

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS URBANOS NA GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA NA CIDADE DE SÃO CARLOS**

Livia Sanches Andrade

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos

Orientador: Prof. André Bernardo, DEQ/UFSCar

São Carlos – SP

2023

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 13 de março de 2023 perante a seguinte banca examinadora:

Orientador: André Bernardo, DEQ/UFSCar

Convidada: Mônica Aguiar, DEQ/UFSCar

Professor da Disciplina: Paulo Waldir Tardioli, DEQ/UFSCar

AGRADECIMENTOS

Dedico o desenvolvimento e, principalmente, a viabilidade deste projeto aos meus pais, Alexandra e Roberto, que sempre me proporcionaram muito mais do que eu precisava para estar nesta faculdade e chegar até aqui. Agradeço e o dedico também aos meus avós, que se esforçaram muito em toda a sua história, puderam me proporcionar estudo e são exemplos de pessoas para mim. Em especial, a minha avó Arilda, por ser a grande razão de tudo e sempre me motivar e mostrar tanta força nos últimos meses.

Agradeço ao meu irmão Pedro, aos meus tios, aos meus primos e aos meus amigos por todo o apoio prestado nesses anos. Agradeço ao Lucas por me incentivar e confortar em momentos de dúvida e dificuldade. Agradeço a Letícia por toda a jornada que compartilhamos em São Carlos, e agora em São Paulo. Agradeço a Bruna e a Lauren por confiarem em mim. Por fim, agradeço ao meu orientador André por toda a condução fundamental na construção deste projeto.

RESUMO

Este projeto objetivou determinar a viabilidade da instalação de uma Unidade de Recuperação Energética (URE) na cidade de São Carlos. Para sustentar a tese, foi estudado o padrão atual de descarte de resíduos analisando seu impacto, de social a financeiro, e seu encaixe a longo prazo dentro da crescente vertente de sustentabilidade. Identificada a necessidade por rotas alternativas, foi feita uma comparação entre os modelos de aproveitamento energético por degradação térmica e sua aplicação em outros países.

Visto que esse conjunto de processos ocorre apenas em condições de queima favoráveis, foi feito um detalhamento da matéria-prima com base em informações fornecidas pelo Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos, pela Empresa de Pesquisa Energética e por demais estudos confiáveis. Através disso, foram obtidos os valores de poder calorífico e o potencial de energia gerada para a quantidade total de resíduos sólidos urbanos (RSU) produzidos por dia na cidade, de modo a se obter o primeiro sinal verde para a continuidade do projeto.

Seguindo para a análise financeira, foram feitas projeções de fluxo de caixa tomando como referência os investimentos iniciais e as condições de funcionamento da URE – Barueri, que será inaugurada em 2026, junto a gastos e lucros reportados em outras usinas funcionais. Através dos cálculos de valor presente, taxa de retorno inicial e tempo de payback, foram criados doze cenários com variação dos preços de energia, de crédito de carbono e de pagamento de empréstimos visando aproximar a simulação da realidade.

Por fim, foram comprovados os benefícios desse processo sustentável, criando teses sólidas para defender ainda mais o destino inteligente do lixo. Foram também expoentes dessa discussão a redução expressiva do volume de lixo, a geração de energia limpa em substituição a fontes não renováveis e a proteção social e ambiental garantida com a parcela de resíduos perigosos utilizada na queima.

Palavras-chave: *resíduos sólidos urbanos; geração de energia; sustentabilidade.*

ABSTRACT

This project aimed to determine the viability of installing an Energy Recovery Unit in São Carlos. To fundament the thesis, the impact of the current pattern of waste disposal was analyzed, from social to financial aspects, such as its long-term fit within the growing sustainability aspect. Once the need for alternative routes was identified, a comparison was made between the models of energy use by thermal degradation and their application in other countries.

Since this set of processes occurs only in favorable burning conditions, a detail of the raw material was made based on information provided by the Municipal Plan of Integrated Waste Management, the Energy Research Company, and other reliable studies. Through this, the calorific power values and the energy potential generated for the total amount of municipal solid waste (US) produced per day in the city were obtained, to obtain the first green light towards the project's goal.

Following the financial analysis, cash flow projections were made taking as reference the initial investments and operating conditions from the same type of industry in Barueri, which will be inaugurated in 2026, along with expenses and profits reported in other functional plants. Through the calculations of present value, initial rate of return, and payback time, twelve scenarios were created with variations of energy prices, carbon credit, and payment of loans to approximate the simulation of reality.

Finally, the benefits of this sustainable process have been proven, creating solid theses to further defend the intelligent garbage disposal. The exponents of this discussion were also the significant reduction of its volume, the generation of clean energy in place of non-renewable sources, and the social and environmental protection guaranteed with the portion of hazardous waste used in the burning.

Keywords: municipal solid waste; power generation; sustainability.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	8
LISTA DE FIGURAS	10
NOMENCLATURA	11
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. Geração e Depósito de Resíduos.....	15
2.2. ESG e as Grandes Empresas.....	21
2.2.1. Economia Circular.....	25
2.3. Classificação dos Resíduos.....	26
2.3.1. Resíduos Perigosos.....	27
2.3.2. O que diz o PNRS.....	30
2.4. Mudanças de Rota.....	31
2.4.1. Reciclagem e Reaproveitamento.....	32
2.4.2. Orgânicos e a Compostagem.....	36
2.4.3. Decomposição Anaeróbia e Biodigestão.....	38
2.4.4. Processos Térmicos.....	39
3. METODOLOGIA	51
3.1. Dados Base.....	51
3.2. Potencial Calorífico.....	59
3.3. Produção de Energia.....	62
3.4. Crédito de Carbono.....	62
3.5. Outros Lucros.....	64
3.6. Unidade de Recuperação Energética (URE).....	64
3.7. Outros Gastos.....	65
4. RESULTADOS	66
4.1. Receita.....	66

4.1.1.	Venda de Energia	66
4.1.2.	Venda de Subprodutos e Tarifa de Destinação Final.....	69
4.1.3.	Créditos de Carbono	69
4.2.	Cálculo dos Custos	69
4.2.1.	Custos e Despesas da URE.....	70
4.2.2.	Custos de Destinação de Cinzas e Inertes	71
4.3.	Fluxo de Caixa e Variação de Cenários.....	71
5.	DISCUSSÃO	76
5.1.	Análise dos Cenários.....	76
5.2.	Impacto na Economia.....	76
5.3.	Incertezas Atribuídas	77
6.	CONCLUSÃO	78
7.	REFERÊNCIAS	79
	<i>ANEXO A – Valores de Emissão Permitidos.....</i>	<i>86</i>
	<i>ANEXO B – Dados Teóricos de PCI.....</i>	<i>88</i>

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Disposição Final de RSU no Brasil por tipo de destinação, em toneladas por ano	16
Tabela 2 – Pontuação Média ISLU por Faixa Populacional	19
Tabela 3 – Pontuação Média ISLU por Faixa Populacional	20
Tabela 4 – Resíduos Perigosos e a Forma de Descarte	28
Tabela 5 – Classificação dos resíduos quanto à origem, segundo o PNRS	30
Tabela 6 – Classificação dos resíduos quanto à periculosidade, segundo o PNRS	30
Tabela 7 – Redução das emissões de CO2 decorrente da reciclagem no Brasil em 2019 por tipo de material, em toneladas	34
Tabela 8 – 15 itens mais encontrados nos mares do Brasil, em 2021, segundo estudos do programa Lixo Fora D'Água	36
Tabela 9 – Dados sobre a gestão de RSU ao redor do mundo	42
Tabela 10 – Comparativo de rendimento entre pirólise, carbonização e gaseificação com base seca madeira	46
Tabela 11 – Classificação de Rejeitos Consideradas por Kim (2019)	54
Tabela 12 – Gravimetria de São Carlos em porcentagem para 2018	55
Tabela 13 – Quantidade, em quilos, de Materiais Comercializados pela COOPERVIDA	56
Tabela 14 – Classificação dos Resíduos Industriais do Estado de São Paulo em 2010	57
Tabela 15 – Destinação dos Resíduos das Classes I e II	58
Tabela 16 – Estimativa da Composição dos RSS	58
Tabela 17 – Composição de C, H, O, N, S e w	61
Tabela 18 – Parâmetros de Geração de Energia	62
Tabela 19 – Parâmetros de Créditos de Carbono	64

Tabela 20 – Parâmetros de Outros Lucros	64
Tabela 21 – Investimento Inicial, Seguro e Manutenção	65
Tabela 22 – Cinzas e Inertes	66
Tabela 23 – Valores Obtidos pela Equação de Dulong Modificada	67
Tabela 24 – Valores Obtidos pela Equação de Lloyd e Davenport	67
Tabela 25 – Valores Obtidos pela Equação de Boye	68
Tabela 26 – Valores de PCI Médios e Descontado	69
Tabela 27 – Venda de Subprodutos e Tarifa de Destinação Final	69
Tabela 28 – Investimento da URE São Carlos em 15 anos	70
Tabela 29 – Investimento da URE São Carlos em 20 anos	70
Tabela 30 – Variação de Cenários Financeiros	71
Tabela 31 – Projeção de VPL	72
Tabela 32 – Projeção de TIR	73
Tabela 33 – Projeção de Payback Simples e Payback Descontado	75
Tabela 34 – Padrão de Emissão Nacional em mg/Nm ³	86
Tabela 35 – Padrão de Emissão Internacional em mg/Nm ³	87
Tabela 36 – PCI teórico 1	88
Tabela 37 – PCI teórico 2	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Destinação Final dos RSS segundo a Abrelpe	29
Figura 2 – Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos	31
Figura 3 – Volume de Materias Recicláveis Recuperados em 2019 por Categoria, em mil toneladas	33
Figura 4 – Processos Termoquímicos de Conversão de Biomassa	43
Figura 5 – Ilustração de Reator Pirolítico	45
Figura 6 – Diagrama de Gaseificação	46
Figura 7 – Visão Geral de um Sistema de Incineração	47
Figura 8 – Sistema de Combustão Martin GmbH	48
Figura 9 – Sistema de Coleta de Cinzas Martin	49
Figura 10 – Incinerador de Leito Fluidizado, retirado da sessão de equipamentos industriais da Kawasaki	50
Figura 11 – Incinerador de Eixo, retirado da sessão de equipamentos industriais da Kawasaki	51
Figura 12 – Composição Gravimétrica de São Carlos	52
Figura 13 – Detalhamento da categoria “Outros” na composição Gravimétrica de São Carlos	53
Figura 14 – Representação Ilustrativa dos Critérios de Gomes, Frésca e Kim.	54
Figura 15 – Distribuição, em quilos, dos materiais comercializados pela COOPERVIDA em 2018	56
Figura 16 – Projeção de VPL	73
Figura 17 – Projeção de TIR	74
Figura 18 – Projeção de Payback	75

NOMENCLATURA

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
Abrelpe - Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
Ambima - Associação Brasileira dos Mercados Financeiro e de Capitais
Amlurb - Autoridade Municipal de Limpeza Urbana
ANCAP - Associação Nacional dos Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis
Ancat - Associação Nacional dos Catadores
ASNS - Autoridade Nacional de Segurança Nuclear
BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CDC – Center for Disease Control and Prevention
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CGTI – Centro de Gestão de Tecnologia e Informação
CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear
DSD - Duales System Deutschland
ECHA – European Chemicals Agency
Emdurb - Empresa Municipal de Desenvolvimento Urbano e Rural de Bauru
EPA – Environmental Protection Agency
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
ESG - Environmental, Social, Governance
ETE - Estação de Tratamento de Efluentes
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH - Índice de Desenvolvimento Humano
IERSU - Inventário Energético de Resíduos Sólidos Urbanos
IPAM – Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia
Ipea – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
ISLU - Índice de Sustentabilidade da Limpeza Urbana
ISWA - International Solid Waste Association
ODS - Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
ONU - Organização das Nações Unidas
PCI - Poder Calorífico Inferior

PCS - Poder Calorífico Superior
PLANSAB - Plano Nacional de Saneamento Básico
PMGIRS - Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PNRS – Plano Nacional de Resíduos Sólidos
RSS - Resíduo de Serviço de Saúde
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
Selurb – Sindicato Nacional das Empresas de Limpeza Urbana
SIGRS - Sistema Integrado de Gerenciamento de Resíduos Sólidos
TIR – Taxa Interna de Retorno
URE - Unidade de Recuperação Energética
VPL – Valor Presente Líquido
WRAP - Programa de Ação para Desperdícios e Recursos
WTERT-USA – Waste to Energy Research and Technology Council
WWF – World Wide Fund For Nature
WWI – Worldwatch Institute
ZWE – Zero Waste Europe

1. INTRODUÇÃO

2 bilhões de toneladas de resíduos são produzidas anualmente no mundo, segundo a Organização das Nações Unidas (ONU). Atingindo cada vez mais cedo o Dia de Sobrecarga da Terra, a população não caminha a passos tão largos em direção à mudança, enquanto estudos indicam que seria necessário cerca de 70% de um novo planeta apenas para suprir a forma pela qual os recursos são utilizados e nosso lixo é gerado.

Nesse sentido, outro estudo da organização estima que 99% de todos os produtos comprados são descartados dentro de um período de seis meses. Este cenário é um dos frutos de uma cultura de consumo rápido, na qual tudo deve ser substituído e atualizado o quanto antes. Por isso, a enorme rotatividade nas prateleiras e, conseqüentemente, o grande despejo, ocasionaram a extração de 30% a mais de recursos do que o planeta conseguia repor a quase 15 anos atrás (WWF, 2008).

Não é racional discordar de que a tecnologia que proporciona isso é benéfica e necessária, e ainda, que não está sendo utilizada da maneira adequada. Contudo, como toda inovação, o período de adaptação se faz presente, e tende a ser um pouco caótico enquanto as leis e normas éticas não se adequam. No entanto, o atraso nesse desenvolvimento coloca a saúde do nosso planeta e seus habitantes em risco, ao passo em que os interesses econômicos e políticos crescem de forma irresponsável e tendenciosa.

O reforço dessa afirmação vem em saber que apenas 30 países são responsáveis pela metade do lixo total gerado, e que estes estão entre os mais ricos do mundo. Ainda, 500 milhões de pessoas, correspondente a 7% da faixa de maior poder aquisitivo, geram 50% de todo o gás carbônico emitido, ao passo que a faixa mais pobre responde por 6% das emissões (WWI, 2010). Recentemente, o tema tomou espaço na mídia quando uma gama de celebridades foi denunciada por ativistas após realizar voos em jatos particulares com duração de poucos minutos. Além do veículo ser de 5 a 14 vezes mais poluente que um avião comercial, em que um passageiro equivale a emissão de 54 kg de CO₂ por pessoa em uma hora (GOL, 2022), o trecho poderia ser facilmente concluído por um carro ou trem, ambos menos poluentes que o transporte aéreo.

Este é um exemplo claro de como o dinheiro e o imediatismo compram a consciência ambiental e comunitária. Ainda mais próximo a realidade da maioria, o filme “O Preço da Verdade – Dark Waters” (2020) relembra a batalha judicial entre o advogado Rob Billot e uma das maiores empresas do setor químico no mundo, a Dupont, a respeito do Teflon[®]. Descoberto em 1938 por

pesquisadores da companhia, o material, que dispunha de inúmeros estudos sobre sua toxicidade mantidos em sigilo, e matou animais e pessoas após ter excedentes de sua produção contaminando a água de rios e lençóis freáticos. O caso se torna ainda mais simbólico com o estudo feito pelo governo americano, em que é constatado que seus subprodutos estão presentes da corrente sanguínea de cerca de 98% da população (CDC, 2007).

A substância, politetrafluoroetileno, está associada a câncer de fígado, câncer de testículo, doenças na tireoide e nos rins (ECHA, 2019), e não deixou de ser comercializada em panelas antiaderentes por render bilhões em vendas da companhia, que em 2017 fez um acordo coletivo para pagar US\$ 671 milhões como indenização a mais de 3500 processos individuais movidos contra ela. Hoje em dia, existe uma grande regulamentação em cima do uso e comercialização do material, sendo que os níveis liberados por panelas durante o preparo de alimentos não é suficiente para causar grandes danos como na década passada. Vale lembrar que o composto se encontra na categoria de “substâncias eternas”, *forever chemicals*, ou seja, compostos que levam tanto tempo para se decompor que estarão no organismo “para sempre”.

Diante do relatado, e ainda mais recentemente citando a tragédia de Brumadinho em 2019, é imprescindível que a atenção voltada ao tratamento de resíduos seja construída com uma forte campanha de conscientização e colaboração. Neste contexto, termos como ESG, economia circular e *zero-waste* (zero descarte) se tornam cada vez mais populares e, além disso, exigidos, tanto por consumidores quanto por colaboradores. Para explorar mais o tema, o próximo capítulo trará maior embasamento nos âmbitos legislativos, educacionais e práticos.

Para complementar a teoria, o presente estudo irá analisar a aplicabilidade de usinas de recuperação energética, uma das rotas alternativas mais utilizadas na Europa, na cidade de São Carlos. Com isso, pretende-se defender a priorização do descarte consciente, os benefícios sociais e econômicos que o cercam e a previsão de um novo horizonte sustentável a partir de casos de sucesso reais.

Atualmente, não existem usinas desse tipo em escala industrial no Brasil, e para se entender melhor a dinâmica foi projetado seu fluxo de caixa, a avaliação do local para construção e o impacto deixado pelos resíduos após a queima. Foram consideradas também as condições adversas que podem afetar essa dinâmica e os empecilhos que poderiam impedir sua construção.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Feita uma breve introdução ao tema, neste capítulo serão abordados mais detalhadamente os processos e legislações que envolvem o descarte de resíduos, seus tipos, o impacto em empresas e as movimentações que a cultura ESG provoca.

2.1. Geração e Depósito de Resíduos

Por mais que a população mundial venha crescendo, este não é o principal motivo do aumento no volume de resíduos sólidos urbanos (RSU). Nos últimos 30 anos, a taxa de crescimento populacional foi três vezes menor do que o aumento do volume de lixo descartado, fazendo com que fosse alcançada a capacidade máxima de alguns dos maiores aterros sanitários do mundo. Este é o caso, por exemplo, do aterro de Jiangcungou, o maior da China. Esgotado em 2019, 25 anos antes do previsto, o local ocupa uma área de 700.000 m² e chegou a receber 10.000 toneladas diárias de lixo, 7.500 a mais do que foi projetado para acomodar (BBC, 2019).

Nessa linha, a expectativa para 2050 é uma escalada de 350% na quantidade de resíduos urbanos, segundo a ONU. E, como visto, o acúmulo de materiais descartados e orgânicos em um grande terreno não deve mais ser a melhor solução como se costumava pensar. Além de altos custos financeiros, o prejuízo ambiental abrange lençóis freáticos, vegetação nativa e o futuro da localidade, uma vez que 1 m² de terreno é perdido a cada 10 toneladas de lixo aterrado (WTERT-USA).

Antigamente, concentrar todo e qualquer tipo de rejeito empilhado longe das cidades parecia tirar um obstáculo de vista, literalmente. No entanto, apesar da confiança de que tudo iria se decompor e ser reabsorvido pelo solo ser fantasiosa, estudos demonstram que dois fatores principais levam ao reforço dessa ideia: os níveis de educação local e o de recursos financeiros voltados ao processo (Selurb, 2019). Embora os exemplos trazidos no capítulo anterior mostrem que pessoas sem carência em nenhum destes fatores sejam grandes contribuintes da poluição, vale ressaltar que seu comportamento é mantido por certa impunidade e brechas na regulamentação e códigos éticos, o que não é o foco deste trecho.

Sendo assim, vale pontuar também a diferença entre lixão e aterro sanitário, tanto do ponto de visto prático quanto ambiental e social. O chamado “lixão” se refere ao local onde ocorre o despejo dos rejeitos sem preparo nenhum do solo, sem separação de material e a céu aberto,

gerando contaminação da terra e da água, emissão de gases poluentes diretamente no ar e um ambiente extremamente insalubre com a presença de animais como urubus, ratos e outros, podendo ainda ser foco de doenças. Na localidade, geralmente clandestina, estão presentes pessoas marginalizadas trabalhando como catadores sem regulamentação, incluindo idosos e crianças, em busca de materiais que possam ser vendidos fora dali.

Já na segunda categoria, os aterros sanitários são locais com preparo e impermeabilização do solo, no qual é instalado um sistema de coleta de chorume a ser transportado para um centro de tratamento. Ademais, antes do encaminhamento a um aterro, ocorre a separação de parte dos recicláveis, reduzindo o volume encaminhado ao local. No Brasil, segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), em 2021 cerca de 60% de RSU gerado foi parar em aterros sanitários, enquanto o restante teve destinação inadequada. Para complementar, dados da Associação Nacional dos Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis (ANCAP) apontam que 65 mil toneladas de gases de efeito estufa foram poupadas de emissão graças ao trabalho de coleta feito por trabalhadores regulamentados nos aterros.

Tabela 1 – Disposição Final de RSU no Brasil por tipo de destinação, em toneladas por ano

Região	Disposição Adequada		Disposição Inadequada	
	t/ano	%	t/ano	%
Norte	1.773.927	35,6	3.209.013	64,4
Nordeste	6.016.948	36,3	10.558.666	63,7
Centro-Oeste	2.456.849	42,5	3.323.972	57,5
Sudeste	29.542.830	73,4	10.706.257	26,6
Sul	6.011.894	70,8	2.479.482	29,2
Brasil	45.802.448	60,2	30.277.390	39,8

Fonte: Adaptado de Abrelpe (2021)

Em um comparativo, parece lógica a ideia de destinar todo o lixo a aterros, e pôr fim aos lixões. Para isso, em 2010 o governo federal colocou em vigência a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que entre diversas resoluções coloca como prioridade a destinação correta dos resíduos, a eliminação de depósitos inadequados e o incentivo ao trabalho regulamentado dos catadores. Como escrito na seção II, do capítulo II, do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, Lei Nº12.305:

Art. 15. A União elaborará, sob a coordenação do Ministério do Meio Ambiente, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, com vigência por prazo indeterminado e horizonte de 20 (vinte) anos, a ser atualizado a cada 4 (quatro) anos, tendo como conteúdo mínimo:

I - diagnóstico da situação atual dos resíduos sólidos;

II - proposição de cenários, incluindo tendências internacionais e macroeconômicas;

III - metas de redução, reutilização, reciclagem, entre outras, com vistas a reduzir a quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição final ambientalmente adequada;

IV - metas para o aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final de resíduos sólidos;

V - metas para a eliminação e recuperação de lixões, associadas à inclusão social e à emancipação econômica de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis (...) (BRASIL, 2010)

Portanto, é através do PNRS que o governo brasileiro incentiva e regulamenta qualquer tipo de organização a ter transparência em seus processos de descarte e/ou de tratamento dos resíduos que gera. Além disso, existe maior atribuição de responsabilidade em temas como coleta seletiva, redução de lixo e consciência ambiental, buscando promover um estilo de vida mais sustentável e uma melhor convivência em comunidade. Como grande meta, o programa entendia que todos os lixões brasileiros deveriam ser fechados até 2014. Em 2018, a lei colhe frutos atrasados com Alagoas se tornando o primeiro estado do Nordeste e o terceiro do país a cumpri-la.

Como novo incentivo, em 2019 o Ministério do Meio Ambiente lançou o Programa Nacional Lixão Zero, com o objetivo de dar maior suporte aos Estados na eliminação dos lixões e na gestão correta de resíduos. Em um primeiro momento, o plano elaborou uma análise detalhada da situação atual dos RSU, oferecendo um diagnóstico completo. Em seguida, a cartilha faz uma análise dos dados e desenha o cenário desejado para o país no trecho intitulado “Situação Desejada”, que é complementado com o terceiro capítulo de indicadores de qualidade. Por fim, o ministério apresenta um Plano de Ação com uma série de sugestões e instruções de enfrentamento do problema (Secretaria de Qualidade Ambiental, 2019).

Durante o texto, fica claro que há necessidade de atuação das três instâncias (federal, estadual e municipal) em conjunto, e ainda do acompanhamento sério em pesquisas e censos, visto que há grande divergência de dados nos aplicados até então. A dificuldade em se obter uma noção real do problema atrapalha a estruturação de sua solução, uma vez que o governo não saberia onde

e como agir. Para minimizar os efeitos disso, a tecnologia é uma grande aliada, ao passo em que softwares de acompanhamento inteligente vem sendo desenvolvidos. Este tipo de recurso automatizado faz a gestão e medição dos níveis de resíduos no local, mantendo o alinhamento da organização com os objetivos do programa.

Ademais, os dados gerados servem na elaboração do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, descrito no PNRS, um relatório que descreve os detalhes dos resíduos gerados em uma empresa, como seu tipo, a quantidade e a destinação. O documento, que deve ser elaborado por um profissional capacitado, há de ser entregue ao órgão responsável anualmente para mostrar que a empresa mantém boas práticas. Isso faz com que ela tenha direito a alguns benefícios, contudo, para empresas geradoras de resíduos industriais, prestadoras de serviços públicos de saneamento básico, serviços de saúde, construção civil, de serviços de transporte e atividades agropecuárias, a entrega do PGRS é obrigatória, em especial para a liberação de alvarás de suas atividades.

Outro momento importante no combate ao descarte incorreto de lixo foi a implantação do Marco do Saneamento, de 2020. Ele, que estabelece um novo prazo para o fim dos lixões no Brasil para 2024, adapta suas metas de acordo com o número de habitantes nas cidades e sua estrutura (Agência Brasil, 2021). Dentre suas pautas está a descontaminação do solo nos locais de antigos lixões, acompanhados pelo Programa Nacional de Recuperação de Áreas Contaminadas. Assim, a personalização de planos de ação para cada localidade se faz de fato muito importante, retomando o ponto colocado anteriormente de que as principais causas para o descarte incorreto de lixo são a defasagem educacional e financeira.

Segundo estudos feitos pelo Sindicato Nacional das Empresas de Limpeza Urbana (Selurb), os municípios com lixões possuem em média 11 pontos percentuais a mais em dependência financeira do Estado quando comparados a locais que destinam o lixo corretamente, chegando a 90,8%. Isso acontece pelo aumento da cadeia logística de separação, transporte, instalação e tratamento em aterros sanitários. Com isso, o processo exige mais mão de obra, afastamento da cidade, diversas normas de funcionamento, pontos de coleta, regulamentação de funcionários, e diversas outras etapas que o fazem não ser mais viável ou prioritário para a prefeitura local.

Dados retirados do Índice de Sustentabilidade da Limpeza Urbana (ISLU) de 2019, mostrados na tabela 2, reforçam o ponto de que cidades menores, que tendem a ser as mais necessitadas de repasses financeiros, possuem um sistema de destino do lixo mais precário e

destinam menos verba ao serviço (arrecadação específica). Nesse sentido, estima-se que cidades que destinam RSU a lixões gastam R\$ 76 mil mensais com isso, contra R\$ 534 mil gastos por locais que destinam corretamente. Contudo, o preço a se pagar no futuro é ainda mais alto, dado que o gasto para reparar a poluição gerada no descarte incorreto é 34 vezes maior do que o tido com a destinação adequada (Serlub, 2019).

Tabela 2 – Pontuação Média ISLU por Faixa Populacional

Região	Faixa Populacional	Cobertura Média do Serviço	Destinação Correta	Arrecadação Específica	ISLU médio
Norte	Acima de 250 mil	92%	33%	44%	0,620
	Entre 100 e 250 mil	81%	29%	36%	0,599
	Entre 50 e 100 mil	69%	7,7%	15%	0,514
	Abaixo de 50 mil	64%	11%	12%	0,553
Nordeste	Acima de 250 mil	95%	90%	60%	0,643
	Entre 100 e 250 mil	95%	35%	25%	0,588
	Entre 50 e 100 mil	80%	16,4%	12%	0,547
	Abaixo de 50 mil	64%	9%	3%	0,535
Centro-Oeste	Acima de 250 mil	99%	67%	67%	0,660
	Entre 100 e 250 mil	96%	55%	36%	0,642
	Entre 50 e 100 mil	90%	55%	45%	0,637
	Abaixo de 50 mil	77%	14%	19%	0,570
Sudeste	Acima de 250 mil	99%	96%	68%	0,675
	Entre 100 e 250 mil	97%	82%	60%	0,673
	Entre 50 e 100 mil	95%	76%	58%	0,669
	Abaixo de 50 mil	82%	51%	41%	0,637
Sul	Acima de 250 mil	99%	92%	85%	0,695
	Entre 100 e 250 mil	98%	100%	92%	0,709
	Entre 50 e 100 mil	93%	94%	85%	0,697
	Abaixo de 50 mil	71%	88%	78%	0,671

Fonte: Índice de Sustentabilidade da Limpeza Urbana (2019)

Alinhado ao PNRS, o ISLU foi criado em 2016 pela Serlub em parceria a PricewaterhouseCoopers (PwC) para se avaliar a adaptação dos municípios e cidades ao plano a partir de quatro pilares: o engajamento do município (fator E), sua sustentabilidade financeira (fator S), a capacidade de recuperação dos resíduos coletados (fator R) e o impacto ambiental provocado (fator I). Para o primeiro pilar, analisa-se também o IDH local e a porcentagem da população atendida pelo sistema de coleta. Para o segundo, é mensurada a arrecadação específica que o município destina a serviços de limpeza urbana em relação a sua despesa total.

Já no terceiro, é estudado o nível de recuperação de materiais que seguirão um processo de reciclagem. Por fim, o quarto pilar contabiliza a quantidade de RSU que segue uma destinação

incorreta a partir da quantidade de resíduos que seguem para a unidade irregular em relação ao total da população que é atendido pelo sistema de coleta. O cálculo final do índice é feito pela equação 1.

$$ISLU = 0,33284 \times E + 0,22421 \times S + 0,22215 \times R + 0,22080 \times I \quad (1)$$

Outro fator chave presente no relatório é o nível de reciclagem médio, mostrado na tabela 3, que se mostra baixo em patamares alarmantes, em cerca de 2%. Para fins de comparação, dados da International Solid Waste Association (ISWA) mostram que o índice é de 67% na Alemanha, 59% na Coreia do Sul, 58% na Áustria e 58% na Eslovênia, os países que mais reciclam no mundo. Ademais, dados do Ipea revelam que R\$ 8 bilhões seriam economizados anualmente se o Brasil reciclasse todo o lixo que destina a aterros e lixões.

Tabela 3 – Pontuação Média ISLU por Faixa Populacional

Região	Faixa Populacional	Reciclagem Média	ISLU médio
Norte	Acima de 250 mil	0,44%	0,620
	Entre 100 e 250 mil	0,43%	0,599
	Entre 50 e 100 mil	0,79%	0,514
	Abaixo de 50 mil	0,93%	0,553
Nordeste	Acima de 250 mil	1,30%	0,643
	Entre 100 e 250 mil	0,82%	0,588
	Entre 50 e 100 mil	0,80%	0,547
	Abaixo de 50 mil	0,55%	0,535
Centro-Oeste	Acima de 250 mil	1,49%	0,660
	Entre 100 e 250 mil	0,48%	0,642
	Entre 50 e 100 mil	1,40%	0,637
	Abaixo de 50 mil	1,83%	0,570
Sudeste	Acima de 250 mil	1,04%	0,675
	Entre 100 e 250 mil	1,93%	0,673
	Entre 50 e 100 mil	2,98%	0,669
	Abaixo de 50 mil	4,65%	0,637
Sul	Acima de 250 mil	3,49%	0,695
	Entre 100 e 250 mil	3,75%	0,709
	Entre 50 e 100 mil	5,04%	0,697
	Abaixo de 50 mil	8,20%	0,671

Fonte: Índice de Sustentabilidade da Limpeza Urbana (2019)

Ainda que países mais desenvolvidos, com maior poder de investimento, componham o topo da lista, o hábito de reciclar e cuidar bem do lixo que produzimos tem forte influência cultural

e educacional. Atualmente, sabe-se que a cada 10 ponto percentuais adicionados no nível de escolaridade de um local, a probabilidade de se haver um lixão cai em quase 4% (Serlub, 2019). No mesmo ano em que o estudo foi feito, a região Nordeste apresentava uma taxa de analfabetismo de 13,9% entre pessoas acima dos 15 anos, seguido por 7,6% na região Norte, 4,9% no Centro-Oeste e 3,3% nas regiões Sul e Sudeste (IBGE, 2019), as que apresentam maior ISLU. Especialmente na região Nordeste, três a cada cinco adultos não possuem ensino médio completo, estando concentrados na região mais da metade das pessoas nos graus mais baixos de escolaridade do país.

A consideração desses dados se faz importante pois é na escola e dentro de casa onde são ensinados os valores de um futuro adulto. Adotar uma lixeira a mais em casa para a coleta seletiva ainda não é uma opção para todos, visto que apenas 41% da população possui acesso a isso (SNS, 2019), mas não jogar lixo no chão, optar por produtos com menos embalagens descartáveis e buscar ressignificar objetivos que iriam para descarte, por exemplo, reflete uma consideração maior com a construção do local que será deixado para as gerações futuras. Assim, a consciência ambiental construída cedo conecta as crianças com a natureza e com seu poder em preservá-la. É sobre essa mudança nos comportamentos atuais e seu reflexo nas empresas que o próximo capítulo irá tratar.

2.2. ESG e as Grandes Empresas

Environmental, Social, Governance. Três palavras que não costumavam serem vistas juntas e hoje norteiam as estratégias das maiores empresas do mundo. Não só de interesse do mundo dos negócios, a sigla contou com um aumento de 150% em 2021 (Google Trends) nas buscas pelo seu significado. Afinal, o que é ESG? Também conhecido por ASG, em português, o termo foi consagrado em 2004 em um relatório do Pacto Global da ONU, elaborado junto ao Banco Mundial, e reforça a importância dos pilares ambiental, social e organizacional.

Em suma, “ESG” visa impulsionar organizações saudáveis a partir de uma boa governança, que não reflita desvios de caráter; de uma pegada sustentável, sem agredir o meio ambiente durante seus processos produtivos; e de uma boa responsabilidade social, se atentando a comunidade que impacta e compreendendo a influência que tem sobre ela, tanto negativa quanto positiva. Dito isso, percebe-se a relação entre a prática e a agenda 2030, na qual são elencadas 17 áreas de desenvolvimento, uma vez que voltar a atenção aos arredores de uma organização faz com que ela

enxergue pontos de melhora e crie soluções para sua comunidade, considerando seus colaboradores, fornecedores e consumidores.

Apesar de sua idealidade inspiradora, um motivador ainda maior para a aderência a essa estratégia surge pelo seu peso no setor financeiro das organizações. De acordo com uma pesquisa recente realizada pela PwC, 77% dos investidores deixarão de consumir produtos que não estejam alinhados aos valores ESG nos próximos anos. Ainda, apenas em 2020, R\$ 2,5 milhões foram colocados em fundos desse tipo (Morningstar, 2020). Outro ponto importante é seu alinhamento com a legislação atual, vide trecho do PNRS abaixo.

Art. 7º São objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos:

(...)

III - estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços; (...)

XI - prioridade, nas aquisições e contratações governamentais, para:

a) produtos reciclados e recicláveis;

b) bens, serviços e obras que considerem critérios compatíveis com padrões de consumo social e ambientalmente sustentáveis; (...)

XIII - estímulo à implementação da avaliação do ciclo de vida do produto. (BRASIL, 2010)

Para auxiliar as empresas em uma transição de sucesso, o Pacto Global oferece o *SDG Compass*, um guia composto por cinco passos que orientam a adoção de Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS, ou *Sustainable Development Goal*) e a implementação de novas atividades ligadas aos temas escolhidos. Basicamente, os objetivos e suas metas são apresentados ao leitor junto a um compilado de cursos e treinamentos. Após essa etapa, devem ser estabelecidos os indicadores guias das novas ações, visando medir a aderência às práticas e a nova cultura. Por fim, o guia instrui e incentiva a comunicação do progresso feito a partir de relatórios e da submissão de um Comunicado de Progresso (COP) no sistema da SDG. Essa transparência é de extrema importância, e promove um efeito benéfico a todas as partes.

Isso é também o que apontam as novas alterações feitas no ISE B3, ou Índice de Sustentabilidade Empresarial, criado pela empresa controladora da Bolsa de Valores do Brasil, a B3, em 2006. Para sua 17ª edição, foi implementado um questionário mais objetivo e acessível, com perguntas variando de acordo com a indústria, a divulgação pública do ranking global final e,

principalmente, o aumento da recorrência para duas vezes por ano (ISE B3, 2022). Todos esses pontos demonstram o quão urgente é a adaptação a bons hábitos na visão do mercado, ainda mais quando o tempo de medição é encurtado e uma listagem comparativa é divulgada.

Ainda se tratando de Brasil, dados da Associação Brasileira dos Mercados Financeiro e de Capitais (Ambima) mostram que a captação líquida de fundos da categoria sustentabilidade e governança teve um aumento de 787% nos primeiros meses de 2021 quando comparado ao mesmo período de ano anterior. Para potencializar seus índices e atrair investimentos, muitas empresas vem adotando estratégias para ampliar sua diversidade e inclusão, reduzir seu impacto ambiental e melhorar a gestão de seus funcionários e sua atmosfera interna.

Dentre as medidas tomadas, a criação de processos seletivos específicos para grupos minoritários dentro do quadro de colaboradores, o desenvolvimento de áreas e programas voltados ao bem-estar, a aproximação da comunidade local, e a reformulação da cadeia produtiva são as principais. O último, em específico, anda muito alinhado a chamada logística reversa, que consiste em atribuir ao produtor a responsabilidade sobre o destino correto do produto após sua venda ou seu consumo. Essa é uma relação defendida pelo PNRS, cujo artigo 33 aponta obrigatoriedade para alguns segmentos específicos.

Art. 33. São obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de:

I - agrotóxicos, seus resíduos e embalagens, assim como outros produtos cuja embalagem, após o uso, constitua resíduo perigoso, observadas as regras de gerenciamento de resíduos perigosos previstas em lei ou regulamento, em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama, do SNVS e do Suasa, ou em normas técnicas;

II - pilhas e baterias;

III - pneus;

IV - óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens;

V - lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista;

VI - produtos eletroeletrônicos e seus componentes. (BRASIL, 2010)

Ainda, duas ramificações do tema são exploradas. Primeiramente, a logística reversa “pós-venda” recai sobre produtos que ainda não foram comprados ou possuem pouco uso e apresentaram algum defeito ou impedimento da sequência de compra, seja por um erro no processamento do pedido, por intercorrências no transporte ou por outros fatores (Oliveira, 2005). Nesses casos, o item retorna a cadeia para ser reavaliado, ajustado ou refeito, e, por ser um ponto de perda de receita para as companhias, vale o alinhamento a novas tecnologias para reduzir ao

máximo sua incidência. Um exemplo prático é a adoção de inteligência artificial em câmeras de monitoramento de montadoras de automóvel ou outras linhas de produção, possibilidade a identificação de falhas antes da finalização da mercadoria.

Em segundo, na logística reversa “pós-consumo” o item segue o fluxo ideal, o consumidor atinge seu objetivo com o produto e sua posse não se faz mais interessante (Oliveira, 2005). É nesse fim de vida útil em que ocorre o descarte e a fabricante deve disponibilizar pontos de coleta para que seja feito o desmanche e/ou a reciclagem. Caso opte pela reciclagem e reaproveitamento de matérias-primas, a companhia deve ter uma melhora no seu lucro, uma redução de sua pegada de carbono e exploração de recursos, e um diferencial perante seus consumidores.

É por essa lógica que, apesar da lei trazer uma atenção especial a indústrias geradoras de resíduos perigosos, a relevância do tema fez com que outras empresas adotem medidas práticas além da destinação correta. Para praticar novos valores e se encaixar em uma economia circular, diversos negócios vêm sendo reavaliados e redesenhados, inclusive com a ajuda de terceiros, que orientam seus clientes na atribuição de valor aos excedentes e descartes de seus processos produtivos. Um dos nomes desse segmento é a Ambipar, que além de ressignificar diversos componentes, envolvendo-os em novos processos, e engrenar a circularidade da linha, também fornece suporte em grandes desastres ambientais, como o ocorrido em Brumadinho.

No começo desse ano, a empresa lançou seu aplicativo de redução de pegada de carbono com uma novidade: o foco em pessoas físicas. No Ambify, o usuário pode calcular seu impacto em uma simples refeição, ou até uma viagem, e ficar a par de formas de mitigar ou compensar os danos. No ano passado, o mesmo foi feito em parceria com o Bradesco, permitindo aos clientes do banco calcular seu impacto através de sua rotina, considerando seus meios de deslocamento, gastos de energia, gás e internet, entre outras atividades (Ambipar, 2022). Ao final da jornada, é gerado o valor de sua pegada, ou seja, o quanto de CO₂ emite com suas atividades, e o quanto de créditos seriam equivalentes na compensação.

Aqui, vale dizer que ambas as empresas neutralizam 100% de suas emissões em atividades operacionais, segundo a Ambipar, e garantem transparência em seus processos para ir na contramão do *greenwashing*. O termo, conhecido em português como “lavagem verde”, se refere ao marketing indevido, apoiado em afirmações falsas ou manipuladas, para passar uma imagem de ambientalmente segura ao negócio. Com o termo sustentabilidade em alta, é comum que todos os grandes nomes do mercado passem a defendê-la. No entanto, como a realidade exige mais que

plantar uma árvore ou utilizar qualquer tipo de selo, há quem recorra a propagandas enganosas em troca do sucesso.

Um dos grandes casos de *greenwashing* aconteceu em 2015, quando a Volkswagen utilizou um software para adulterar os dados das inspeções de seus veículos a diesel em um episódio conhecido como Dieseldiesel. Na ocasião, quase meio milhão de carros circularam violando a lei federal norte-americana, segundo a EPA, totalizando 11 milhões de veículos impactados no mundo todo com a premissa de fazê-los parecer menos poluentes do que realmente eram. A fraude, descoberta por pesquisadores do Conselho Internacional de Transporte Limpo (ICCT), provocou o recall de 8,5 milhões de unidades e, o que era para render bons frutos a empresa, transformou-se em multas milionárias, a prisão dos envolvidos e uma perda de credibilidade imensurável (BBC, 2015).

2.2.1. Economia Circular

Retomando os princípios da economia circular, em casos que as empresas realmente buscam a adesão ao método, existem alguns passos importantes a serem seguidos. Um deles é a atenção a todas as etapas do processo, como já falado, pois deve haver um cuidado maior ao que é eliminado, qual o tipo de excedente e qual está sendo seu tratamento, assim como a fonte das matérias-primas, seu processo de obtenção, suas alternativas mais sustentáveis e o impacto de sua extração na natureza. Além disso, é necessária uma reavaliação do próprio produto, em especial para o aumento de sua vida útil, suas atualizações, a taxa de reparabilidade, sua coleta pós-consumo, o reuso de suas partes e o nível de reciclagem do que não pode mais ser aproveitado. No meio tempo, durante a fabricação, é importante um estudo da quantidade de substâncias tóxicas utilizadas, o gasto energético dos maquinários e os impactos que a planta por si só traz.

Diante de tantos pontos de atenção, é evidenciado o conceito de Design Regenerativo, famoso pela aplicação do economista Walter Stahel e extremamente alinhado ao “Cradle to cradle”, ou “do berço ao berço”, como é também conhecida a economia circular. Aqui, são consideradas todas as etapas da cadeia, e reavaliadas até que não haja sobras prejudiciais ao meio ambiente (Ellen Macarthur Foundation, 2022). Para isso, há maior aplicação de produtos biodegradáveis, de energias limpas, um alinhamento a comunidade local e a colaboração dos consumidores.

Quem de fato contribuiu imensamente ao movimento é a Ellen Macarthur Foundation, uma referência em economia circular em todo o mundo. Além de trazer vasto conteúdo informativo em

seu site, a fundação trabalha com grandes empresas e governos para implantar mudanças e desenvolver estratégias inteligentes. Fortalecendo seu objetivo, ela criou a CE100, ou *Circular Economy Hundred*, uma rede composta por companhias, universidades e outras partes interessadas em buscar inovação, crescimento das práticas sustentáveis e preservação da saúde do nosso planeta. Informações adicionais a esta estão disponíveis em diversos artigos no site da fundação.

2.3. Classificação dos Resíduos

Embora a atenção que o tema tem ganhado seja imprescindível, não são todos os materiais que podem seguir os “três R’s”. Para entender melhor a destinação que cada material pode ter de acordo com suas especificações, em 2004 a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) elaborou a NBR 10.004, na qual detalha duas categorias principais para os RSU: perigosos (classe I) e não perigosos (classe II). Dentro da segunda, no entanto, são criadas as subcategorias “não inertes” (classe II A) e “inertes” (classe II B). Antes disso, o documento define resíduo sólido como explicado abaixo.

Resíduos sólidos: resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. (ABNT, 2004, pág. 1)

Assim, a partir do momento em que algo vira resíduo, o primeiro passo para sua classificação é observar sua cor, seu odor, seu estado físico e alguns aspectos gerais de homogeneidade para se obter uma descrição detalhada. Então, sua denominação é dada com base na atividade que o originou, do que é constituído, a qual atividade industrial pertence e novamente considerando seu estado físico. A terceira etapa de análise é indicar sua destinação correta entre aterro sanitário, no caso de resíduo não perigoso; aterro específico para resíduo perigoso; aterro de resíduo inerte, que também podem ser os aterros sanitários comuns; ou tratamento térmico, como compostagem, incineração, entre outros.

Para acomodar os pertencentes a classe I são mensurados sua inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Já na classe II A estão presentes os que não se enquadram na classe I mas apresentam características como solubilidade em água,

biodegradabilidade ou combustibilidade. Por último, a definição dos resíduos inertes da classe II B segue abaixo.

Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor. (ABNT, 2004, pág. 5)

A despeito de uma definição extensa, os resíduos de classe II B são aqueles que não alteram o solo nem a água, uma vez que não se decompõem ou demoram longos prazos para isso. São exemplos de materiais desse tipo pedras, vidro, areia, latas de alumínio, isopor e entulhos. Já na classe II A tem-se, como dito, materiais com potencial de combustão, solubilidade em água e biodegradação, assim como madeira, restos orgânicos, tecidos, gesso, papel, etc. Para ambas, o direcionamento será a reciclagem, a reutilização ou a deposição em aterros, regulamentados pela norma ABNT NBR 13.896/97.

Por fim, na classe I estão os resíduos que exigem cautela quando manipulados e transportados, e que não podem ser depositados em aterros comuns nem reciclados. Portanto, seu destino é regulado por um conjunto de normas, incluindo a ABNT NBR 10.157/87, que traz as especificações na construção de aterros especiais. Essa categoria será detalhada a seguir.

2.3.1. Resíduos Perigosos

Não obstante de todo descarte incorreto ser prejudicial a saúde e ao meio ambiente, alguns tipos de resíduos são mais agressivos e letais, em especial a curto prazo. Dentro da classificação de resíduos perigosos, o transporte e descarte correto possuem ainda mais exigências e regulamentações por tratar de produtos agressivos com risco à segurança. São considerados resíduos da classe I alguns dos presentes na tabela 4, acompanhados da forma de descarte sugerida.

Tabela 4 – Resíduos Perigosos e a Forma de Descarte

Material	Encaminhamento
Pilhas e Baterias	Coletores específicos localizados em lojas ou mercados
Lâmpadas Fluorescentes	Devolvidas ao revendedor ou em postos de coleta
Produtos Radioativos	Serviço especializado
Produtos Químicos	Serviço especializado
Lixo Hospitalar	A depender do grupo
Restos de Tinta	Solidificação, evaporação do solvente ou encaminhar a uma estação de tratamento para redução da toxidade
Pneus	Devolvidos em postos de coleta
Produtos Eletrônicos	Buscar orientação do fabricante e depositar em um ponto de coleta sem desmontar
Agrotóxicos	Devolver os excedentes em centrais de recebimento

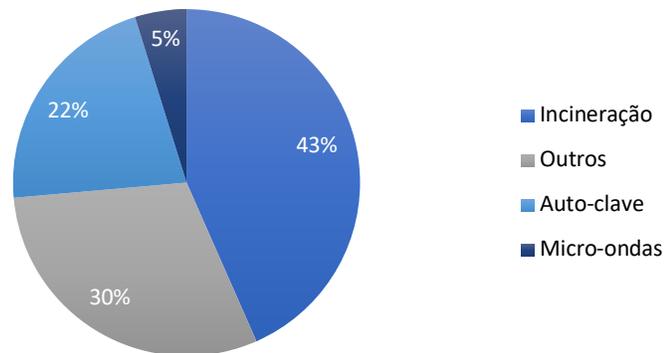
Fonte: UFSM, 2021

Contudo, vale ressaltar que a forma de descarte sugerida é baseada em uma premissa muito reforçada no caso de resíduos perigosos: a logística reversa. Como citado anteriormente, ela atribui a responsabilidade da destinação final do resíduo perigoso a seu gerador, ou seja, os diversos pontos de coleta de pilhas vistos nos supermercados são, na verdade, motivados por lei. Isso também faz com que diversos prestadores de serviço da área da saúde contratem empresas terceirizadas para lidar com seu lixo, principalmente por conter nele o risco radioativo, regulamentado por regras ainda mais rígidas. Uma delas, por exemplo, é a lei federal Nº 10.308, de 20 de novembro de 2001, que considera orientações e atribui responsabilidades à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e à Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ASNS).

Para os resíduos de serviços de saúde (RSS), são cerca de dez etapas na separação entre sua identificação, tratamento, transportes interno e externo e a disposição final em locais como proteção adequada. Portanto, logo no início do processo o lixo será classificado entre o Grupo A, de materiais possivelmente infectantes; Grupo B, de materiais que contenham substâncias químicas, como reagentes de laboratório; Grupo C, no qual estão os rejeitos radioativos; Grupo D, de resíduos comuns, como luvas e papéis; e, por fim, Grupo E, com instrumentos perfurocortantes.

Em especial nessa categoria, o mundo viu um crescimento inesperado de volume despejado, e apenas no Brasil foram coletadas cerca de 290 mil toneladas de resíduos em 2020 (Abrelpe, 2021), primeiro ano da pandemia da Covid-19. Contudo, mesmo com toda a informação, legislação e estrutura disponíveis, 30% dos RSS tiveram destinação inadequada (Abrelpe, 2021), como mostra o gráfico abaixo.

Figura 1 – Destinação Final dos RSS segundo a Abrelpe



Fonte: Adaptado de Abrelpe (2021)

Presente na memória da grande maioria, o acidente nuclear provocado pela explosão do reator 4 na Usina Nuclear de Chernobyl é um lembrete atual da importância desse tipo de legislação e fiscalização onde se utilizam resíduos radioativos, mesmo 36 anos após o ocorrido, justamente por apontar o quão letal e frágil é seu manuseio. Até hoje são vistas feridas deixadas pela liberação do que se estima equivaler a 100 vezes mais radiação do que continha a bomba atômica lançada sobre Hiroshima, ao passo que 5 milhões de pessoas vivem em território contaminado e houve aumento considerável da incidência de câncer de tireoide na região (GREENPEACE, 2016).

Outro expoente histórico é o acidente Césio 137, que ocorreu em Goiânia em 1987, e é considerado o maior acidente nuclear do mundo fora de usinas nucleares. Na ocasião, o manuseio inapropriado de um aparelho de radioterapia deixado em um hospital abandonado espalhou fragmentos de ^{137}Cs por toda a região, enquanto a população intrigada pelo pó azul brilhante (partículas de césio que se iluminavam azulados no escuro) o compartilhava curiosa. Até hoje, não há consenso sobre o número de vítimas, que são 120 pelo Governo Federal e 1032 pelo Governo do Estado de Goiás. Para tentar mitigar seus efeitos, 6 mil toneladas de material contaminados estão depositados em containers revestidos de concreto e aço, onde devem permanecer por 600 anos.

2.3.2. O que diz o PNRS

Segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, os resíduos sólidos podem ser classificados de acordo com sua fonte geradora e quanto a sua periculosidade, além de atribuir o nome “rejeito” apenas àqueles materiais que não possuem mais alternativas de reaproveitamento, tanto econômica quanto tecnologicamente viáveis. Para ilustrar melhor a divisão proposta, as informações foram dispostas na tabela 5, na classificação quanto a origem.

Tabela 5 – Classificação dos resíduos quanto à origem, segundo o PNRS

Classificação	Definição
Resíduos Domiciliares	Provenientes de atividades domésticas em áreas urbanas
Resíduos de Limpeza Urbana	Provenientes da limpeza de logradouros e vias públicas
Resíduos Sólidos Urbanos	Somatória dos resíduos domiciliares e de limpeza urbana
Resíduos de Estabelecimentos Comerciais e Prestadores de Serviço	Provenientes dos serviços comerciais exceto os de limpeza urbana, saneamento básico, serviços de saúde, construção civil e transporte
Resíduos dos Serviços Públicos de Saneamento Básico	Provenientes do saneamento básico exceto os domiciliares e de limpeza urbana
Resíduos Industriais	Provenientes de instalações e processos industriais
Resíduos de Serviços de Saúde	Provenientes dos serviços de saúde regulamentados pelo Sisnama e SNVS
Resíduos da Construção Civil	Proveniente de construções, reformas, reparos e demolições
Resíduos de Serviços de Transporte	Provenientes de portos, aeroportos, rodovias, ferrovias, fronteiras e alfandegas
Resíduos de Mineração	Provenientes de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios
Resíduos Agrossilvopastoris	Provenientes de atividades agropecuárias e silviculturais

Fonte: BRASIL, Lei Nº12.305, 2 de agosto de 2010

Já na tabela 6, é mostrada a classificação quanto a periculosidade, sendo divididos entre perigosos e não perigosos de acordo com o risco atribuído a sua existência e despejo.

Tabela 6 – Classificação dos resíduos quanto à periculosidade, segundo o PNRS

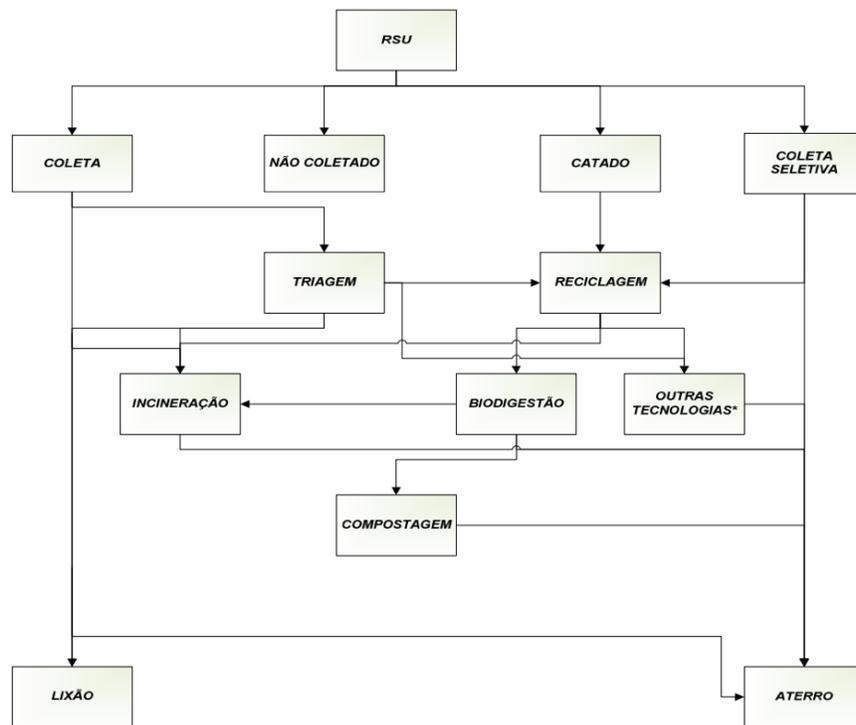
Classificação	Definição
Resíduos Perigosos	Aqueles que apresentam risco à saúde pública ou à qualidade ambiental devido a sua inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e/ou mutagenicidade
Resíduos Não Perigosos	Os demais, não enquadrados como perigosos

Fonte: BRASIL, Lei Nº12.305, 2 de agosto de 2010

2.4. Mudanças de Rota

Depois de todos os pontos abordados, nota-se o quão grandes são os desafios a serem enfrentados, mas não devem mais existir dúvidas sobre a importância em contorná-los. Como visto, os lixões deixaram de ser uma boa opção há muito tempo, e os aterros já não podem ser mais a via principal. Ademais, foi visto que nem todos os materiais podem ser reciclados, levantando o questionamento de qual seria a melhor estratégia senão essa, na qual é depositada grande expectativa. Para entender como destinar cada parte do que é descartado, serão melhor detalhadas aqui as alternativas viáveis na destinação de resíduos urbanos, e que estão compiladas na imagem abaixo, produzida pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) brasileira.

Figura 2 – Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos



Fonte: EPE

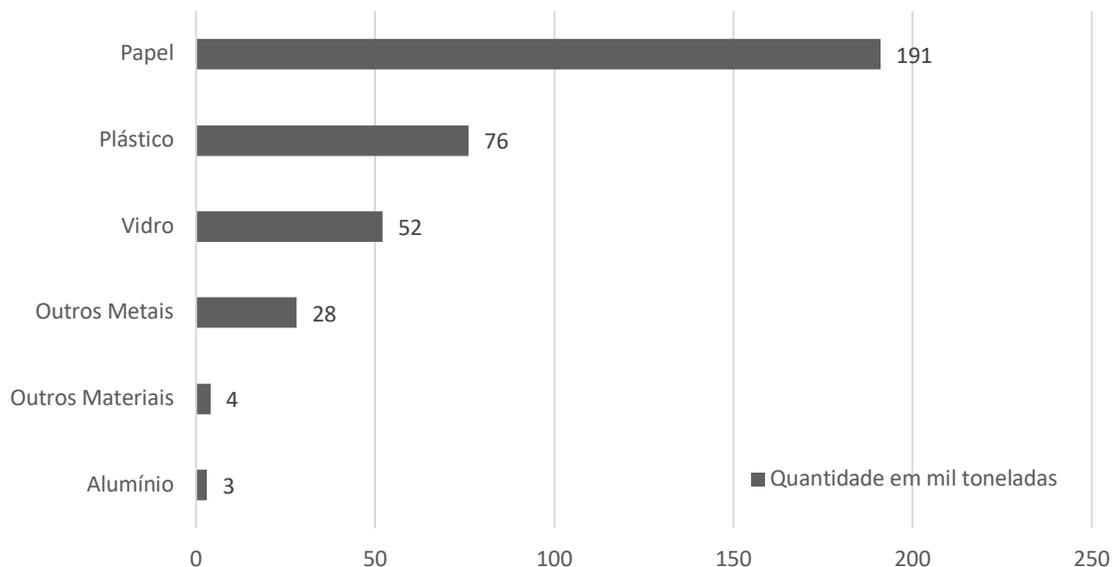
2.4.1. Reciclagem e Reaproveitamento

De início, a própria reciclagem será a primeira a ser destacada, afinal, este é um mercado que envolve cerca de US\$ 410 bilhões anualmente, segundo relatórios da União Europeia. Como se sabe, esse é um sistema que separa basicamente quatro grandes grupos: papel, metal, vidro e plástico. No entanto, dentro dessas categorias existem exceções. Para o caso dos papéis, os que possuem algum tipo de cola, como adesivos, etiquetas e fita crepe; sujeiras não removíveis, como guardanapos usados, papel higiênico e papel toalha; ou tipos especiais, como papel de fotografia, plastificados, metalizados ou parafinados, não podem ser reciclados.

Da mesma forma, na categoria de plásticos, itens como espumas, cabos de panela, protetores de tomada e acrílicos ficam de fora. Aqui, vale citar o isopor, que apesar de reciclável, não é de interesse das empresas devido ao grande volume que ocupa em seu transporte, versus seu baixo valor agregado. Já metais como grampos, esponjas de aço, latas de tinta e latas de combustível, também não são recicláveis, em parte pelo contato com substâncias perigosas. Por fim, para os vidros, não se enquadram as cerâmicas, louças e cristais por serem considerados impurezas em meio ao material desejado, ampolas de medicamentos (pelo mesmo princípio das latas) e espelhos. Mesmo que extensa, é importante que a separação correta seja respeitada para não prejudicar o material final ou os maquinários utilizados.

No Brasil, em 2019, dados da Ancat, a Associação Nacional dos Catadores, mostram um total coletado de 354 mil toneladas de material reciclável, cuja detalhamento está mostrado na figura 3. Como falado anteriormente a respeito dos valores culturais por trás da reciclagem e dos investimentos financeiros nos serviços de coleta, a região Sudeste é responsável por grande parte dessa arrecadação, mais de 40%, ou cerca de 141 mil toneladas (Ancat, 2021), seguida pelas regiões Sul, Centro-Oeste, Nordeste e Norte, respectivamente.

Figura 3 – Volume de Materias Recicláveis Recuperados em 2019 por Categoria, em mil toneladas



Fonte: Ancat (2021)

Falando mais sobre o vidro, apesar das limitações atuais que a tecnologia impõe sobre suas variantes, esse é um material que pode ser totalmente reciclado diversas vezes sem perda de propriedades essenciais. Por isso, cerca de 40% de uma garrafa de vidro hoje é feita de material reciclado, a pender para mais de acordo com sua coloração. Não obstante, um pedaço de vidro leva 5 mil anos para se decompor (AMBIVIDRO, 2019), ou seja, é hoje um material que pode ser totalmente aproveitado ou permanecer para sempre na natureza na falta dessa consciência ambiental.

O mesmo segue com o isopor, que leva mais de 400 anos, enquanto outros plásticos podem chegar a até 450 anos, e levanta o questionamento se os obstáculos para sua reciclagem são mesmo tão grandes e qual será o preço final disso. Para ilustrar ainda mais o impacto da reciclagem, a tabela 7 resume quanto CO₂ foi poupado de emissão devido a ação da coleta seletiva de 2019.

Tabela 7 – Redução das emissões de CO2 decorrente da reciclagem no Brasil em 2019 por tipo de material, em toneladas

Material	Volume Coletado		Emissões	
	Toneladas	%	tCO ₂ eq	%
PEAD	15.445	3,9	16.710	9,6
PEBD	23.613	5,9	33.253	19,1
PET	23.452	5,9	20.049	16,7
PP+OS	11.831	2,9	8.761	5,0
Plástico	74.341	18,6	87.773	50,4
Alumínio	3.217	0,8	27.022	15,5
Aço	27.914	7,0	35.451	20,3
Metal	31.131	7,8	62.473	35,8
Papel	190.822	47,6	22.827	13,1
Vidro	104.204	26,0	1.235	0,7
Total	400.498	100	174.308	100

Fonte: Ancat (2021)

Para fins de comparação, um estudo feito pela Orizon Valorização de Resíduos concluiu que 27 milhões de toneladas equivalentes de CO2 são emitidas por ano pelos mais de 3 mil lixões clandestinos do Brasil. Para coletar o volume equivalente a isso, seria necessário o reciclo de 62 milhões de toneladas de resíduos. Para o CEO da companhia, Milton Pilão, “2,1 milhões de toneladas de gás carbônico equivalente que deixam de ir anualmente para a atmosfera, a partir da valorização de resíduos (...) Seria o mesmo que plantar quase 20 milhões de árvores ou retirar mais de 1 milhão de carros das ruas anualmente”, como disse na COP26 (2021).

No país que mais recicla no mundo, a Alemanha, o percentual de resíduos enviados a aterros beira impressionantes 1%, fruto de políticas de incentivo a reciclagem, ao reaproveitamento e ao uso dos não aproveitáveis para geração de energia (Eurostat). Desde 2005, o país proíbe o despejo em aterros sem que haja tratamento prévio, e desde o século passado exige de seus municípios sua taxa de coleta de lixo (Comissão Europeia, 2012). Para incentivar a redução, o país entrega aos seus residentes um planejamento anual de como será a coleta de resíduos naquele local, o chamado *Abfalkalender*, um calendário e guia prático que ensina a fazer a separação do lixo.

Outro ponto, mais voltado as indústrias, foi a implantação do Sistema *GreenDot*, um ponto verde adicionado as embalagens para avisar o consumidor que a empresa produtora pagava uma taxa à DSD (*Duales System Deutschland*) para coletar e reciclar o material (SASSE, 2002). A DSD é uma organização formada na união das empresas de reciclagens alemãs e que cobre todo o

território, exceto Munique. Com a evolução e padronização do seu trabalho, estima-se que os materiais reciclados façam parte da matéria-prima da maioria das empresas do país.

Por último, um incentivo bem difundido é conhecido por “*pfand*”, que consiste em devolver ao consumidor o valor pago pelo recipiente da bebida que comprou (Deutsch Welle, 2021). Para isso, existem máquinas em praticamente todos os mercados locais nas quais qualquer pessoa deposita garrafas de vidro, plástico ou alumínio, e recebem um valor diferente na moeda local por cada uma. Hoje, estima-se que a taxa de retorno dos recipientes esteja acima de 98%, segundo o chefe de economia circular da ONG DUH. Isso também fez com que empresas passassem a utilizar menos plástico nas suas garrafas para facilitar sua reciclagem, economizando material e reduzindo o impacto da extração de matérias-primas.

Portanto, nem tudo que não é reciclável de fato chegou ao fim de sua vida útil e deve ser encaminhado a aterros, como visto. Com pouca (ou muita) ciência, coisas como o óleo de cozinha são salvos de fins inadequados e deixam de se tornar um grande poluente de rios e mares. Nesse caso, é através de um resíduo duvidoso que se obtém sabão perfeito para uso, inclusive em processos caseiros e, em uma escala maior, empresas conseguem produzir biodiesel da mesma fonte (Petrobras, 2014). No entanto, quando descartado incorretamente, o óleo polui as águas e intoxica animais, como baleias e peixes, ferindo todo o ecossistema de algas e plantas ao redor por prejudicar a entrada de luz solar (Abrelpe, 2021). Ademais, durante sua passagem por encanamentos pode aderir a parede das tubulações e bloquear os demais resíduos, causando entupimento.

Além dele, o plástico, item mais coletado para reciclagem, é também o mais encontrado em corpos hídricos. Como mostra a tabela 8, o isopor e as bitucas de cigarro compõem o topo do ranking. Na amostra, os quinze itens elencados representam 80% dos materiais totais, e os outros 20% são formados por roupas, itens de pesca, entre outros (Abrelpe, 2021). Do total, o Panorama dos Resíduos Sólidos de 2021 estima que 2 milhões de toneladas de RSU cheguem aos mares todo ano.

Tabela 8 – 15 itens mais encontrados nos mares do Brasil, em 2021, segundo estudos do programa Lixo Fora

D'Água

Nº	Material	Especificação	Quantidade	
1	Plástico	Fragmentos de plástico mole ou rígido	4.454	26,6%
2	Papel e Papelão	Bitucas de cigarro	2.849	17,0%
3	Plástico	Esferas plásticas	1.300	7,8%
4	Isopor	Isopor liso e granulado	1.336	8,0%
5	Plástico	Tampas, lacres e argolas	841	5,0%
6	Plástico	Talheres descartáveis	423	2,5%
7	Plástico	Hastes de cotonetes e pirulito	409	2,5%
8	Plástico	Tubos de eppendorf	382	2,3%
9	Papel e Papelão	Papel	339	2,0%
10	Metal	Lacres, tampas e recipientes	255	1,5%
11	Outros	Embalagem laminada de alimento	241	1,4%
12	Vidro e Cerâmica	Fragmentos de vidro	167	1,0%
13	Plástico	Sacolas plásticas	159	1,0%
14	Madeira	Palitos e talheres	147	0,9%
15	Plástico	Garrafas PET	135	0,8%

Fonte: Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (2021)

Ademais, em parceria com a Universidade de Leeds, do Reino Unido, o estudo concluiu que esse volume de plástico equivale a 690 mil toneladas. Segundo dados da Ancat, esse material foi responsável em média pela geração de 44% do faturamento de cooperativas em 2020, com esse número chegando a 66% na região Norte. Por fim, retomando o tema da tabela 8, a coleta desse material equivale a 50,4% de todo o CO₂ equivalente poupado na atividade (Ancat, 2021).

2.4.2. Orgânicos e a Compostagem

Expandindo a atenção no setor alimentício, os restos orgânicos flertam com o reaproveitamento, em especial com a ascensão do movimento *zero waste*. Não são poucos os conteúdos em mídias digitais ensinando como reviver a cenoura esquecida, preservar a alface por mais tempo ou utilizar cascas que iam para o lixo em um novo caldo. Principalmente em uma cultura global que joga fora 931 milhões de toneladas de alimentos por ano (FAO-ONU, 2019), essa atenção deve ser cobrada. Das prateleiras dos mercados, 17% é desperdiçado (FAO-ONU,

2019), enquanto registros de pessoas em situação de rua buscando comida em caminhões de lixo tomou os jornais no ano passado em Fortaleza.

Do montante geral, dados da Abrelpe refletem a postura negativa do brasileiro, que coloca seu país entre os 10 que mais perdem, no pré-consumo, e desperdiçam, no pós-consumo e transportação, alimentos no mundo. Aqui, são jogados no lixo 8,9 milhões de toneladas de resíduos orgânicos todo ano (Embrapa, 2018), dentre os quais apenas a quantidade de arroz seria suficiente para alimentar todas as 33 milhões de pessoas em situação de fome (Penssan, 2022). Em países mais desenvolvidos, como os Estados Unidos, o número chega a ser suficiente para alimentar toda a população do nosso país. Já na Grã-Bretanha, dados do Programa de Ação para Desperdícios e Recursos (WRAP) mostram que 70% do que é descartado está próprio para o consumo.

Voltando para dentro de nossas fronteiras, é ainda um reforço desse retrocesso saber que apenas 1% de todo o nosso desperdício é aproveitado em outra finalidade (Abrelpe, 2019), como em fertilização do solo e geração de energia. O restante, acaba em aterros e lixões, liberando gases nocivos, como o metano, ao ar livre todos os dias. A compostagem cruza perfeitamente esse caminho, dando fim a resíduos orgânicos e criando subprodutos, como o adubo, com pouco custo.

A cidade de São Paulo, por exemplo, conta hoje com cinco pátios desse tipo, que previnem até 15 mil toneladas de ir parar em aterros anualmente (Amlurb, 2019). Para que gere bons resultados, o processo deve utilizar as partes certas de compostos orgânicos ricos em carbono, como cascas de árvore, capim e feno, e em nitrogênio, como os restos de alimentos, borras de café e folhas. Essa relação é conhecida como proporção C/N e é essencial para os microrganismos ali presentes, como bactérias e fungos, que farão a metabolização.

Outro fator relevante é o controle da temperatura, que fica na faixa de 50°C a 65°C. Com o calor e o oxigênio, ocorre a decomposição biológica, que libera nutrientes e minerais na mistura. Para iniciar o processo, deve ser escolhido um local protegido de ações intensas, como ventos e chuvas, e podem ser usadas uma composteira ou outra área limpa. Então, devem ser depositadas camadas intercaladas de composto rico em carbono, de forma espaçada e cortados em pedaços pequenos, com o rico em nitrogênio. O primeiro tipo compõe a primeira camada, e o segundo tipo deve formar a última, sempre umedecendo bem e revirando periodicamente para aerar, acelerar o processo e evitar odores desagradáveis (Associação Caatinga, 2020).

Ao final do período de três meses, o composto resultante é um grande aliado ao preparo do solo, aumentando sua retenção de água, infiltração e resistência a erosão, e a recuperação de sua

fauna, ao fortalecer o processo de crescimento da vegetação futura e deixá-la mais resistente a parasitas (EPA). Contudo, isso não substitui os fertilizantes químicos em níveis nutricionais, exceto quando há fortificação e, devido a dificuldade no transporte, é recomendada sua produção descentralizada e local, atendendo a pequenas comunidades (HOORNWEG; OTTEN, 1999, apud ZAMBON, 2017, p. 48).

Platt e Goldstein (2014) caracterizam um sistema de compostagem como: aberto ou fechado, com aeração passiva ou ativa; com leiras estáticas ou com revolvimento; realizado no próprio local ou em instalações centralizadas. Inacio e Miller (2009) separam os principais métodos de compostagem em grupos conforme o tipo de aeração, grau de revolvimento das leiras, e se são realizados em leiras ou de forma confinada, como biorreatores. (...) Segundo Inacio e Miller (2009), os métodos mais utilizados são: leiras estáticas com aeração natural; leiras estáticas com aeração forçada; compostagem com revolvimento de leiras e compostagem em reatores (confinada). Além desses métodos, Platt e Goldstein (2014) incluem o método da vermicompostagem como um dos mais utilizados. (ZAMBON, 2017, p. 49)

Por mais que o princípio básico de uma técnica secular se mantenha, algumas adaptações e inovações foram atribuídas a compostagem, desde a vermicompostagem, que utiliza minhocas, até a criação de composteiras elétricas de pequeno porte, com ciclos de 24 horas. De qualquer maneira, o importante se faz aproveitar o material para a boa finalidade que ele pode ter, e este é um pensamento muito forte na Áustria, uma referência no tema com mais de 400 estações de compostagem (BAWP Statusbericht, 2021). Em uma delas, a Usina de Compostagem de Viena, estima-se que passem cerca de 120 mil toneladas de resíduos orgânicos anualmente. Ainda no viés da conscientização, são promovidos no país eventos sobre a gestão de resíduos que dão visibilidade a startups e apresentação de inovações (Advantage Austria), e reuniões organizadas por moradores para discussões locais.

2.4.3. Decomposição Anaeróbia e Biodigestão

Se na compostagem o oxigênio era um fator essencial, aqui ele é completamente dispensável, e um subproduto simples é somado a outro gerador de energia. Na decomposição anaeróbia, bactérias fazem a degradação de matéria orgânica hidratada no interior de biorreatores sem a presença de oxigênio. O processo, explorado desde o século XIX, ocorre em quatro etapas: hidrólise, acidificação ou fermentação, acetanogênese, e formação de metano (VRG, [s.d.]).

Na primeira, as cadeias mais complexas do material orgânico são quebradas em partes menores de açúcares, aminoácidos e gordura, que em seguida são fermentados e transformados em subprodutos que incluem dióxido de carbono e hidrogênio. Após isso, o que foi gerado na segunda fase é oxidado por bactérias acetogênicas, para que então bactérias metanogênicas possam decompor a matéria em metano (VGR, [s.d.]).

Assim como o acúmulo de resíduos orgânicos pode atrair animais indesejados e até mesmo doenças, o alto custo desse tipo de reator também desfavorece sua aplicação em muitas localidades. Contudo, a biodigestão resulta em um excelente composto biofertilizante e os gases liberados podem chegar a 96% de metano que, ao ser purificado, se torna biometano (EPE, 2014) e é utilizado na geração de energia limpa (LIMA, 2021). Ademais, podendo ser alimentado por dejetos de animais e humanos, uma estação de biogestão tem grande utilidade em propriedades agrícolas, que passam a economizar e ser menos dependente da eletricidade e de adubo vindos dos centros.

Por fim, na composteira, a qualidade dos subprodutos é variada de acordo com a qualidade da matéria orgânica inserida, e da relação C/N, o que eleva a importância da separação dos materiais pré-processamento. Por exemplo, para a obtenção de um adubo de qualidade, devem ser retirados todos os contaminantes possíveis daquela matéria-prima (EPE, 2014). Segundo dados da EPE de 2002, uma média de 200 kWh/t RSU são obtidos considerando eficiência de 35%. Para melhorá-la, podem ser controlados o pH, a temperatura e o tempo de detenção hidráulico (TDH), pelo qual se estima a duração do processo (LIMA, 2021).

2.4.4. Processos Térmicos

Destinados os materiais recicláveis, reaproveitáveis e orgânicos, há ainda opções que vão mais a fundo no significado da frase “o lixo é ouro”. Como visto nos capítulos anteriores, os resíduos orgânicos podem gerar energia elétrica através da compostagem, no entanto, os processos de pirólise, gaseificação e incineração abrangem uma gama maior de “matérias-primas” e reduzem milhões de toneladas de RSU em até 90% de seu volume inicial, gerando energia elétrica (EPE, 2014). Aqui, basicamente qualquer RSU, exceto resíduos hospitalares dos grupos C e E (CONAMA, 2002), resíduos com alto teor de flúor e resíduos contendo metais pesados, podem parar nos fornos e reatores.

Contudo, por mais que essa possibilidade exista, não deve ser levada como regra. Existem diversas estratégias quando o assunto é a queima do lixo, seja pelo tipo de processo utilizado, pela rígida regulamentação ou ainda pela análise econômica e de viabilidade que relacionam quais

materiais funcionam melhor em cada destino. E isso tudo se faz necessário pois, por ter um princípio simples, 8% do total de resíduos gerados todo ano (IBGE) são queimados ilegalmente, liberando 256.000 toneladas de CO₂ equivalente na atmosfera (ISLU, 2019). Caso isso fosse feito pelo processo correto, a queima em locais com estrutura para transformar o biogás em energia geraria até 1,5 bilhão de kWh todo ano (ISLU, 2019), capazes de suprir a demanda de grandes centros urbanos (IBGE, 2020).

Contrastando benefícios como a drástica redução no volume de resíduos, o fato de ser uma energia limpa, com maior taxa de conversão (IPCC, 2011) e a eliminação de parte significativa dos resíduos perigosos (LOMBARDI; CARNEVALE; CORTI, 2015), os processos térmicos enfrentam diversas críticas por seu alto custo e necessidade de regulamentação e fiscalização, visto que seus subprodutos exigem tratamento para serem liberados com segurança. Um exemplo dessa divisão acontece agora no Brasil, enquanto tramitam dois projetos de leis opostos no Congresso, o PL 4980/20 (Governo Federal, 2020), que busca proibir a prática, e o PL 4603/21 (Governo Federal, 2021), que a incentiva. O PNRS em si proíbe a queima descontrolada, como mostra o trecho abaixo extraído do capítulo VI.

Art. 47. São proibidas as seguintes formas de destinação ou disposição final de resíduos sólidos ou rejeitos: (...)

III - queima a céu aberto ou em recipientes, instalações e equipamentos não licenciados para essa finalidade; (...)

§ 1º Quando decretada emergência sanitária, a queima de resíduos a céu aberto pode ser realizada, desde que autorizada e acompanhada pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e, quando couber, do Suasa. (BRASIL, 2010)

Enquanto o Plano se refere a queima irregular, as normas CONAMA nº316, de 2002, acrescida da CONAMA nº386, de 2006, regulamentam os detalhes das operações térmicas, especificando quais materiais, métodos e tratamentos devem ser aplicados. Além disso, a norma destrincha quais as obrigações da empresa perante o governo, dentre elas a entrega do Plano de Inspeção e Manutenção do Sistema, quais são os limites de impacto ambiental (Limites Máximos de Emissão) e qual a qualificação de profissional exigida.

Art. 31. Todo sistema de tratamento térmico de resíduos deve dispor de:

I - Plano de Inspeção e Manutenção do Sistema, com registros completos das inter-venções de inspeção, manutenção, calibração;

II - Sistema de Automonitoramento, capaz de manter o registro dos efluentes discriminados nas condicionantes do processo de licenciamento.

Parágrafo único. Estes registros deverão ser disponibilizados integralmente ao órgão ambiental, sempre que solicitado. (CONAMA, 2002)

No mundo, o cenário também é de dualidade, enquanto alguns países aderem a prática e outros a condenam. Isso acontece pois ainda há o que se refinar na tecnologia de tratamento dos gases decorrentes da queima, e muitos ambientalistas criticam o gasto de materiais que poderiam ser reutilizados e reciclados em um processo linear, e não circular. Ainda sobre o tipo de material queimado, um melhor rendimento é obtido com produtos de maior capacidade calorífica, o que significa que países em desenvolvimento, onde grande parte do lixo é orgânica, o processo não é tão produtivo. O Inventário Energético de Resíduos Sólidos Urbanos, elaborado pela EPE, de 2014, também trata do tema com a afirmação abaixo.

Por necessitar de um poder calorífico mínimo, o que corresponde a teor mínimo de plásticos e similares – e está relacionado ao poder aquisitivo -, a incineração permite que, nos países mais ricos, sejam retirados recicláveis dos resíduos e, ainda assim, o material resultante mantenha condições de ser incinerado, o que é conhecido por “mass burning”. Já nos países de menor poder aquisitivo, a viabilidade desta tecnologia depende de segregação para retirada de restos alimentares e, assim, aumentar o teor dos combustíveis, reduzir o investimento e o custo operacional, o que é denominado “CDR – combustível derivado de resíduos”. (EPE, 2014)

Nesses locais, o avanço tecnológico vem permitindo que as análises de impacto reflitam melhores resultados, e que as discussões sobre a aplicação da prática sejam mais amigáveis, fazendo com que o número de licenciamentos cresça. Em países como a Suécia, 51% dos resíduos gerados em 2015 foram incinerados e 48% reciclados (MILIOS, 2013a apud EPE, 2014). Já na Dinamarca, a proporção é maior, com 54% terminando em usinas, a maior taxa da Europa, (ZWE, 2016) e 42% em reciclagem. No continente, todos os países possuem regras de biomonitoramento em seu quadro legislativo, no entanto, a associação Zero Waste Europe aprofunda essas análises de forma independente, alegando que as exigidas atualmente sejam insuficientes. Para uma visão geral, estão dispostos no quadro abaixo dados sobre a destinação de resíduos ao redor do mundo.

Tabela 9 – Dados sobre a gestão de RSU ao redor do mundo

País	Reciclagem	Compostagem	Recuperação Energética ⁽¹⁾	Aterro Sanitário
Holanda	39%	7%	42%	12%
Suiça	31%	11%	45%	13%
Estados Unidos	24%	8%	13%	55%
Austrália	20%	<<1%	<1%	80%
Japão	15%	-	78%	7%
Israel	13%	-	-	87%
França	12% ⁽²⁾	n.i. ⁽⁴⁾	40%	48%
Brasil	<8%	2%	-	>90% ⁽³⁾
Reino Unido	8%	1%	8%	83%
Grécia	5%	-	-	95%
Itália	3%	10%	7%	80%
Suécia	3%	5%	52%	40%
México	2%	-	-	98%

(1) Basicamente incineração

(2) Incluindo compostagem

(3) Incluindo lixões

(4) Não informado

Fonte: Inventário Energético dos Resíduos Urbanos (2014)

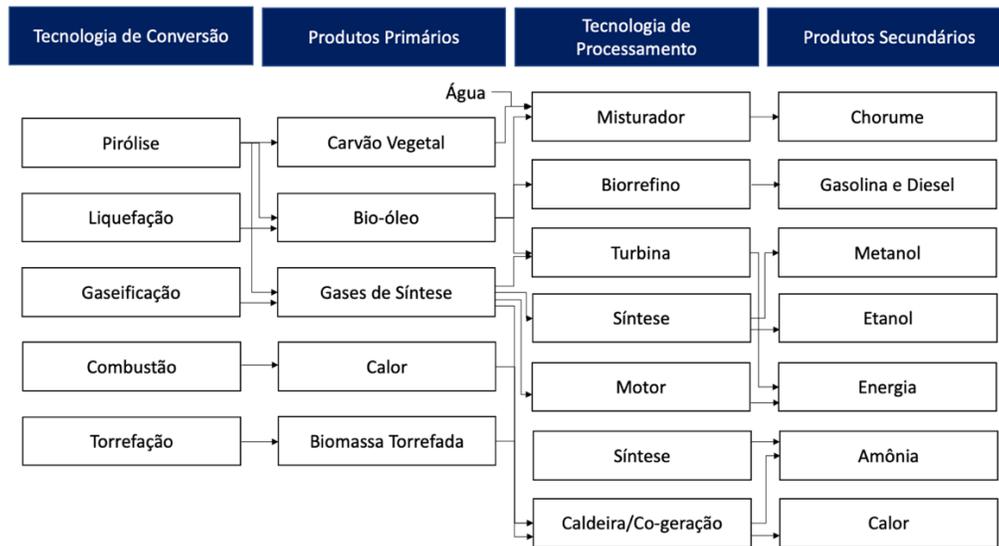
Diante disso, é importante notar o alinhamento entre as vias alternativas quando o aterro não é a principal rota do resíduo, para que não sejam perdidos potenciais substratos da reciclagem. E para uma estratégia de destinação eficiente, deve ser elaborado um plano diretor que, ao ser baseado na premissa de resíduo mínimo, recebe o nome de Sistema Integrado de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, ou SIGRS (EPE, 2014). Segundo o Conama, a orientação para os prestadores do serviço segue a atenção ao não desperdício:

Art. 24. A implantação do sistema de tratamento térmico de resíduos de origem urbana deve ser precedida da implementação de um programa de segregação de resíduos, em ação integrada com os responsáveis pelo sistema de coleta e de tratamento térmico, para fins de reciclagem ou reaproveitamento, de acordo com os planos municipais de gerenciamento de resíduos. (CONAMA, nº316, 2002)

Apesar das críticas ao tratamento térmico, o potencial de colaboração do metano ao efeito estufa é 21 vezes maior do que o dióxido de carbono (EPE, 2014), proveniente da sua queima. Isso aponta a necessidade de se consumir o composto com utilidade energética, e evitar grande parte da eliminação de resíduos perigosos via deposição em aterros e degradação natural. Ademais, não só esse “resíduo” tem grande aplicação, mas também as cinzas, que podem ser separadas dos metais e alumínio remanescentes misturados a elas, seguindo estes para reciclagem, e ter aplicação na pavimentação de ruas e concretagem, perante comprovação ao órgão regulador.

Aprofundando na teoria, um processo é considerado de degradação térmica quando ocorre a temperaturas superiores a 800°C (CONAMA) e altera a composição dos materiais envolvidos. Nos casos que serão abordados, os principais subprodutos variam e estão compilados na figura abaixo, retirada do Comunicado Técnico ISSN 2177-4447 da Embrapa (2015) em uma adaptação de Bridgwater (2008). Outras diferenças estão na pressão empregada, tempo de residência das moléculas e tamanho das partículas (Embrapa, 2015), e para entendê-las com maior detalhamento, vale discorrer sobre a construção, condições e desenvolvimento de cada tecnologia individualmente.

Figura 4 – Processos Termoquímicos de Conversão de Biomassa



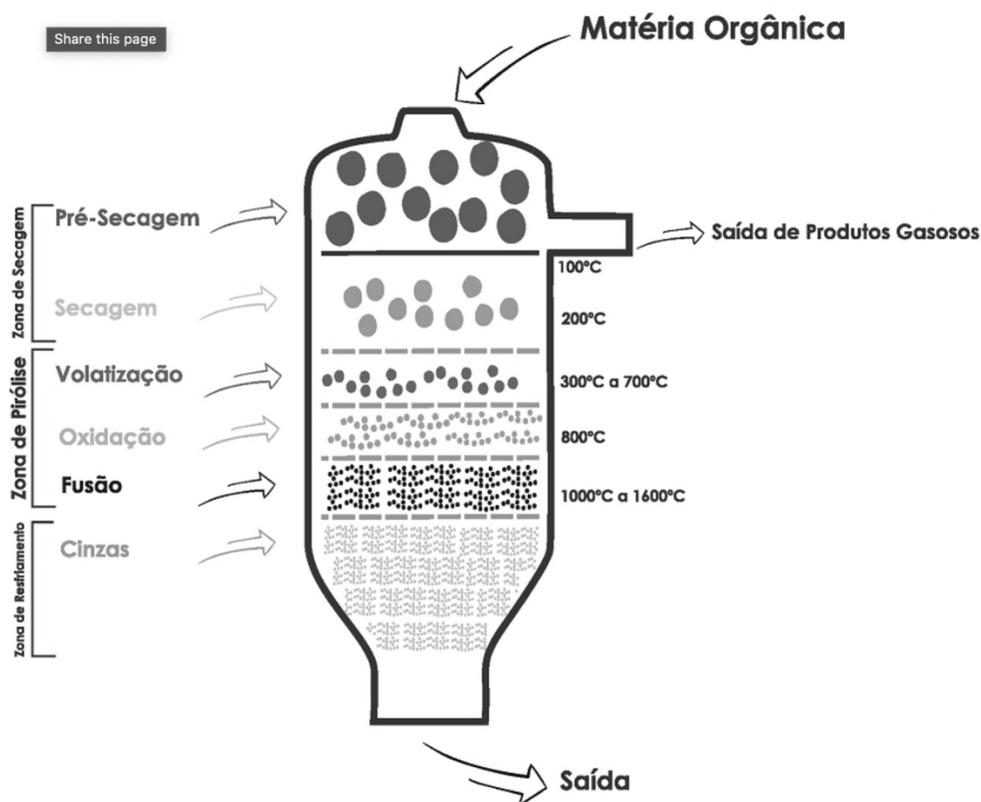
Fonte: Adaptado de Bridgwater (2008) apud Embrapa (2015)

De início, a pirólise é um dos métodos de tratamento térmico que consiste na degradação do material na ausência total ou quase total de oxigênio, e que ocorre basicamente em três zonas dentro do reator. Na primeira, ocorre a pré-secagem e secagem, em que fontes externas fornecem calor aos resíduos, retirando sua umidade e liberando gases como N_2 , CH_4 , H_2 , CO e CO_2 . Aqui, a temperatura varia de $100^\circ C$ a $200^\circ C$. Na segunda etapa, essa faixa sobe para $300^\circ C$ a $1600^\circ C$, e são formados o bio-óleo, álcoois, óleo combustível, entres outros, por processos como a fusão das moléculas, a oxidação e a volatilização. Por último, ocorre o resfriamento do remanescente e são coletadas as cinzas (UFPR, 2017). Vale lembrar que esses processos são autossustentáveis, visto que geram mais energia com seus subprodutos do que consomem para fazê-los.

No Brasil, o mais comum é a pirólise lenta, chamada de carbonização e que tem como produto o carvão vegetal. Segundo Pedroza (2011), o tempo de residência nesse processo é de horas, enquanto na pirólise convencional é de 5 a 30 minutos e na rápida, 0,5 a 5 segundos. Apesar de um subproduto simples, dados da Empresa de Pesquisa Energética do Ministério de Minas e Energia mostram que 7,3 milhões de toneladas de carvão vegetal foram produzidos no país em 2012, contudo, para isso foram utilizadas mais de 29 milhões de toneladas de madeira de floresta.

Antes de qualquer um desses processos, vale a separação e trituração dos resíduos em partes menores, visto que o calor será melhor difundido quanto menos densa é a massa. Em especial devido as formas de transferência de calor que predominam nas temperaturas em que ocorre a pirólise, a condução e a convecção, caso a matéria esteja muito grande, não são coletadas quantidades ideais de um bio-óleo de boa qualidade (UFPR, 2017). Uma ilustração do reator pirolítico é mostrada na figura abaixo.

Figura 5 – Ilustração de Reator Pirolítico

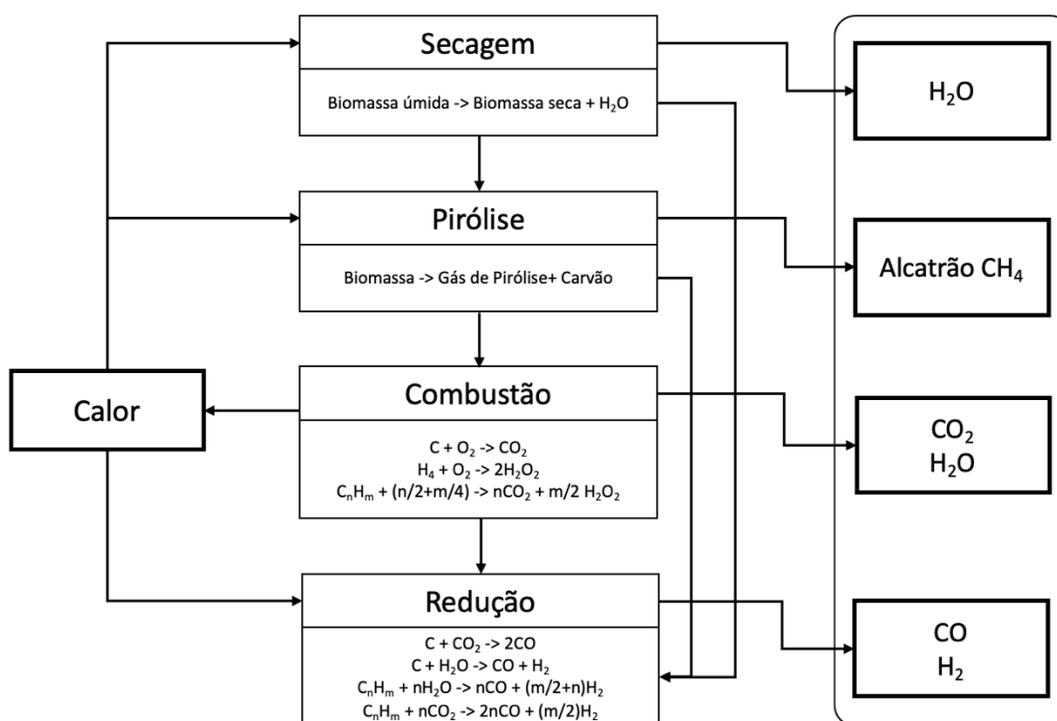


Fonte: Resíduos Sólidos Alagoas

Outro método utilizado, a gaseificação é feita em temperaturas altas (800°C a 900°C) na presença parcial de oxigênio e em quatro etapas principais. A primeira, é de secagem para remoção da umidade; a segunda é a zona de pirólise, onde ocorre a fragmentação da matéria pelo calor com formação do gás de pirólise e carvão; a terceira, de remoção das impurezas e combustão, na qual é gerado calor que realimenta o processo; e por último, ocorre a redução dos produtos das etapas anteriores, resultando em CO, H₂, H₂O e CH₄ principalmente.

Nesse processo, junto com uma queima mais controlada, com menor emissão de poluentes e facilidade de aplicação em processos de menor escala, a gaseificação também apresenta uma eficiência menor. Abaixo, é mostrado um diagrama do processo adaptado da companhia holandesa *Biomass Technology Group*.

Figura 6 – Diagrama de Gaseificação



Fonte: Adaptado de *Biomass Technology Group*

A tabela abaixo traz uma relação entre os três métodos abordados até aqui, com algumas particularidades e seus rendimentos. Ela reflete o que foi dito anteriormente, partículas de tamanho reduzido são melhores para a formação de bio-óleo com mais qualidade. Além disso, processos com temperaturas maiores tendem a formar maior parcela de produtos gasosos.

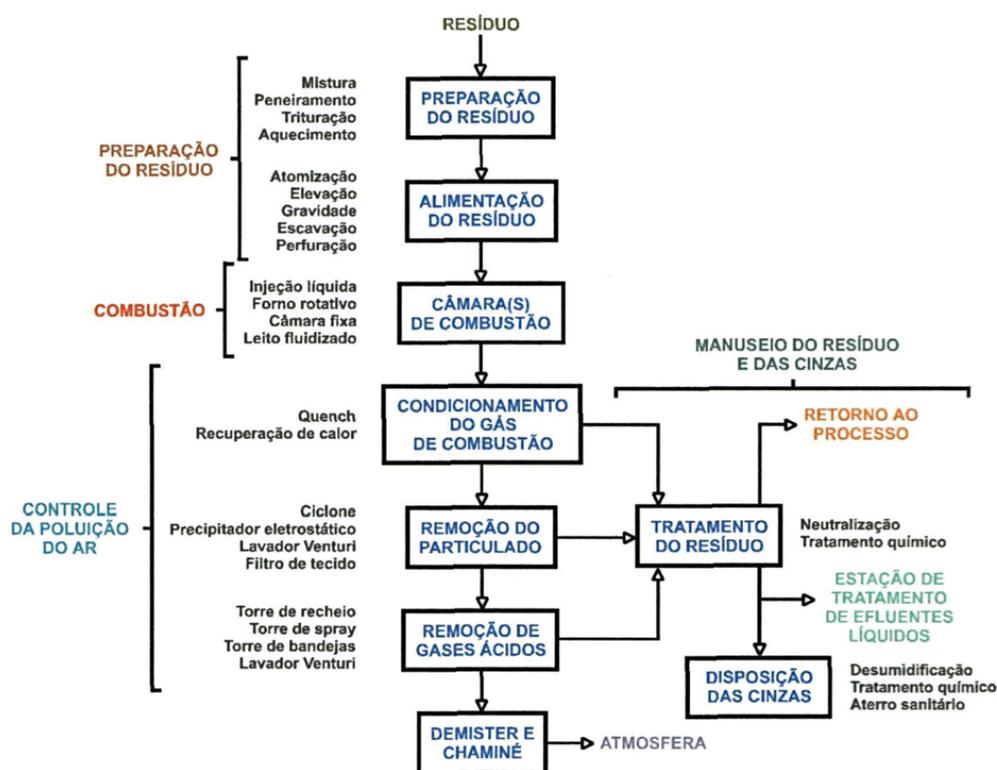
Tabela 10 – Comparativo de rendimento entre pirólise, carbonização e gaseificação com base seca madeira

Método	Condições de Processo	Líquido	Carvão	Gás
Pirólise rápida	Temperaturas moderadas (450-550°C), tempo de residência curto (0,5-3s), biomassa com partículas de tamanho reduzido	75%	12%	13%
Carbonização	Baixas temperaturas (400-450°C), tempo de residência longo (horas ou dias), partículas grandes	30%	35%	35%
Gaseificação	Altas temperaturas (900°C) e alto tempo de residência	5%	10%	85%

Fonte: Adaptado de Bridgwater (2008)

Por último, a incineração ocorre na presença total de oxigênio, com combustão da matéria em altas temperaturas (cerca de 1200°C) em basicamente duas câmaras: a primária, onde acontece a secagem, decomposição e gaseificação, e a secundária, que realiza a queima dos gases obtidos nos processos anteriores (UFRGS). O esquema abaixo retrata a estrutura geral de um sistema de incineração segundo Dempsey e Oppelt em seu trabalho de 1993.

Figura 7 – Visão Geral de um Sistema de Incineração



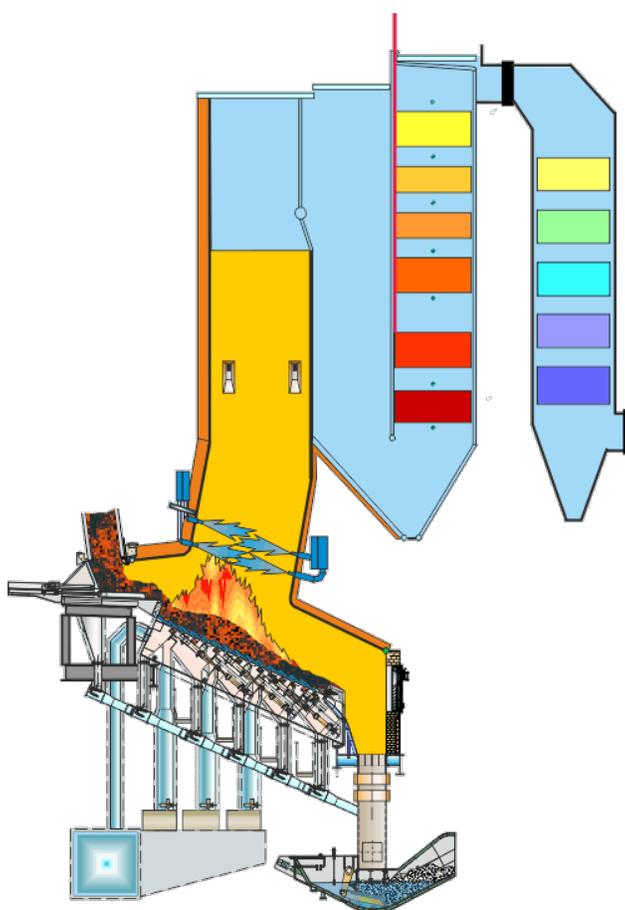
Fonte: Dempsey e Oppelt (1993) apud Guilherme (2000)

Para liberação dos gases da queima com o menor impacto possível na atmosfera, o sistema geralmente inclui uma torre de resfriamento; uma torre de mistura com adição de cal hidratada e carvão ativado para captura de moléculas com enxofre, cloro, óxidos e metais voláteis; filtro para contenção de particulados; e uma chaminé (NOVA AMBIENTAL). Apesar disso, os sistemas não são 100% eficazes, como comentado anteriormente, e liberam quantidades mínimas de dioxinas e

furanos, principalmente. As quantidades aceitáveis de liberação são apresentadas no anexo A e regulamentadas pela CONAMA nº316/02, junto a outros limites de emissão de acordo com a legislação vigente em países da Europa e Ásia.

No processo, um dos fornos mais aplicados na incineração é o da Martin GmbH, que pode processar até 59 milhões de toneladas de resíduos por ano e exige um investimento relativamente mais baixo (Miranda, 2018). No site da companhia alemã, é possível encontrar a imagem abaixo exemplificando o funcionamento de seu sistema de combustão.

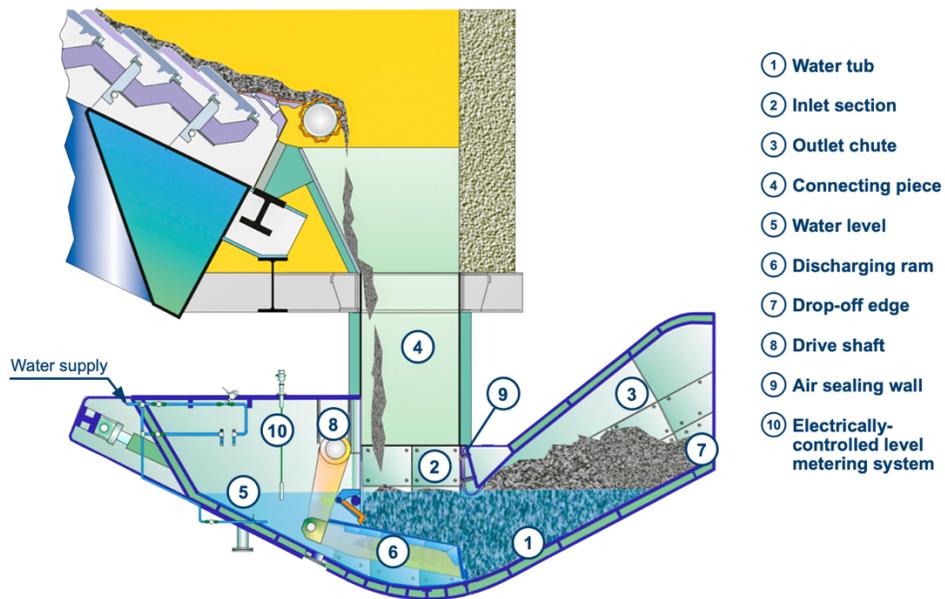
Figura 8 – Sistema de Combustão Martin GmbH



Fonte: Martin (2023)

Na parte inferior, é localizado seu sistema de coleta das cinzas e rejeitos, detalhado na figura abaixo. Nele, é utilizado um fluxo de água para resfriamento, e uma forma côncava com uma esteira para passagem do material.

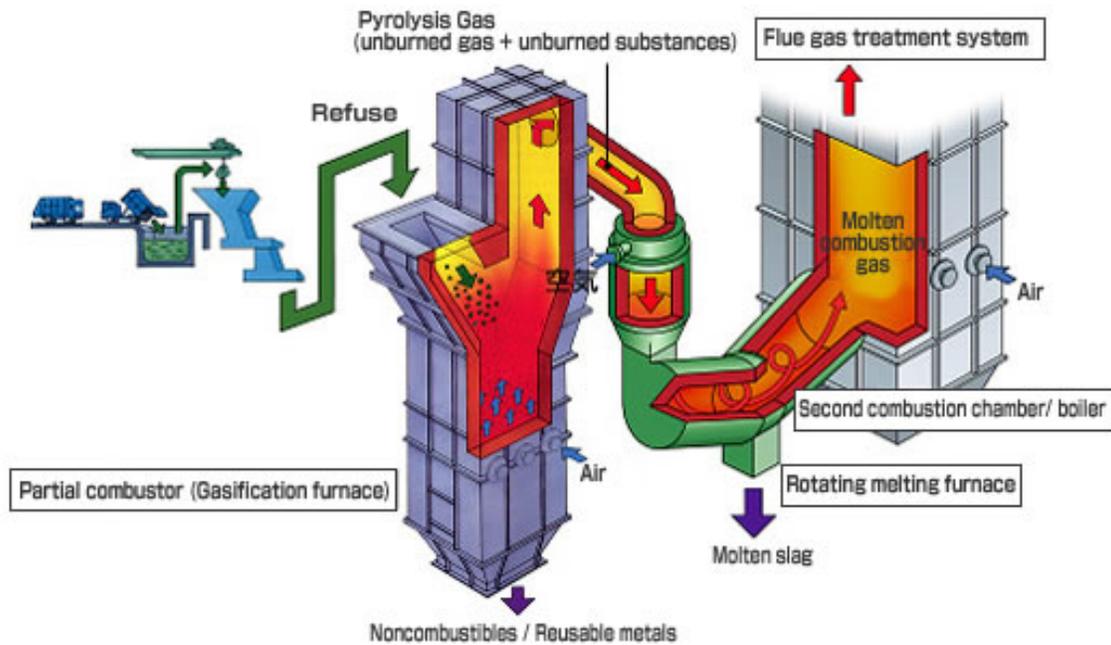
Figura 9 – Sistema de Coleta de Cinzas Martin



Fonte: Martin (2023)

Outro tipo de incinerador é o de leito fluidizado, mostrado na figura abaixo, no qual os resíduos são suspensos por uma corrente de ar. Ainda, segundo a fabricante, as cinzas são derretidas e saem com a escória, e o calor da queima do gás de combustão é recuperado na caldeira para gerar energia.

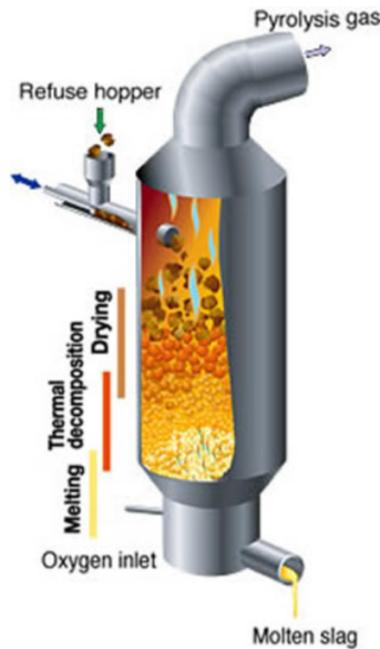
Figura 10 – Incinerador de Leito Fluidizado, retirado da sessão de equipamentos industriais da Kawasaki



Fonte: Kawasaki 2022

Outras variações incluem incineradores de plasma, nos quais o calor é fornecido na passagem de corrente elétrica através de um gás inerte, e de eixo, mostrado na figura abaixo. Nele, o funcionamento é similar ao de um leito fluidizado, mas tendo a escória fundida coletada na sua parte inferior e dispendo de um formato diferente, similar a uma cápsula, que favorece o funcionamento em “um eixo”. Escória fundida nada mais é do que os resíduos de uma fusão, geralmente metal.

Figura 11 – Incinerador de Eixo, retirado da sessão de equipamentos industriais da Kawasaki



Fonte: Kawasaki 2022

Em suma, os principais resíduos gerados pela incineração são os gases de combustão, as cinzas e a energia térmica. Cabe destacar que ainda não existem usinas de incineração dos RSU com recuperação de energia em escala comercial em funcionamento no Brasil, mas será comentado em capítulos posteriores sobre a instalação de Unidades de Recuperação Energética nos próximos anos.

3. METODOLOGIA

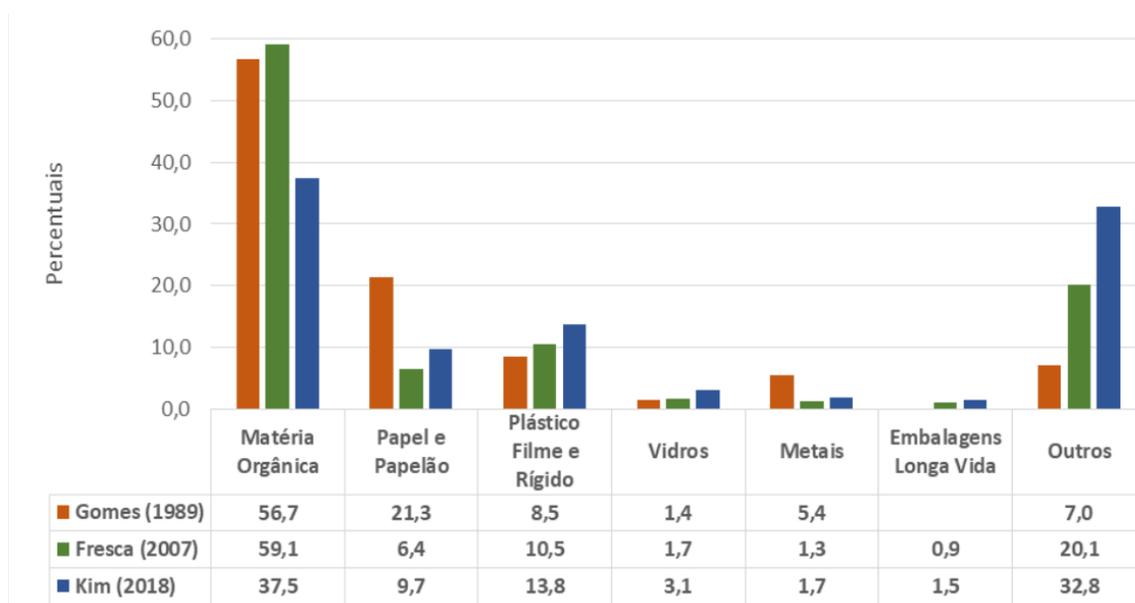
Neste tópico será destrinchada a metodologia de cálculo utilizada para simulação de geração de energia em um processo de incineração. Será utilizada como referência a produção residual da cidade de São Carlos (SP), cujos dados estão dispostos no tópico 3.1.

3.1. Dados Base

Anualmente, São Carlos produz 800 toneladas de resíduos por dia, segundo estudo da USP de 2020. Desses, dados presentes no Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de São Carlos, publicado no mesmo ano, trazem um panorama da composição gravimétrica que

seguem para deposição em aterro. Isso nada mais é do que a categorização e contabilização de cada grupo de componentes que fazem parte do volume total de resíduos gerados. Ademais, os dados abaixo e outros que serão apresentados neste tópico seguem de estudos dos autores Fábio R. C. Frésca, de 2007, e Viviane J. H. Kim, de 2019.

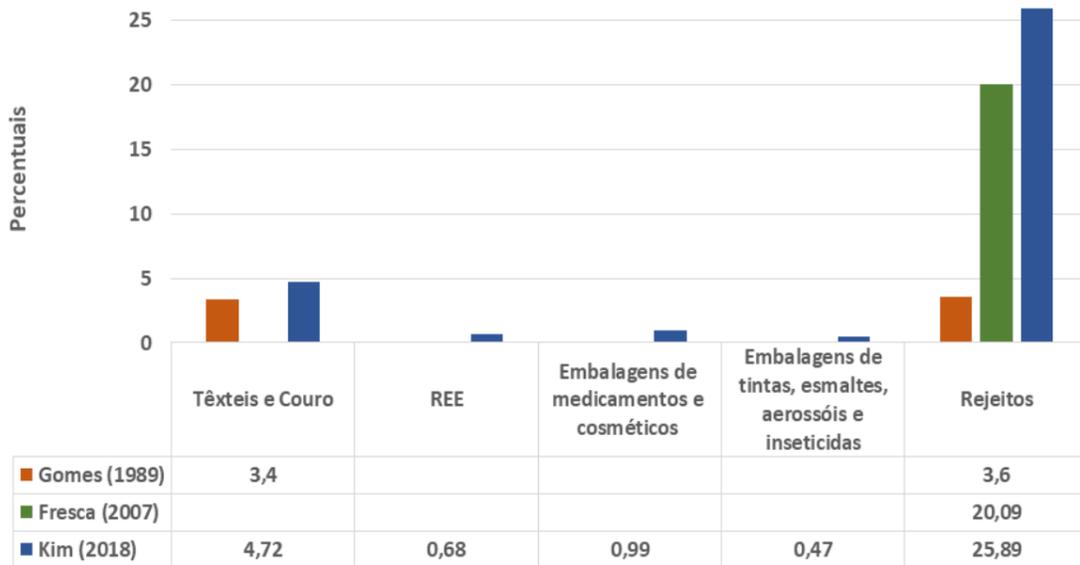
Figura 12 – Composição Gravimétrica de São Carlos



Fonte: PMGIRS 2020

Dos quais a categoria “Outros” está destrinchada abaixo.

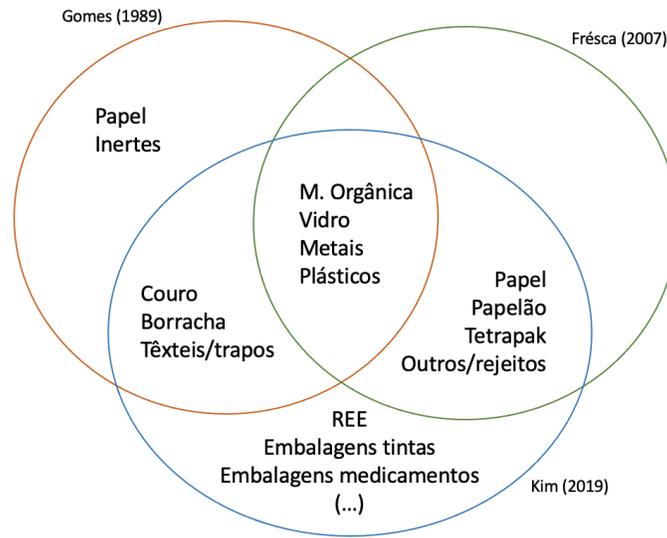
Figura 13 – Detalhamento da categoria “Outros” na composição Gravimétrica de São Carlos



Fonte: PMGIRS 2020

Maiores divergências encontradas entre os dados se dão pela diferença nos critérios utilizados para categorizar os resíduos, como ilustra a imagem abaixo, adaptada do documento de Kim (2019). Segundo a autora, Gomes (1989) considerou apenas “Papel”, incluindo papéis de resíduos sanitários e partículas inertes do solo, e Frésca (2007) contabilizou “Papel e Papelão” juntos, enquanto colocou resíduos sanitários e do solo nas categorias “Rejeitos” e “Outros”. Para as categorias “Vidro”, “Metais” e “Matéria Orgânica”, não foi necessário ajuste dos dados, e as variações “Plástico Filme” e “Plástico Rígido” foram somadas pelos três pesquisadores.

Figura 14 – Representação Ilustrativa dos Critérios de Gomes, Frésca e Kim.



Fonte: Adaptado de Kim (2019)

Assim, a composição e definição de cada classe de resíduos foi padronizada por Kim como segue na tabela abaixo, adaptada da autora.

Tabela 11 – Classificação de Rejeitos Consideradas por Kim (2019)

Categoria	Definição
Matéria Orgânica	Material biodegradável (restos de alimentos, partículas de solo, etc)
Papel	Folha sulfite, papel pardo, folhetos etc.
Papelão	Material pardo com mais de uma camada
Plástico Filme	Plásticos finos de fácil deformação
Plástico Rígido	Plásticos com resistência maior, de difícil deformação
Vidro	Material transparente, colorido ou não, usado para embalar bebidas
Metais	Embalagens compostas por materiais ferrosos e não ferrosos, como latas de alumínio
Embalagens Longa Vida	Embalagens de multicamadas para conservar e transportar líquidos
Têxteis, Couro e Borracha	Materiais da família dos tecidos, pedaços de couro e borracha
REE	Resíduos eletroeletrônicos
Medicamentos, curativos, embalagens de medicamentos e cosméticos	Embalagens de medicamentos, cosméticos e higiene pessoal, como band-aid e gaze usada
Embalagens de tintas esmaltes, aerossóis e inseticidas	Todos os produtos considerados como inflamáveis, corrosivos ou solventes
Rejeitos	Todo material não recuperável ou que não se enquadram em nenhuma categoria anterior

Fonte: Adaptado de Kim (2019)

E por sua classificação e estudo detalhado com acompanhamento da coleta e quantização de parte da amostra que chega aos pontos de coletas de RSU, será utilizada a base de dados de Kim para 2018, destrinchada na tabela abaixo. A autora fez medições no verão e no inverno e optou por se basear na média entre eles.

Tabela 12 – Gravimetria de São Carlos em porcentagem para 2018

Categoria	São Carlos (inverno)	São Carlos (verão)	São Carlos (média)
Matéria Orgânica	39,48	35,47	37,48
Papel	5,16	5,08	5,13
Papelão	4,78	4,41	4,59
Plástico Filme	6,18	6,83	6,51
Plástico Rígido	7,66	6,84	7,25
Vidro	3,78	2,41	3,10
Metais	1,61	1,85	1,73
Embalagens Longa Vida	1,63	1,28	1,46
Têxteis e Couro	4,12	5,32	4,72
REE	1,05	0,31	0,68
Medicamentos, curativos, embalagens de medicamentos e cosméticos	1,01	0,96	0,99
Embalagens de tintas esmaltes, aerossóis e inseticidas	0,40	0,52	0,47
Rejeitos	23,08	28,70	25,89

Fonte: Adaptado de Kim (2019)

Em relação aos recicláveis, a coleta é feita pela Cooperativa de Trabalho de Catadores de Materiais de São Carlos, COOPERVIDA, e atinge entre 30% e 40% da população local, recebendo em média 100 toneladas por mês (PMGIRS, 2020). Para formar esse valor, são somados os resíduos comercializados pela empresa, contabilizados na tabela abaixo para o período de 2016 até metade de 2019, e o que é considerado rejeito, parte que soma matéria orgânica, materiais não recicláveis e materiais recicláveis sem mercado em São Carlos, e representou quase 57% de todos os materiais recebidos pela associação em 2018 segundo Kim (2019).

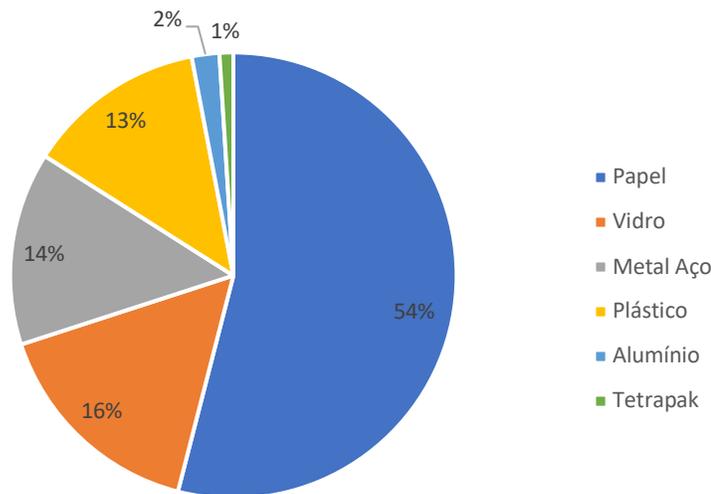
Tabela 13 – Quantidade, em quilos, de Materiais Comercializados pela COOPERVIDA

Ano	2016	2017	2018	Jan-Jun/2019
Quantidade [kg]	487.416,30	443.547,19	594.143,85	292,686,86

Fonte: Adaptado de PMGIRS 2020

A composição desses materiais comercializados feita no ano de 2018 em quantidade de massa (kg) está mostrada na figura abaixo, retirada do PMGIRS 2020, com dados fornecidos pela associação.

Figura 15 – Distribuição, em quilos, dos materiais comercializados pela COOPERVIDA em 2018



Fonte: Adaptado de PMGIRS 2020

Outro segmento de interesse deste tópico são os resíduos industriais, também abordados no PMGIRS da cidade. Para a coleta de dados, foi investigado que sete das dez empresas que forneceram dados possuem resíduos passíveis de logística reversa, contudo, nenhuma dispunha de pontos de coleta. Além disso, apenas três delas usavam o sistema pública de coleta, sendo que as demais contratam empresas privadas ou escoam por outras vias. Ao se tratar de resíduos industriais, segue a seguinte descrição.

Segundo o IPEA (2012), dentre os resíduos industriais estão os resíduos de processos, resíduos de operação de controle de poluição ou descontaminação, materiais adulterados, materiais e substâncias oriundos de atividades de remediação de solo contaminado, resíduos da purificação de matérias-primas e produtos, cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plástico, papel, madeiras, fibras, borracha, metal, escórias, vidros e cerâmicas. (PMGIRS, 2020)

Portanto, dados obtidos em um estudo da CETESB de 2010 mostram a contabilização de resíduos industriais e sua divisão nas categorias Perigosos e Não Perigosos, como segue abaixo, para o Estado de São Paulo e em específico para o município de São Carlos. A estimativa foi feita com 1.234 indústrias e aponta que a região “Em industrialização”, na qual se encontra São Carlos, é responsável por 6,78% da geração na classe I, equivalente a 47.764 t/ano, e 44,36% na classe II, sendo 42.199.910 t/ano.

Tabela 14 – Classificação dos Resíduos Industriais do Estado de São Paulo em 2010

Tipo de Resíduo	Estado de São Paulo		Município de São Carlos	
	Geração [t/ano]	Participação [%]	Geração [t/ano]	Participação [%]
Classe I – Perigoso	704.498	0,7	6.463,42	3,5
Classe II – Não Perigoso (A e B)	95.135.425	99,3	179.546,67	96,4
Não Informada	-	-	199,83	0,1
Total	95.839.923	100	186.209,92	100

Fonte: Adaptado de CETESB 2013

Por fim, para se ter a dimensão quantitativa no tratamento dos resíduos industriais, parte da destinação está detalhada na tabela abaixo, com destaque para as quantidades em coprocessamento e incineração. Nota-se que ainda existem algumas outras vias além das elencadas, que foram escolhidas conforme interesse do trabalho.

Tabela 15 – Destinação dos Resíduos das Classes I e II

Método	Classe I [t/ano]	Classe II [t/ano]
Coprocessamento em fornos de cimento	2.843,61	-
Reciclagem	1.881,58	3.377,12
Aterro industrial de terceiros	607,15	23.352,76
Aterro sanitário de terceiros	-	25,00
Incinerador	150,70	0,30
Aterro sanitário municipal	-	110.146,21
Aterro industrial próprio	-	41.864,00
Aterro sanitário e autoclave	5,00	-

Fonte: Adaptado de PMGIRS 2020

Outro segmento que possui afinidade com os processos de degradação térmica é o de Resíduos de Serviço de Saúde, que tem a incineração como método de tratamento na maior parte dos municípios (43%), segundo o Plano Estadual de Resíduos Sólidos de São Paulo. Apesar disso, os grupos A, passível de incineração, e E, não passível de incineração, são coletados juntos pela empresa São Carlos Ambiental com volume aproximado de 1 tonelada por dia e destinados a autoclavagem (PMGIRS, 2020). Já os resíduos dos grupos B e C são de responsabilidade da empresa geradora, enquanto os restantes, do grupo D, também são coletados pela São Carlos Ambiental, mas em situação similar a da coleta regular. Para se estimar as quantidades dessas categorias, será utilizada a proporção do Estado de São Paulo.

Tabela 16 – Estimativa da Composição dos RSS

Grupo	Representação [%]	Quantidade estimada [t/ano]
A+E	40	364
B+E	5	45,5
D	55	500,5
C	n.i. ⁽¹⁾	-

(1) Não foram reportados valores da Classe C devido a destinação junto aos resíduos domiciliares

Fonte: Adaptado de PMGIRS 2020

O PMGIRS aponta que apenas de medicamentos vencidos e outros produtos químicos, pertencentes ao grupo B, a Santa Casa de Misericórdia de São Carlos gere 2 toneladas por ano. No entanto, na maioria dos estabelecimentos visitados não há registros organizados e um acompanhamento confiável da geração de cada grupo no local.

3.2. Potencial Calorífico

O potencial calorífico de um composto consiste na quantidade de calor liberado em sua combustão estequiométrica, medido em unidade de energia por massa, ou ainda em unidade de energia por volume, no caso de líquidos e gases. Sendo a água comumente um dos produtos da queima, o cálculo pode ser feito para o Poder Calorífico Superior (PCS) ou o Poder Calorífico Inferior (PCI). No primeiro, a água é contabilizada na fase líquida, ou seja, é descontada a energia gasta para sua vaporização do total de energia liberada na forma de calor. Já no segundo, ela é considerada na fase gasosa, e este é o cenário mais comum, visto que a temperatura dos gases de combustão é geralmente superior a da sua vaporização.

Em condições específicas, o PCI será próximo ao PCS, como na queima de um combustível sem hidrogênio, em que não ocorrerá formação de água. Supondo um combustível com baixo teor de umidade e a ausência da água advinda da umidade relativa do ar, com uma temperatura de equilíbrio pré-condensação de 25°C, os termos se relacionam como segue a equação abaixo. Nela, PCI_w equivale ao Poder Calorífico Inferior em umidade “w”, o PCS_{seco} se refere ao PCS de combustível seco, w se refere ao teor de umidade da amostra, e h_{LV} é a entalpia de vaporização da água a 25°C.

$$PCI_w = PCS_{seco} - w * h_{LV} \quad (2)$$

Portanto, seguindo a lógica da relação entre os termos, a segunda parte da expressão representa a energia exigida na vaporização da água remanescente na amostra. Por outro lado, em casos nos quais o teor de umidade do combustível é mais alto, acima de 3%, e que haverá formação de água pela presença de hidrogênio, a equação é expandida para atender as novas condições, como segue abaixo. Nela, o teor (H) será dado em massa de hidrogênio ($m_{hidrogênio}$) por massa de combustível seco (m_{cs}).

$$PCI_w = (1 - w) * PCS_{seco} - [(1 - w) * 9 * H + w] * 584,2 \quad (3)$$

Aqui, o multiplicador 9 surge da estequiometria ao considerar que todo o hidrogênio se converterá em água, e o 584,2 equivale a entalpia de vaporização da água a 25°C na unidade kcal/kg.

Um dos meios de se determinar o valor do PCI é a aplicação de equações baseadas na composição do combustível utilizado, e valores teóricos de PCI foram adicionados ao anexo B para fins comparativos. Aqui, vale ressaltar que todas são desenvolvidas para materiais simples, heterogêneos, o que acarreta certo distanciamento dos valores reais. Uma dessas relações é a equação de Dulong modificada, na qual são inclusos os percentuais referentes ao carbono inorgânico (C_{inorg}), que não participa da queima e equivale a aproximadamente 32 kcal/kg, e ao carbono orgânico (C_{org}). Ademais, surgem os termos O, para a porcentagem de massa em base seca do Oxigênio, S para o Enxofre, e N para o Nitrogênio.

$$PCI_w = (1 - w) * \left[7831 * C_{org} + 35932 * \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2212 * S + 1187 * O + 578 * N - 32 \right] - [(1 - w) * 9 * H + w] * 583,2 \quad (4)$$

Segundo Kami (CHANG et al., 2007; KOMILIS et al., 2012 apud 2019), essa relação é muito válida por resultar em valores próximos aos obtidos experimentalmente. Outra equação útil é a de Lloyd e Davenport, na qual o carbono compõe o índice único C, como porcentagem de massa em base seca.

$$PCI_w = (1 - w) * [8546 * C + 27126 * H - 2018 * O + 1419 * N + 2672 * S] - [(1 - w) * 9 * H + w] * 583,2 \quad (5)$$

Outra referência é a relação desenvolvida por Boye, na qual os mesmos índices anteriores são mantidos, e há leve variação nos multiplicadores:

$$PCI_w = (1 - w) * [8400 * C + 27766 * H - 2649 * O + 1500 * N + 2672 * S] - [(1 - w) * 9 * H + w] * 583,2 \quad (6)$$

Por fim, existe a relação de Themelis (2003), que se aplica para Resíduos Sólidos Urbanos considerando a porcentagem de combustível ($Y_{combustível}$), água ($Y_{água}$), metal (Y_{metal}) e vidro (Y_{vidro}) na amostra, e não dos compostos individualmente.

$$PCI = \frac{[18500*Y_{combustível} - 2636*Y_{água} - 628*Y_{vidro} - 544*Y_{metal}]}{4,185} \quad (7)$$

Ainda no estudo de Kami (2019), são apresentados valores encontrados por Jimenez (2016) para as variáveis envolvidas nas três primeiras equações citadas. Eles estão dispostos na tabela 17, junto aos valores de umidade (w), o teor de cinzas (Cz), material volátil (MV) e carbono fixo (CF) encontrados por análise imediata.

Tabela 17 – Composição de C, H, O, N, S e w

Função Gravimétrica	Análise Elementar					Análise Imediata			
	C	H	O	N	S	Cz/inertes	w	MV	CF
Fração Orgânica	0,480	0,064	0,376	0,026	0,004	5,000	0,700	21,400	3,600
Papel	0,434	0,058	0,443	0,003	0,002	6,000	0,100	75,600	8,400
Plástico	0,600	0,072	0,228	0	0	10,000	0,050	83,000	2,000
Metal	0,045	0,006	0,043	0,001	0	90,500	0,020	0	0
Vidro	0,005	0,001	0,004	0,001	0	98,900	0,011	0	0
Têxteis e couro	0,480	0,064	0,400	0,022	0,002	3,200	0,100	66,000	17,500
Borracha	0,697	0,087	0	0,020	0,016	20,000	0,012	83,900	4,900
Madeira	0,495	0,060	0,427	0,002	0,001	1,500	0,200	68,100	0

Fonte: Kami 2019

Ao final dos cálculos, que serão dispostos mais adiante, é importante que o resultado do PCI total da amostra esteja em uma faixa aceitável de energia por quilo para que sua incineração seja viável. Segundo Themelis (2003), no caso de PCI inferior a 1675 kcal/kg, o processo apresenta restrições técnicas e exige a adição de um combustível auxiliar para acontecer. Já para valores acima desse mínimo e abaixo de 2000 kcal/kg, a queima é viável após algum tratamento que eleve esse número. Portanto, a faixa ideal é acima de 2000 kcal/kg, na qual a queima pode ocorrer sem empecilhos.

3.3. Produção de Energia

Após a avaliação da qualidade do material, seguindo para a geração de energia será utilizada a relação abaixo:

$$E = PCI \times \eta \times Q \times t \quad (8)$$

Na qual E é o total de energia gerada, η é a eficiência do processo, Q é a quantidade de RSU processada e, para obtê-la em kWh, será multiplicado por t, o tempo de funcionamento estudado. Para esse trabalho, a usina funcionará 330 dias por ano, 24 horas por dia, e seu rendimento é igual a 26%. Ainda, a quantidade de material processado é equivalente a geração diária total de São Carlos, 800 t/dia, descontada a parcela que segue para a reciclagem, o que significa um total de 761,36 t/dia. Segue abaixo resumo dos dados descritos.

Tabela 18 – Parâmetros de Geração de Energia

Parâmetro	Quantidade
Rendimento (η)	26%
Quantidade de RSU (Q)	761,36 t/dia
Tempo de Funcionamento (t)	330 dias, 24 horas por dia

Fonte: Aatoria própria

3.4. Crédito de Carbono

Um dos grandes fantasmas que assombra a incineração de resíduos é a emissão de gases tóxicos que surgem da degradação térmica. Entretanto, o que poucos sabem é que a recuperação energética reduz em até 8 vezes a emissão de gases de efeito estufa (GEE) quando comparada a aterros com captura de metano (IPCC, 2014). Enquanto a deposição a céu aberto gera cerca de 64 milhões de toneladas de GEE por ano, estima-se que a cada tonelada de RSU incinerada após remoção dos recicláveis, 2 toneladas de carbono equivalente são poupadas de emissão (IEA Bioenergy).

Aprofundando neste tema, um dos grandes esforços para incentivar a nova mentalidade sustentável foi a criação do mercado de carbono em 1992 durante uma convenção da ECO-92, no Rio de Janeiro. Ainda mais, com a assinatura do Protocolo de Quioto alguns anos depois, a

responsabilidade cresceu sobretudo para países mais industrializados e em vias de. Hoje, essa relação está estruturada em um mercado regulado e um mercado voluntário, estando o primeiro ainda pouco definido no Brasil.

A ideia por trás de ambos consiste no seguinte cenário: uma parte que emite GEE com seus processos pode compensar seu ônus ao comprar o “bônus” de uma parte que faz a captura de carbono, como seria o caso de uma empresa buscando compensar suas emissões e de um agricultor que cultiva seu plantio, como se esse “reflorestamento” equilibrasse a atividade poluente. Isso é feito através da geração de títulos por profissionais qualificados dentro de algum projeto do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), ou outras iniciativas do tipo (IPAM, 2022).

Portanto, a principal diferença ocorre na obrigatoriedade atribuída a cada público, pois enquanto no primeiro o governo impõe metas de redução progressiva para setores específicos, o segundo é formado por empresas com interesse, e não obrigação, em fazer a compensação. Outro ponto é que no mercado regulado a fiscalização é maior, havendo punição para a parte que não cumprir o previsto. Além disso, o preço do crédito de carbono chega a ser até três vezes maior, e o sistema de compra e venda de permissões é chamado de “cap and trade” (Saes, 2022).

Nesse sentido, estima-se que, em cenário de plena regulamentação e funcionamento, o Brasil pode ter até US\$100 bilhões em receita com o mercado de carbono até 2030 (ICC, 2021). Nele, a moeda de troca, o crédito de carbono, é igual a 1 tonelada de carbono equivalente, ou seja, 1 tonelada de carbono puro ou uma mistura de elementos cujo potencial destrutivo seja comprável a 1 tonelada de carbono puro. Nessa estimativa, é usado o Potencial de Dano Global (GWP), que se baseia na meia-vida e na eficiência radioativa do gás. Para exemplificar, basta tomar o metano, que por ser 23 vezes mais nocivo que o carbono, tem seu GWP igual a 23, e custaria 23 vezes mais ao emissor.

Para a venda de créditos de carbono no presente trabalho, foi considerada comercialização em mercado voluntário, no qual empresas desenvolvem projetos de captura ou que evitem emissão. Nos cálculos, foi utilizada a cotação do dia 24 de janeiro de 2023, obtido do site da CBIO Brasil, na faixa de 80 reais.

Tabela 19 – Parâmetros de Créditos de Carbono

Parâmetro	Valor
Preço do Crédito de Carbono	R\$80,00
Emissão Evitada por tRSU	2 t
Emissão Anual Total Evitada	528.000 t
Lucro Total	R\$42,24 milhões

Fonte: Autoria própria

3.5. Outros Lucros

Outros dois lucros da usina ocorrem pela venda dos subprodutos para reciclagem e pelo pagamento da Tarifa de Destinação Final. No primeiro, foram considerados os valores de 15 centavos pelo quilo do vidro e 3 reais pelo quilo do metal. Já o segundo é uma taxa paga pela prefeitura ao prestador do serviço por fazer a captação e destinação do RSU. Segundo dados da Secretaria do Meio Ambiente de setembro de 2022, esse valor era de 201 reais por tonelada pagos a Emdurb (Empresa Municipal de Desenvolvimento Urbano e Rural de Bauru), que está localizada em uma cidade de dimensões próximas a São Carlos, para depósito em aterro sanitário. Para tornar a destinação em URE mais atrativa para o governo, será considerada 50% dessa taxa, equivalente a 100 reais, para destinação em usinas de recuperação térmica. Segue abaixo resumo dos dados descritos.

Tabela 20 – Parâmetros de Outros Lucros

Parâmetro	Valor
Venda de Vidro	R\$0,15/t
Venda de Metal	R\$3,00/t
Tarifa de Destinação Final	R\$100,00/t

Fonte: Autoria própria

3.6. Unidade de Recuperação Energética (URE)

No presente estudo, será utilizada como referencial a Unidade de Recuperação Energética (URE) de Barueri, uma instalação que partirá recuperação energética para geração de energia. No entanto, diferente de usinas de incineração, em UREs é realizada a separação dos materiais recicláveis antes do processamento. No caso estudado, serão considerados metais e vidros como formadores deste grupo, como comentado no tópico anterior.

A URE-Barueri é a primeira unidade desse tipo a ser construída no Brasil, e entrará em funcionamento em 2026 processando aproximadamente 300 mil toneladas de RSU por ano, ou 825 toneladas por dia, segundo o site oficial da empresa. Ainda, dados da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental indicam que a operação evitará a emissão de 900 mil toneladas de CO₂ enquanto produz 20MWh. Destes, 87% são destinados ao abastecimento de 80 mil residências locais, e 13% são aplicados na própria operação.

Ademais, a localização da usina é extremamente favorável, uma vez que fica dentro do Setor de Tratamento de Esgoto da cidade e pode utilizar a água de reuso da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) da Sabesp, que recentemente adquiriu 20% da FOXX URE-BA S.A, responsável pela URE. Por já abrigar outras locações do mesmo setor, o transporte até o local possui estrutura pronta tanto para a chegada quanto escoamento de resíduos, além de não prejudicar habitações ao redor.

Segundo a própria empresa, o investimento inicial ficou em torno de 520 milhões de reais e, por ainda não estar em funcionamento, o gasto anual da unidade para fins de projeção financeira foi estimado com base no estudo “VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE USINAS “WASTE-TO-ENERGY”” da Universidade de Brasília. Nele, são consideradas duas usinas: uma com capacidade de processamento de 400 t/dia e outra de 1200 t/dia. Portanto, para aplicação no caso presente, foram utilizadas as médias de gasto com seguro do local e manutenção de estrutura, na qual foram também contabilizados os gastos com folha de pagamento. A vida útil dessa usina é estimada em 20 anos e o resumo desses valores está apresentado na tabela abaixo.

Tabela 21 – Investimento Inicial, Seguro e Manutenção

Tipo de Gasto	Valor Financeiro [milhões R\$]
Investimento Inicial	520
Seguro Anual	0,0565
Manutenção Anual	5,8

Fonte: A autoria própria

3.7. Outros Gastos

Além dos valores citados no tópico anterior, existe o gasto de destinação com os resíduos do processo de incineração, que estão estimados em 300 kg por tonelada incinerada (Le Goux e Le Douce, 1995; Chandler *et al.*, 1997 apud Varela *et al.*, 2009) e englobam as cinzas e os inertes.

Apesar das cinzas terem aplicação em outros processos, como na produção de asfalto e cerâmica, por exemplo, este detalhamento não será abordado no presente trabalho e elas serão tratadas como um gasto anual da usina. Portanto, do mesmo estudo da Universidade de Brasília citado no tópico anterior, sabe-se que o preço pago em 2015 pelo quilo de cinzas e inertes era de 40 reais, corrigidos aproximadamente para 55 reais em 2023. O resumo dos valores citados se encontra a seguir.

Tabela 22 – Cinzas e Inertes

Parâmetro	Quantidade
Quantidade Gerada	300 kg/t RSU
Preço Pago	R\$55,00/t

Fonte: Autoria própria

4. RESULTADOS

A partir do exposto no capítulo anterior, serão apresentados os resultados dos cálculos para a simulação da URE – São Carlos.

4.1. Receita

Como dito no capítulo anterior, alguns índices integram o cálculo da receita, como a venda de energia, de materiais recicláveis, a tarifa de destinação final e os créditos de carbono. A seguir, serão apresentados os valores obtidos para cada um deles.

4.1.1. Venda de Energia

Sabe-se que, para o cálculo da quantidade de energia produzida, deve-se calcular o PCI da amostra a partir das relações de Dulong modificada (equação 4), a de Lloyd e Davenport (equação 5), a de Boye (equação 6) e a de Themelis (equação 7) e dos dados das tabelas 11 e 16. Pela última, foi obtido um valor de PCI próximo a 6494,10 kJ/kg, um resultado satisfatório quando comparado aos demais, mas que não será utilizado nos cálculos futuros devido a incerteza atribuída. Abaixo, segue maior detalhamento das três primeiras equações mencionadas.

Tabela 23 – Valores Obtidos pela Equação de Dulong Modificada

Categoria	Composição do RSU [%]	PCI úmido individual [kcal/kg]	PCI úmido individual [kJ/kg]	PCI úmido na amostra [kJ/kg]	Porcentagem na amostra [%]
Matéria Orgânica	37,48	933,36	3905,16	1463,66	37,48
Papel	5,13	3261,37	13645,57	700,02	5,13
Papelão	4,59	3261,37	13645,57	626,33	4,59
Plástico Filme	6,51	5787,09	24213,17	1576,28	6,51
Plástico Rígido	7,25	5787,09	24213,17	1755,45	7,25
Vidro	3,10	18,51	77,43	2,40	3,10
Metais	1,73	344,06	1439,53	24,90	1,73
Embalagens Longa Vida	1,46	6330,00	26484,72	386,68	1,46
Têxteis e Couro	4,72	3889,03	16271,70	768,02	4,72
REE	0,68	5787,09	24213,17	164,65	0,68
Medicamentos, curativos, embalagens de medicamentos e cosméticos	0,99	4524,23	18929,37	187,40	0,99
Embalagens de tintas esmaltes, aerossóis e inseticidas	0,47	181,28	758,48	3,56	0,47
Rejeitos	25,89	1830,63	7659,36	1983,01	25,89
TOTAL	100,00	41935,08	175456,39	9642,36	100,00

Fonte: Autoria própria

Tabela 24 – Valores Obtidos pela Equação de Lloyd e Davenport

Categoria	Composição do RSU [%]	PCI úmido individual [kcal/kg]	PCI úmido individual [kJ/kg]	PCI úmido na amostra [kJ/kg]	Porcentagem na amostra [%]
Matéria Orgânica	37,48	1029,07	4305,63	1613,75	37,48
Papel	5,13	3625,80	15170,35	778,24	5,13
Papelão	4,59	3625,80	15170,35	696,32	4,59
Plástico Filme	6,51	5901,36	24691,30	1607,40	6,51
Plástico Rígido	7,25	5901,36	24691,30	1790,12	7,25
Vidro	3,1	50,90	212,97	6,60	3,10
Metais	1,73	410,20	1716,30	29,69	1,73
Embalagens Longa Vida	1,46	6330,00	26484,72	386,68	1,46
Têxteis e Couro	4,72	4200,10	17573,24	829,46	4,72
REE	0,68	5901,36	24691,30	167,90	0,68
Medicamentos, curativos, embalagens de medicamentos e cosméticos	0,99	4763,58	19930,83	197,32	0,99

Embalagens de tintas esmaltes, aerossóis e inseticidas	0,47	230,55	964,63	4,53	0,47
Rejeitos	25,89	1937,86	8108,01	2099,16	25,89
TOTAL	100,00	43907,96	183710,92	10207,17	100,00

Fonte: Autoria própria

Tabela 25 – Valores Obtidos pela Equação de Boye

Categoria	Composição do RSU [%]	PCI úmido individual [kcal/kg]	PCI úmido individual [kJ/kg]	PCI úmido na amostra [kJ/kg]	Porcentagem na amostra [%]
Matéria Orgânica	37,48	945,28	3955,04	1482,35	37,48
Papel	5,13	3334,87	13953,11	715,79	5,13
Papelão	4,59	3334,87	13953,11	640,45	4,59
Plástico Filme	6,51	5716,58	23918,17	1557,07	6,51
Plástico Rígido	7,25	5716,58	23918,17	1734,07	7,25
Vidro	3,1	48,24	201,83	6,26	3,10
Metais	1,73	379,33	1587,13	27,46	1,73
Embalagens Longa Vida	1,46	6330,00	26484,72	386,68	1,46
Têxteis e Couro	4,72	3933,94	16459,61	776,89	4,72
REE	0,68	5716,58	23918,17	162,64	0,68
Medicamentos, curativos, embalagens de medicamentos e cosméticos	0,99	4525,73	18935,64	187,46	0,99
Embalagens de tintas esmaltes, aerossóis e inseticidas	0,47	213,79	894,48	4,20	0,47
Rejeitos	25,89	1835,88	7681,32	1988,69	25,89
TOTAL	100,00	42031,66	175860,48	9670,02	100,00

Fonte: Autoria própria

Uma vez que os metais e vidros seguem para reciclagem, os valores finais de PCI devem descontar o PCI individual de cada um, e os novos dados seguem na tabela abaixo. Outro ponto importante é o fato de que a categoria de medicamentos, curativos, embalagens de medicamentos e cosméticos ter sido considerada 50% plástico e 50% papel. Ademais, o grupo de Rejeitos, que não possui composição definida, foi calculada com base na média ponderada dos PCIs das demais categorias. Por fim, foi usado o mesmo valor de PCI úmido individual para o papel e papelão, e para o plástico filme e plástico rígido.

Tabela 26 – Valores de PCI Médios e Descontado

Parâmetro	Valor Total [kJ/kg]	Valor Descontado Metal e Vidro [kJ/kg]
Obtido por Dulong Modificada	9642,36	9615,06
Obtido por Lloyd e Davenport	10207,17	10170,88
Obtido por Boye	9670,02	9636,31
Média	9839,85	9807,41

Fonte: Aatoria própria

Uma vez que a média obtida sem metais e vidros equivale a 2344,03 kcal/kg, o processo de queima é favorável para essa amostra sem a necessidade de adição de combustível.

4.1.2. Venda de Subprodutos e Tarifa de Destinação Final

Para o cálculo da venda de subprodutos e do total ganho com a Tarifa de Destinação Final, foram utilizados os valores apresentados no tópico 3.5 para encontrar os que estão dispostos na tabela abaixo.

Tabela 27 – Venda de Subprodutos e Tarifa de Destinação Final

Tipo	Quant. [t/ano]	Preço Unitário [R\$/kg]	Lucro Anual [milhões R\$]
Vidro	7920	0,15	1,188
Metais	4567,2	3,04	13,884
TDF	264000	0,10	26,400
Total	12487,2	-	41,472

Fonte: Aatoria própria

4.1.3. Créditos de Carbono

A partir dos dados da tabela 19, a emissão evitada de carbono equivalente é igual a 528 mil toneladas por ano, totalizando um lucro de 42,24 milhões de reais com a venda dos créditos.

4.2. Cálculo dos Custos

A seguir, seguem os valores obtidos com a projeção do investimento e manutenção da URE e com a destinação das cinzas e inertes.

4.2.1. Custos e Despesas da URE

Como descrito no tópico 3.6, o investimento necessário para construção da URE é de 520 milhões de reais e, dada a grandeza do valor, aqui será suposto que parte dele, 220 milhões, venha de empréstimo tomado do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) a ser pago durante 15 anos com taxa anual baseada na Selic, 13,75%. Portanto, seria aplicada uma taxa de 1,15% ao mês, durante 180 meses, com uma parcela mensal calculada através da equação abaixo.

$$PMT = PV \times \left(\frac{(1+i)^n \times i}{(1+i)^n - 1} \right) \quad (8)$$

Na qual PMT é o valor da parcela, PV é o valor presente do empréstimo, i é a taxa de juros e n é o tempo condizente com o período de cobrança dos juros, sendo contado em quantidade de meses nesse caso. Com isso, foram calculados os valores abaixo.

Tabela 28 – Investimento da URE São Carlos em 15 anos

Parâmetro	Quantidade
Valor Total do Empréstimo (PV)	R\$220.000.000,00
Período de Pagamento (n)	180 meses
Taxa de Juros (i)	1,15% ao mês
Parcela Mensal Estimada (PMT)	R\$2.900.000,00
Total Pago no Empréstimo	R\$522.059.000,00

Fonte: Autoria própria

Pretende-se ainda simular um prazo de pagamento de 20 anos, como será visto no tópico 4.3, no qual os valores apresentados acima seriam alterados como mostra a tabela abaixo.

Tabela 29 – Investimento da URE São Carlos em 20 anos

Parâmetro	Quantidade
Valor Total do Empréstimo (PV)	R\$220.000.000,00
Período de Pagamento (n)	240 meses
Taxa de Juros (i)	1,15% ao mês
Parcela Mensal Estimada (PMT)	R\$2.704.000,00
Total Pago no Empréstimo	R\$648.923.000,00

Fonte: Autoria própria

4.2.2. Custos de Destinação de Cinzas e Inertes

A partir dos dados da tabela 22, calcula-se que os gastos para destinação de cinzas e inertes são da ordem de 4,146 milhões de reais por ano.

4.3. Fluxo de Caixa e Variação de Cenários

Sendo o fluxo de caixa calculado pelo total arrecadado menos o total gasto, devem ser somados os lucros com venda de energia, de subprodutos, recebido com a TDF e venda dos créditos de carbono, mais o caixa total do ano anterior, e subtraídos os custos de investimento, manutenção, seguro e destinação das cinzas e inertes. Para ampliar a análise, foram criados 12 cenários que variam o preço pago pela energia em mais e menos 20%, o preço de um crédito de carbono em mais e menos 20% e o período de pagamento do empréstimo em mais 5 anos para entender como esses fatores afetariam a projeção de ganhos e retorno financeiro da empresa. A organização dessa estratégia está disposta abaixo.

Tabela 30 – Variação de Cenários Financeiros

Cenário	Preço da Energia		Preço do Crédito de Carbono		Tempo de Investimento	
	Variação [%]	Preço [R\$/kWh]	Variação [%]	Preço [R\$/tCO ₂ eq]	Variação [%]	Tempo de Pagamento da Dívida [anos]
1	0	0,549	0	80	0	15
2	+20	0,659	0	80	0	15
3	-20	0,439	0	80	0	15
4	0	0,549	+20	96	0	15
5	0	0,549	-20	64	0	15
6	+20	0,659	+20	96	0	15
7	-20	0,439	-20	64	0	15
8	+20	0,659	-20	64	0	15
9	-20	0,439	+20	96	0	15
10	0	0,300	0	80	+33	20
11	+20	0,549	+20	96	+33	20
12	-20	0,439	-20	64	+33	20

Fonte: Autoria própria

Agora, parece simples esticar cada valor ao longo dos 20 anos de vida útil da unidade e estimar em que momentos os ganhos superariam os gastos. No entanto, devido ao fenômeno da inflação, o dinheiro hoje não vale o mesmo do nos anos seguintes, sendo necessário realizar sua correção para o valor presente. Para ilustrar o que foi dito, deve-se notar que a mesma unidade de bala que era comprada por 10 centavos em 2010, hoje vale 1 real. Os 20 centavos eram o valor presente em 2010, enquanto o 1 real era o valor futuro corrigido pela inflação. Assim, para estimar o quanto realmente será lucrado em 2024, 2025, e assim por diante, é necessário converter os valores de fluxo de caixa futuros para o seu valor presente equivalente a partir da equação abaixo.

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+TMA)^j} - Investimento\ Inicial \quad (9)$$

Na qual VPL é o Valor Líquido Presente, FC é o fluxo de caixa, TMA é a taxa mínima de atratividade e j é o período de cada fluxo de caixa. No caso estudado, a taxa mínima de atratividade é a rentabilidade mínima esperada e foi considerada igual a taxa de juros. Além disso, deve-se notar que a VPL reflete se o investimento irá gerar lucro no caso de resultado positivo, ou prejuízo, quando negativo.

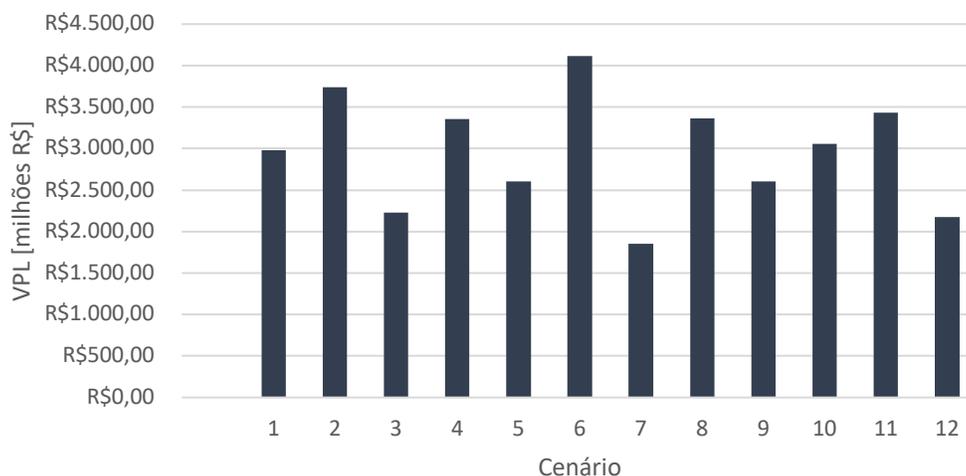
Tabela 31 – Projeção de VPL

Cenário	VPL [milhões R\$]
1	R\$ 2.982,99
2	R\$ 3.740,53
3	R\$ 2.225,45
4	R\$ 3.359,20
5	R\$ 2.606,78
6	R\$ 4.116,74
7	R\$ 1.849,24
8	R\$ 3.364,31
9	R\$ 2.601,66
10	R\$ 3.058,43
11	R\$ 3.434,64
12	R\$ 2.175,16

Fonte: Autoria própria

Para as projeções feitas, segundo o VPL, todas são viáveis, e estão colocadas no gráfico abaixo para fins visuais.

Figura 16 – Projeção de VPL



Fonte: Autoria própria

Outro índice analisado é a Taxa Interna de Retorno, que representa a taxa de desconto na qual o valor do VPL vai a zero, ou seja, pode ser calculada substituindo o VPL por zero na equação 9 e “TMA” por “TIR”. Caso a nova taxa seja maior do que a TMA base, o projeto é viável, do contrário não.

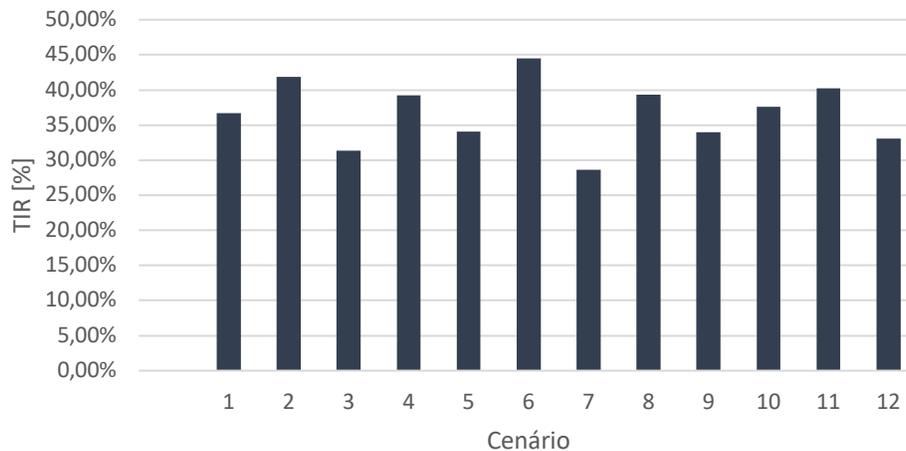
Tabela 32 – Projeção de TIR

Cenário	TIR
1	36,66%
2	41,89%
3	31,33%
4	39,27%
5	34,03%
6	44,46%
7	28,61%
8	39,30%
9	33,99%
10	37,62%
11	40,25%
12	33,03%

Fonte: Autoria própria

Novamente, todos os cenários se mostram viáveis, e a representação visual é feita abaixo.

Figura 17 – Projeção de TIR



Fonte: Autoria própria

Um último cálculo de grande importância na projeção de investimentos é o tempo de payback, ou tempo em que o investidor recupera seu investimento através dos lucros do seu negócio. De forma prática, ele acontece a partir do momento que o fluxo de caixa fica positivo, e de forma analítica, pode ser obtido pela razão entre o investimento inicial e o saldo médio do fluxo de caixa no período. Em um payback simples, os valores futuros são utilizados, mas para se obter a estimativa realista, é importante que cada valor de fluxo de caixa futuro seja corrigido para o valor presente, de forma a se obter o que é chamado de payback descontado.

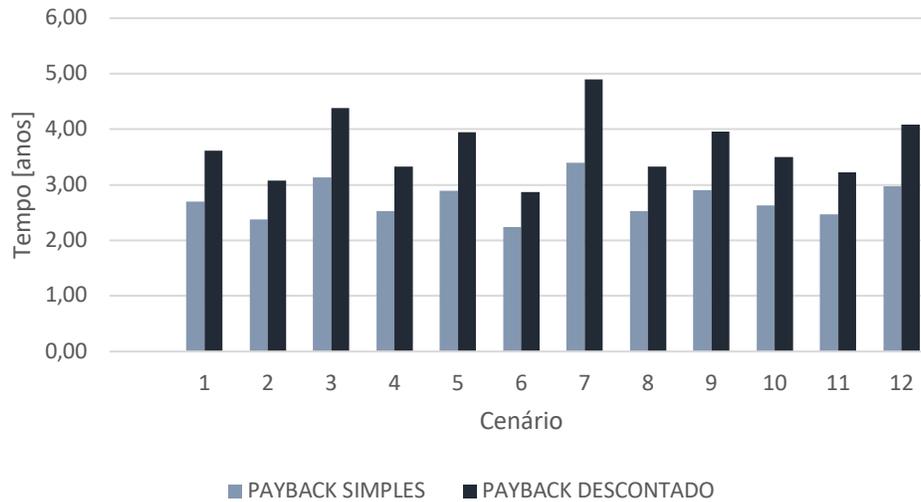
Tabela 33 – Projeção de Payback Simples e Payback Descontado

Cenário	Payback Simples [anos]	Payback Descontado [anos]
1	2,70	3,62
2	2,38	3,07
3	3,13	4,39
4	2,53	3,33
5	2,90	3,95
6	2,24	2,87
7	3,40	4,90
8	2,53	3,33
9	2,90	3,95
10	2,63	3,50
11	2,47	3,23
12	2,97	4,09

Fonte: Autoria própria

Abaixo, segue a representação visual.

Figura 18 – Projeção de Payback



Fonte: Autoria própria

5. DISCUSSÃO

Feita todas as variações de cenários para redução das incertezas e considerados os principais fatores que afetam a saúde financeira de um negócio, serão discutidos a viabilidade e os efeitos da construção de uma Unidade de Recuperação Energética em São Carlos.

5.1. Análise dos Cenários

Como esperado, o cenário em que os preços de energia e crédito de carbono aumentam enquanto o total do investimento se mantém é o melhor caso que poderiam ocorrer, resultando em uma TIR bem acima da TMA e um tempo de payback 22% menor que a média geral. Ademais, é importante citar que a variação no preço da energia afeta mais os lucros do que qualquer outro fator, colocando o cenário 2 (+20% preço da energia, pagamento em 15 anos) como o segundo mais bem projetado, e colocando o cenário 8 (+20% preço da energia, -20% preço do crédito de carbono, pagamento em 15 anos) no mesmo patamar o cenário 4, em que não há quedas e o aumento é apenas no preço do crédito de carbono.

Dentre os piores casos, o indesejável seria o cenário 7, com um tempo de payback 33% acima da média, seguido dos cenários 3 e 12, todos em que o preço da energia cai 20%. Apesar de variados, todos os cenários apresentaram TIR maior que a TMA, VPL positivo e tempo de recuperação do investimento inferior a 5 anos, o que mostra que todos seriam viáveis na prática, e a unidade sobreviveria a incertezas do cenário brasileiro e mundial.

5.2. Impacto na Economia

Segundo o PMGIRS de 2020, a prefeitura de São Carlos gasta R\$20.000.000,00 por ano com contratos para a destinação de resíduos sólidos, e 25 mil reais por dia na deposição de 100 toneladas de RSU em aterro sanitário. Escalando esse montante para as 800 toneladas base deste estudo, seriam 200 mil reais por dia, ou 66 milhões de reais por ano (330 dias de funcionamento) com a destinação. O valor é superior ao que seria gasto na usina com a Tarifa de Destinação Final, que tem o propósito de cobrir esses custos e tornar o negócio atrativo para o empreendedor. Ademais, ainda seriam coletados impostos da instituição privada, porém vale ressaltar que o cálculo presente no tópico 4.1.2 considera que todo o resíduo da cidade passaria pela URE, antes mesmo de ser conduzido a centrais de reciclagem.

Outro impacto relevante é em torno da área utilizada para a construção do aterro, visto que são utilizados 980.000 m² no aterro de Guatapar (PMGIRS, 2014), para onde vo os resíduos de São Carlos, contra 9.720 m² na URE-Barueri. Ocupando 1% da área, o restante poderia ser utilizado para atividades de captura de carbono ou construção de centros de pesquisa e educação.

5.3. Incertezas Atribuídas

O primeiro ponto gerador de incertezas nos cculos finais é o valor do PCI calculado para a amostra pois, além da incerteza que já reside na aplicação das fórmulas e na média entre elas, os valores de umidade são variáveis, assim como a composição da amostra local e de quais outros componentes dela poderiam seguir para reciclagem, reduzindo seu potencial. Em especial para o PCI da classe de rejeitos, a incerteza é expressiva na ausência de detalhamento de sua composição.

Quanto a visão financeira, as taxas atribuídas estão sujeitas a variação constante, especialmente no cenário global atual, visto que uma taxa Selic tão alta quanto agora não deve ser mantida por tanto tempo e nem subir mais. Seu patamar atual serve para atrair investimentos e manter esse dinheiro “no banco”, pois aumenta o preço das parcelas que deverão ser pagas em empréstimos caso saia de l.

Ademais, por melhor que seja a aplicação dos parâmetros de VPL e TIR, eles desconsideram os custos de oportunidades ao longo do tempo, o que pode aumentar ou reduzir os lucros da empresa. Ainda nesse tema, o preço da manutenção anual varia com gastos inesperados com danos no maquinário, o que deve acontecer com grande probabilidade dadas as condições em que o processo ocorre, e com eventuais necessidades de substituição de algum item.

Outro ponto de atenção  o surgimento de alguma ação trabalhista, que pode ocorrer caso a empresa desvie do código de tica e da CLT vigente. Além disso, sendo a URE-Barueri a primeira unidade do tipo instalada no país, deve haver alteração no preço do seguro para 2026, que foi baseado neste trabalho em um preço de 2015 em dólares. Com a variação constante da moeda, o fornecimento de insumos importados deve ser afetado, mas isso foi amenizado pelo preço do investimento inicial ser um dado real e atual.

Por fim, deve haver resistência por parte das administradoras de aterros e das geradoras de energia contra a criação de novas usinas de aproveitamento térmico, o que coloca o futuro do setor nas mãos do governo, que pode estreitar ou formalizar novas regulamentações. A esperança é que

seja seguido o caminho de países desenvolvidos e as proporções e tecnologias de um URE cresçam e se solidifiquem cada vez mais.

6. CONCLUSÃO

Analisados os fundamentos que movem a busca por uma rota mais sustentável no descarte do lixo, a qualidade do material disponível localmente e a projeção financeira ao longo de sua vida útil, a instalação da uma Unidade de Recuperação Energética em São Carlos se mostra viável. Em especial pela atenção crescente que o tipo de destinação vem recebendo no Brasil, pelos avanços tecnológicos no tratamento de gases residuais, e por sua aplicabilidade e sucesso no exterior, este tipo de usina pode representar uma grande aliada futura.

Entretanto, por agora, sabe-se que um alto investimento inicial é requerido, o que faz necessária a obtenção de linhas de crédito e uma empresa bem estruturada por trás da obra. Ainda, um outro facilitador seria agregar os municípios próximos, como Descalvado e Ibaté, no compartilhamento do local. Outro ponto importante é a resistência que muitos grupos de ambientalistas apresentam contra a incineração, o que pode trazer resistência e informações manipuladas em torno do projeto.

7. REFERÊNCIAS

ADVANTAGE AUSTRIA. Tecnologias austríacas para a gestão de resíduos. Advantage Austria, 2022. Disponível em: https://www.advantageaustria.org/br/br/Apresentacao_Final_-_ASC_Abfallwirtschaft_18.05.22__compress.pdf Acesso em: 30 ago. 2022.

AGÊNCIA BRASIL. Marco do Saneamento: Brasil desativa 600 lixões em um ano. Agência Brasil, 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2021-04/marco-do-saneamento-brasil-desativa-600-lixoes-em-um-ano> Acesso em: 10 ago. 2022.

AGÊNCIA BRASIL. Surgimento de lixões está ligado à falta de recursos e educação. Agência Brasil, 2019. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2019-04/surgimento-de-lixoes-esta-ligado-falta-de-recursos-e-educacao#:~:text=O%20levantamento%20mostra%20que%20cidades,534%20mil%20a%20cada%20m%C3%AAAs> Acesso em: 10 ago. 2022.

ANDRADE, Rubenildo V.. Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental. 2007. 227 páginas. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (ABES). URE - BARUERI: Unidade de Recuperação Energética de Resíduos Sólidos. ABES, 2015. Disponível em: <http://www.abes-mg.org.br/visualizacao-de-clipping/ler/5808/ure-barueri-unidade-de-recuperacao-energetica-de-residuos-solidos>. Acesso em: 10 jan. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Constituição (1987). ABNT NBR 10157: Aterros de resíduos perigosos - Critérios para projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, RJ, 1987.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS CATADORES (ANCAT). Anuário da Reciclagem ANCAT, 2021. Disponível em: <https://uploads->

[ssl.webflow.com/605512e6bb034aa16bac5b64/61c0df8ef4e32e41f3ef9943_Anua%CC%81rio%20da%20Reciclagem%202021%20\(1\).pdf](https://ssl.webflow.com/605512e6bb034aa16bac5b64/61c0df8ef4e32e41f3ef9943_Anua%CC%81rio%20da%20Reciclagem%202021%20(1).pdf) Acesso em: 10 set. 2022.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 03 de agosto de 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia, 2014. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2018%20-%20%20Invent%C3%A1rio%20Energ%C3%A9tico%20de%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos%20Urbanos%5B1%5D.pdf>. Acesso em: 10 set. 2022.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Diagnóstico do manejo de Resíduos Sólidos Urbanos. Brasília, Ministério do Desenvolvimento Regional, 2020. Disponível em: http://antigo.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2019/Diagnostico_RS2019.pdf Acesso em: 10 ago. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Programa Lixão Zero: Fase 2 - Resíduos Sólidos. Brasília, Ministério do Meio Ambiente, 2019. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/images/agenda_ambiental/residuos/programalixaozero_saibamais.pdf Acesso em: 10 ago. 2022.

BRITO, Adailton P.; SILVA, Celso L.. Estudo da viabilidade econômica da implantação de incineradores de “RSU” na região de Bauru. Periódico Eletrônico Fórum Ambiental de Alta Paulista, São Paulo, v. 8, n. 12, p. 15-26, 2012.

CALAFAT, Antonia et al. Polyfluoroalkyl Chemicals in the U.S. Population: Data from the National Health and Nutrition Examination Survey. Environ Health Perspect, EUA, 2007.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. 2002. RESOLUÇÃO CONAMA n° 316/2002, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. Disponível em: <https://sudema.pb.gov.br/servicos/servicos-ao-publico/legislacao-ambiental/cma/resolucao-conama-no-316.pdf/view>. Acesso em: 15 ago. 2022.

DIVINO, Natalia C. C.. Avaliação do potencial de rejeitos das associações de catadores como combustível derivado de resíduo - CDR. 77 páginas. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

ECHA. Why we care about "forever chemicals" and why you should too. ECHA, 2020. Disponível em: <https://chemicalsinourlife.echa.europa.eu/why-we-care-about-forever-chemicals-and-why-you-should-too> Acesso em: 10 ago. 2022

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Economia Circular. Ellen Macarthur Foundation, 2017?. Disponível em: <https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/pt/economia-circular/conceito> Acesso em: 23 ago. 2022.

FRÉSCA, Fábio R. C.. Um estudo da geração de resíduos sólidos domiciliares no município de São Carlos, SP, a partir da caracterização física. 134 páginas. Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2017.

GODOY, Silvia Neri e GUIMARÃES, Marta Brito e MATUSHIMA, Eliana Reiko. Intoxicação por politetrafluoretileno - Teflon - em psitacídeos. 2002, Anais.. São Paulo: Associação Brasileira de Veterinários de Animais Selvagens - ABRAVAS, 2002. . Acesso em: 27 fev. 2023.

GREENHOUSE GAS PROTOCOL. Emission Factors from Cross-Sector Tools. Greenhouse Gas Protocol, 2017. Disponível em: https://ghgprotocol.org/calculation-tools#cross_sector_tools_id Acesso em: 10 jan. 2023.

GULIN, Gleyse. Mercado de Carbono: Regulado e Voluntário. Conheça as principais diferenças e oportunidades. SAES Advogados, 2022. Disponível em: <https://www.saesadvogados.com.br/2022/07/18/mercado-de-carbono-regulado-e-voluntario-conheca-as-principais-diferencas-e-oportunidades/>. Acesso em: 10 jan. 2023.

HOTTEN, Russell. Volkswagen: The scandal explained. BBC News, 2015. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/business-34324772>. Acesso em: 10 set. 2022.

INTERNATIONAL CHAMBER OF COMMERCE (ICC). Brasil pode ganhar até US\$ 100bi em receitas de crédito de carbono até 2030. ICC, 2021. Disponível em: <https://www.iccbrasil.org/brasil-pode-ganhar-ate-us-100bi-em-receitas-de-credito-de-carbono-ate-2030/> Acesso em: 15 dez. 2022.

JIN, Ellen. A rubbish story: China's mega-dump full 25 years ahead of schedule. BBC News, 2019. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/world-asia-50429119> Acesso em: 10 ago. 2022.

KAWASAKI. Usina de incineração (recuperação de calor). Kawasaki, 2020. Disponível em: https://global.kawasaki.com/br/industrial_equipment/environment_recycling/waste/heat.html Acesso em 10 set. 2022.

KIM, Viviane J. H.. Análise da composição gravimétrica dos resíduos domiciliares de São Carlos. 2019. 196 páginas. Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2019.

LICHOTTI, Camille; BUONO, Renata. Um Maracanã de comida no lixo. Piauí, 2022. Disponível em: <https://piaui.folha.uol.com.br/um-maracana-de-comida-no-lixo/> Acesso em: 26 ago. 2022.

MARQUES, Luís; GALDINO, Stéphanie. Os Mercados de Carbono Nacionais: perspectivas históricas e atuais. WayCarbon, 2021. Disponível em: <https://blog.waycarbon.com/2021/04/mercados-de-carbono-nacionais/>. Acesso em: 10 jan. 2023.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Ibama. Instrução Normativa nº 12/2013, de 16 de julho de 2013. Dispõe sobre a regulamentação dos procedimentos de controle da importação de resíduos

de que trata a Resolução Conama n° 452/12, em consonância com a Convenção da Basileia. Brasileira: Ibama, 2013. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=130330> Acesso em: 10 set. 2022.

NOGUEIRA, Yanne C. T.. Viabilidade técnica e econômica de usinas "waste-to-energy". 85 páginas. Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

OLIVEIRA, Ivanir; GUARNIERI, Patrícia. A caracterização da logística reversa no ambiente empresarial em suas áreas de atuação: pós-venda e pós-consumo agregando valor econômico e legal. Tecnologia e Humanismo - UTFPR, n. 39, p. 120-131, 2005.

PACTO GLOBAL. ESG: Entenda o significado da sigla ESG (Ambiental, Social e Governança) e saiba como inserir esses princípios no dia a dia de sua empresa. Pacto Global, Rede Brasil, 2021?. Disponível em: <https://www.pactoglobal.org.br/pg/esg>. Acesso em: 23 ago. 2022.

PAIM, C.P.; PALMA, E.C.; EIFLER-LIMA, V.L. Gerenciar resíduos químicos: uma necessidade. Caderno de Farmácia - UFRGS, Rio Grande do Sul, v. 18, n. 1, p. 23-31, 2002.

PEDROZA, Marcelo M. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM PROCESSO DE PIRÓLISE. Revista Brasileira de Energias Renováveis, Paraná, v.6, n.2, p. 184-207, mar. 2017.

PETROBRAS. Petrobras Biocombustível reaproveita óleo de cozinha para produzir biodiesel. Petrobras, 2014. Disponível em: <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/petrobras-biocombustivel-reaproveita-oleo-de-cozinha-para-produzir-biodiesel.htm>. Acesso em: 20 set. 2022.

PINHEIRO, Igor S.; FERREIRA, João A.. Economicidade dos serviços de coleta e transporte de resíduos sólidos urbanos. 104 páginas. Escola de Contas e Gestão do TCE-RJ, Rio de Janeiro, 2017.

POLI, Dora et al.. Uma avaliação das metodologias para determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos. Revista de Ciências Exatas e Tecnologia, São Paulo, v. 8, n. 8, p. 9-31, 2013.

REDE BRASILEIRA DE PESQUISA. 2º Inquérito Nacional sobre Insegurança Alimentar no Contexto da Pandemia da Covid-19 no Brasil. Rede Brasileira de Pesquisa, 2022. Disponível em: <https://pesquisassan.net.br/2o-inquerito-nacional-sobre-inseguranca-alimentar-no-contexto-da-pandemia-da-covid-19-no-brasil/#:~:text=A%20fome%20tem%20cor&text=Em%20outras%20palavras%2C%2065%25%20dos,comandados%20por%20pretos%20e%20pardos>. Acesso em: 10 set. 2022.

RETTMANN, Ricardo. O que é e como funciona o mercado de carbono? IPAM Amazônia, 2021?. Disponível em: <https://ipam.org.br/cartilhas-ipam/o-que-e-e-como-funciona-o-mercado-de-carbono/>. Acesso em: 10 jan. 2023.

ROCHA, José D.; SCHULTZ, Emerson L.; PIGHINELLI, Anna. Comunicado Técnico: Plataforma Tecnológica Termoquímica (Pirólise e Gaseificação). Embrapa, Brasília, ISSN 2177-4447, mar. 2015.

RUIZ, Irene B.; CWIENK, Jeannette. Como funciona o sistema de garrafas retornáveis na Alemanha? Deutsche Welle, 2021. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/como-funciona-o-sistema-de-garrafas-retorn%C3%A1veis-na-alemanha/a-59886110> Acesso em: 25 ago. 2022.

SASSE, Julia. A Deposição de Lixo na Alemanha: alternativas para um programa brasileiro de administração do lixo. 2001. 10 páginas. Fraunhofer Institut (Alemanha) e UNIMEP (projeto DAAD/FAPESP), São Paulo, 2001.

SELURB. Índice de Sustentabilidade da Limpeza Urbana. Selurb, PwC, 2019. Disponível em: <https://selur.org.br/wp-content/uploads/2019/09/ISLU-2019-7.pdf> Acesso em: 10 ago. 2022.

SEYBOTH, Kristin et al. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2012. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN_Full_Report-1.pdf Acesso em: 15 set. 2022.

SIQUEIRA, Caroline. Resíduos Perigosos: O que são e como lidar da maneira correta. UFSM, 2021. Disponível em: <https://www.ufsm.br/pro-reitorias/proinfra/uma/2021/03/19/residuos-perigosos-o-que-sao-e-como-lidar-da-maneira-correta> Acesso em: 15 ago. 2022.

UNGARETII, Marcella; BENEDUCCI, Giovana. ISE B3: Um raio-X da nova carteira do Índice de Sustentabilidade da B3. EXPERT XP, 2022. Disponível em: <https://conteudos.xpi.com.br/esg/ise-b3-um-raio-x-da-nova-carteira-do-indice-de-sustentabilidade-da-b3/> Acesso em: 25 ago. 2022.

VARELA, A. et al. Caracterização inorgânica de cinza volante de uma estação de incineração de resíduos sólidos urbanos com vista à sua eventual reciclagem. Revista de Ciências Agrárias, Portugal, v. 32, n. 1, p. 207-215, 2009.

VERTOWN. Biodigestor: para que serve, tipos, vantagens, desvantagens. Vertown, 2022. Disponível em: <https://www.vertown.com/blog/biodigestor/> Acesso em: 28 ago. 2022.

ANEXO A – Valores de Emissão Permitidos

Tabela 34 – Padrão de Emissão Nacional em mg/Nm³

Poluente	Resolução CONAMA n° 316	
Material Particulado (MP) total	70	
Substâncias inorgânicas na forma particulada, agrupadas em conjunto, da Classe I	Cádmio e seus compostos, medidos como cádmio (Cd)	0,28
	Mercúrio e seus compostos, medidos como mercúrio (Hg)	
	Tálio e seus compostos, medidos como tálio (Tl)	
Substâncias inorgânicas na forma particulada, agrupadas em conjunto, da Classe II	Arsênio e seus compostos, medidos como arsênio (As)	1,40
	Cobalto e seus compostos, medidos como cobalto (Co)	
	Níquel e seus compostos, medidos como níquel (Ni)	
	Telúrio e seus compostos, medidos como telúrio (Te)	
	Selênio e seus compostos, medidos como selênio (Se)	
Substâncias inorgânicas na forma particulada, agrupadas em conjunto, da Classe III	Antimônio e seus compostos, medidos como antimônio (Sb)	7,00
	Chumbo e seus compostos, medidos como chumbo (Pb)	
	Cromo e seus compostos, medidos como cromo (Cr)	
	Cianetos facilmente solúveis, medidos como Cianetos (CN)	
	Cobre e seus compostos, medidos como cobre (Cu)	
	Estanho e seus compostos medidos como estanho (Sn)	
	Fluoretos facilmente solúveis, medidos como flúor (F)	
	Manganês e seus compostos, medidos como manganês (Mn)	
	Platina e seus compostos, medidos como platina (Pt)	
	Paládio e seus compostos, medidos como paládio (Pd)	
	Ródio e seus compostos medidos como ródio (Rh)	
	Vanádio e seus compostos, medidos como vanádio (V)	
Gases	Óxidos de enxofre, medidos como dióxidos de enxofre	280,00
	Móxidos de carbono, medidos como dióxidos de nitrogênio	570,00
	Óxidos de enxofre, medidos como dióxidos de enxofre	0,0001

Compostos clorados inorgânicos, medidos como cloreto de hidrogênio	80,00-1,8kg/h
Compostos fluorados inorgânicos, medidos como fluoreto de hidrogênio	5,00
Dioxinas e Furanos: dibenzo-p-dioxinas e dibenzo-p-furanos, expressos em TEQ (total de toxicidade equivalente) da 2,3,7,8 TCDD (tetracloro-dibenzo-para-dioxina)	0,50

Fonte: Governo Federal (2002)

Tabela 35 – Padrão de Emissão Internacional em mg/Nm³

Poluente	Melhores Técnicas Disponíveis	UE – Diretiva de Emissões Industriais 2010/75/EC	Padrão Nacional da China GB18485-2014	Padrão Nacional da Índia
Material Particulado	1-5	10	30	50
Cloreto de Hidrogênio	1-8	10	60	50
Fluoreto de Hidrogênio	<1	1	-	4
Dióxido de Enxofre	1-40	50	100	200
Óxidos de Nitrogênio	120-180	200	300	400
Monóxido de Carbono	1-10	50	100	100
Carbono Orgânico	5-30	10	-	20
Mercúrio	0,001-0,002	0,05	0,05	0,05
Cádmio	0,005-0,05	0,05	0,1	0,05
Chumbo	0,005-0,5	0,5	1	0,5
Outros Metais	0,005-0,5	0,5	-	-
Dioxinas e furanos	0,01-0,1	0,1	0,1	0,1
Amônia	<10	n/a	n/a	n/a

n/a = não aplicável; “-“ = sem limite de emissão

Fonte: UM ENVIRONMENT (2019)

ANEXO B – Dados Teóricos de PCI

Tabela 36 – PCI teórico 1

Material	Potencial calorífico [kcal/kg]
Plástico	6.301
Borracha	6.780
Couro	3.629
Têxteis	3.478
Madeira	2.520
Alimentos	1.311
Papel	4.033

Fonte: EPE (2014) retirado do IVIG (2005)

Tabela 37 – PCI teórico 2

Combustível	Potencial Calorífico [kcal/kg]
Carvão (antracite)	7.620
Carvão (betuminoso)	7.811
Turfa	2.006
Óleo Combustível	10.062
Gás Natural	9.921
Resíduos Sólidos Municipais Misturados	2.682
Papel Misturado	3.800
Papel de Jornal	4.443
Papel Corrugado	3.936
Correspondência Antiga	3.401
Revistas	2.933
Resíduos de Alimentos Misturados	1.323
Embalagens de Leite	6.330
Polietileno	10.556
Poliestireno	9.175
Plásticos Misturados	7.881
Pneus	7.713
Folhas de Árvore (50% de umidade)	1.975
Folhas de Árvore (10% de umidade)	4.462
Ervas (65% de umidade)	1.502
Madeira Verde	1.172
Madeira de Construção	4.080

Fonte: US EPA (1996) apud MARANHÃO (2008)