

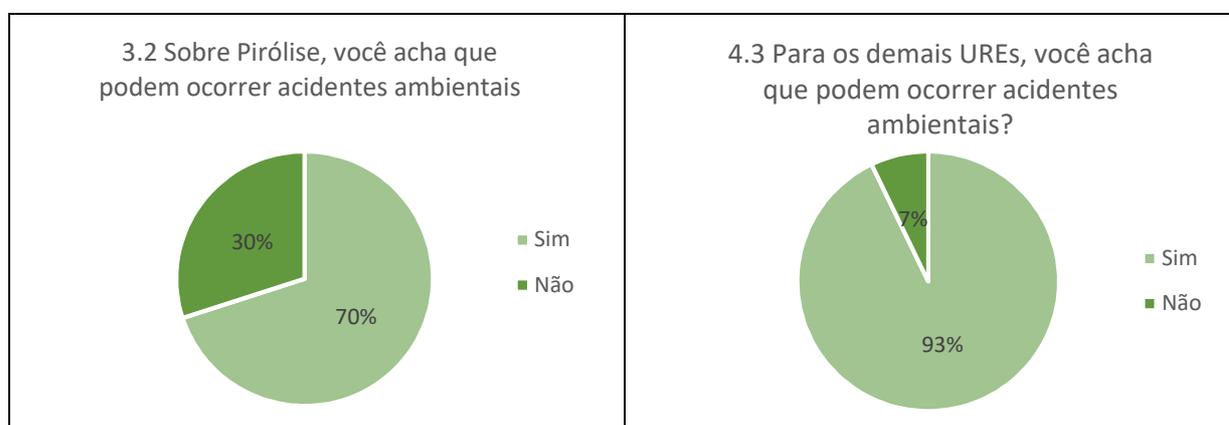
Quadro 12 - Conhecimento sobre outras tecnologias

2.6 Você conhece alguma outra tecnologia de recuperação energética? Qual?		
Município	Região	Resposta
Duque de Caxias	RMRJ	-
Mesquita	RMRJ	Não
Niterói	RMRJ	Sim. Biodigestão.
Nova Iguaçu	RMRJ	Não
Rio de Janeiro	RMRJ	Biometanização; aproveitamento de biogás de aterros sanitários
Peruíbe	Litoral Central	Coprocessamento em fornos de clínquer.
Santos	Litoral Central	Não
Cajamar	RMSP	Não
Guararema	RMSP	-
Itapevi	RMSP	Usina termoeétrica movida à biogás de aterro sanitário.
Itaquaquecetuba	RMSP	Não
Mauá	RMSP	-
Mogi das Cruzes	RMSP	-
Poá	RMSP	-
Ribeirão Pires	RMSP	-
Salesópolis	RMSP	Não conheço
Jundiaí	Interior de SP	Não

Observando as respostas acima percebe-se que não se identifica uma preferência para o grupo respondente.

5.3.5 Percepção de probabilidade e gravidade de acidentes

As expectativas quanto à possibilidade de ocorrência de acidentes são mostradas a seguir:



Como pode ser observado nas figuras acima a noção de que as todos os tipos de UREs podem causar acidentes ambientais, embora quando se trate de pirólise haja uma pequena parcela que não pense da mesma forma.

As percepções de probabilidades de acidentes são mostradas na **Figura 16** e na **Figura 17**:

Figura 16 - Percepção de probabilidades de acidentes em Usinas de Pirólise

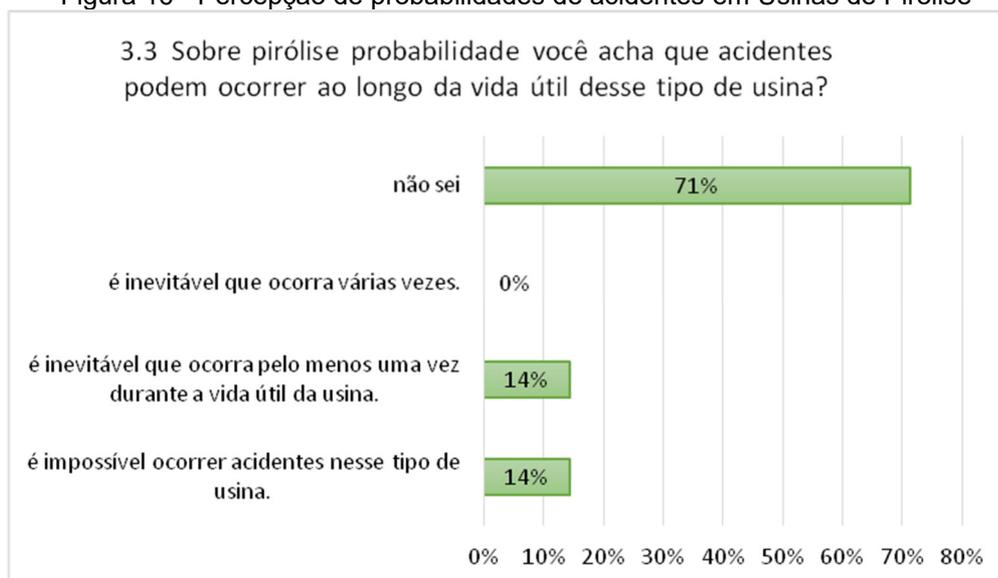
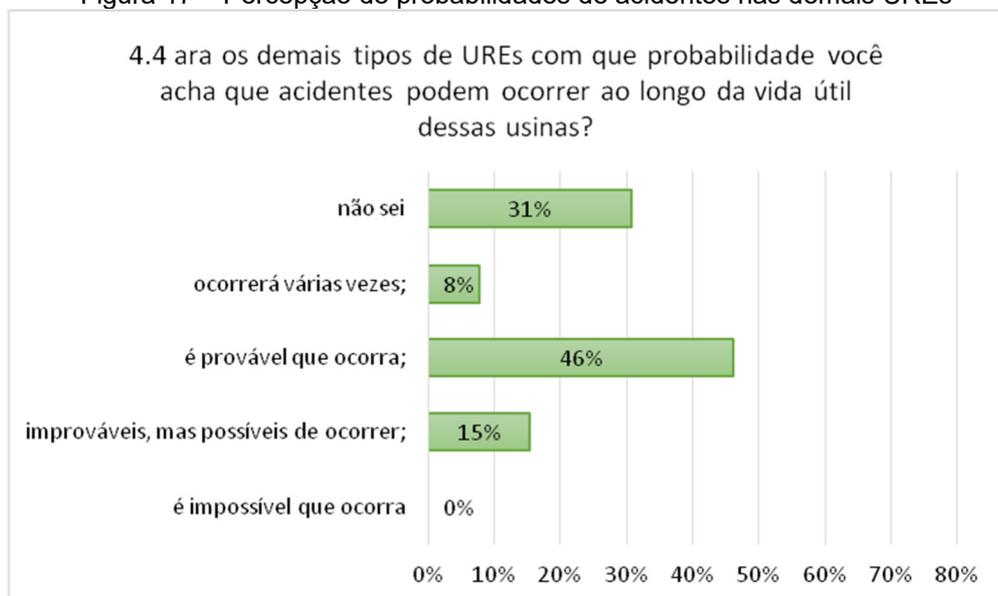


Figura 17 – Percepção de probabilidades de acidentes nas demais UREs



Antes de iniciar a discussão desta seção cabe observar que no questionário houve um erro material resultou em categorizações de probabilidade diferentes para

as perguntas 3.3 e 4.4. Mas isso não impede a comparação entre as respostas das duas perguntas e nem altera a conclusão.

Os respondentes tendem a uma percepção de probabilidade menor para usinas de pirólise do que para as demais UREs. Essa diferença pode ser explicada pelo fato de não haver ainda usinas de pirólise implantadas no país para fins de tratamento de RSUs. Também o fato de 70% dos respondentes não saberem dar uma opinião sobre esse assunto prejudica conclusões sobre esse aspecto.

As expectativas de gravidades de acidentes são mostradas na **Figura 18** e na **Figura 19**:

Figura 18 - Percepção de gravidade de acidentes para usinas de pirólise

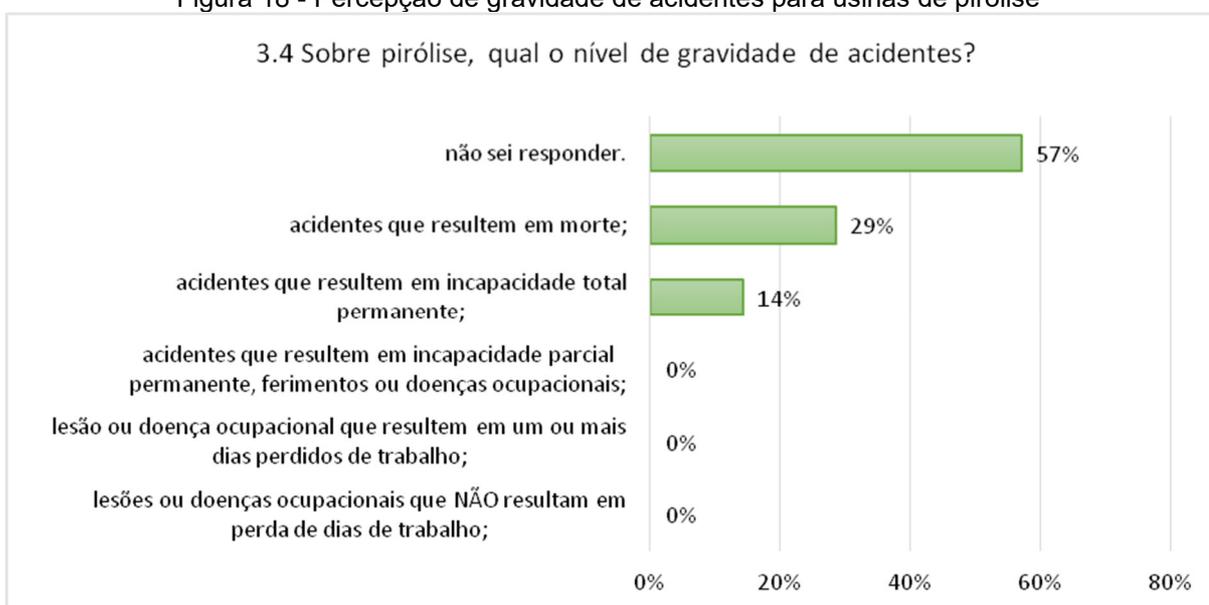
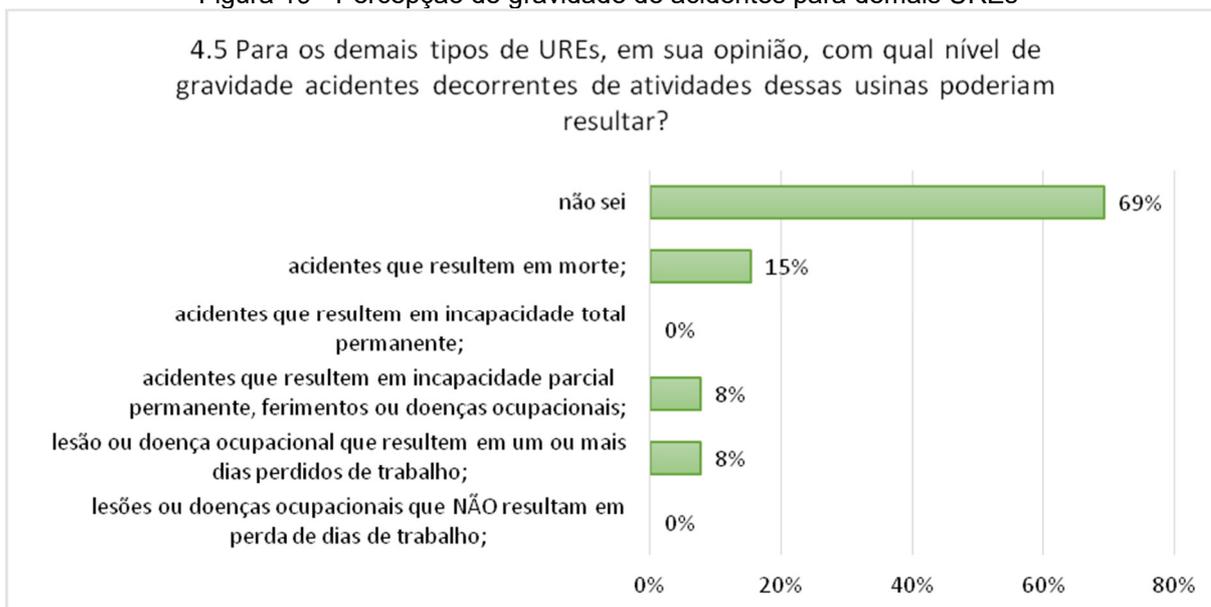


Figura 19 - Percepção de gravidade de acidentes para demais UREs



Observando as figuras acima, os respondentes tendem a ter uma percepção de gravidade dos acidentes em usinas de pirólise maior do que para os demais tipos de UREs.

As expectativas de gravidades de acidentes ambientais são mostradas na **Figura 20** e na **Figura 21**:

Figura 20 - Percepção de gravidade de acidentes ambientais para usinas de pirólise

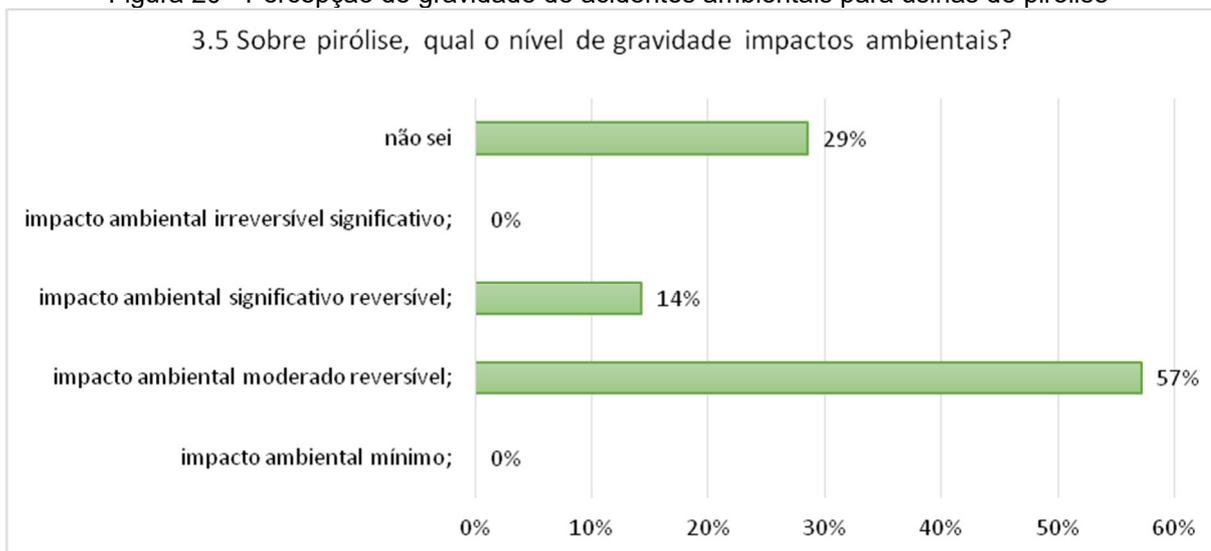
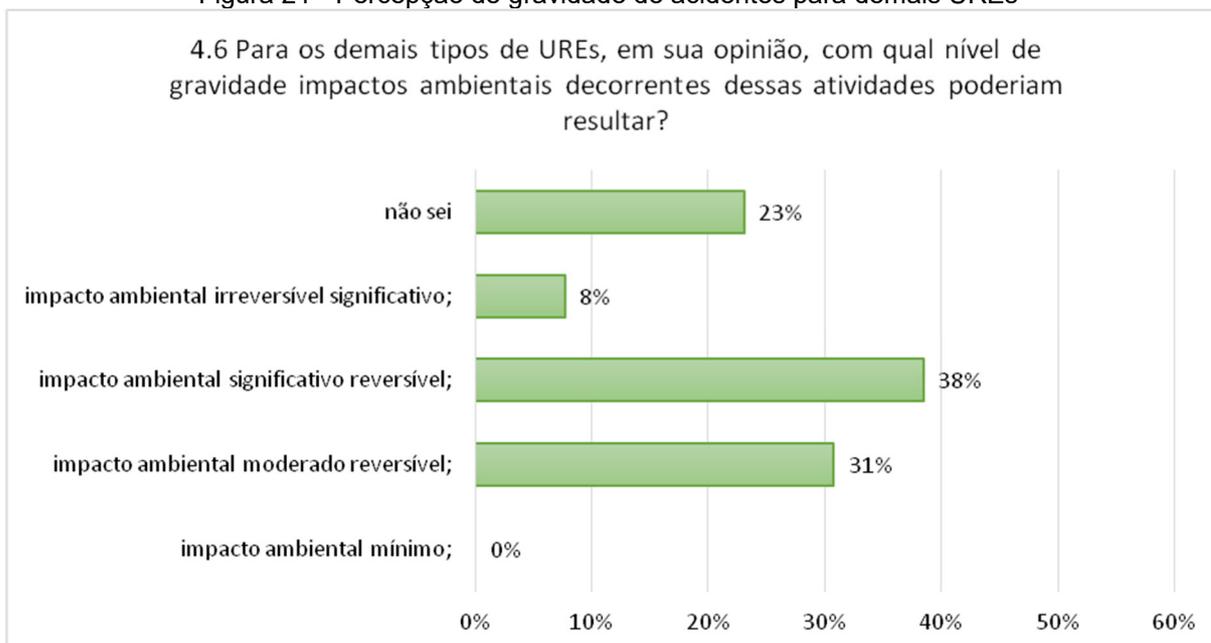


Figura 21 - Percepção de gravidade de acidentes para demais UREs



Quando se trata da gravidade de impactos ambientais os respondentes tendem a ter uma percepção que as usinas de pirólise ocasionariam impacto menor do que as demais UREs.

Embora o tamanho da amostra não permita confirmar uma diferenciação com um grau de confiança adequado, as tendências de percepções de probabilidade e gravidade estariam condizentes com os comparativos de aceitação e oposição mostrados anteriormente. Segundo Schimidt (2004) os riscos percebidos como tendo benefícios claros são mais aceitos do que os riscos percebidos como tendo pouco ou nenhum benefício.

Além disso, outro fator que pode explicar essa tendência é o fato de que em algumas prefeituras os profissionais nas secretarias de meio ambiente já passaram pela experiência em licenciar plantas de incineração e gaseificação. Avaliação de risco da usina de pirólise

5.3.6 Planilha ETBA

O **Quadro 13** mostra a planilha ETBA elaborada correspondentes aos setores identificados como A, B, C e D na **Figura 11**.

Quadro 13 - Planilha ETBA

Setor: Recebimento e forno rotativo			
Fonte de Energia	Descrição do Perigo	Alvos Potenciais	Barreiras
1. Química	1.1-Mistura de gases inflamáveis	1.1.1-Pessoas; 1.1.2-Prédios; 1.1.3-Equipamentos	-Integridade das paredes do forno e tubulações; -Ausência de oxigênio; -Purga com N ₂ ; -Pressão interna positiva; -Distanciamento; -Edificações à volta; -Rotas de fuga; -Paredes do Galpão; -Vedações; -Ventilação
	1.2-Mistura de gases tóxicos	1.2.1-Pessoas; 1.2.2-Fauna;	-Paredes do forno; -Distanciamento; -Ventos; -Rotas de fuga; -Paredes do Galpão -Ventilação -Refratários da fornalha;
	1.3-Gás Reciclado	1.3.1-Pessoas; 1.3.2-Fauna;	-Distanciamento; -Ventos; -Rotas de fuga; -Paredes do Galpão -Ventilação
2. Pressão	2.1-Gases sob alta temperatura	2.1.1-Pessoas; 2.1.2-Prédios; 2.1.3-Equipamentos	-Paredes do forno; -Distanciamento; -Edificações; -Rotas de fuga; -Paredes do galpão -Válvulas PSV
3. Cinética	3.1-Tambor em rotação	3.1.1-Pessoas;	-Carenagem no motor de acionamento -Distanciamento
	3.2-Veículos terrestres	3.2.1-Pessoas; 3.2.2-Prédios; 3.2.3-Forno	-Limite de velocidade baixo; -Atenção; -Ruído dos motores; -Rotas de fuga
	3.3-Aeronaves	3.3.1-Pessoas; 3.3.2-Prédios; 3.3.3-Forno	-Baixa probabilidade
4. Potencial	4.1-Telhado;	4.1.1-Pessoas; 4.1.2-Prédios; 4.1.3-Forno	-Inspeção; -Manutenção -Baixa Frequência
	4.2-Luminárias;	4.2.1-Pessoas; 4.2.2-Prédios; 4.2.3-Forno	-Inspeção; -Manutenção
	4.3-Aeronaves;	4.3.1-Planta	-Baixa Frequência de sobrevoos -Segurança das aeronaves
	4.4-Eletrostática	4.4.1-Equipamentos	-Distância
	4.5-Torres de transmissão	4.5.1-Pessoas; 4.5.2-Prédios; 4.5.3-Forno	
5. Ruído	5.1-Forno rotativo	5.1.1-Pessoas	-Protetor auricular
		5.1.2-Fauna	-Distanciamento

Setor: Recebimento e forno rotativo			
Fonte de Energia	Descrição do Perigo	Alvos Potenciais	Barreiras
	5.2-Veículos	5.2.1-Pessoas 5.2.2-Fauna	-Protetor auricular -Distanciamento
6.Térmica	6.1-Forno 6.2-Linhas de exaustão 6.3-Linhas de retorno de água aquecida	6.1.1-Pessoas 6.1.2-Equipamentos 6.2.1-Pessoas 6.2.2-Equipamentos 6.3.1-Pessoas 6.3.2-Equipamentos	-Parede do forno -Camisa do forno -Distanciamento -Paredes das linhas -Distanciamento -Paredes das linhas -Distanciamento
7.Radiação	7.1-Chama do queimador	7.1.1-Pessoas	-Paredes de alvenaria -Distanciamento -Trajes
8.Elétrica	8.1-Painel elétrico 8.2-Cabos de alimentação 8.3-Lâmpadas, interruptores, equip. elétricos 8.4-Relâmpagos	8.1.1-Pessoas 8.1.2-Equipamentos 8.2.1-Pessoas 8.2.2-Equipamentos 8.3.1-Pessoas 8.3.2-Equipamentos 8.4.1-Pessoas 8.4.2-Equipamentos	-Isolamento, -Manutenção, -Procedimentos -Proteção contra explosão -Para-raios

Observando o **Quadro 13** pode-se classificar as energias que estão diretamente ligadas às substâncias geradas (energias diretas) pelo processo de pirólise que são a química, a pressão, a térmica e a radiação. Tratam-se de energias com maior potencial destrutivo, podendo causar danos para além dos limites do empreendimento e cujas ameaças demandam uma atenção especial, com cenários bem definidos.

Já as energias cinética, potencial e elétrica não têm relação direta com as substâncias geradas, a princípio potencial de destruição consideravelmente menor ameaçando vidas e bens dentro do empreendimento. Contudo, numa eventual falha das respectivas barreiras, poderiam prejudicar as barreiras que contêm as energias diretas mencionadas acima.

A energia referente ao ruído, por não proporcionar uma ameaça imediata, não foi tratada neste trabalho.

5.3.7 Resultados da pesquisa sobre dados climatológicos

A **Tabela 7** mostra as médias e amplitudes registradas por essa estação.

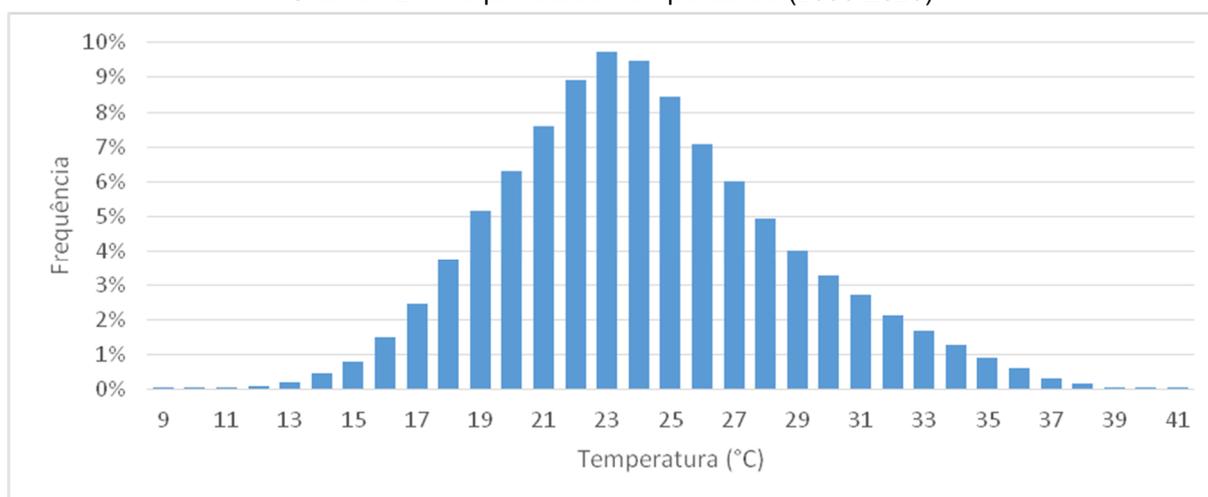
Tabela 7 - Dados climatológicos de Seropédica (2000-2020)

Parâmetro Estatístico	Temperatura do ar - bulbo seco, horária (°C)	Umidade relativa do ar, horária (%)	Vento, direção horária (° (gr))	Vento, velocidade horária (m/s)
Média Aritmética	23,7	77,9	187,8	2,0
Desvio Padrão	4,5	17,7	119,5	1,6
Coefficiente de Variação	19,1%	22,7%	63,6%	78,4%
Menor Valor	8,6	10,0	1,0	0,0
Maior Valor	41,3	100,0	360,0	13,7

Fonte: BRASIL, 2021

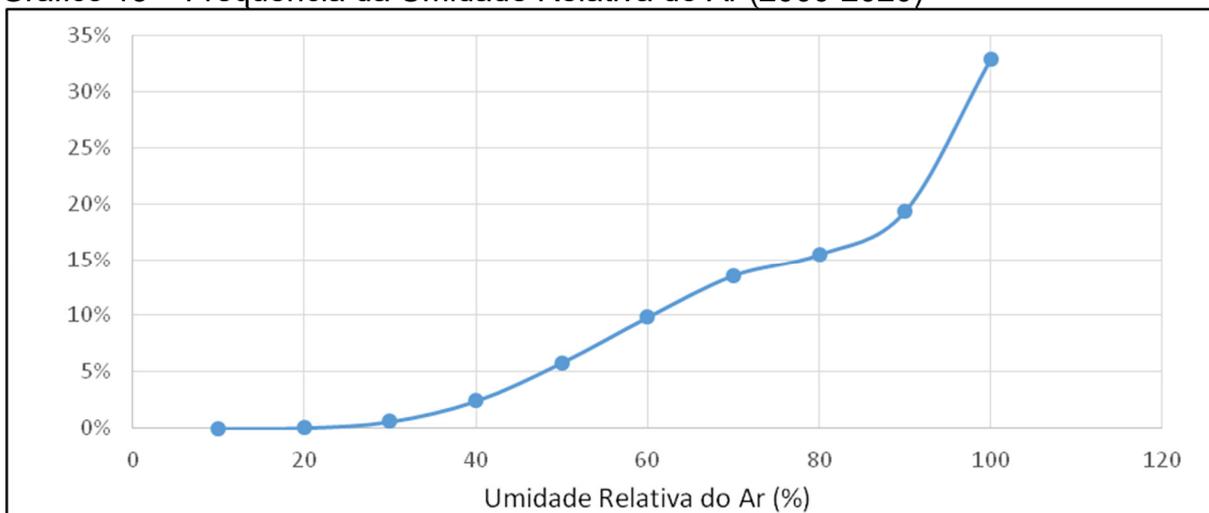
Observando novamente a **Tabela 7**, a temperatura média é de 23,7°C, com um CV de 19,1% e uma temperatura máxima de 41,3°C. Mas ao se observar a frequência percebe-se que as temperaturas mais frequentes variam de 21°C a 26°C (**Gráfico 12**).

Gráfico 12 - Frequência de Temperaturas (2000-2020)



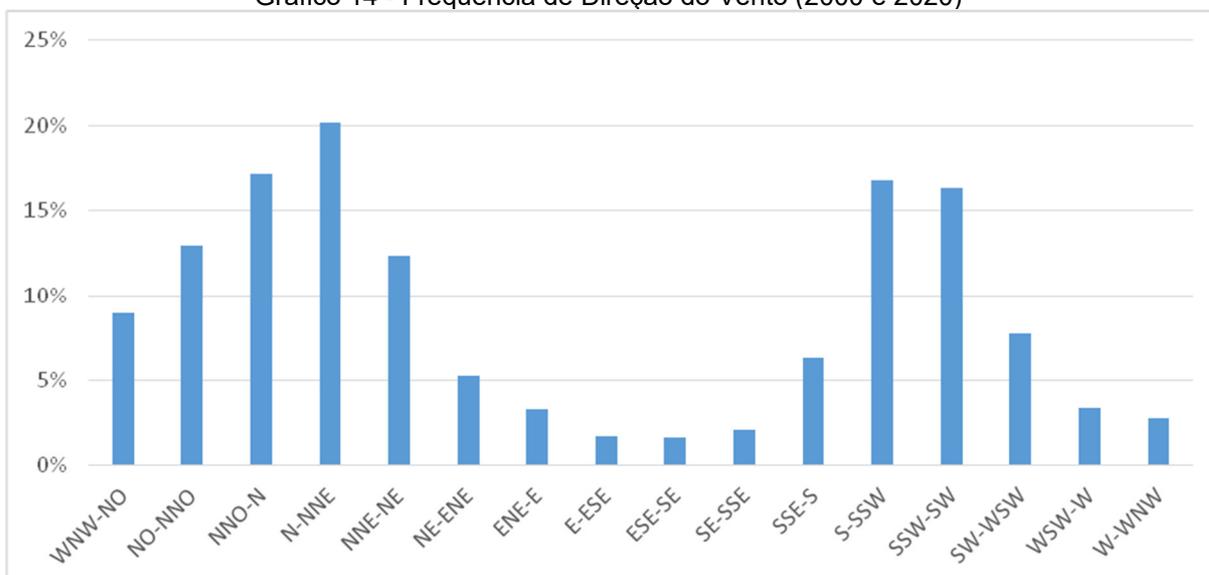
Observando ainda a **Tabela 7**, percebe-se que a umidade média é de 77,9% com um CV de 22,7% e máxima de 100% (ver **Gráfico 13**).

Gráfico 13 – Frequência da Umidade Relativa do Ar (2000-2020)



A **Tabela 7** mostra ainda uma média de direção de ventos vindos da direção entre sul e sudoeste com um CV relativamente alto de 63,6%. Mas ao observar-se o gráfico de frequência de direções dos ventos (ver **Gráfico 14**) percebe-se um bimodalidade com uma frequência significativa de ventos originados de direções entre noroeste e nordeste e também uma frequência significativa de ventos vindos de direções entre sul-sudoeste até oeste sudoeste. Esses ventos vindos de noroeste e nordeste são os que podem ocasionar maiores riscos, já que ao sul do CTR há dois bairros povoados. Os ventos vindos de leste-sudeste por outro lado podem afetar os funcionários da planta de tratamento de biogás, localizada a noroeste da usina de pirólise.

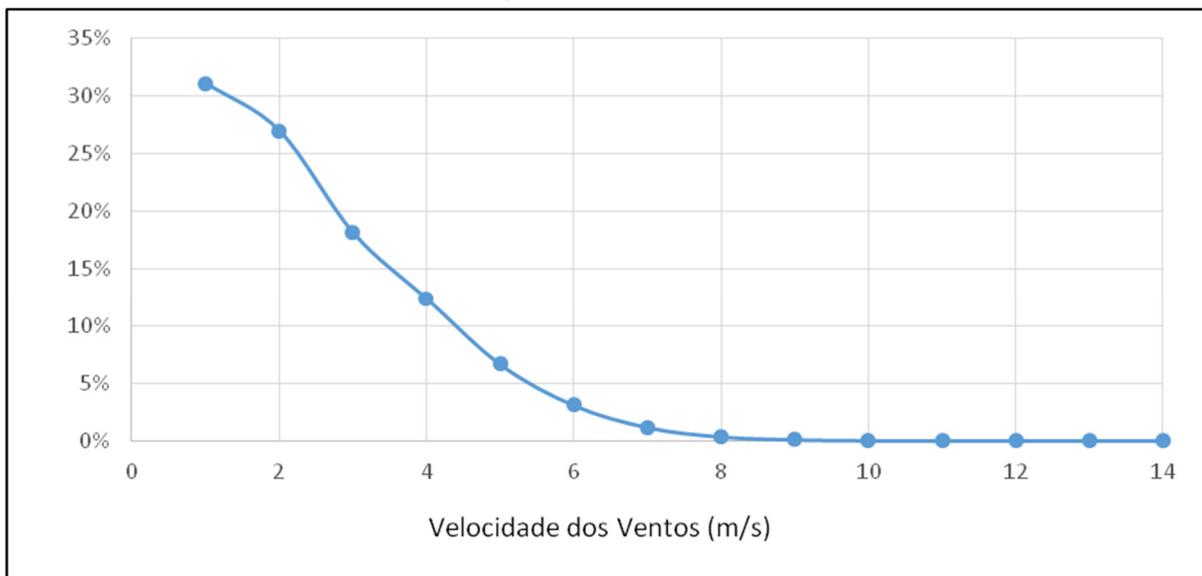
Gráfico 14 - Frequência de Direção do Vento (2000 e 2020)



Fonte: BRASIL, 2021

Por fim a Tabela 7 traz as velocidades dos ventos com uma média de 2,0 m/s e um CV relativamente alto de 78,4% e máxima de 13,7 m/s. Observando as frequências das velocidades percebe-se que em 90% das vezes os ventos atingem velocidades abaixo de 4 m/s (ver **Gráfico 15**).

Gráfico 15 - Frequência de Velocidade dos Ventos



O **Quadro 14** resume os parâmetros climatológicos que foram aplicados ao modelo.

Quadro 14 – Resumo dos parâmetros climatológicos

Parâmetros	Valores	Fonte
Temperatura média (Rio de Janeiro/RJ)	25°C	BRASIL (2021)
Velocidade do Vento Média	2 m/s	BRASIL (2021)
Direção considerada	ESE – 1,2%	BRASIL (2021)
Umidade	77,9%	BRASIL (2021)
Rugosidade do solo	Urbano ou Floresta	Estimado pelo autor
Classe de Estabilidade	E	Determinado pelo ALOHA
Cobertura e nuvem	5/10	Estimado pelo autor

Fonte: Próprio autor

5.3.8 Simulação do Alcance das Emissões Fugitivas

A dispersão de emissões fugitivas de benzeno a uma vazão de 4,3 g/h, considerando o limite de exposição ambiental de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e com ventos vindos da direção ESE é mostrada na **Foto 8**.

Foto 8 – Emissão fugitiva de benzeno



Como pode ser visto na **Foto 8** uma dispersão de benzeno poderia atingir os prédios administrativos da unidade de tratamento de biogás da Ciclus Ambiental, expondo os trabalhadores que ocupam o setor. A distância atingida seria de 90 metros a partir da fonte.

As concentrações de emissões fugitivas de benzeno nessas condições não atingem o Limite Inferior de Explosividade (LIE - menor concentração de uma substância que misturada com o ar forma uma mistura inflamável) em áreas arejadas.

Para o benzo[a]pireno os dados físico-químicos são mostrados no **Quadro 15**.

Quadro 15 - Dados físico químicos do benzo[a]pireno

Grandeza	Valores	Fonte
n° CAS	50-32-8	INCHEM
Massa Molar	252,3093 g/mol	NIST
Limite Inferior de Explosividade	Não disponível	
Limite Superior de Explosividade	Não disponível	
<i>Flash Point</i>	Não disponível	
Cap. Térmica do líquido a 298,15 K, 1 atm	385,4 J/mol.k (1527,49 J/Kg.K)	ROUX et al. (2008)
Cap. Térmica do gás a 500 K, 1atm	414,73 J/mol.K (1240,67 J/kg.K)	NIST (2021d)
Pressão crítica	2608,40 kPa (26,598 atm)	CHEMÉO (2021)
Ponto de Fusão	450 K	NIST (2021e)
Ponto de Ebulição	768,2 K	NIST (2021e)
Temperatura Crítica	1030,6 K	CHEMÉO (2021)
Pressão de Vapor (77°F)	5,49.10 ⁻⁹ mmHg	CAMEO (2021b)
Densidade do vapor (em relação ao ar)	8,7	CAMEO (2021)
Dens. do Ar (25°C, 1 atm)	1,184 Kg/m ³	
Dens. do Benzo[a]pireno (25°C, 1 atm)	10.300,8 Kg/m ³	calculado
IDLH	Não disponível	
IDLH/10	Não disponível	
PAC-1	1,5 ppm	POHANISH (2012)
PAC-2	10 ppm	POHANISH (2012)
PAC-3	80 ppm	POHANISH (2012)
RfC	2.10 ⁻⁶ mg/m ³	USEPA (2017b)
Classificação IARC	Provavelmente carcinogênico (2A)	IARC (2002)

O *software* Aloha não foi capaz de fornecer com precisão uma estimativa da dispersão de nuvens tóxicas com os valores de referência. A hipótese que pode explicar essa dificuldade reside no fato de que essas substâncias possuem elevado ponto de ebulição e uma vez liberadas devem se converter em material particulado para o qual o Aloha não foi desenvolvido. Essa hipótese é corroborada por Jongeneelen (2001, p.4) que diz:

Os HPAs são compostos na maioria não voláteis. Os HPAs transportados pelo ar com menos de quatro anéis aromáticos (faixa de peso molecular de 128–178) estão apenas presentes como compostos gasosos no ambiente de trabalho. Os HPAs com quatro anéis (peso molecular 202) estão presentes tanto como compostos gasosos quanto como partículas. HPAs com pesos moleculares maiores (> 228) são meramente ligados a partículas transportadas pelo ar.

Então o risco de exposição a HPAs continuaria presente na forma de materiais particulados devendo ser levado em consideração para fins de programas de monitoramentos ambientais e ocupacionais.

No entanto, Meesters (2011), pesquisador do instituto RIVM⁹ publicou um estudo com o intuito de prever a dispersão e deposição de partículas como HPAs, dioxinas e metais pesados originadas de incêndios em edificações utilizando o *software* PHAST em conjunto com o *software* desenvolvido por aquele instituto denominado OPS-ST. No método utilizado o autor assume algumas simplificações assumindo que partículas com até 2 µm de diâmetro médio tendem a se comportar como gases neutros. A partir dessa premissa as modelagens foram feitas utilizando o gás nitrogênio. Os parâmetros utilizados o PHAST e no OPS-ST são dados na **Tabela 8**.

Tabela 8 - Parâmetros de entrada para o PHAST e OPS-ST (MEESTERS, 2011, p.63 e p.66)

Parâmetros de entrada no PHAST	Valores
Dimensão da edificação*	6m x 50 m x 50m
Taxa de liberação**	0,16 Kg/s
Temperatura final de liberação*	50°C
Taxa de pré diluição com o ar*	0 Kg/s
Classe de estabilidade de Pasquill**	D
Velocidade do vento**	6 m/s
Altura da fonte***	0,5 m
Diâmetro da fonte***	25 m
Capacidade térmica***	0 MW
Rugosidade do receptor***	0,1 m
Altura da quietude do vento***	0,1 m
Distribuição de tamanho de partícula***	Médio

*parâmetros PHAST **parâmetros comuns ao PHAST e OPS-ST ***parâmetro OPS-ST

⁹ Instituto Nacional da Saúde Pública e Meio Ambiente dos Países Baixos (*Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu – RIVM*)

Os resultados dessa simulação são mostrados na **Tabela 9**:

Tabela 9 - Deposição seca por distância a favor do vento em função da ascensão de pluma

Distância de deposição	Deposição seca para diferentes ascensões de pluma (mg/m ²)						
	0m	1m	2m	5m	10m	25m	71m
25m	8308.9	1740.3	526.5*	63.4*	7.1*	0.4*	0.1*
50m	2659.5	1336.6	605.4	118.3*	15.6*	0.5*	0.1*
75m	1325.5	900.6	483.2	131.2	22.4*	0.4*	0.1*
100m	802.2	620.9	373.4	124.9	26.8	0.5*	0.1*
200m	232.0	211.1	169.2	80.6	29.4	0.7*	0.0*
300m	109.7	104.6	90.6	52.9	24.7	1.1	0.0*
400m	64.5	63.1	56.6	39.3	20.0	1.5	0.0
500m	42.5	42.3	38.9	29.4	16.3	2.0	0.0*
1.000m	11.0	11.6	11.2	9.6	7.2	2.6	0.1
1.500m	4.9	5.4	5.3	4.8	3.8	2.0	0.1
2.000m	2.8	3.2	3.1	2.9	2.4	1.5	0.1
2.500m	1.8	2.1	2.1	1.9	1.6	1.1	0.2
5.000m	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4	0.2
10.000m	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
15.000m	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0
20.000m	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0

Fonte: adaptado de Meesters (2010, p.78)

Cabe ressaltar que os resultados obtidos por Meesters referem-se à deposição de material na superfície à jusante do incêndio. O Aloha permite estimar apenas a concentração do poluente no ar nas distâncias de interesse.

Mesmo assumindo todo o material particulado estimado pelo Aloha se deposite na superfície a uma dada distância os resultados, a aplicação das simplificações utilizadas por Meesters no Aloha produziu resultados muito diferentes. Essa diferença de resultados também pode ser explicada pelo fato de que os *softwares* requerem diferentes parâmetros o que indica que utilizam conjuntos diferentes de equações para as modelagens.

Um outro *software* que poderia ser utilizado para a modelagem de dispersão de material particulado e que é recomendado pela USEPA é o AERMOD. Esse *software* é pouco intuitivo e exige o conhecimento do funcionamento pré processadores que por sua vez exigem o fornecimento de dados no formato .txt, e com uma formatação específica. Os dados meteorológicos do Brasil são comumente fornecidos pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTec, órgão vinculado ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Inpe. No momento em que

esse tópico estava sendo escrito o *site* se encontrava indisponível, o que também impediria a utilização do AERMOD.

5.3.9 Ruptura catastrófica do forno de pirólise

A modelagem para dispersão de nuvem tóxica é mostrada na **Foto 9**.

Foto 9 – Dispersão de nuvem tóxica devido à ruptura catastrófica (ref. n-nonano)



O quadrado vermelho corresponde ao limite das dependências da usina de pirólise. Como pode ser observado, uma dispersão de nuvem tóxica devido a uma ruptura catastrófica no forno formaria uma zona vermelha (PAC-3), laranja (PAC-2) e amarela (PAC-1)¹⁰ a distâncias de 61, 197 e 241 m, respectivamente. Nesse cenário somente os funcionários e terceiros da usina de pirólise estariam sujeitos a risco de morte. No entanto, a área afetada por uma nuvem tóxica em concentrações capazes

¹⁰ PAC-1: Efeitos leves e transitórios na saúde. PAC-2: Efeitos irreversíveis ou outros efeitos graves à saúde que podem prejudicar a capacidade de tomar medidas de proteção. PAC-3: Efeitos à saúde com risco de vida.

de causar danos irreversíveis ou duradouros à saúde humana abrangeria uma área aproximada de 7.000 m² naquela empresa. Assumindo que os funcionários da Ciclus Ambiental fiquem espalhados homogeneamente na área da empresa isso poderia significar que cerca de 60 funcionários ficariam submetidos a esse de risco.

A **Figura 22** mostra a árvore de falhas elaborada para a modelagem de uma ruptura catastrófica.

Para um melhor entendimento, a seguir são apresentados os símbolos lógicos utilizados nos diagramas das árvores de falhas para a representação das relações lógicas dos eventos de entrada e saída, isto é, dos eventos contribuintes para as falhas:



Evento topo ou intermediário;



Porta lógica "OU": A saída ocorre se uma ou mais entradas do portão existirem;



Porta lógica "E": A saída ocorre se todas as entradas do portão existirem simultaneamente;



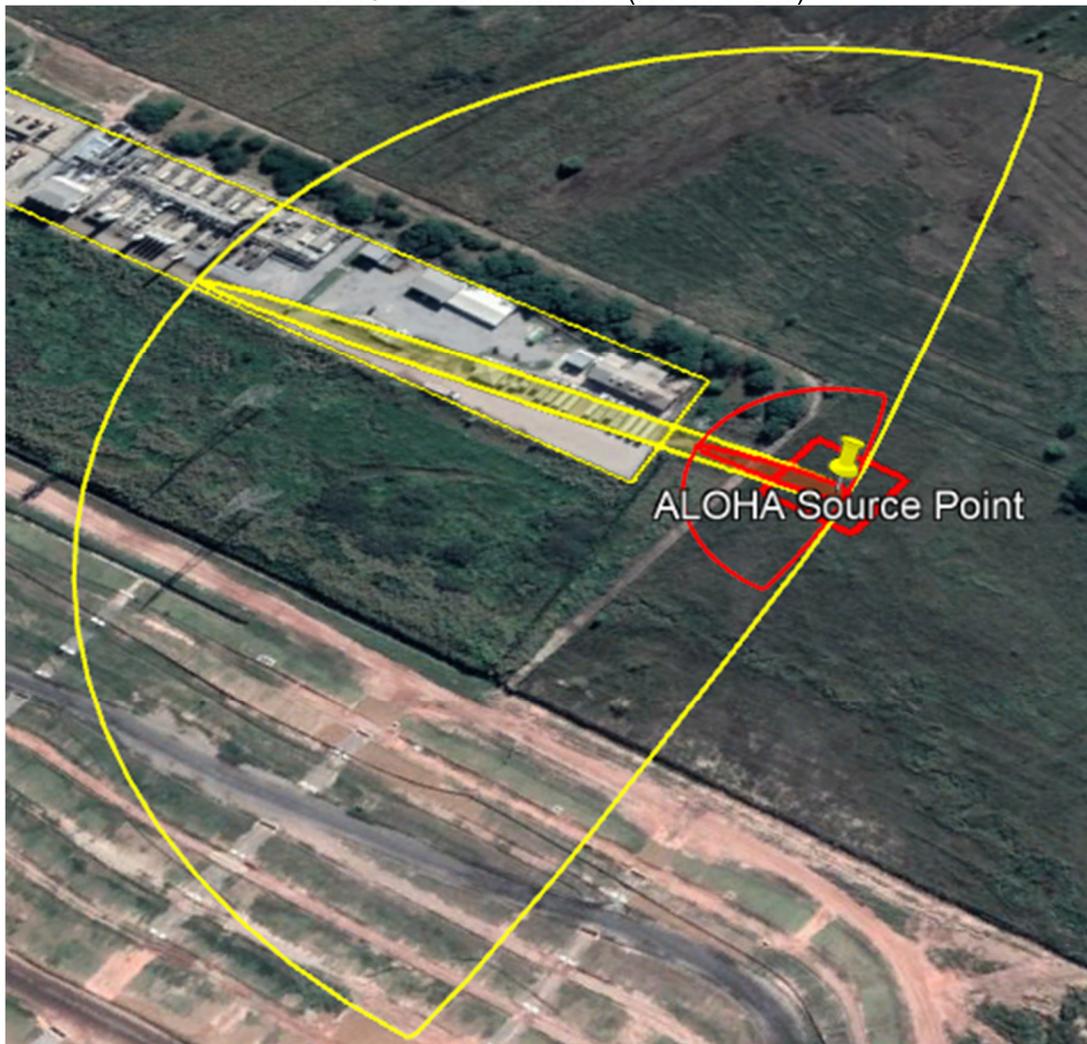
Evento básico: Representa uma falha básica, ou seja, aquela que, para a sua ocorrência não requer o desenvolvimento de nenhum outro evento adicional.

A probabilidade de ocorrência obtida por meio dessa árvore seria de 4,06E-05. Mas acredita-se que seja muito pouco provável que a nuvem desprendida não entre em ignição dada a disponibilidade de superfícies quentes, com temperaturas acima do ponto de ignição.

As taxas de falha utilizadas podem ser consultadas no **APÊNDICE C**.

Outro ponto a ser levado em consideração é que as temperaturas de autoignição que praticamente são todos abaixo de 500°C, que é a temperatura de regime do forno além da chama da câmara de combustão. Assim há a possibilidade quase que certa de haver uma ignição tardia, cujo cenário pode ser observado na **Foto 10**.

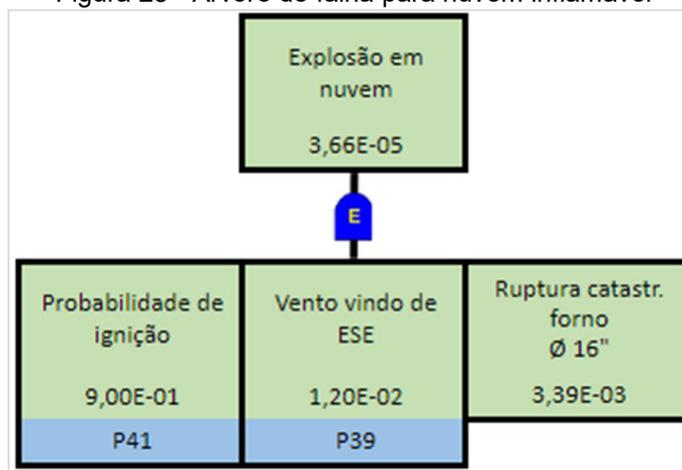
Foto 10 - Nuvem inflamável (ref. n-nonano)



A zona vermelha, correspondentes limite inferior de inflamabilidade (LII), alcança uma distância de 51 metros. A zona amarela corresponde a 10% do LII e alcança uma distância de 10%.

Para esse cenário, a árvore de falha foi assumida como a de ruptura catastrófica contida na **Figura 22** acrescida da fonte de ignição, como mostrado na **Figura 23**.

Figura 23 - Árvore de falha para nuvem inflamável



Para o cenário de nuvem inflamável a recomendação é aplicar a probabilidade de ignição de $2,00E-01$ para substâncias inflamáveis o n-nonano que com ponto de fulgor $31,1^{\circ}\text{C}$ (CETESB 2014; 2019c).

A probabilidade de ocorrência de nuvem inflamável nesse caso seria de **$3,66E-05$** .

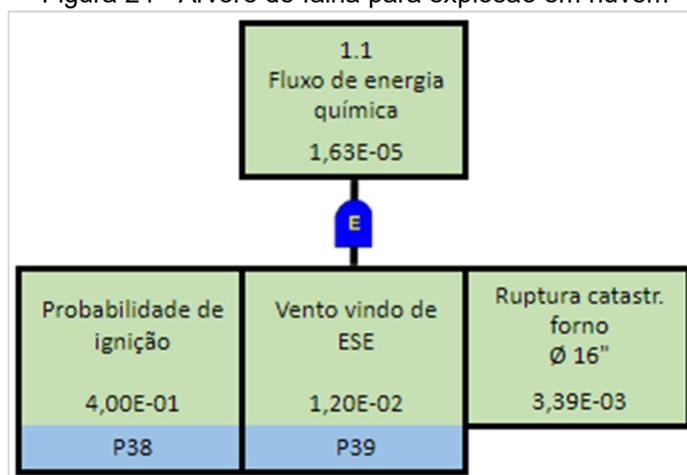
O cenário explosão em nuvem é mostrado na **Foto 11**. A zona vermelha tem o potencial de 75% de fatalidade. Já a zona em laranja corresponde a uma sobrepressão de 0,1 bar que tem o potencial de 25% de fatalidade. O raio de impacto das zonas vermelha e laranja são de 24 m e 60 m, respectivamente.

Foto 11 - Explosão em nuvem (ref. n-nonano)



Para esse cenário, a árvore de falha foi assumida como a de ruptura catastrófica contida na **Figura 22** acrescida da fonte de ignição, como mostrado na **Figura 24**.

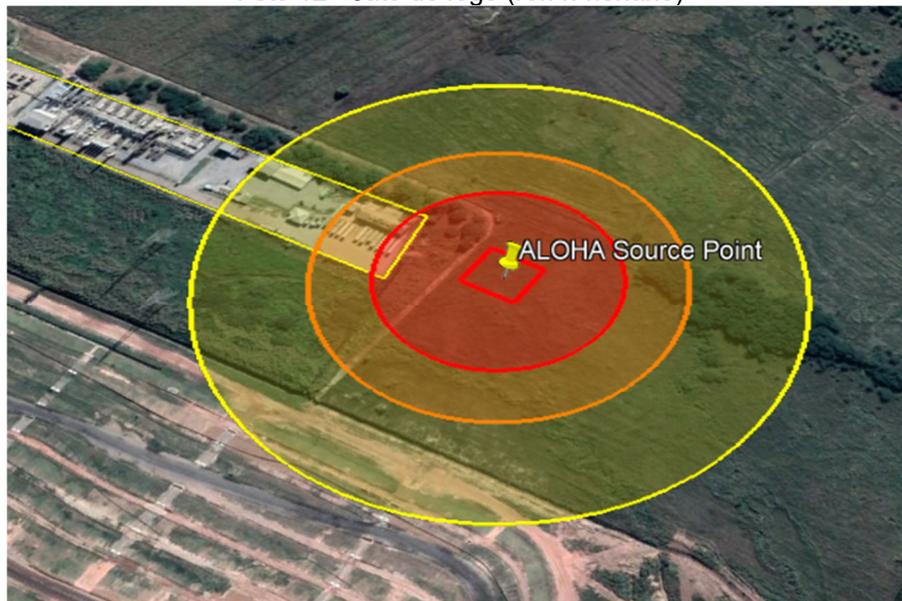
Figura 24 - Árvore de falha para explosão em nuvem



A probabilidade de ocorrência de explosão em nuvem nesse caso seria de **1,63-05**.

A seguir é mostrado o cenário de jato de fogo (**Foto 12**).

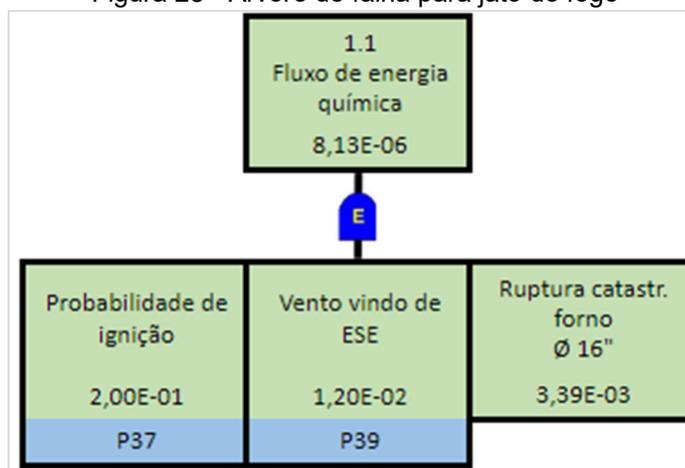
Foto 12 - Jato de fogo (ref. n-nonano)



Como pode ser observado o raio de alcance para zona vermelha (letal para exposição por 60 segundos) é de 75 m. O raio da zona laranja (queimaduras de 2º grau) é de 111 m. O raio da zona amarela (dores para exposições de 60 segundos) é de 177 m. Nessas condições a duração desse evento, no entanto ficaria restrita a 20 segundos.

Nota-se que nessa zona vermelha avança para dentro dos limites da Ciclus Ambiental, abrangendo uma área de 620 m², aproximadamente. Seguindo a mesma estimativa adotada para dispersão de nuvem tóxica chega-se a um número de 5 indivíduos expostos ao risco de morte. Para esse cenário, a árvore de falha seria a mesma da **Figura 22** acrescida da fonte de ignição como mostrado na Figura 25.

Figura 25 - Árvore de falha para jato de fogo



5.3.10 Simulação da liberação total em 10 minutos

Para as tipologias acidentais de nuvem tóxica, nuvem inflamável e explosão em nuvem o *software* não foi capaz de determinar o raio de forma precisa.

Para jato de fogo a simulação é mostrada na **Foto 13**.

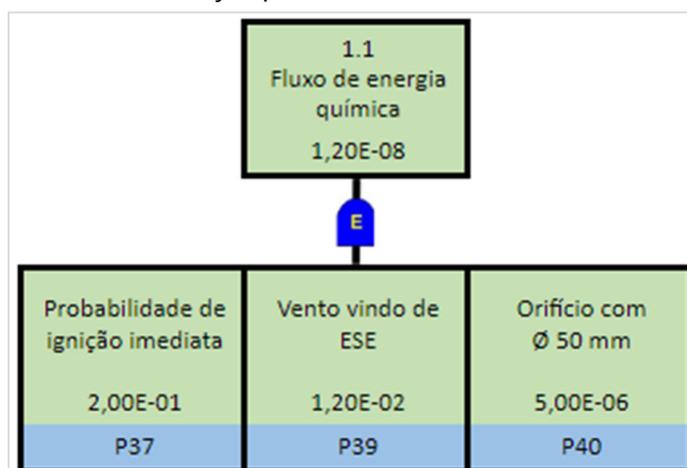
Foto 13 - Jato de fogo



Como pode ser observado na **Foto 13** somente os trabalhadores da usina de pirólise estariam expostos a riscos de morte.

A árvore de falha para essa tipologia acidental é mostrada na **Figura 26**. Como a probabilidade de formação de orifício com 50 mm de diâmetro é muito baixa não produziu alteração na probabilidade de ocorrência.

Figura 26 - Árvore de falha para jato de fogo em liberação por 10 minutos Ø 50mm



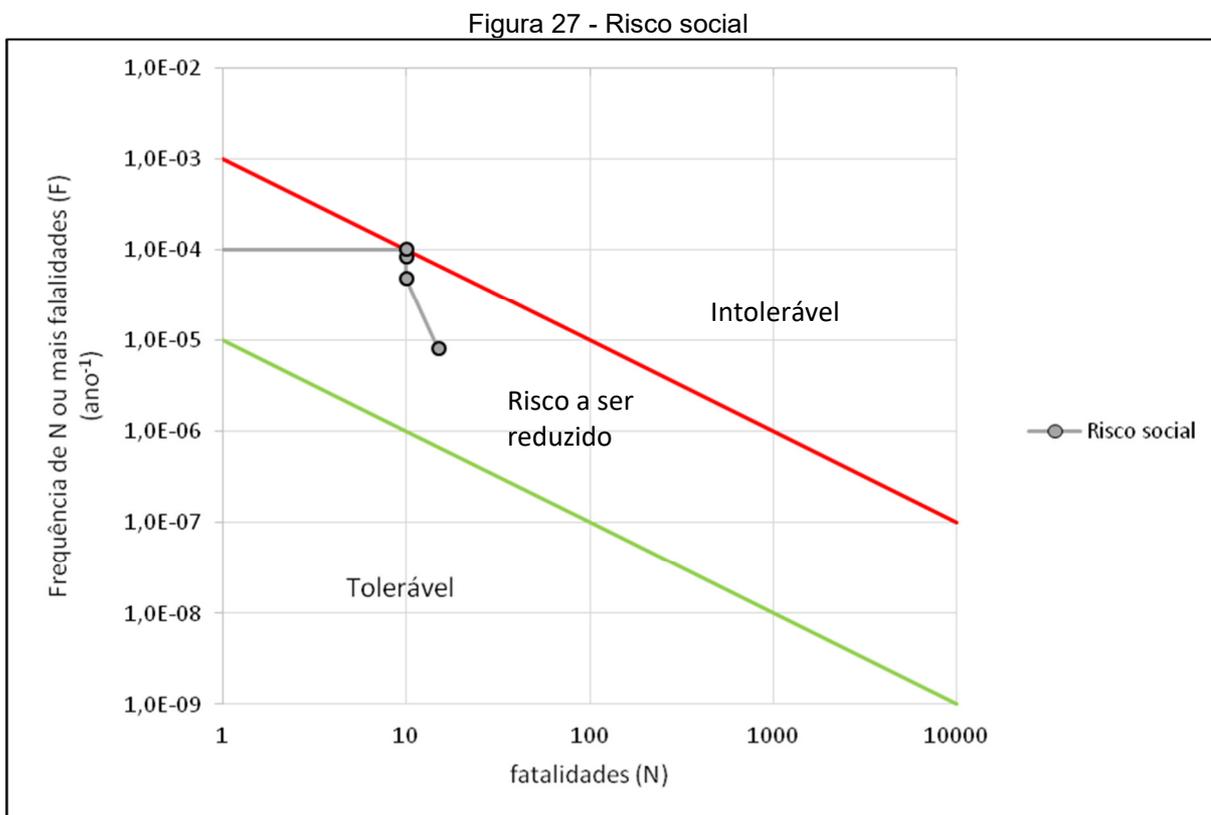
5.3.11 Riscos social e individual

A **Tabela 10** mostra as probabilidades e o número de fatalidades para cada tipologia de acidente.

Tabela 10 - Probabilidades e fatalidades

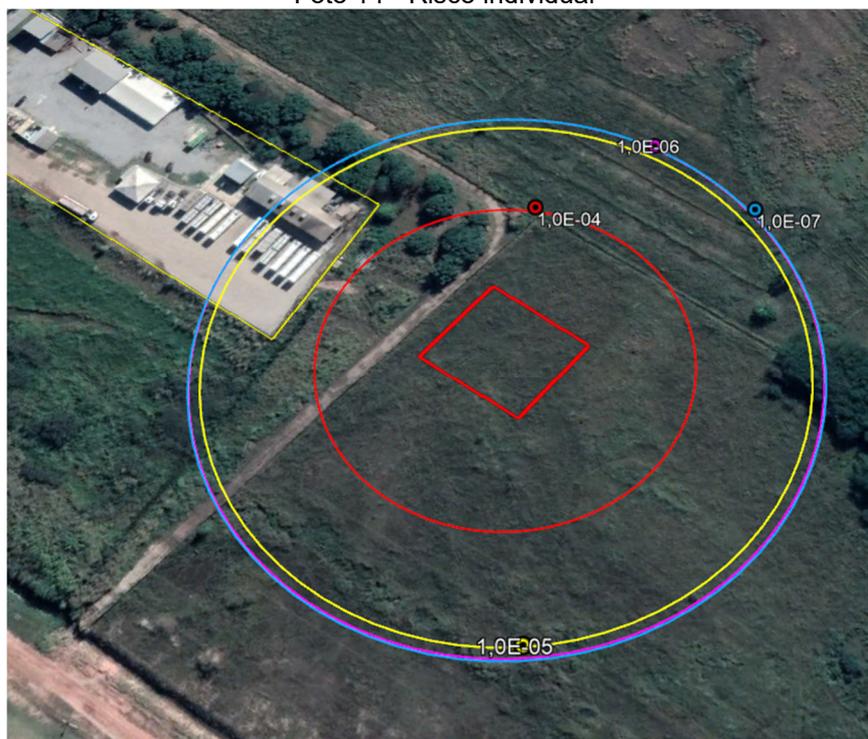
Hipótese	Tipologia	Fatalidades de funcionários	Fatalidades de terceiros	Probabilidade (ano ⁻¹)	Probabilidade acumulada	Raios da curva de isorrisco
Ruptura catastrófica	Nuvem tóxica	20	15	8,13E-06	8,13E-06	75,21
Ruptura catastrófica	Nuvem inflamável		10	4,06E-05	4,87E-05	61,64
Ruptura catastrófica	Jato de fogo		10	3,66E-05	8,53E-05	23,84
Ruptura catastrófica	Explosão em nuvem		10	1,63E-05	1,02E-04	51,34
Liberação total em 10 minutos	Nuvem tóxica		0	6,00E-08	1,02E-04	20,1
Liberação total em 10 minutos	Nuvem inflamável		0	1,20E-08	1,02E-04	-
Liberação total em 10 minutos	Explosão em nuvem		0	2,40E-08	1,02E-04	-
Liberação total em 10 minutos	Jato de fogo		0	1,20E-08	1,02E-04	-

Na **Figura 27** é mostrada a curva F-N e os riscos sociais acumulados. Pode-se observar que a curva atinge o limite do que se considera como risco intolerável exigindo ações para adequação.



Na **Foto 14** são mostradas as curvas de isorrisco para risco individual.

Foto 14 - Risco individual



Levando-se em conta o critério de tolerabilidade da Cetesb (2014) a curva de isorrisco referente à probabilidade de $1,0E-05$ – acima do limite tolerável – alcança um raio de 87 m, ultrapassando os limites da usina de pirólise.

Região de risco individual	Risco individual
Tolerável	$RI < 10^{-6}$ mortes/ano
A ser reduzido	10^{-6} mortes/ano \leq RI \leq 10^{-5} mortes/ano
Intolerável	$RI > 10^{-5}$ mortes/ano

5.4 Caso de Planta de pirólise de Bento Gonçalves/RS

Em 2018 a Prefeitura de Bento Gonçalves/RS tentou implantar uma planta de pirólise para tratar de seus RSUs. O subitem “Plano de Emergência” (PMBG, 2018) trazia apenas, um descritivo dos equipamentos de segurança para situações de incêndios de pequenas proporções. O licenciamento acabou sendo indeferido pelo órgão ambiental daquele estado, Fepam (FEPAM, 2020), mas por motivos outros que não os riscos de incêndios e explosões de grandes proporções, como

georreferenciamento incorreto, perdas de prazo e irregularidades junto ao Tribunal de Contas do Estado.

CONCLUSÕES

A partir das informações de literatura normas e catálogos técnicos foi possível criar uma maquete eletrônica em escala. Essa maquete permite uma maior consciência situacional da planta uma vez que permite visualizar e contabilizar os equipamentos mínimos que comporiam uma usina de pirólise.

O local escolhido para implantação da usina de pirólise neste trabalho apresenta a vantagem de ser ainda pouco habitado e pouco frequentado o que pode ser uma vantagem para a aquisição de áreas para o estabelecimento de um cinturão de segurança.

A literatura levantada revelou que essa tecnologia é adequada para o tratamento de resíduos plásticos, mais especificamente aqueles baseados em resinas de poliolefinas. Para outros tipos de resíduos essa tecnologia se mostrou problemática tanto pela baixa geração de energia quanto pela maior frequência de paradas não programadas das plantas.

Nos Brasil as Usinas de Recuperação Energéticas (UREs) são bem menos adotadas quando se compara a tecnologia de aterros sanitários. Isso acontece também nos Estados Unidos, e a explicação levantada é a de que naquele país há uma grande disponibilidade de terras para a implantação de aterros. Isso pode explicar a baixa demanda por tratamentos térmicos no Brasil.

Do ponto de vista socioambiental, essa tecnologia compete com os trabalhadores do setor de reciclagem secundária. No Brasil, a curto e médio prazo pode ser que esse impacto não seja observado, já que no país apenas cerca de 5% dos resíduos com potencial de reciclagem é, de fato, reciclado. Mas a longo prazo, a medida em que o processo for aprimorado e se tornar lucrativo pode ocorrer a escassez de material reciclável no mercado, tirando a fonte de sustento dos catadores. Será, então, necessário que o poder público pense em uma forma de reintegrar esses profissionais ao mercado de trabalho. Uma forma de minimizar esses dois últimos problemas seria aproveitar a expertise dos catadores para a

tarefa de separação prévia de resíduos a serem processados por tipo. Esses profissionais são capazes, pelo tato e audição, de identificar e separar resíduos plásticos por tipo de polímero.

Embora haja na academia pesquisadores que defendam a reciclagem primária e secundária em detrimento de tratamento térmico, há casos em que aquelas reciclagens não sejam possíveis. É o caso, por exemplo, de embalagens descartadas de lubrificantes que comumente contêm uma quantidade residual do produto. Para esses casos os tratamentos térmicos são os mais indicados.

A forma de abordagem dos respondentes da pesquisa de opinião sobre percepção de risco evocando a Lei de Acesso a Informação (LAI), proporcionou uma taxa baixa de retorno que se constituiu em apenas 26% dos municípios consultados. Há uma crença ou pretexto entre boa parte dos municípios amostrados de que uma pesquisa acadêmica está fora do escopo do que preconiza a LAI. Além disso, quase metade dos municípios não deram retorno mostrando que esses departamentos ainda não funcionam de acordo com o que propõem.

Embora seja necessário um número maior de prefeituras participantes da pesquisa, é possível afirmar que há uma tendência de que apenas 31,5% seus profissionais de meio ambiente apresentem um conhecimento no máximo mediano. Há também uma tendência de que os respondentes apresentem um sentimento de oposição às usinas de pirólise quando comparadas a tratamentos térmicos já existentes. Ao mesmo tempo esses profissionais apresentam um sentimento de benefício maior para a pirólise quando comparada às demais tecnologias. A expectativa de frequência de acidentes é menor para a pirólise do que para os demais tipos de Usinas de Recuperação Energética (UREs). Já a expectativa de gravidade de um acidente é maior para a pirólise do que para as demais UREs. A expectativa para a gravidade de acidentes ambientais é menor para a pirólise. No geral a percepção de risco para pirólise entre os gestores de RSUs é menor para a pirólise quando comparada às demais UREs.

O *software* Aloha provou-se útil para uma modelagem de dispersão de nuvens e efeitos explosões e incêndios para a maioria das substâncias envolvidas no processo de pirólise com a vantagem de ser gratuito. Neste trabalho a limitação ficou por conta da modelagem de material particulado para a qual o software não foi

projetado. Isso impediu a modelagem das emissões fugitivas de naftaleno e benzo[a]pireno, já que devido aos altos pontos de fusão e ebulição podem estar parcialmente contidos no material particulado. Para esses casos, talvez um software com mais recursos possa solucionar essa limitação. Mas cabe lembrar se tratam softwares preços elevados, o que pode inviabilizar uma análise em muitos casos.

Mesmo com as limitações do método proposto, a análise de risco indicou que a planta de pirólise nos moldes como foi elaborada proporcionaria um risco individual (probabilidade maior que 10^{-5} por ano) num raio de 91 metros ultrapassando os limites da usina, o que vai exigir uma série de ações mitigadoras visando reduzir esse risco ao nível “tolerável” na curva F-N recomendado pela Cetesb (2014). Mesmo ocupando uma área útil reduzida para seu funcionamento, a sua instalação em áreas muito habitadas ou frequentadas demandará uma quantidade consideravelmente maior de medidas de segurança, que poderiam inviabilizar economicamente a atividade da planta. Nesse sentido, a escolha do CTR Seropédica como local de uma planta de pirólise aparentemente seria um local adequado. A análise de risco com os cenários e hipóteses consideradas mostraram que uma usina de pirólise proporcionaria riscos para além do tolerável.

O novo marco do Saneamento Básico, com prazo para adequação até 2024, um elemento de pressão sobre municípios que terão que abandonar as velhas práticas de dispor seus resíduos em lixões ou aterros controlados adotar formas ambientalmente corretas. A tecnologia de pirólise pode ser uma boa alternativa para aqueles municípios com dificuldades em encontrar ou licenciar áreas grandes o suficiente para a implementação de um aterro sanitário.

No Brasil a legislação ainda é praticamente silente sobre a tecnologia de pirólise. Apesar de citarem a tecnologia de pirólise, o que se observa a legislação que deveria tratar do assunto é genérica, pensada a partir da tecnologia de incineração, não atendendo às especificidades da tecnologia pirólise. Além disso, são focadas no monitoramento de emissões, não especificando o método ou requisitos mínimos para uma análise de riscos. Essas legislações não contemplam o monitoramento de HPAs e BTEX, que são poluentes sabidamente emitidos em processos de pirólise de poliolefinas. Também não especificam uma metodologia de análise de riscos a ser utilizada. O arcabouço legal existente, portanto, não é adequado para regulamentar Usinas de Pirólise, sendo necessário a criação de

legislação específica ou que se modifique o texto dessas resoluções e portarias de forma a contemplar essa tecnologia.

A legislação permissiva, a percepção de risco reduzida e a falta de experiência com a tecnologia de pirólise aplicada a RSUs constituem fatores de risco para a atividade de usinas de pirólise. Isso pode ser particularmente grave naqueles estados da união em que as secretarias estaduais de meio ambiente não tenham pessoal experiente no assunto ou com legislações mais permissivas. O processo de licenciamento da usina de pirólise de Bento Gonçalves serve de alerta que ilustra os fatores discutidos

PONTOS DE MELHORIA

- Garantir a existência de profissionais com experiência em análise de riscos nas secretarias municipais e estaduais
- Adotar redundância para válvulas de alívio, sensores de oxigênio e temperatura
- Submeter procedimentos operacionais e de segurança a auditoria antes de sua implementação
- Adequar as resoluções e portarias para as especificidades do processo de pirólise
- Estabelecer critério para probabilidade de ignição de HCs submetidos a altas temperaturas
- Adotar *checklist* para inspeções e manutenções e verificação da montagem por profissional independente.
- Garantir a implementação de um programa de monitoramento por meio de hemogramas de funcionários e populações vizinhas para prevenção de leucemia

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O *software* Aloha não tem capacidade para modelar a dispersão material particulado não possibilitando a modelagem de dispersão de HPAs. Assim, uma sugestão de estudo efetuar a Modelagem de HPAs com AERMOD e/ou PHAST/OPS-ST.

O Aloha não foi projetado para simular cenários de explosões confinadas que pode se constituir um risco relevante se for levado em consideração a probabilidade de entrada de ar no sistema. Seria de grande relevância utilizar outros programas ou modelos para poder mensurar o risco desse cenário.

A literatura e alguns relatos indicam que a categoria de profissionais catadores de materiais recicláveis poderia assumir um posicionamento contra a implantação da técnica de tratamento de resíduos por pirólise. Seria interessante realizar um estudo visando a proposição da inserção desses profissionais na atividade de pirólise de resíduos plásticos.

Os dados obtidos neste trabalho poderiam servir de base para um estudo de viabilidade econômica para a implantação de usinas de pirólise.

A pesquisa de percepção de riscos elaborada para este trabalho poderia gerar dados mais consistentes se houvesse dados de um maior número de municípios a ser incluído. Uma recomendação neste caso seria estender o envio de formulários, de acordo com o método proposto neste trabalho, para mais prefeituras afim de atingir um mínimo de 35 municípios.

Tomando por base o método utilizado neste trabalho, somente 22% dos municípios deram retorno à solicitação de informação. Então, outra forma de fazer com que o questionário chegue aos potenciais respondentes poderia ser testada.

Muitos servidores das secretarias municipais se recusaram a responder o questionário com a alegação de que não se tratava de um pedido de informação ao cidadão e, portanto, não estaria abrangido pela Lei de Acesso à Informação (LAI). Os questionários de pesquisa são, sim, um pedido de informação. Afim de eliminar essa barreira poderia se discutir a mudança da redação da LAI de forma a incluir o fornecimento de informações para fins acadêmicos, incluindo aí respostas a questionários elaborados pela comunidade acadêmica.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, S.; BAKHTOM, S.; ZIAEI, M.; ARGHAMI, S. Comparison of Risk Assessment Using HAZOP and ETBA Techniques: Case Study of a Gasoline Refinery Unit in Iran. **Journal of Human, Environment and Health Promotion**; v.1(1), p.19-27, 2015
- ABIDIN, N. A. Z.; ARIFFIN, M. A.; RUSLI, R. **Preliminary Risk Assessment For The Bench-Scale of Biomass Gasification System**, 2011 National Postgraduate Conference, 2011.
- ACHILIAS, D. S., & KARAYANNIDIS, G. P.). The Chemical Recycling of PET in the Framework of Sustainable Development. **Water, Air, & Soil Pollution: Focus**, 4(4/5), 385–396, 2004
- ACHILIAS, D.S.; ROUPAKIAS, C.; MEGALOKONOMOS, P., LAPPAS, A.A.; ANTONAKOU, E.V. Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP). **J. Hazard. Mater.** 149, 536–542, 2007.
- AGUADO, J.; SERRANO, D.; VICENLE, G.; SANCHEZ, N. Effect of Decalin Solvent on the Thermal Degradation of HDPE **Journal of Polymers and the Environment**, v.14, p.375-384, 2006
- AHMAD, I., KHAN, M. I., KHAN, H., ISHAQ, M., TARIQ, R., GUL, K., ET AL. (2014). Pyrolysis study of polypropylene and polyethylene into premium oil products. **Int. J. Green Energy** 12, 663–671.
- ALMEIDA, D.; MARQUES, M. F. Thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste. **Polímeros**, v.26(1), p.44-51, 2016
- AL-SALEM, S. M., LETTIERI, P.; BAEYENS, J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): a review. **Waste Management**, 29(10), 2625-2643, 2009.
- AL-SALEM, S.M.; ANTELAVA, A.; CONSTANTINOU, A.; MANOS, G.; DUTTA, A. A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). **Journal of Environmental Management** v.197, p.177-198, 2017
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API) - **Risk-Based Inspection Technology**: downstream segment API recommended practice 581. 654p. 2008
- AMRISK - Estudo de Análise de Risco da Unidade de Recuperação de Energia (URE) Valoriza Santos. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcgclcfndmkaj/https://acpo.org.br/wp-content/uploads/2020/06/4_ear_valoriza_1.pdf>. Acesso em 22 mai 2022.
- AN, T.C., HUANG, Y., LI, G.Y., HE, Z.G., CHEN, J.Y., ZHANG, C.S. Pollution profiles and health risk assessment of VOCs emitted during e-waste dismantling processes associated with different dismantling methods. **Environment International**, 73, 186–194, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO (ABIPLAST). Perfil 2019. Disponível em: < http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2020/09/Perfil_2019_web_abiplast.pdf >. Acesso em 17 mai 2023.

BARNES, D. K. A., GALGANI, F., THOMPSON, R. C., & BARLAZ, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, 364(1526), 1985–1998, 2009.

BARRAGÁN-GUTIÉRREZ, I.; LÓPEZ-DÍAZ, A.; KRUMM, W. Synthetic fuel production from shredded scrap waste. **Revista Facultad De Ingeniería**, 26(44), 135-145, 2017.

BELTRAME, P. L., CARNITI, P., AUDISIO, G., & BERTINI, F. Catalytic degradation of polymers: Part II—Degradation of polyethylene. **Polymer Degradation and Stability**, 26(3), 209–220, 1989.

BESTON **Beston Factory - Pyrolysis & Carbonization Machine**. Youtube, 08 dez. 2020. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=FldeQTOguFI> >. Acesso em 28 nov. 2021c.

BESTON **Plastic Pyrolysis Plant Design**. Disponível em: < <https://bestonpyrolysisplant.com/plastic-pyrolysis-plant-design/> >. Acesso em 06 jan 2021b

BESTON **Waste pyrolysis process**. Disponível em: < <https://bestonturkey.com/pyrolysis-machine-for-sale/> >. Acesso em 06 jan 2021a

BLAST kills man, hurts two in Tiruvallur factory. **Times of India**, India, 25 ago. 2014. City, p. 1. Disponível em: < <https://timesofindia.indiatimes.com/city/chennai/Blast-kills-man-hurts-two-in-Tiruvallur-factory/articleshow/40862903.cms> >. Acesso em: 27 dez. 2020.

BOUNDY, B., DIEGEL, S. W., WRIGHT, L., AND DAVIS, S. C. **Biomass energy data book**. 4th ed. US: Oak Ridge National Laboratory, 2011

BRASIL 2019. **Portaria interministerial nº 274**, Disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos. Disponível em: < <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-interministerial-n%C2%BA-274-de-30-de-abril-de-2019-86235505> > Acesso em 18/10/2020c.

BRASIL **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Secretaria-Geral Subchefia para Assuntos Jurídicos. Brasília, 2020d.

BRASIL **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília, 2010.

BRASIL. 2002. Resolução do CONAMA nº 316/2002. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. Disponível em < <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=338> >. Acesso em 17 out 2020b.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados históricos anuais**. Disponível em: < <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos> >. Acesso em 14 jan 2021.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. **Sistema nacional de informações sobre saneamento (SNIS): diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos: 2019**. Brasília: SNS; MDR, 2020a. 244 p.

BRASIL. Portaria N.º 02, de 08 de maio de 1984. **NR-13 Caldeiras e Recipientes Sob Pressão**, Brasília,DF, 08 mai 1984.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT). Mapa de raios em tempo real. Disponível em: < <http://www.inpe.br/webelat/homepage/> > Acesso em: 05 jan 2023.

BRAZIL TRIANGLE Projeto: Implantar CTR - central de tratamento de resíduo classe II para processar até 500tpd. - Goianinha/RN < https://issuu.com/leticiavonsohsten/docs/caderno_-_projeto_brazil_triangle__?issuu_product=document_page&issuu_context=action&issuu_cta=save_publication >. Acesso em 09 mai. 2020d.

BROOKS, A. L., WANG, S., & JAMBECK, J. R. The Chinese import ban and its impact on global plastic waste trade. *Science Advances*, 4(6) Brooks, A. L., Wang, S., & Jambeck, J. R. (2018). The Chinese import ban and its impact on global plastic waste trade. **Science Advances**, 4(6), 2018.

BROUWER, R., HADZHIYSKA, D., IOAKEIMIDIS, C., & OUDERDORP, H. (2017). The social costs of marine litter along European coasts. **Ocean & Coastal Management**, 138, 38–49.

BUEKENS, A., HUANG, H. Comparative evaluation of techniques for controlling the formation and emission of chlorinated dioxins/furans in municipal waste incineration. **Journal of Hazardous Materials**, 62, 1-33, 1998.

BUREAU FOR ANALYSIS OF INDUSTRIAL RISKS AND POLLUTIONS (BARPI). ARIA Database. [S.I.], 2022a. **Explosion at a pyrolysis plant**. Disponível em < https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/52747_en/?lang=en >. Acesso em: 20 jul. 2022a.

BUREAU FOR ANALYSIS OF INDUSTRIAL RISKS AND POLLUTIONS (BARPI). ARIA Database. [S.I.], 2022b. **Two hydrocarbon tanks ablaze subsequent to a malicious act**. Disponível em: < chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/A46801_a46801_fiche_impel_001.pdf >. Acesso em: 26 jul. 2022b.

BUREAU FOR ANALYSIS OF INDUSTRIAL RISKS AND POLLUTIONS (BARPI). ARIA Database. [S.I.], 2022. **Product release and fire in a vinyl chloride manufacturing unit**. Disponível em < https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/19500_en/?lang=en >. Acesso em: 26 jul. 2022c.

BUREAU FOR ANALYSIS OF INDUSTRIAL RISKS AND POLLUTIONS (BARPI). ARIA Database. [S.l.], 2022. **Furnace fire at an auto parts company**. Disponível em < https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/50827_en/?lang=en >. Acesso em: 26 jul. 2022e.

BUREAU FOR ANALYSIS OF INDUSTRIAL RISKS AND POLLUTIONS (BARPI). ARIA Database. [S.l.], 2022. **PORT-JEROME-SUR-SEINE**. Disponível em < https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/25346_en/?lang=en >. Acesso em: 26 jul. 2022f.

CAMEO CHEMICALS. **Chemical datasheet: Benzo[a]pyrene**. Disponível em: < <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/10593> >. Acesso em: 18 jan 2021b.

CAMEO CHEMICALS. **Chemical datasheet: Naphtalene**. Disponível em: < <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/4005> >. Acesso em: 18 jan 2021a.

CARDUCCI, N. G.; HOGLUND, A.; LUBE, M.; MURDOCK, D. **Mixed Plastics Recycling Plant - Reck 'em Recyclers**. 2020. 51 f. Honor Theses (Graduation) - College of Engineering and Applied Sciences and Chemical Engineering department from University of Wyoming, 2020.

CARVALHO, A. V. F. **Controle de emissões fugitivas de compostos orgânicos voláteis em componentes de linhas de processo de refinarias de petróleo**. Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Gestão da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Sistemas de Gestão. Área de Concentração: Organizações e Estratégia. Linha de Pesquisa: Sistema de Gestão de Meio Ambiente Orientador: Prof. Sérgio Luiz Braga França, D. Sc. Niterói 2016

CARVALHO, M. B. **A3 - Metodologia de avaliação e construção de indicadores**. 1. ed. Rio de Janeiro/RJ: Ciência Moderna, 2009. 199 p. ISBN 978-85-7393-786-2.

CHALIKI, P.; PSOMOPOULOS, S.; THEMELIS, J.; STAVROULAKIS, C. WTE plants installed in 10 european cities. *In*: 12th international conference on protection and restoration of the environment. At Skiathos island, Greece, 1:493 – 500, 2014.

CHEMÉO. Chemical Properties of Benzo[a]pyrene (CAS 50-32-8). Disponível em: < <https://www.chemeo.com/cid/18-179-4/Benzo%5Ba%5Dpyrene> >. Acesso em: 23 jan 2021.

CHERNYAKHOVSKIY I, TIAN T, JOYCE M, MACKAY M, NINA G. U.S. **Laws and regulations for renewable energy grid interconnections, 2016**. National Renewable Energy Laboratory – NREL, 2016 (Technical Report, NREL/TP-6A20-66724).

CLIMA TEMPO. **Você sabe o que é uma rajada de vento?** Disponível em: < <https://www.climatempo.com.br/noticia/2021/10/14/voce-sabe-o-que-e-uma-rajada-de-vento--2349> >. Acesso em 09 mar 2023.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Ficha de Informação de Produto Químico: nonano**. Disponível em: <

https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=NONANO >. Acesso em 08 out 2019c.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Ficha de Informação de Produto Químico: hexano**. Disponível em < https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=HEXANO > Acesso em 15 fev 2023a.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Ficha de Informação de Produto Químico: nonano**. Disponível em < https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=NONANO > Acesso em 15 fev 2023b.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Norma Técnica P-4.261/03: **Risco de Acidente de Origem Tecnológica - Método para decisão e termos de referência**. São Paulo: Cetesb, 2014.

CONSERVATION OF CLEAN AIR AND WATER IN EUROPE (CONCAWE). **An introduction to Concawe: how does Concawe work?** Disponível em: < https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/2017/01/11031402_how_does_concawe_work-2011-00710-01-e.pdf >. Acesso em 08 ago. 2022a.

CONSERVATION OF CLEAN AIR AND WATER IN EUROPE (CONCAWE). **European downstream oil industry safety performance: Statistical summary of reported incidents – 2017, 2018** (CONCAWE Report nº 11/18).

CONSERVATION OF CLEAN AIR AND WATER IN EUROPE (CONCAWE). **European downstream oil industry safety performance: Statistical summary of reported incidents – 2018, 2019** (CONCAWE Report nº 6/19).

CONSERVATION OF CLEAN AIR AND WATER IN EUROPE (CONCAWE). **European downstream oil industry safety performance: Statistical summary of reported incidents – 2019, 2020** (CONCAWE Report nº 11/20).

CONSERVATION OF CLEAN AIR AND WATER IN EUROPE (CONCAWE). **European downstream oil industry safety performance: Statistical summary of reported incidents – 2020, 2021** (CONCAWE Report nº 6/21).

CORNELL LAW SCHOLL. Legal Information Institute. **40 CFR § 240.211-3 - Recommended procedures: Operations**. Disponível em: < <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/240.211-3> >. Acesso em 17 fev. 2021b.

CORNELL LAW SCHOLL. Legal Information Institute. **40 CFR Part 240 - Guidelines for the thermal processing of solid wastes**. Disponível em: < <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/part-240> >. Acesso em 17 fev. 2021a.

DEPLEDGE, M. H.; GALGANI, F.; PANTI, C.; CALIANI, I.; CASINI, S.; FOSSI, M. C. Plastic litter in the sea. **Marine Environmental Research**, 92, 279–281, 2013.

ECONODATA. **Ciclus**. Disponível em < <https://www.econodata.com.br/consulta-empresa/1031990000230-CICLUS-AMBIENTAL-DO-BRASIL-S-A#socios-section> >. Acesso em: 26 abr 2023.

ELORDI, G.; OLAZAR, M.; LOPEZ, G.; AMUTIO, M.; AGUADO, R.; BILBAO, J. Catalytic pyrolysis of HDPE in continuous mode over zeolite catalysts in a conical spouted bed reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.85, p.345–351, 2009.

ELSDON, R., PAL, D., Waste to Energy Process Safety Challenges, 2011. IChemE Symposium Series Number 156, 2011

EMERGENCY EVENTS DATABASE (EM-DAT). **Query Tool**. Disponível em < <https://public.emdat.be/> >. Acesso em 08 ago 2022.

ERICSSON, C. A. Barrier Analysis. In: HAZARD Analysis Techniques for System Safety. 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. cap. 19, p. 355-351. ISBN 9780471720195.

EUROPEAN COMISSION. EMARS – Deliverable **D18 - Final guideline for safe and eco-friendly biomass gasification**. Disponível em: < chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://task33.ieabioenergy.com/download.php?file=files/file/publications/new/gasification_guide_final_guideline_for_safe_and_eco_friendly_biomass.pdf >. Acesso em 03 ago 2022.

EUROPEAN COMISSION. EMARS – Fire **involving hydrocarbons**. 2018b. Disponível em: < <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/accident/view/49e45aa7-1276-11e8-acbe-005056ad0167> >. Acesso em: 04 ago. 2022.

EUROPEAN COMISSION. EMARS – **Explosion at a pyrolysis plant**. 2020. Disponível em: < <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/accident/view/5180a5a5-2bed-fbee-4218-a2d651f156e27> >. Acesso em: 04 ago. 2022.

EUROPEAN COMISSION. EMARS – Release of **substances and fire in a vinyl chloride installation**. 1999. Disponível em: < <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/accident/view/92bf0e85-25ed-d365-3bda-c3f02e39c725> >. Acesso em: 03 ago. 2022.

EUROPEAN COMISSION. EMARS – **Accident in the vinyl chloride production plant of a petrochemical industry caused by maintenance**. 1991. Disponível em: < <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/accident/view/82fe19ff-b822-f699-2664-c7884ee33c92> >. Acesso em: 03 ago. 2022.

EUROPEAN COMISSION. EMARS – **Emission of pyrolysis fuel oil**. 2012a. Disponível em: < <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/accident/view/4e5caa18-9081-3472-652d-cc43d9a01b9f> >. Acesso em: 03 ago. 2022.

EUROPEAN COMISSION. EMARS – **Fire in two hydrocarbon storage tanks following a malicious act**. 2018a. Disponível em: <

<https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/accident/view/b16b15fc-5f3b-11e8-ba5c-005056ad0167> >. Acesso em: 03 ago. 2022.

EUROPEAN COMMISSION. EMARS – **Leak of pyrolysis benzine**. 2012b. Disponível em: < <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/accident/view/261716ed-8d7d-aa45-8e9c-044aee0a22c2> >. Acesso em: 03 ago. 2022.

EUROPEAN COMMISSION. EMARS – **Liquified flammable gas was released from a pipeline near a furnace and ignited**. 1993. Disponível em: < <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/accident/view/5845b3db-027f-ecae-bf65-93a187b77458> >. Acesso em: 03 ago. 2022.

EUROPEAN GAS PIPELINE INCIDENT DATA GROUP (EGIG) < <https://www.egig.eu/reports> >. Acesso em 07 jan 2023.

EWFM **Swivel Joint - Model 2833 - Stainless Steel Construction**. Disponível em: < <https://www.ewfm.co.uk/wp-content/uploads/2021/11/Stainless-Steel-Data-Sheet.pdf> >. Acesso em 03 mar 2023.

EXCEL LOADING SYSTEMS (ELS). Disponível em: < https://www.excelloading.com/assets/files/S20_DUAL_SEAL_SWIVEL_JOINT.pdf?r=false >. Acesso em 03 mar 2023.

FAILLACE, J. G. **Eficiência de argilas pilarizadas como catalisadores na pirolise de gasóleo com polietileno para produção de óleo combustível**. 2017. 149f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO) **Woodgas as an Engine Fuel**, Forestry Paper 72. United Nations, Rome, 1986.

FRIGO, S., SEGGIANI, M., PUCCINI, M., VITOLO, S., Liquid fuel production from waste tyre pyrolysis and its utilisation in a diesel engine. **Fuel** 116, 399–408, 2014.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DO RIO GRANDE DO SUL (FEPAM). **Processo administrativo nº 6348-05.67/18.1**: Indeferimento de licença prévia nº 00012/2020. Disponível em: < http://ww2.fepam.rs.gov.br/doclics/signed/2020/1099514_signed.pdf >. Acesso em 26 set 2021.

GAURH, P.; PRAMANIK, H. Thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste polypropylene for recovery of valuable petroleum range hydrocarbon. **International Journal of Research In Science & Engineering**. Special Issue: March 2018

GLEIS, M. Gasification and Pyrolysis? Reliable Options for Waste Treatment? **Waste Management, Volume 3 (Vivis)**, 403-410, 2012.

GLOBAL ALLIANCE FOR INCINERATOR ALTERNATIVES (GAIA). **Waste Gasification & Pyrolysis: High Risk, Low Yield processes for waste management: A technology risk analysis**, 2017, 16p.

GREGORY, M. R. Environmental implications of plastic debris in marine settings--entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, 364(1526), 2013–2025, 2009

GUEDES, E. **Procedimento Analítico Para Cálculo de Tensões Elásticas, em Interseções Ortogonais de Vasos de Pressão Cilíndricos**. Orientador: José Luis Drummond Alves e Eliane Maria Lopes Carvalho. 2007. 157 f. Tese (Doutorado) - Tese submetida ao corpo docente da coordenação dos programas de pós-graduação de engenharia da universidade federal do rio de janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de doutor em ciências em engenharia civil., Rio de Janeiro/RJ, 2007.

GUIMARÃES, L. S. Gerenciamento de riscos e segurança de sistemas. São Paulo: editora, 2003.

GUIMARÃES, L. S. Síntese de doutrina de segurança para projeto e operação de submarinos nucleares. *In*: GUIMARÃES, L. S. **Síntese de doutrina de segurança para projeto e operação de submarinos nucleares**. Orientador: Hernani Luis Brinati. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. f. 645.

HACKETT, C., WILLIAMS, R. B., DURBIN, T. D., WELCH, W., PENCE, J., ALDAS, R., JENKINS, B. M. & SALOUR, D. (2004) **Evaluation of conversion technology processes and products**, 2004, University of California. (Final Report).

HE, Z., LI, G., CHEN, J., HUANG, Y., AN, T., & ZHANG, C. Pollution characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds emitted from different plastic solid waste recycling workshops. **Environment International**, 77, 85–94, 2015.

HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE (HSE). **Failure rate and event data for use within risk assessments (28/06/2012)**. Disponível em: < <https://www.hse.gov.uk/landuseplanning/failure-rates.pdf> >. Acesso em 23 jan 2021.

HONUS, S., KUMAGAI, S., FEDORKO, G., MOLNÁR, V., & YOSHIOKA, T. Pyrolysis gases produced from individual and mixed PE, PP, PS, PVC, and PET—Part II: Production and physical properties. **Fuel**, 221, 346–360, 2018b

HORVAT, N., NG, F.T.T. Tertiary polymer recycling: study of polyethylene thermolysis as a first step to synthetic diesel fuel. **Fuel** 78, 459-470, 1999.

INSTITUTION OF CHEMICAL ENGINEERS (ICHEME). Disponível em: < <https://www.icheme.org/media/7141/causes-chemical-details.pdf> >. Acesso em 22 ago 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Regiões metropolitanas 2017**. Disponível em: < https://atlascolar.ibge.gov.br/images/atlas/mapas_brasil/brasil_regioes_metrropolitanas.pdf >. Acesso em 11 abr. 2023.

INTELLIGENT ENERGY – EUROPE (IEE). **Gasification Guide**, 2007.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (IARC). **IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans, Vol. 82: Some traditional herbal medicines, some mycotoxins, naphthalene and styrene**, Lyon, IARC Press, pp. 367–435, 2002

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (IARC). **IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans, Vol. 120: Benzene**, Lyon, IARC Press, 309p., 2018.

INTERNATIONAL POWER ECOLOGY COMPANY (IPEC). Pyrolysis plant disasters 18/12/2014. Disponível em < <https://i-pec.ru/en/useful-info/pyrolysis-plant-disasters> >. Acesso em 09 mai 2020.

JAMBECK, J. R., GEYER, R., WILCOX, C., SIEGLER, T. R., PERRYMAN, M., ANDRADY, A., Law, K. L. Plastic waste inputs from land into the ocean. **Science**, 347(6223), 768–771, 2015.

MING JIE. Environmental Equipment. **Batch tire plastic pyrolysis plant: technical parameters**. Disponível em: < https://www.mingjiegroup.com/products/Tire_plastic_Pyrolysis_Plant.html >. Acesso em 05 mar 2021.

JONGENEELLEN, F. Benchmark guideline for urinary 1-hydroxypyrene as biomarker of occupational exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. **The Annals of Occupational Hygiene**, 45(1), 3–13, 2001.

JOPPERT, Jr.N. Otimização da co-pirólise de gasóleo pesado com embalagens de PEAD pó-uso utilizando planejamento fatorial. 2015.124 f. Tese (Doutorado em Química Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, RJ.

JORGE, C. J. Apresentação pirolise 26 06 2018 parte 1 de 4. Youtube, 27 jun. 2018a. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=kSREXZGBxxM> >. Acesso em 02 jan. 2021.

JORGE, C. J. Apresentação pirolise 26 06 2018 parte 2 de 4. Youtube, 27 jun. 2018b. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=4lew4ltK5lc> >. Acesso em 02 jan. 2021.

JORGE, C. J. Apresentação pirolise 26 06 2018 parte 3 de 4. Youtube, 27 jun. 2018c. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=kGakpe0K-IA> >. Acesso em 02 jan. 2021.

JUNG, S.-H., CHO, M.-H., KANG, B.-S., & KIM, J.-S. Pyrolysis of a fraction of waste polypropylene and polyethylene for the recovery of BTX aromatics using a fluidized bed reactor. **Fuel Processing Technology**, 91, 277–284, 2010.

KALOGERAKIS, N., KARKANORACHAKI, K., KALOGERAKIS, G. C., TRIANTAFYLLIDI, E. I., GOTSIS, A. D., PARTSINEVELOS, P., & FAVA, F. Microplastics Generation: Onset of Fragmentation of Polyethylene Films in Marine Environment Mesocosms. **Frontiers in Marine Science**, 4, 2017.

KAMINSKY, W. MENZEL J., SINN, H. Recycling of Plastics, **Conversation and Recycling**, 1, 19, 1976

KUMAR R. Tertiary and quaternary recycling of thermoplastics by additive manufacturing approach for thermal sustainability. **Materials Today: Proceedings**. XXX(XXX)XXX, 2020

KUMAR, M. Application of Markov Modeling in soap making plant: A Case study. **International Journal of Electronics Engineering**. V.11, p.872-81, 2019.

KUMAR, S.; SINGH, R.K. Recovery of hydrocarbon liquid from waste high density polyethylene by thermal pyrolysis. **Brazilian Journal Chemical Engineering**. 28 (4), 659–667, 2011.

LEDESMA, E.B., KALISH, M.A., NELSON, P.F., WORNAT, M.J., MACKIE, J.C., Formation and fate of PAH during pyrolysis of fuel-rich combustion of coal primary tar. **Fuel** 79 (14), 1801–1814, 2000.

LEES, F. P. **Loss Prevention** in the Process Industries, Hazard Identification, Assessment and Control. 2nd Edition, London, 2005.

LEMANN, M. F. **Waste Management**. 1. ed. Bern; New York: Peter Lang, 2008. 381p.

LIBÉRATION. **Berre-l'Etang, la piste criminelle confirmée**. Disponível em: < https://www.liberation.fr/societe/2015/07/15/berre-l-etang-la-piste-criminelle-confirmee_1348580/ >. Acesso em 29/07/2022.

LOPES, E. J.; OKAMURA, L. A.; YAMAMOTO, C. I. formation of dioxins and furans during municipal solid waste gasification. **Braz J Chem Eng**; 32:87-97, 2015.

LUKOIL. **Fire outbreak at stavrolen complex brought under control; no health threat to population posed**. 2014. Disponível em: < <https://www.lukoil.com/PressCenter/Pressreleases/Pressrelease/fire-outbreak-at-stavrolen-complex-brought-under-c> >. Acesso em 25 abr 2023.

MACEDO, E.S. de. **Elaboração de cadastro de risco iminente relacionado a deslizamentos: avaliação considerando experiencia profissional, formação acadêmica e subjetividade**. 2001. 206f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2001.

MAKARICHI, L.; JUTIDAMRONGPHAN, W., & TECHATO, K. The evolution of waste-to-energy incineration: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 91, 812–821, 2018.

MCCAFFREY, W., COOPER, D., & KAMAL, M. Tertiary recycling of polyethylene: mechanism of liquid production from polyethylene by thermolysis/reactive distillation. **Polymer Degradation and Stability**, 62(3), 513–521, 1998

MCCAFFREY, W., COOPER, D., & KAMAL, M. The effect of short-chain branching on the thermolysis/reactive distillation of polyethylene. **J. Appl. Polym. Sci**, 73, 1415-1421, 1999.

MEESTERS, J. **Predicting the dispersion and deposition of particles released in a fire**. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven, The Netherlands, 2011, 95p. (Series Minor Research Project: toxicology & environmental Health Report 261).

MISKOLCZI, M.; ANGYAL, A.; BARTHA, L.; VALKAI, J. Fuels by pyrolysis of waste plastics from agricultural and packing sectors in a pilot scale reactor. **Fuel Processing Technology**. 90, 1032-1040, 2009

MUKHERJEE, C.; DENNEY J.; MBONIMPA E.G.; SLAGLEY J.; BHOWMIK R. A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 119, 2020

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). U.S. Department of commerce. **NIST Livro de química na web, SRD 69: Naphtalene - Condensed phase thermochemistry data**. Disponível em: < <https://webbook.nist.gov/cgi/inchi?ID=C91203&Mask=2#Thermo-Condensed> >. Acesso em 19 jan 2021b.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). U.S. Department of commerce. **NIST Livro de química na web, SRD 69: Benzo[a]pyrene - Gas phase thermochemistry data**. Disponível em: < <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C50328&Mask=1#Thermo-Gas> >. Acesso em 19 jan 2021d.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). U.S. Department of commerce. **NIST Livro de química na web, SRD 69: Benzo[a]pyrene - Phase change data**. Disponível em: < <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C50328&Mask=4#Thermo-Phase> >. Acesso em 19 jan 2021e.

NOGUEIRA, F.R. **Gerenciamento de riscos ambientais associados a escorregamentos: contribuição às políticas públicas municipais para áreas de ocupação subnormal**. 2002. 269f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

OLIVEIRA, A. O. **Modelo de Planta de Pirólise em 3D**. Disponível em: < <https://youtu.be/m9RTTrfb2ODg> >. Acesso em 01 nov 2023.

ONTARIO MINISTRY OF THE ENVIRONMENT (OME). **GUIDELINE A-7: Air Pollution Control, Design and Operation Guidelines for Municipal Waste Thermal Treatment Facilities**. 2009, 25p.

ORLANDO, V. O. **Licenciamento Ambiental de Unidade de Recuperação Energética – URE: Estudo de Caso URE Barueri**. Trabalho de Conclusão de Curso (Programa de Pós-Graduação em Conformidade Ambiental com Requisitos Técnicos e Legais) – Escola Superior da Cetesb, São Paulo, 71p., 2018

PIATTI, T. M.; RODRIGUES, R. A. F. **Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais**. Maceió: Edufal, 2005, 51p. il. – (Conversando sobre ciências em Alagoas)

POHANISH, R. **Sittig's Handbook of Toxic and Hazardous Chemicals and Carcinogens**. 6. ed. Norwich, NY: William Andrew, 2012. 3096 p. v. 1. ISBN 978-1437778694.

PONZIO, A., KALISZ, S., BLASIAK, W., Effect of operating conditions on tar and gas composition in high temperature air/steam gasification (HTAG) of plastic containing waste. **Fuel Processing Technology** 87 (3), 223–233, 2006.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BENTO GONÇALVES (PMBG). SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. **Edital de concorrência nº 017/2018, do tipo técnica e preço, para parceria público-privada (ppp), na modalidade de concessão administrativa, para a modernização, gestão, manutenção, otimização e geração de energia ambientalmente sustentável através do processo de tratamento dos resíduos sólidos urbanos no município de Bento Gonçalves**, 2018a. Disponível em: < http://ppps.bentogoncalves.rs.gov.br/uploads/downloads/Concorr%C3%AAncia_017_2018-_Usina_de_Reciclagem_PROC2.pdf >. Acesso em 26 set. 2021.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BENTO GONÇALVES (PMBG). SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. **Anexo III – da infraestrutura e operação** 2018b. Disponível em: < http://ppps.bentogoncalves.rs.gov.br/uploads/downloads/3_-_ANEXO_III_-_DA_INFRAESTRUTURA_E_OPERA%C3%87%C3%83O_-_OK1.pdf >. Acesso em 26 set. 2021.

PSOMOPOULOS, C. S., BOURKA, A., & THEMELIS, N. J. Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA. **Waste Management**, 29(5), 1718–1724, 2009.

RAGUSA, A.; SVELATO, A.; SANTACROCE, C.; CATALANO, P.; NOTARSTEFANO, V.; CARNEVALI, O.; PAPA, F.; RONGIOLETTI, M. C. A, BAIOTTO, F.; DRAGHI, S.; D'AMORE, E.; RINALDO, D.; MATTA, M.; GIORGINI, E. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta **Environment International**, v.146, p.1-8, 2021.

RIVM. **Reference manual bevi risk assessments**. Version 3.2. Bilthoven, 2009. 189 p. Translation of the: Handleiding Risicoberekeningen Bevi. Versie 3.2. Disponível em: < <https://www.rivm.nl/publicaties?objectid=rivmp:22450&type=org&disposition=inline> . Acesso em: 27 jun 2021.

ROHRMANN, B. **Risk perception, risk attitude, risk communication, risk management: a conceptual appraisal**. In: 15th TIEMS Annual Conference 2008, The International Emergency Management Society. Praha 2008

ROLLINSON, A. N. Fire, explosion and chemical toxicity hazards of gasification energy from waste. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries** v.54, p.273–280, 2018.

ROUX, M. V.; TEMPRADO, M.; CHICKOS, J. S.; NAGANO, Y. Critically Evaluated Thermochemical Properties of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. **J. Phys. Chem. Ref. Data**, v.37, n°4, 2008.

SÃO PAULO. Resolução SMA 79/2009. São Paulo, SP, Secretaria de Meio Ambiente 2014. Disponível em: <
https://smastr16.blob.core.windows.net/resolucao/2009/2009_res_est_sma_79.pdf >
Acesso em: 17 out. 2020.

SCHMIDT, M. Investigating risk perception: a short introduction (2004). PhD Thesis, Vienna, Austria.

SCOTT, D. S., CZERNIK, S. R., PISKORZ, J., & RADLEIN, D. S. A. G. Fast pyrolysis of plastic wastes. **Energy & Fuels**, 4(4), 407–411, 1990.

SHAH, N., ROCKWELL, J., & HUFFMAN, G. P. (1999). Conversion of Waste Plastic to Oil: Direct Liquefaction versus Pyrolysis and Hydroprocessing. **Energy & Fuels**, 13(4), 832–838.

SHARMA, B.K., MOSER, B.R., VERMILLION, K.E., DOLL, K.M., RAJAGOPALAN, N. Production, characterization and fuel properties of alternative diesel fuel from pyrolysis of waste plastic grocery bags. **Fuel. Process. Tech.** 122, 79–90, 2014

SHARUDDIN, S. D. A., ABNISA, F., WAN DAUD, W. M. A., & AROUA, M. K. A review on pyrolysis of plastic wastes. **Energy Conversion and Management**, 115, 308–326, 2016.

STANTEC. **Waste to energy**: a technical review of municipal solid waste thermal treatment practices Burnaby, BC, 2011. (Final report).

STEER, M.; COLE, M.; THOMPSON, R. C.; LINDEQUE, P. K. Microplastic ingestion in fish larvae in the western English Channel. **Environmental Pollution**, 226, 250–259, 2017.

STOLECKA, K. RUSIN, A. Analysis of hazards related to syngas production and transport. **Renewable Energy** v.146 p2535-2555, 2020.

SWEDISH SAFETY AND CHEMICALS AGENCY (SSCA). Failed inertia during process cause of explosion at pyrolysis plant in Joensuu. Disponível em: <
<https://tukes.fi/sv/-/epaonnistunut-prosessin-tytetys-syyna-rajahdykseen-joensuun-pyrolyysilaitoksel-1> >. Acesso em 27 dez 2020.

TANIMOTO, K. S. **Proposta de um questionário destinado a avaliar a percepção de risco relativa a um repositório de rejeitos radioativos**. Orientador: Prof. Dr. Goro Hiromoto. 2011. 75 p. Dissertação (Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Ipen, São Paulo, 2011.

THEMELIS N. J.; SHIN, D. Survey of MSW generation and disposition in the US. **MSW Management** p.18–24, 2015.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2001.

TISHMAN ENVIRONMENT AND DESIGN CENTER (TEDC). **U.S. Municipal solid waste incinerators: an industry in decline**. 2019. 87p.

TNO - The Netherlands Organization of Applied Scientific Research. **Guidelines for Quantitative Risk Assessment – Guideline for Quantitative Risk Assessment Purple Book**”. 3ed. The Hague, 2005.

TRIBUNAL DE CONTAS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL (TCE-RS). **Processo nº 016633-0200/18-5: IT - Análise de Esclarecimentos Processo de Inspeção Especial - Executivo/2018**. Disponível em: < https://portal.tce.rs.gov.br/app/visdoc-angular/anonimo/open/PRE/518727#&id_arquivo=1636819&tarjas=true >. Acesso em 26 set 2021.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Assessment of municipal solid waste energy recovery technologies** (Final REPORT-3-8-2021), 2021.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Initial List of Hazardous Air Pollutants with Modifications**. Disponível em: < <https://www.epa.gov/haps/initial-list-hazardous-air-pollutants-modifications> >. Acesso em: 17 fev. 2021c.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Naphthalene; CASRN 91-20-3 (CASRN 50-32-8)**. [S. /], 1998. Disponível em: < https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris_documents/documents/subst/0436_summary.pdf#nameddest=rfc >. Acesso em: 24 jan. 2021.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Frequent Questions about Energy Recovery from Waste**. Disponível em: < <https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/web/html/faq.html> >. Acesso em 15 fev 2021b.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Toxicological Review of Benzo[a]pyrene: executive summary** (CASRN 50-32-8), Washington, DC, 2017b. 9p. (EPA/635/R-17/003Fc).

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Fugitive Emissions and Fugitive Dust Emissions**. 1. ed. North Carolina: USEPA, 1975, 18 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **State of Practice for Emerging Waste Conversion Technologies Final Project Report**. North Carolina: USEPA, 2012, 82p.

WAITE, J. L. Land reuse in support of renewable energy development. **Land Use Policy**, 66, 105–110, 2017

WANG, L.; ZHANG, X. Bayesian Analytics for Estimating Risk Probability in PPP Waste-to-Energy Projects. **Journal of Management in Engineering**, 34(6), (2018). doi:10.1061/(asce)me.1943-5479.0000658

WEIBOLD. **Fire at a tire pyrolysis facility in the Netherlands**. Disponível em: < <https://weibold.com/fire-at-a-tire-pyrolysis-facility-in-netherlands> >. Acesso em 22 ago 2022.

WENSING, C. S.; ELIAS, F. M.; MENDES, H. G.; INOCENTE, I. S.; THIESEN, K.; MARCON, P. G. **Projeto de viabilidade técnico-econômica da instalação de uma unidade industrial de pirólise de pneus**. Orientador: Prof. Esp. Diogo Quirino Buss. 2018. 386 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Relatório Técnico/Científico apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à aprovação da disciplina de Projetos de Engenharia, Tubarão/SC, 2018.

WILLIAMS, E. A., & WILLIAMS, P. T. The pyrolysis of individual plastics and a plastic mixture in a fixed bed reactor. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, 70(1), 9–20, 1997.

WILLIAMS, P. T.; WILLIAMS, E. A. Interaction of plastics in mixed-plastics pyrolysis. **Energy Fuel**, 13:188–96, 1998.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Air quality guidelines**. Copenhagen: 2000, 288p. 2000.

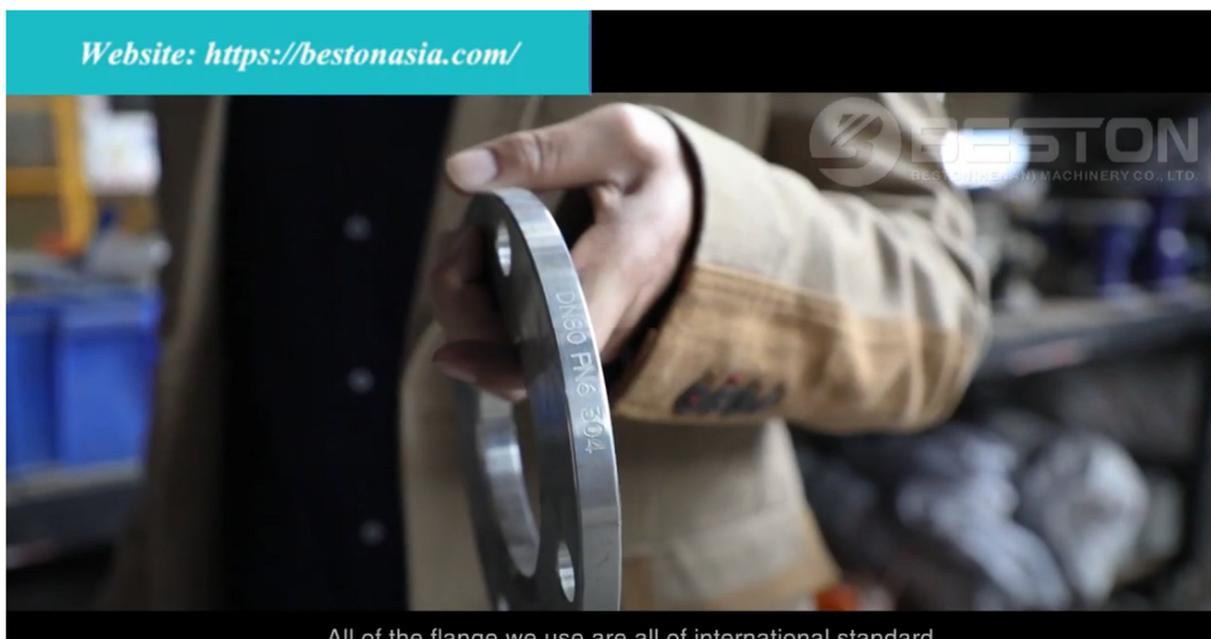
WONG, N. W. M. Advocacy Coalitions and Policy Change in China: A Case Study of Anti-incinerator Protest in Guangzhou. **VOLUNTAS: International Journal of Voluntary and Nonprofit Organizations**, 27(5), 2037–2054, 2015.

WSP ENVIRONMENTAL LTD. **Investigation into the performance (environmental and health) of waste to energy technologies internationally: stage One - Review of Legislative and Regulatory Frameworks for Waste to Energy Plants**. WSP Environmental Ltd, on behalf of the Government of Western Australia's Department of Environment and Conservation. 2013, 111p

XAVIER, José Carlos de Moura. **Riscos de eventos na-tech sob mudanças climáticas na região costeira do estado de São Paulo**. 2017. 112f. Tese de doutorado em Infraestrutura Aeroportuária — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

APÊNDICE A - Aspectos de uma planta de pirólise

De acordo com a Beston (2021c) os flanges utilizados apresentam a seguinte especificação DN 80 PN 6 304, isto é, projetada para ser montada com tubulações com Diâmetro Nominal de 80 mm e Pressão Nominal¹¹ de 6 bar.



As válvulas são feitas de cobre ou aço inox (BESTON, 2021c)

¹¹ A pressão nominal (PN) é o designador de classificação seguido por um número de designação, que indica a classificação de pressão aproximada em barras. PN vem do francês para pressão nominal, que é a taxa de pressão oficial, em vez da capacidade de pressão real de um tubo individual. PN é usado principalmente no sistema padrão europeu DIN, EN, BS, ISO, etc. A barra é a unidade de pressão, e 1 barra é igual a 14,5 psi ou 100 quilopascals (kPa).



O reator é feito em aço caldeira. O exemplo mostrado Foto 15 é um forno de pirólise com diâmetro de 2,6 m e comprimento de 6,6 m. De acordo com a Beston as paredes de seus fornos têm espessura de 16 mm. Mas há outros fabricantes que utilizam espessuras de 12 ou 10 mm

Foto 15 – Lateral do forno de pirólise (BESTON, 2021c)



A Foto 16 mostra os dois tipos possíveis de alimentação para fornos de pirólise de resíduos plásticos.

Foto 16 – Dois tipos de alimentação. Alimentação contínua (esq.) e batelada (dir.)



Foto 17 - Alimentação por meio de um conveyor (esteira transportadora)



Foto 18 - Dentes de engrenagem do forno



Foto 19 - Detalhe mostrando rolo e anel do reator



APÊNDICE B - Questionário

Pesquisa sobre percepção de risco sobre usinas de tratamento térmico

Propósito da pesquisa: Prezado(a), você está participando de uma pesquisa realizada pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ que tem como objetivo compreender a percepção de riscos do tratamento de resíduos em Usinas de Recuperação Energética (UREs).

Público alvo: pessoas envolvidas com a gestão ou gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.

Questionário: Por favor responda as questões abaixo da forma que melhor retratem as suas opiniões e/ou atitudes. O preenchimento do formulário leva em torno de 10 minutos.

Confidencialidade: O objetivo da pesquisa é científico. Os dados colhidos são genéricos e subjetivos, sendo analisados e tratados de forma agregada. Em nenhum caso, há a utilização ou revelação de nomes dos respondentes da pesquisa.

Responsáveis pela pesquisa:

Alex de Oliveira e Oliveira – Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente (alexwisk@gmail.com)

Dra. Mônica Regina da Costa Marques Calderari – Professora Orientadora do Doutorado (monicamarquesuerj@gmail.com)

Dra. Marinilza Bruno de Carvalho – Professora membro da banca de Doutorado (marinilza@sr2.uerj.br)

1. ABORDAGEM

Estratégica, cultural, político-social e técnico-científico

2. TIPO DE RESULTADO

Técnico, político, social e econômico

As questões a seguir dizem respeito a sua conscientização a respeito de Unidades de Recuperação Energética a partir de resíduos sólidos urbanos.

1) Imagine a seguinte situação: um estagiário na sua empresa precisa apresentar um TCC cujo tema deve estar relacionado com tecnologias de destinação de

resíduos no futuro. Qual tecnologia você o aconselharia como tema para que ele desenvolvesse seu TCC?

- 2) Que aspectos você considera mais importantes para que se escolha uma tecnologia de destinação de resíduos sólidos?

As afirmativas a seguir dizem respeito a sua conscientização a respeito de Usinas de Recuperação Energética a partir de resíduos sólidos urbanos. Marque de 1 a 3 o quanto você conhece sobre a gestão e gerenciamento de resíduos em seu município.

De acordo com a Resolução SMA nº 79/2009 da Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2014), Usinas de Recuperação Energética são quaisquer unidades dedicadas ao tratamento térmico de resíduos sólidos, com recuperação de energia térmica ou combustíveis gerados no processo. Incluem o tratamento por oxidação térmica e outros processos como a pirólise, gaseificação ou processos de plasma. Abrangem também toda a área do empreendimento, incluindo fornos, recepção e armazenamento; linhas de triagem; equipamentos de geração de energia e unidades de controle de poluição do ar e chaminés.

- 3) Quais tipos de Usinas de Recuperação Energética (UREs) você conhece?

	Nunca ouvi falar	Já ouvi falar	Conheço razoavelmente	Conheço bastante
Incineração	(1)	(2)	(3)	(4)
Gaseificação	(1)	(2)	(3)	(4)
Pirólise	(1)	(2)	(3)	(4)
Plasma	(1)	(2)	(3)	(4)

4) Você conhece a política nacional para Usinas de Recuperação Energética (UREs)?

(1)	(2)	(3)	(4)
Nunca ouvi falar	Já ouvi falar	Conheço razoavelmente	Conheço bastante

Riscos percebidos sobre as tecnologias de recuperação energética de resíduos sólidos

A seguir marque a alternativa que melhor representa seu ponto de vista em relação às afirmações:

5) Usinas de Recuperação Energética (URE) geram poluição do ar

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Discordo totalmente	Discordo	Não concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente

6) Usinas de Recuperação Energética (URE) geram efluentes

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Discordo totalmente	Discordo	Não concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente

7) Usinas de Recuperação Energética (URE) produzem outros tipos de resíduos sólidos

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Discordo totalmente	Discordo	Não concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente

8) Usinas de Recuperação Energética (URE) produzem poluição sonora

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
-----	-----	-----	-----	-----

Discordo totalmente	Discordo	Não concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente
------------------------	----------	-------------------------------	----------	------------------------

9) Usinas de Recuperação Energética (URE) causam odores desagradáveis na região

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Discordo totalmente	Discordo	Não concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente

10) Usinas de Recuperação Energética (URE) de resíduos sólidos causam impactos à saúde dos moradores locais

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Discordo totalmente	Discordo	Não concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente

11) Usinas de Recuperação Energética (URE) de resíduos sólidos podem sofrer explosões

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Discordo totalmente	Discordo	Não concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente

12) A presença de uma Usina de Recuperação Energética (URE) provoca o aumento do tráfego de veículos na região

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Discordo totalmente	Discordo	Não concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente

13) O armazenamento de resíduos a serem processados em Usinas de Recuperação Energética (URE) causam impactos ambientais

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Discordo totalmente	Discordo	Não concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente

14) A disposição de cinzas do processo recuperação energética de resíduos causa impactos ambientais

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Discordo totalmente	Discordo	Não concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente

15) Com que frequência você acha que acidentes podem ocorrer em Usinas de Recuperação Energética?

- Incapaz de ocorrência durante a vida útil da usina
- Tão improvável, que pode não ocorrer durante a vida útil da usina
- Improvável, mas possível de ocorrer durante a vida útil da usina
- É provável que ocorra em algum momento na vida útil da usina
- Ocorrerá várias vezes ao longo da vida útil da usina
- É provável que ocorra frequentemente ao longo da vida útil da usina

16) Com qual nível de gravidade você acha que acidentes podem ocorrer em Usinas de Recuperação Energética?

- Pode resultar em um ou mais dos seguintes itens: lesões ou doenças ocupacionais que não resultam em perda de dias de trabalho, impacto ambiental mínimo ou perda monetária inferior a US\$ 100 mil
- Pode resultar em um ou mais dos seguintes itens: lesão ou doença ocupacional, resultando em um ou mais dias perdidos de trabalho, impacto ambiental moderado reversível ou perda monetária igual ou superior a US\$ 100 mil, mas inferior a US\$ 1 milhão.
- Pode resultar em um ou mais dos seguintes itens: incapacidade parcial permanente, ferimentos ou doenças ocupacionais que podem resultar em hospitalização de pelo menos três funcionários, impacto ambiental significativo reversível ou perda monetária igual ou superior a US\$ 1 milhão, mas inferior a US\$ 10 milhões.
- Pode resultar em um ou mais dos seguintes itens: morte, incapacidade total permanente, impacto ambiental irreversível significativo ou perda monetária igual ou superior a US\$ 10 milhões.

As afirmativas de 14 a 22 dizem respeito aos benefícios proporcionados pelas atividades de Usinas de Recuperação Energética a partir de resíduos sólidos urbanos. Marque de 1 a 5 o quanto você concorda com cada afirmativa.

17) Usinas de Recuperação Energética (URE) proporcionam benefícios econômicos para o município

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Discordo totalmente	Discordo	Não concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente

18) Usinas de Recuperação Energética (URE) proporcionam benefícios ambientais para o município

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Discordo totalmente	Discordo	Não concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente

19) Usinas de Recuperação Energética (URE) promovem desenvolvimento econômico na região

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Discordo totalmente	Discordo	Não concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente

20) Usinas de Recuperação Energética (URE) geram empregos no município

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Discordo totalmente	Discordo	Não concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente

21) Usinas de Recuperação Energética (URE) promovem aumento de arrecadação para o município

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Discordo totalmente	Discordo	Não concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente

22) Usinas de Recuperação Energética (URE) ajudam a reduzir os gastos com de combustíveis fósseis

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Discordo totalmente	Discordo	Não concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente

23) Usinas de Recuperação Energética (URE) ajudam a reduzir o gasto com eletricidade

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Discordo totalmente	Discordo	Não concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente

24) Usinas de Recuperação Energética (URE) melhoram a qualidade ambiental nas suas vizinhanças

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Discordo totalmente	Discordo	Não concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente

25) Usinas de Recuperação Energética (URE) podem resolver o problema de disposição de resíduos sólidos urbanos

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Discordo totalmente	Discordo	Não concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente

As afirmativas a seguir dizem respeito das suas atitudes frente a Usinas de Recuperação Energética a partir de resíduos sólidos urbanos. Marque de 1 a 5 o quanto você concorda com cada afirmativa.

26) A tecnologia de Recuperação Energética (URE) é promissora

(1) Discordo totalmente	(2) Discordo	(3) Não concordo, nem discordo	(4) Concordo	(5) Concordo totalmente
-------------------------------	-----------------	--------------------------------------	-----------------	-------------------------------

27) Usinas de Recuperação Energética (URE) são a melhor maneira de tratar de resíduos sólidos

(1) Discordo totalmente	(2) Discordo	(3) Não concordo, nem discordo	(4) Concordo	(5) Concordo totalmente
-------------------------------	-----------------	--------------------------------------	-----------------	-------------------------------

28) É preferível a eletricidade gerada de Usinas de Recuperação Energética (URE) no lugar da gerada de usinas termelétricas

(1) Discordo totalmente	(2) Discordo	(3) Não concordo, nem discordo	(4) Concordo	(5) Concordo totalmente
-------------------------------	-----------------	--------------------------------------	-----------------	-------------------------------

29) É preferível a eletricidade gerada de Usinas de Recuperação Energética (URE) em vez da gerada de usinas hidrelétricas

(1) Discordo totalmente	(2) Discordo	(3) Não concordo, nem discordo	(4) Concordo	(5) Concordo totalmente
-------------------------------	-----------------	--------------------------------------	-----------------	-------------------------------

30) A construção de uma Usinas de Recuperação Energética (URE) fora do seu município deve ser apoiada pela população

(1) Discordo totalmente	(2) Discordo	(3) Não concordo, nem discordo	(4) Concordo	(5) Concordo totalmente
-------------------------------	-----------------	--------------------------------------	-----------------	-------------------------------

31) A construção de uma Usinas de Recuperação Energética (URE) no seu município deve ser apoiada pela população

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Discordo totalmente	Discordo	Não concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente

Perfil dos entrevistados

As questões a seguir visam entender qual é o perfil médio dos profissionais que atuam no ramo de gestão e/ou gerenciamento de resíduos sólidos

32) Instituição onde trabalha

33) Seu cargo

34) Nível hierárquico na instituição em que trabalha

- a) Presidente, Superintendente, Diretor ou Reitor
- b) Secretário Executivo ou Secretário Geral
- c) Coordenador ou chefe
- d) Técnico ou operacional

35) Qual a sua faixa etária?

() 18 a 25 anos

() 26 a 35 anos

() 36 a 50 anos

() 51 a 64 anos

() A partir de 65 anos

36) Grau de instrução

- a) Ensino fundamental
- b) Ensino médio
- c) Ensino técnico
- d) Ensino superior
- e) Pós-graduação

37) Tempo de atuação na área de gestão e/ou gerenciamento de resíduos

- a) até 5 anos de atuação
- b) de 6 a 10 anos de atuação
- c) de 11 a 20 anos de atuação
- d) de 21 a 30 anos de atuação
- e) mais de 30 anos de atuação

APÊNDICE C - Taxas de falha

P01 - Essa probabilidade refere-se ao erro de remontagem em uma operação de manutenção preventiva. A falha ao executar uma política da planta ou tarefas programadas, como testes periódicos ou manutenções realizadas semanalmente, mensalmente ou em intervalos maiores $1,0E-02$ (LEES, 2005, p.14/65).

P02 - Essa probabilidade se refere à alimentação do forno com aparas em tamanhos grandes o suficiente para causar obstrução na tubulação de saída do forno. Em condições normais de operação a falha em seguir um procedimento escrito é de $1,0E-02$ (LEES, 2005, p.14/65). Ou essa falha também pode se dar devido a um procedimento escrito em que se omite a necessidade de reduzir as aparas a tamanhos adequados para a operação do forno $3,0E-03$ (LEES, 2005, p.14/65). Assumindo-se que um ou outro evento pode ocorrer foi utilizada a soma dessas probabilidades que é **$1,3E-02$** .

P03 - Essa probabilidade refere-se à operação alinhamento das duas válvulas esfera posicionadas na saída do forno ou acionamento do sistema de purga. Para válvulas identificadas de forma clara e inequívoca, e que são parte de um grupo de duas ou mais válvulas semelhantes em um dos seguintes aspectos: tamanho e forma, estado ou presença de marcas a probabilidade de erro humano é de $3,0E-03$ (LEES, 2005, p.14/66).

P04 - Essa probabilidade refere-se a falhas nos flanges. Para flanges com diâmetro de 220mm e 2 mm de espessura a probabilidade de falha é de $3,0E-06$ (HSE, 2012, p.30). Foi assumido que os flanges de qualquer diâmetro apresentam a mesma taxa de falha, e como no reator de pirólise desenhado em 3D possui 33 flanges desse tipo, portanto, a probabilidade de falha para esses flanges foi considerada como sendo de **$9,9E-05$** por ano.

P05 - A taxa de falhas para válvulas submetidas a condições criogênicas é de 1 a cada 1.569.000 de horas (HSE, 2012, p.36) ou **$5,6E-03$** por ano.

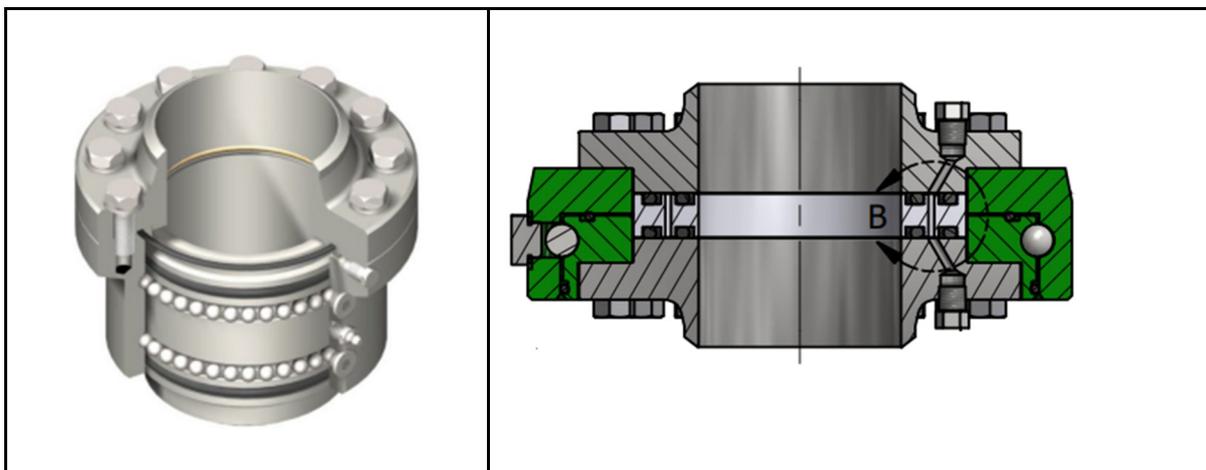
P06 - Não foram encontradas informações a respeito do sistema de purga de nitrogênio para um forno de pirólise de resíduos plásticos. Mas baseado em experiência profissional é comum que para esse tipo sistemas se utilizem tubulações com até 49 mm de diâmetro. Há registros de taxas de falhas para orifícios nesse tipo de tubulação de 3, 4 e 25 mm ou ainda uma ruptura total. Dado que o nitrogênio é fornecido por meio de cilindros as falhas capazes de impedir a entrada de nitrogênio no reator seriam o surgimento de um orifício de 25mm ($5,0E-06$ por metro por ano) ou de ruptura total ($1,0E-06$ por metro por ano) (HSE, 2012, p.47). Para soma de probabilidades de eventos independentes utiliza-se a fórmula a seguir:

$$P(A \cup B \cup C) = 1 - [(1 - P_A)(1 - P_B)(1 - P_C)]$$

Portanto, a taxa de falha para essa tubulação combinada é de $6,0E-06$ por metro por ano. Estima-se que essa tubulação tenha por volta de 5m de comprimento, o que leva a uma taxa de falha de **$3,0E-05$** por ano.

P07 - Não foi encontrada uma taxa de falha para juntas rotativas (*swivel joints*). Contudo, os componentes que mais sofrem desgastes numa junta rotativa são os anéis de vedação (*o-rings*). Para esse componente a taxa de falha é de 0,2 falhas a cada 10^6 horas (LEES, 2005, p. A.14/7). Considerando um regime de trabalho de 24 horas de funcionamento, equivale a uma taxa de falha de $1,75E-03$ por ano. Como as juntas rotativas comumente possuem, pelo menos, dois anéis de vedação descascados em vermelho nos exemplos abaixo (EWF, 2023; EXCEL, 2023). Uma falha da junta rotativa que resulte em vazamento ocorrerá se os

dois anéis falharem ao mesmo tempo, por isso a taxa de falha para esse equipamento foi assumida como sendo de $3,1E-06$.



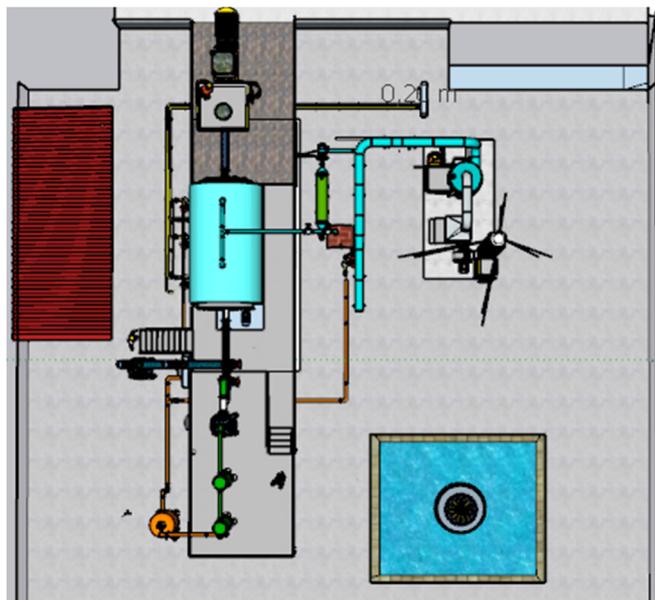
P08 - Para o gasômetro foi assumida uma taxa de falha para tanques de pequeno volume. Para eventos de bola de fogo foram consideradas as falhas referentes a vazamentos catastróficos e de grande monta, cujas taxas são respectivamente $1,6E-05$ e $1,0E-04$. As falhas combinadas resultam numa taxa de **$1,16E-04$** (HSE, 2012, p.10).

P09 - Na indústria do petróleo a probabilidade de colisão de um veículo com uma das linhas de um tanque esfera é de $1E-05$ por ano (LEES, 2005, p.22/75). Na maquete eletrônica desenhada assumiu-se a presença de pelo menos dois veículos que são um dos caminhões que realizariam o transporte de resíduos plásticos para a planta de pirólise ao longo dos dias e pelo menos uma empilhadeira trafegando próximos ao forno. Nesse caso considera-se que a probabilidade de colisão seria de **$2,0E-05$** .

P10 - Para queda de aeronaves as probabilidades são dadas no quadro a seguir:

Choques de aeronaves	Taxa de quedas por km ² por ano	Fonte
Aviões leves	$2,04E-05$	HSE, 2012, p.81
Helicópteros	$1,05E-05$	HSE, 2012, p.81
Avião de transporte pequeno	$2,60E-06$	HSE, 2012, p.81
Avião de transporte grande	$1,10E-06$	HSE, 2012, p.81
Aviões militares de combate	$4,10E-06$	HSE, 2012, p.81
Total	$3,87E-05$	HSE, 2012, p.81

Para a planta em questão a área considerada é mostrada abaixo e mede aproximadamente 800 m^2 ou $8,0E-4 \text{ Km}^2$. Proporcionalmente à área ocupada pela planta, a probabilidade de queda de aeronaves é de $3,1E-08$ por ano.



P11 - Um tipo de falha que pode ocorrer com válvulas de alívio é o travamento de modo que, em uma situação de pressão interna do recipiente acima da especificada, essa válvula **permaneça fechada**. Para esse tipo de falha a probabilidade é de $0,5 \times 10^{-6}$ por hora (HSE, 2012, p.35) ou **4,4E-03** por ano.

P12 - A omissão de uma etapa ou instrução importante de um procedimento formal ou ad hoc tem uma probabilidade de $3,0 \times 10^{-3}$ (LEES, 2005, p.14/75).

P13 - Há na literatura dados de probabilidade de abertura de orifícios nas paredes de reatores com diâmetros de 6, 13, 25 e 50 mm (HSE, 2012, p.30). A depender da pressão interna do reator no momento de um evento de jato de fogo em qualquer um desses tamanhos de orifícios pode haver consequências fatais. Por conservadorismo foi adotado o diâmetro que apresenta a maior probabilidade de ocorrência é o orifício de 50 mm. A taxa de falha do reator nesse caso é de **5,0E-06**.

P14 - Para tubulação com 220 mm de diâmetro, como aquelas posicionadas na entrada e na saída do forno, foi assumido que para um evento de **bola de fogo** seriam originados de um orifício correspondente a $1/3$ do diâmetro da tubulação ou ruptura total. As respectivas taxas de falha são de $4,0 \times 10^{-7}$ e $2,0 \times 10^{-7}$ por metro por ano, respectivamente (HSE, 2012, p.47). Então as probabilidades combinadas resultam numa taxa de $6,0 \times 10^{-7}$ por metro por ano. Considerando as tubulações referentes ao transportador helicoidal de alimentação e de saída e a tubulação que liga este último ao *scrubber*, o comprimento com base nas medições efetuadas na planta 3D é de 7,7 m. Portanto, a taxa de falha para esse tipo de tubulação para o evento de bola de fogo é de **4,6E-06** por ano.

P15 - Para tubulação com 220 mm de diâmetro, como aquelas posicionadas na entrada e na saída do forno, foi assumido que para um evento de **jato de fogo** seriam originados de um orifício correspondente a 25mm. A taxa de falha é de $7,0 \times 10^{-7}$ por metro por ano (HSE, 2012, p.47). Considerando as tubulações referentes ao transportador helicoidal de alimentação e de saída e a tubulação que liga este último ao *scrubber*, o comprimento com base nas medições efetuadas na planta 3D é de 7,7 m. Portanto, a taxa de falha para esse tipo de tubulação para o evento de bola de fogo é de **5,4E-06** por ano.

P16 - Um outro tipo de falha que pode ocorrer com válvulas de alívio é o travamento de modo que a mesma **não feche completamente** depois de solicitada ocasionando um

vazamento. Para esse tipo de falha a probabilidade é de 2×10^{-6} por hora (HSE, 2012, p.35) ou **1,75E-02** por ano.

P17 - O vazamento pode se dar por orifícios de diferentes tamanhos como os discutidos para P14 e P15. Por conservadorismo foi adotado a maior probabilidade, isto é, **5,4E-06** por ano.

P18 - Como se trata de um processo contínuo o forno passará quase todo o tempo com resíduos plásticos a serem processados. Por esse motivo foi considerada uma probabilidade de 100%, ou seja, **1,0E+00**.

P19 - A taxa de falha para válvulas esfera é de **5,0E-07** (HSE, 2012, p.35).

P20 - Para transportadores helicoidais a taxa de falha varia de 0,005 a 0,008 (KUMAR, 2019). Então foi assumida a taxa de **8,0E-02**.

P21 - Como se trata de um processo contínuo o forno passará todo o tempo na temperatura de trabalho entre 450°C e 500°C, ou seja, acima do ponto de ignição acima da temperatura de ignição do n-hexano que é de 225,2°C (CETESB, 2023a) e do n-nonano que é de 205,1°C (CETESB, 2023b). Assim, foi assumida uma probabilidade de **1,0E+00**.

P22 - A probabilidade de ignição de gás inflamável como o Gás Liquefeito de Petróleo ou o Gás Natural varia de 10^{-3} a 0,9 (LEES, 2005, p.8/61, p.9/30, p.9/55 e p.16/147) a depender do tipo e magnitude do vazamento. Por conservadorismo foi adotado a frequência de **9,0E-01**.

P23 - Para tarefas de rotina completamente familiares, bem projetadas e altamente praticadas, ocorrendo várias vezes por hora, executada nos mais altos padrões possíveis por pessoa altamente motivada, altamente treinada e experiente, totalmente ciente das implicações de falha, com tempo para corrigir erros potenciais, mas sem o benefício de auxiliares de trabalho significativos. Para essas situações a probabilidade de erro humano é de 4,0E-04 (LEES, 2005, p.14/75).

P24 - Restaurar ou mudar um sistema para o estado original ou novo seguindo os procedimentos, com algumas verificações. Para essas situações a probabilidade de erro humano é de 3,0E-03 (LEES, 2005, p.14/75).

P25 - Responder corretamente ao comando do sistema, mesmo quando houver um sistema de supervisão aumentado ou automatizado, fornecendo interpretação precisa do estágio do sistema. Para essas situações a probabilidade de erro humano é de 2,0E-05 (LEES, 2005, p.14/75).

P26 - Essa probabilidade refere-se a falhas nos flanges. Para flanges com diâmetro de 220mm e 2 mm de espessura a probabilidade de falha é de 3,0E-06 (HSE, 2012, p.30). Foi assumido que os flanges de qualquer diâmetro apresentam a mesma taxa de falha, e como no reator de pirólise desenhado em 3D possui 5 flanges desse tipo, portanto, a probabilidade de falha para esses flanges foi considerada como sendo de **1,5E-05** por ano.

P27 - Um estudo do sistema de detecção de incêndio e gás no terminal de gás em St Fergus. Os resultados relatados para as taxas de falha limitam-se aos detectores de gás, que ocorreram principalmente em cabines de compressores e salas de geradores de emergência. Hanks dá as seguintes taxas de falha:

	Taxa de falhas (falhas/10 ⁶ horas)	
	Cabine do compressor	Outras instalações
Detector de gás	48	8
Detector de gás e módulo	75	35

Para detectores em um ambiente não adverso, a taxa geral de falhas é avaliada como 0,057 falhas/ano, das quais 0,04 falhas/ano foram classificadas como seguras e 0,017 falhas/ano como perigosas. A maioria dos ambientes adversos resulta em uma taxa de falha muito maior. Para tais ambientes, a taxa de falhas foi avaliada em 4,6E-01 falhas/ano. (LEES, 2005, p.APPENDIX 14/28). Embora a literatura consultada não aponte uma taxa de falhas específica para detectores de oxigênio, é provável que esse tipo de detector apresente valores próximos aos detectores de outros gases. Como o detector de oxigênio considerado atuará dentro do forno, entende-se que o mesmo seria submetido a um ambiente adverso e, portanto, com uma estimativa de **4,6E-01** falhas por ano.

P28 - A taxa de falha esperada para aquecedores a gás é de $405 \cdot 10^{-3}$ por ano ou 4,05E-01 por ano (LEES, 2005, p12/95).

P29 - De acordo com o item 13.5.4.5 da Norma Regulamentadora do Ministério de Trabalho e Emprego (NR-13), para Categoria de Vaso I, a inspeção de segurança periódica, constituída por exames externo e interno, deve obedecer aos seguintes prazos máximos estabelecidos a seguir (BRASIL, 2019):

	Exame externo	Exame interno
Estabelecimento sem SPIE	1 ano	3 anos
Estabelecimento com SPIE	3 anos	6 anos

Foi assumido que a inspeção externa se dará no período de 1 ano, o que exigiria o desligamento do forno, pelo menos, no mesmo período, de forma que a probabilidade foi assumida como sendo de **1,0E+00**.

P30 - Para sensores de pressão a taxa de falha é de 1,41E-00 (LEES, p.APPENDIX 14/26).

P31 - Para sensores de temperatura a taxa de falha é de 8,8E-01 (LEES, p.APPENDIX 14/26).

P32 - Como apontado para P22, a probabilidade de ignição de um gás inflamável é de 9,0E-01. Para cada fonte de ignição há uma frequência como mostrado na tabela a seguir:

Tipo de ignição	Nº incidentes	Não ajustado	Fontes conhecidas	Probabilidade
Chama	8	9,3%	16,7%	1,50E-01
GLP ignizado	2	2,3%	4,2%	3,75E-02
Superfícies quentes	10	11,6%	20,8%	1,88E-01
Fricção	4	4,7%	8,3%	7,50E-02
Elétrica	8	9,3%	16,7%	1,50E-01
Partículas quentes	3	3,5%	6,3%	5,63E-02
Eletricidade Estática	6	7,0%	12,5%	1,13E-01
Fumantes	-	-	-	-
Autoignição	7	8,1%	14,6%	1,31E-01
Desconhecida	38	44,2%	-	-
Total	86	100,0%	100,0%	9,00E-01

A partir da tabela acima tem-se que a probabilidade de uma ignição oriunda de faíscas em equipamentos elétricos é de **1,5E-01**.

P33 - Seguindo o mesmo raciocínio, a probabilidade de ignição devido à eletricidade estática é de **1,13E-01**.

P34 - De acordo com o Grupo de Eletricidade Atmosférica do INPE, a densidade de descargas no município de Seropédica é de 7,2 por km²/ano - Ranking densidade nacional: 960; Ranking densidade estadual: 28 - (BRASIL, 2023). Como a planta considerada ocupa uma área de 800 m², tem-se nessa área tem-se uma frequência de raios de **5,76E-03** por ano.

P35 - De acordo com o portal Clima Tempo, os ventos podem ser classificados de acordo com a escala Beaufort. De acordo com essa escala, ventos de categoria 9 (75-88 Km/h) já são capazes de causar quedas de árvores e danos significativos às edificações (CLIMA TEMPO, 2023). A frequência de ventos desse tipo no município de Seropédica no ano de 2018 foi de **1,1E-04**.

P36 - A Cetesb (2014) preconiza a hipótese de ruptura catastrófica. Aquela norma dá a entender que para dutos uma “ruptura catastrófica” significa uma ruptura equivalente a 100% de diâmetro sem, no entanto, dar uma definição para vasos de pressão, como é o caso do forno de pirólise. O API (2008, p.474) estabelece que os orifícios em equipamentos são limitados a um diâmetro máximo de 16 polegadas (40,6 cm). A taxa de falha para uma ruptura catastrófica de um reator é de **1,0E-05** (HSE, 2012, p.30).

P37 - A probabilidade de ignição imediata para uma nuvem inflamável é de **2,0E-01** (CETESB, 2014, P.30)

P38 - A probabilidade de explosão em nuvem inflamável é de **4,0E-01** (CETESB, 2014, P.30).

P39 - A probabilidade de ventos vindos da direção ESE é de 1,2% de acordo com o levantamento feito por meio de BRASIL (2021), ou seja, **1,2E-02**.

P40 - A probabilidade de falha para um reator em que se forma um orifício de 50 mm é de **5,0E-06** (HSE, 2012, p.30).

P41 - A probabilidade para ignição retardada de nuvem inflamável com muitas fontes de ignição é de **9,0E-01** (CETESB, 2014, P.30).

P37 - A probabilidade de ignição imediata para uma nuvem inflamável é de **2,0E-01** (CETESB, 2014, P.30)

P38 - A probabilidade de explosão em nuvem inflamável é de **4,0E-01** (CETESB, 2014, P.30).

P39 - A probabilidade de ventos vindos da direção ESE é de 1,2% de acordo com o levantamento feito por meio de BRASIL (2021), ou seja, **1,2E-02**.

P40 - A probabilidade de falha para um reator em que se forma um orifício de 50 mm é de **5,0E-06** (HSE, 2012, p.30).

P41 - A probabilidade para ignição retardada de nuvem inflamável com muitas fontes de ignição é de **9,0E-01** (CETESB, 2014, P.30).