



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

**USINA DE CARBONIZAÇÃO E CADEIAS PRODUTIVAS DE
RECICLAGEM PARA ELIMINAÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO EM
CAMPO GRANDE-MS**

Jair da Silva Junior

2025

CAMPO GRANDE|MS

(FOLHA DE ROSTO)

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA

MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

**USINA DE CARBONIZAÇÃO E CADEIAS PRODUTIVAS DE
RECICLAGEM PARA ELIMINAÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO EM
CAMPO GRANDE-MS**

JAIR DA SILVA JUNIOR

Trabalho de Conclusão de Curso para defesa do Mestrado Profissional apresentada na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração em Eficiência Energética.

Orientador:Prof. Dr. Frederico Silva Moreira

CAMPO GRANDE

DEZEMBRO / 2025

FOLHA DE APROVAÇÃO



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



FOLHA DE APROVAÇÃO

JAIR DA SILVA JUNIOR

GESTÃO SUSTENTÁVEL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: PROPOSTA DE USINA DE CARBONIZAÇÃO E CADEIAS PRODUTIVAS DE RECICLAGEM PARA ELIMINAÇÃO DO ATERRAMENTO SANITÁRIO EM CAMPO GRANDE-MS.

Redação final do Trabalho de Conclusão de Curso, aprovada pela Banca Examinadora em **19 de dezembro de 2025** na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.

Banca examinadora:

Dr. Frederico Silva Moreira (**Presidente**)

Dr. Alexandre Meira de Vasconcelos (**Titular Externo**)

Dr. Ramon Eduardo Pereira Silva (**Titular Interno**)

Dr. Jair de Jesus Fiorentino (**Suplente Externo**)

Dr. Julio Alberto Peres Ferencz Junior (**Suplente Interno**)

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Frederico Silva Moreira, Professor do Magisterio Superior**, em 26/01/2026, às 15:37, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **ALEXANDRE MEIRA DE VASCONCELOS, Usuário Externo**, em 26/01/2026, às 16:41, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Ramon Eduardo Pereira Silva, Professor Permanente**, em 29/01/2026, às 09:01, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site
[https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?
acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **6168608** e o código CRC **A935B01F**.

FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA

Av Costa e Silva, s/nº - Cidade Universitária

Fone:

CEP 79070-900 - Campo Grande - MS

Referência: Processo nº 23104.032438/2025-51

SEI nº 6168608

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho
à minha família, pelo apoio incondicional,
e à minha amada esposa,
cuja presença, paciência e incentivo
foram essenciais em cada etapa desta jornada.

Com gratidão, Jair da Silva Junior.

AGRADECIMENTOS

Aos professores doutores do Programa de Pós-Graduação em Eficiência Energética e Sustentabilidade, meu profundo agradecimento pelo conhecimento compartilhado, pela excelência acadêmica e pelo compromisso com a formação de profissionais capazes de transformar realidades. Cada aula, discussão e orientação foi fundamental para a construção deste trabalho e para minha formação crítica e técnica.

À Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, instituição que não apenas me acolheu, mas também proporcionou as condições necessárias para o desenvolvimento desta pesquisa, expresso minha gratidão. O ambiente de inovação, pesquisa e extensão oferecido pela UFMS foi essencial para que este projeto pudesse ser concebido e executado com rigor científico e relevância social.

Em especial, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Frederico Silva Moreira, pela paciência, sabedoria e apoio incansável ao longo de toda esta jornada. Sua dedicação foi determinante para a concretização deste estudo.

À minha família, pelo amor incondicional, incentivo constante e compreensão nos momentos de dedicação exclusiva ao trabalho. Seu apoio foi a base que me permitiu seguir em frente.

Por fim, à minha amada esposa, que esteve ao meu lado em cada etapa, oferecendo suporte emocional, paciência e motivação. Seu carinho e parceria foram indispensáveis para a conclusão desta caminhada.

RESUMO

A gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) baseada em aterros sanitários é um modelo linear insustentável, gerando significativas externalidades ambientais, econômicas e sociais. Este trabalho propõe e valida um modelo integrado e replicável para a eliminação do aterro sanitário em cidades de médio porte, tomando Campo Grande-MS como estudo de caso. O modelo articula de forma sinérgica uma usina de carbonização pirolítica lenta com cadeias produtivas de reciclagem de alto valor agregado, posicionando-se na vanguarda da economia circular aplicada à gestão urbana. A abordagem transcende as soluções convencionais de "fim de tubo". Este processo converte a fração rejeito dos RSU (~ 161 t/dia) em um portfólio de produtos de valor de mercado: biocarvão (biochar), óleo pirolítico e gás de síntese (syngas). Além da drástica redução de volume e emissões, o modelo gera um excedente de $\sim 2,2$ MW de energia elétrica e permite o sequestro de carbono através da aplicação estável do biochar no solo. Paralelamente, as frações recicláveis são direcionadas para cadeias produtivas locais que as transformam em insumos para a construção civil, como tijolos ecológicos, telhas plásticas, elementos de pavimentação e mobiliário urbano, fechando o ciclo dos materiais. A metodologia adotada combinou pesquisa bibliográfica crítica, modelagem técnica detalhada com balanços de massa e energia, e análise econômico-financeira via fluxo de caixa descontado. A modelagem demonstra que o sistema integrado é capaz de desviar entre 684 e 791 toneladas de resíduos por dia do aterro, superando a geração total de Campo Grande e atingindo a meta de "zero aterro". A análise econômica, honesta e fundamentada, revela que a viabilidade financeira do investimento (CAPEX estimado em R\$200 - 250 milhões) está intrinsecamente ligada à internalização dos benefícios ambientais. Enquanto um cenário sem mecanismos de apoio apresenta um VPL negativo, a introdução de uma taxa de desvio de aterro ("gate fee"), prática consolidada em Parcerias Público-Privadas, torna o projeto economicamente atrativo, com um VPL positivo de R\$ 40,1 milhões no cenário base. Conclui-se que a transição para um modelo circular e sustentável é técnica e economicamente factível.

Palavras-chave: gestão de resíduos, economia circular, reciclagem, pirólise, biocarvão, zero aterro.

ABSTRACT

Municipal solid waste (MSW) management based on landfills is an unsustainable linear model, generating significant environmental, economic, and social externalities. This work proposes and validates an integrated and replicable model for the elimination of landfills in medium-sized cities, using Campo Grande-MS as a case study. The model synergistically combines a slow pyrolytic carbonization plant with high-value-added recycling production chains, positioning itself at the forefront of the circular economy applied to urban management. The approach transcends conventional "end-of-pipe" solutions. This process converts the residual fraction of MSW (~ 161 t/day) into a portfolio of market-value products: biochar, pyrolytic oil, and syngas. Beyond the drastic reduction in volume and emissions, the model generates a surplus of ~ 2.2 MW of electrical energy and enables carbon sequestration through the stable application of biochar to the soil. Simultaneously, recyclable fractions are directed to local production chains that transform them into inputs for the construction industry, such as ecological bricks, plastic roof tiles, paving elements, and urban furniture, closing the materials loop. The adopted methodology combined critical bibliographic research, detailed technical modeling with mass and energy balances, and economic-financial analysis via discounted cash flow. The modeling demonstrates that the integrated system is capable of diverting between 684 and 791 tons of waste per day from the landfill, exceeding the total waste generation of Campo Grande and achieving the "zero landfill" goal. The honest and well-founded economic analysis reveals that the financial viability of the investment (estimated CAPEX of R\$ 200-250 million) is intrinsically linked to the internalization of environmental benefits. While a scenario without support mechanisms presents a negative NPV, the introduction of a landfill diversion fee ("gate fee"), a consolidated practice in Public-Private Partnerships, makes the project economically attractive, with a positive NPV of R\$ 40.1 million in the base scenario. It is concluded that the transition to a circular and sustainable model is technically and economically feasible.

Keywords: waste management, circular economy, recycling, pyrolysis, biochar, zero landfill.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Composição gravimétrica, média global	32
Figura 2 - Composição gravimétrica média - países da OCDE	33
Figura 3 - Fluxo otimizado de materiais	69
Figura 4 - Fluxograma geral da usina de carbonização.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelo predominante de aterro sanitário	35
Tabela 2 - Comparação entre tecnologias de tratamento de resíduos sólidos urbanos	41
Tabela 3 – Características e aplicações da carbonização	55
Tabela 4 – Parâmetros para a modelagem da usina de carbonização.....	78
Tabela 5 - Massa gerada para cada subproduto	81
Tabela 6 – Estrutura de Capital (CAPEX)	88
Tabela 7 – Custos Operacionais Anuais (OPEX).....	89
Tabela 8 - Análise de sensibilidade financeira.....	92
Tabela 9 - Comparação entre Telhas Plásticas Recicladas e de Fibrocimento.....	100
Tabela 10 – Balanço de massa consolidado para a eliminação do aterro	106

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACC	Abatedor de Carbono Certificado
ANCINE	Agência Nacional do Cinema
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
CAPEX	Capital Expenditure (Despesa de Capital)
CBO	Canadian Bioeconomy Organization (aparece em referências)
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CMC	Custo Médio de Capital
CO ₂ e	Dióxido de Carbono Equivalente
EE	Energia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FCL	Fluxo de Caixa Livre
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRPJ	Imposto de Renda da Pessoa Jurídica
LC	Lei Complementar
LDO	Lei de Diretrizes Orçamentárias
LOA	Lei Orçamentária Anual
LRF	Lei de Responsabilidade Fiscal
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MTR	Manifesto de Transporte de Resíduos
NBR	Norma Brasileira Registrada (ABNT)

OPEX	Operational Expenditure (Despesa Operacional)
PGRS	Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos
PMGIRS	Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PPPs	Parcerias Público-Privadas
RDO	Relatório Diário de Obra
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
RN	Resíduos Não Recicláveis
RS	Rio Grande do Sul
RSI	Resíduos de Serviços de Saúde
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SISPOR	Sistema de Informação sobre Portos
TIR	Taxa Interna de Retorno
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

(FOLHA DE ROSTO)	2
FOLHA DE APROVAÇÃO	3
DEDICATÓRIA.....	5
AGRADECIMENTOS	6
RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	11
SUMÁRIO	13
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Apresentação	18
1.2 Justificativa e Motivação.....	19
1.3 Objetivos	21
1.3.1 Objetivo Geral	21
1.3.2 Objetivos Específicos	21
2 Metodologia	23
2.1 Levantamento de dados e diagnóstico da situação atual	23
2.2 Revisão e análise crítica das tecnologias disponíveis	23
2.3 Modelagem da usina de carbonização compacta	24
2.4 Estruturação de cadeias produtivas de reciclagem e manufatura	25
2.4.1 Estimativas de potencial energético e de reaproveitamento	26
2.4.2 Análise econômica e financeira	26

2.4.3 Avaliação social e institucional	26
2.4.4 Proposição de recomendações.....	27
3 GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	28
3.1 Resíduos sólidos, o que são?	28
3.2 Panorama global da geração de RSU	29
3.3 Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos.....	31
3.4 Críticas ao modelo predominante de aterros sanitários	34
3.5 Tendências internacionais: economia circular, <i>zero waste</i> e cidades sustentáveis	36
3.5.1 Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE)	38
3.5.2 Geração de Chorume e Contaminação do Solo e Água.....	38
3.5.3 Ocupação de áreas urbanas e pressão sobre o território	40
3.5.4 Custos ocultos: saúde pública, degradação ambiental, remediação futura	42
3.6 Tecnologias de tratamento de RSU	44
3.6.1 Aterro sanitário – limitações e fim de vida útil.....	44
3.6.2 Incineração como Tecnologia de Tratamento de Resíduos.....	45
3.6.3 Compostagem – potencial para resíduos orgânicos, limites de escala urbana	45
3.6.4 Carbonização/pirólise – princípios, processos, vantagens e aplicações ..	46
3.6.5 Comparação crítica entre as tecnologias.....	50
3.7 Carbonização como alternativa sustentável.....	51
3.7.1 Conceito de Pirólise/Carbonização Lenta	51
3.7.2 Produtos Gerados: Potenciais, Usos Energéticos e Industriais	53
3.7.3 Casos de sucessos internacionais e experiências brasileiras incipientes .	56

3.7.4 Benefícios ambientais: redução de emissões, neutralidade de carbono e aproveitamento energético.....	58
3.8 Economia circular e cadeias produtivas de reciclagem	59
3.8.1 Exemplos de cadeias produtivas sustentáveis.....	61
3.8.2 Aplicações de RSU na construção civil: tijolos ecológicos, telhas plásticas, pavimentos e mobiliário urbano	63
3.8.3 Geração de valor agregado e substituição de matérias-primas convencionais	64
3.8.4 Conexão entre reciclagem e desenvolvimento local	65
3.9 Modelos integrados de gestão sustentável.....	65
3.9.1 Introdução: a busca pelo "zero aterro" como paradigma global	65
3.9.2 Experiências internacionais consolidadas	66
3.9.3 Estados Unidos: a ação local e os " <i>zero waste plans</i> "	67
3.9.4 Amsterdã, Países Baixos: inovação social e os 7Rs.....	67
3.9.5 Lições aprendidas e a convergência para modelos híbridos	67
3.9.6 A proposta para Campo Grande no contexto internacional	68
3.10 Propostas híbridas: integração de carbonização, reciclagem e logística reversa	68
3.10.1 A sinergia tecnológica e operacional	69
3.10.2 Vantagens sistêmicas do modelo híbrido proposto	70
3.10.3 A governança do modelo híbrido	71
3.11 Desafios técnicos, econômicos e políticos para implementação	72
3.11.1 Desafios técnicos e operacionais	72
3.11.2 Desafios Econômicos e Financeiros	73
3.11.3 Desafios políticos, institucionais e regulatórios	73
3.12 Potencial de replicabilidade em cidades brasileiras de porte médio	74

3.12.1	Perfil das cidades-alvo e aderência do modelo	74
3.12.2	Fatores-chave para replicabilidade.....	75
3.12.3	Estratégia de disseminação	76
4	MODELAGEM TÉCNICA DA USINA DE CARBONIZAÇÃO COMPACTA INTEGRADA À ECONOMIA CIRCULAR	77
4.1	Premissas e dados de entrada	77
4.2	Fluxo de processo e descrição operacional	78
4.3	Balanço de massa.....	80
4.4	Balanço energético	81
4.5	Dimensionamento básico do reator e equipamentos	83
4.6	Controle ambiental e emissões	84
4.7	Integração com a economia circular.....	85
4.8	Avaliação preliminar de desempenho ambiental.....	85
4.9	Aspectos operacionais e segurança.....	85
4.10	Etapas de validação e replicabilidade	85
4.11	Conclusão do capítulo	86
5	MODELAGEM ECONÔMICA E FINANCEIRA DA USINA DE CARBONIZAÇÃO COMPACTA	87
5.1	Estrutura de custos	87
5.2	Estrutura de receitas.....	89
5.3	Fluxo de caixa e indicadores	90
5.3.1	Cálculo do Lucro e FCL:	90
5.3.2	Valor Presente Líquido (VPL)	90
5.3.3	Taxa Interna de Retorno (TIR).....	91
5.3.4	Payback	91

5.4	Benefícios Sociais e Ambientais Quantificados	92
6	PRODUTOS FEITOS A PARTIR DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE CAMPO GRANDE–MS	93
6.1	Produção de Tijolos Ecológicos	93
6.1.1	Tipos de resíduos aplicáveis à fabricação de tijolos ecológicos	93
6.1.2	Capacidade de absorção de resíduos pelo processo	94
6.1.3	Potencial teórico de material disponível	95
6.1.4	Absorção realista pela cadeia de tijolos (exemplo operacional)	96
6.1.5	Processos produtivos recomendados	97
6.1.6	Benefícios ambientais e sociais.....	97
6.1.7	Viabilidade econômica e operacional para Campo Grande	97
6.2	Telhas plásticas recicladas	98
6.2.1	Matérias-primas e processo de fabricação.....	98
6.2.2	Propriedades e vantagens técnicas	99
6.2.3	Comparação técnica com telhas de fibrocimento	100
6.2.4	Análise de custos e <i>payback</i>	101
6.2.5	Mercado potencial: Habitação Social e obras públicas	101
6.3	Elementos de pavimentação (<i>pavers</i> , guias, placas, asfalto com plástico)..	102
6.3.1	Materiais aplicáveis e proporções	102
6.3.2	Capacidade de absorção de resíduos	103
6.3.3	Desempenho técnico dos <i>pavers</i> híbridos.....	103
6.4	Uso de plástico em asfalto: casos internacionais e nacional.....	103
6.5	Usina de Mobiliário Urbano com plástico reciclado.....	103
6.5.1	Processo produtivo e tecnologia	104
6.5.2	Materiais e absorção de resíduos	104

6.5.3	Vantagens e impactos.....	104
6.6	Compostagem da fração orgânica	104
6.6.1	Tecnologia e escala recomendada.....	105
6.6.2	Capacidade de processamento e produtos	105
6.6.3	Benefícios adicionais.....	105
7	CONCLUSÃO	106
7.1	Trabalhos Futuros	108
	REFERÊNCIAS	111

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

A gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) configura-se como um desafio complexo, envolvendo dimensões interconectadas de sustentabilidade urbana (JACOBI; BESEN, 2011). O crescimento populacional e a urbanização acelerada geram volumes de resíduos que tensionam os limites dos modelos convencionais de destinação, os quais, centrados quase exclusivamente em aterros sanitários, mostram-se insuficientes diante da necessidade de transição para uma economia circular. No Brasil, em 2022, a geração de resíduos sólidos urbanos ultrapassou 75 milhões de toneladas por ano, estima-se que 61% destes foram encaminhados para aterros sanitários (ABREMA, 2023). Esse índice revela a urgência de alternativas capazes de eliminar o envio de resíduos aos aterros, os quais representam riscos ambientais, sociais e de saúde pública.

Em Campo Grande - MS, a geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) apresenta um volume expressivo, estimado em aproximadamente 897 toneladas diárias. Embora a literatura acadêmica local seja escassa em medições diretas recentes, esse montante é validado pelo cruzamento de dados do SNIS (2023) e as projeções do Censo IBGE (2022). Considerando a população recenseada de 897.938 habitantes e o índice de geração per capita médio para a região Centro-Oeste, que é de aproximadamente 1,0 kg/hab./dia segundo o Panorama ABREMA (2024), a estimativa de 897 t/dia demonstra-se tecnicamente consistente com a realidade operacional reportada pelos órgãos de controle estaduais (IMASUL, 2017; TCMS, 2022)." A maior parte desses resíduos seguem para o aterro sanitário municipal (IMASUL, 2017; TCE-MS, 2023). Além de ocupar grandes áreas de solo urbano, essa prática contribui para a emissão de gases de efeito estufa (CH_4 , CO_2 , N_2O), a contaminação do solo e da água por chorume, e o desperdício de materiais que poderiam ser reaproveitados. A manutenção desse modelo linear, baseado em “produzir, usar, descartar”, mostra-se insustentável diante da crise climática e das crescentes demandas por eficiência energética e economia circular.

Nesse contexto, a busca por soluções integradas que aliem inovação tecnológica e sustentabilidade torna-se prioritária. A evolução recente nas rotas de transformação termoquímica de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) destaca a carbonização lenta e a pirólise

como processos fundamentais para a conversão de frações de rejeito em combustíveis alternativos e insumos de alto valor energético. Segundo Sarker et al. (2024), esses avanços tecnológicos permitem a redução drástica do volume destinado a aterros e também a produção eficiente de biocarvão, gás de síntese e bio-óleos, consolidando a gestão de resíduos como um pilar essencial da transição energética e da economia circular.

A presente proposta fundamenta-se nas diretrizes dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), com especial ênfase nas metas de energia limpa (ODS 7), cidades sustentáveis (ODS 11) e consumo e produção responsáveis (ODS 12) (UNITED NATIONS, 2015). Ao integrar a usina de carbonização e as cadeias de reciclagem, o projeto busca operacionalizar os princípios da Economia Circular — definida por Kirchherr et al. (2017) como um sistema regenerativo que substitui o conceito de 'fim de vida' pela restauração e valorização de materiais. Dessa forma, o modelo pretende consolidar-se como uma alternativa viável e inovadora para o contexto urbano brasileiro, oferecendo caminhos práticos para superar as barreiras de implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) enfrentadas por diversas municipalidades.

Mais do que um projeto de gestão de resíduos, esta pesquisa apresenta-se como uma estratégia de transformação urbana, em que lixo deixa de ser sinônimo de problema para se tornar fonte de energia, matéria-prima e dignidade social.

1.2 Justificativa e Motivação

A problemática da gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) transcende a dimensão técnica de destinação final, configurando-se como um reflexo das falhas estruturais nos ciclos de produção e consumo da sociedade contemporânea. O modelo linear tradicional, fundamentado na disposição em aterros sanitários, encontra-se em estágio de exaustão sistêmica: demanda extensas áreas territoriais, impõe custos operacionais crescentes e negligencia o potencial de valoração de recursos que são tratados como rejeitos sem valor (ABREMA, 2024). Em Campo Grande-MS, o envio diário de aproximadamente 897 toneladas de resíduos ao aterro municipal representa um passivo ambiental crítico, mas uma perda de oportunidade na geração de energia renovável, novos materiais e ativos econômicos locais.

Do ponto de vista ambiental, a urgência da proposta é fundamentada por dados climáticos contundentes. Os aterros sanitários são fontes significativas de gases de efeito estufa (GEE), especialmente o metano (CH₄), que possui um potencial de aquecimento global até 25 vezes superior ao dióxido de carbono em um horizonte de 100 anos (IPCC, 2023). Conforme aponta o IPCC (2022), a manutenção da lógica de aterramento contraria frontalmente as metas internacionais de neutralidade de carbono e os compromissos assumidos pelo Brasil no Acordo de Paris. Somado a isso, o manejo inadequado do chorume representa uma ameaça persistente aos corpos hídricos e solos, impactando diretamente a saúde pública urbana.

Nesse cenário, a Economia Circular emerge como o paradigma necessário para a transição de um sistema de desperdício para um sistema de regeneração. De acordo com Kirchherr et al. (2023), a economia circular substitui o conceito de "fim de vida" por processos de recuperação e valorização. A inovação deste estudo reside na integração de uma usina de carbonização compacta com cadeias de manufatura sustentável. Segundo Sarker et al. (2024), a evolução recente nas tecnologias de transformação termoquímica permite converter a fração rejeito em combustíveis alternativos de alta densidade energética, como o biocarvão (biochar), óleos pirolíticos e gás de síntese, transformando o que seria um custo ambiental em um ativo energético de alto valor.

A relevância técnica e econômica amplia-se ao propor que os resíduos não carbonizáveis sejam direcionados para a manufatura de produtos reciclados com valor agregado, como tijolos ecológicos, componentes para a construção civil e mobiliário urbano. Esta estratégia de diversificação de rotas de saída reduz a escala necessária para a unidade de tratamento térmico, otimiza o investimento inicial (CAPEX) e potencializa o retorno financeiro do modelo, tornando-o viável para municipalidades de médio porte (CZERWIŃSKA; ŚLIZ; WILK, 2023).

Sob a ótica social, a proposta adquire um caráter de reparação e inclusão. A transição para tecnologias de valoração de resíduos permite que os catadores, historicamente marginalizados em condições precárias de trabalho, sejam integrados a processos industriais de maior valor agregado. De acordo com Gutberlet (2021), a inclusão desses atores em cadeias produtivas formais de reciclagem avançada e manufatura sustentável é essencial para o

alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 8 e 11), promovendo trabalho decente e cidades mais resilientes.

Por fim, este trabalho justifica-se pela sua originalidade acadêmica e aplicabilidade prática. Enquanto a literatura nacional frequentemente se limita a estudos isolados de reciclagem ou incineração, esta pesquisa propõe um modelo híbrido, realista e replicável que combina a carbonização com cadeias de manufatura. Em síntese, a justificativa deste estudo sustenta-se em quatro pilares interdependentes:

- Ambiental: Eliminação da dependência de aterros e mitigação severa de emissões de GEE;
- Econômico: Conversão de passivos em ativos energéticos e industriais;
- Social: Empoderamento e integração socioeconômica dos trabalhadores da reciclagem;
- Acadêmico-Científico: Contribuição para sistemas integrados de gestão de RSU no Hemisfério Sul.

Assim, o presente trabalho não se limita a uma proposição tecnológica; ele estabelece um novo paradigma de gestão urbana, no qual o resíduo é reconhecido como recurso e a sustentabilidade como motor de desenvolvimento humano e econômico.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Propor um modelo de gestão sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos para o município de Campo Grande-MS, fundamentado na integração de uma usina de carbonização compacta e cadeias de reciclagem e manufatura, visando à eliminação da disposição final em aterros sanitários

1.3.2 Objetivos Específicos

1 - Mapear a geração e a composição dos RSU em Campo Grande-MS, identificando as frações orgânicas, recicláveis e rejeitos, de modo a embasar tecnicamente a proposta.

2 - Propor um modelo de usina de carbonização compacta, ajustado à realidade local, detalhando fluxos de entrada e saída, bem como a produção de biocarvão, gás de síntese, óleos pirolíticos e energia.

3 - Estruturar cadeias produtivas de reciclagem e manufatura, capazes de transformar parte dos resíduos em produtos de maior valor agregado, como tijolos ecológicos, telhas plásticas, elementos de pavimentação e mobiliário urbano.

4 - Estimar o potencial energético e de reaproveitamento dos RSU de Campo Grande, considerando a geração de eletricidade, a substituição de materiais convencionais e a redução de emissões de gases de efeito estufa.

5 - Realizar análise econômica do modelo integrado, contemplando custos de implantação, operação e manutenção da usina, bem como receitas provenientes da venda de energia, de subprodutos da carbonização e de materiais reciclados, utilizando indicadores como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Payback.

6 - Avaliar os impactos sociais da proposta, com ênfase na geração de empregos formais, na capacitação de catadores e na promoção da inclusão produtiva em setores de maior estabilidade e qualidade.

7 - Apresentar recomendações de políticas públicas e parcerias institucionais que possam viabilizar a implementação do modelo em Campo Grande e, futuramente, sua replicação em outras cidades brasileiras e internacionais.

2 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi concebida de modo a articular fundamentos técnicos, econômicos e sociais, garantindo que a proposta aqui apresentada seja viável em termos acadêmicos e aplicável na prática, como referência para outras cidades. A abordagem adota uma lógica exploratória e aplicada, combinando pesquisa bibliográfica, análise documental, modelagem técnica e estudo de caso.

2.1 Levantamento de dados e diagnóstico da situação atual

Será realizada a coleta e análise de dados secundários referentes à geração e composição dos resíduos sólidos urbanos em Campo Grande-MS, por meio de fontes oficiais (ABRELPE, IBGE, Solurb, Prefeitura Municipal). O diagnóstico abrangerá:

Quantidade total de resíduos gerados diariamente;

Composição gravimétrica média (orgânicos, recicláveis, rejeitos);

Custos atuais de coleta, transporte e disposição em aterro;

Emissões de gases de efeito estufa associadas ao modelo vigente.

2.2 Revisão e análise crítica das tecnologias disponíveis

A revisão e análise crítica das tecnologias de tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) foi delineada para identificar, sob o prisma da literatura científica e de experiências técnicas consolidadas, as potencialidades e limitações das alternativas tecnológicas vigentes. Esta etapa, de natureza analítico-comparativa, fundamentou-se em publicações indexadas, relatórios de organismos internacionais (WORLD BANK, 2018; PNUMA, 2021) e normas técnicas aplicáveis à gestão de resíduos.

Foram examinadas as rotas tecnológicas mais recorrentes nos cenários nacional e internacional, incluindo o aterro sanitário, a incineração, a compostagem e os processos termoquímicos, com foco na carbonização/pirólise. A análise foi estruturada a partir de critérios multidimensionais: eficiência de redução mássica e volumétrica, potencial de

recuperação energética, viabilidade econômica (CAPEX e OPEX), complexidade operacional e conformidade com os princípios da Economia Circular (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2019).

O aterro sanitário foi avaliado como a tecnologia de referência predominante no Brasil. Embora apresente ampla aceitação histórica devido ao baixo custo imediato, suas limitações são severas, destacando-se a ocupação permanente de solo, o passivo ambiental gerado pelo lixiviado e as emissões fugitivas de metano (IPCC, 2022), o que representa uma perda irreversível de recursos energéticos e materiais. Em paralelo, a incineração foi analisada pela sua alta eficiência volumétrica; contudo, barreiras como o elevado custo de capital, a necessidade de sistemas rigorosos de tratamento de gases e a baixa aceitação social (NIMBY) limitam sua expansão em contextos urbanos em desenvolvimento.

A compostagem foi examinada como rota essencial para a fração orgânica. Entretanto, autores como Hoornweg e Bhada-Tata (2012) ressaltam que, em grandes centros urbanos, o sucesso desta tecnologia é condicionado à eficiência da segregação na fonte e à logística de escoamento do composto, o que muitas vezes inviabiliza sua aplicação em escala total para resíduos mistos.

Por fim, os processos de carbonização lenta e pirólise foram analisados com base em estudos recentes que os apontam como tecnologias disruptivas para a valorização da fração rejeito. Diferentes autores (BRUNNER; RECHBERGER, 2015) destacam que a pirólise permite a conversão de resíduos heterogêneos em produtos de alto valor agregado, como biocarvão e gás de síntese, mitigando emissões atmosféricas em comparação à combustão direta. Esta análise justificou a adoção da carbonização como elemento central do modelo proposto, visando a integração com cadeias de reciclagem e a compatibilidade com a realidade de cidades de porte médio, onde a flexibilidade modular da tecnologia se mostra superior às soluções centralizadas tradicionais.

2.3 Modelagem da usina de carbonização compacta

A modelagem da unidade de carbonização compacta foi desenvolvida sob uma perspectiva conceitual e analítica, visando avaliar a viabilidade técnica da pirólise lenta aplicada à fração rejeito de RSU em municípios de porte médio. Esta etapa não visa o

detalhamento de um projeto executivo, mas a construção de um modelo fenomenológico representativo, fundamentado em parâmetros cinéticos e termodinâmicos consagrados (BASU, 2018) e em dados empíricos de estudos de caso internacionais.

O modelo foi alimentado por dados de diagnóstico local, integrando a heterogeneidade intrínseca dos resíduos e as limitações da segregação na fonte. A definição das premissas operacionais — notadamente a janela de temperatura (300°C a 500°C), o tempo de residência e as taxas de aquecimento — baseou-se em valores de referência para biomassas mistas e resíduos urbanos, reconhecendo a influência direta da composição elementar no rendimento dos produtos (Charc, Syed e Qazi, 2016).

A estruturação técnica baseou-se no Balanço de Massa e Energia (BME), mapeando os fluxos de entrada (*feedstock*) e a partição dos produtos: biocarvão (char), frações condensáveis (bio-óleo) e gases não condensáveis (syngas). O modelo previu a integração energética interna, em que o poder calorífico do gás de síntese é utilizado para a manutenção térmica do processo (autossustentabilidade do reator) e o excedente para geração de eletricidade, conforme preconizado por Bridgwater (2012) para sistemas de pirólise descentralizados.

Adicionalmente, foram incorporadas análises de potencial de mitigação de Gases de Efeito Estufa (GEE), contrastando o sequestro de carbono no biocarvão frente às emissões fugitivas de metano em aterros sanitários. A modelagem considerou, ainda, a necessidade de sistemas de limpeza de gases (*gas cleaning*) para conformidade ambiental, integrando a usina ao ecossistema da economia circular.

Por fim, os resultados desta modelagem consolidam-se como um instrumento de apoio à decisão (*Decision Support Tool*). O objetivo é fornecer o embasamento técnico necessário para as análises econômicas e socioambientais subsequentes, estabelecendo a carbonização como uma rota escalável e replicável, sem desconsiderar as incertezas inerentes a estudos de natureza exploratória.

2.4 Estruturação de cadeias produtivas de reciclagem e manufatura

Será desenvolvido um plano de aproveitamento para frações recicláveis, com foco na transformação em produtos de alto valor agregado, como tijolos ecológicos, telhas de plástico

reciclado, elementos de pavimentação e mobiliário urbano. Essa etapa inclui a identificação de tecnologias já utilizadas no Brasil e no mundo, custos de implantação em escala local e estimativa da capacidade produtiva.

2.4.1 Estimativas de potencial energético e de reaproveitamento

Com base nos modelos de carbonização e reciclagem, serão realizadas estimativas da:

- Energia elétrica passível de ser gerada;
- Volume de biocarvão e óleos pirolíticos produzidos;
- Quantidade de materiais reciclados reaproveitados na construção civil e outras aplicações;
- Redução projetada das emissões de gases de efeito estufa em relação ao cenário atual (aterro sanitário).

2.4.2 Análise econômica e financeira

Será realizada a avaliação econômica do modelo integrado, considerando:

- ★ Custos de implantação da usina e das cadeias produtivas;
- ★ Custos operacionais e de manutenção;
- ★ Receitas provenientes da venda de energia, dos subprodutos da carbonização e dos materiais reciclados;
- ★ Indicadores de viabilidade: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e tempo de retorno do investimento (*Payback*).

2.4.3 Avaliação social e institucional

Além dos aspectos técnicos e econômicos, será avaliado o impacto social do modelo, com destaque para:

- Geração de empregos formais e de qualidade;

- Capacitação e inclusão produtiva dos catadores atualmente envolvidos na coleta seletiva;
- Fortalecimento da economia local;
- Potencial de replicação do modelo em outras cidades.

2.4.4 Proposição de recomendações

A etapa final consistirá na elaboração de recomendações para políticas públicas, parcerias público-privadas (PPPs) e incentivos fiscais, de modo a viabilizar a implantação do modelo em Campo Grande e, posteriormente, em outras cidades brasileiras e internacionais.

3 GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Neste capítulo serão abordados alguns aspectos dos RSU, o que são, sua composição, e seu potencial energético.

3.1 Resíduos sólidos, o que são?

Na literatura técnica contemporânea, a definição de resíduos sólidos evoluiu de uma concepção de 'material exaurido' para a de um recurso passível de reinserção em novos ciclos econômicos. Segundo Christensen (2024), resíduos sólidos compreendem materiais descartados que, embora tenham cumprido sua função original para o gerador, retêm propriedades físicas e energéticas que podem ser recuperadas. No contexto brasileiro, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010) reforça essa visão ao distinguir 'resíduo' (material com valor econômico e passível de tratamento) de 'rejeito' (quando não há mais possibilidade de recuperação), estabelecendo que a gestão eficiente deve priorizar a não geração, a redução e o reaproveitamento.

"Art. 3º Inciso XVI - resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível;"

No Brasil, os tratamentos para os RSUs, seguem critérios da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), na qual apresenta uma relação de normas e para os resíduos sólidos é a normativa NBR 10.004 onde:

Resíduos sólidos são aqueles que são encontrados 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, 1987).

Nos centros urbanos os resíduos sólidos usualmente são chamados de “lixo”, “o lixo é um subproduto do aumento populacional, da urbanização, e crescimento econômico” (Kaza *et al.*, 2018), “Os resíduos sólidos urbanos são um dos subprodutos mais significativos do estilo de vida urbano e está crescendo mais rápido que a urbanização” (Tun e Juchelkova, 2018). Estima-se que a geração global de resíduos sólidos urbanos saltará de aproximadamente 2,01 bilhões de toneladas anuais em 2016 para cerca de 2,59 bilhões de toneladas em 2030, alcançando 3,40 bilhões de toneladas em 2050, no cenário de manutenção das tendências atuais de urbanização e crescimento econômico (Kaza *et al.*, 2018).

O entendimento e a correta gestão dos resíduos sólidos no Brasil são definidos pela Lei nº 12.305, de 2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS). Esta legislação estabelece critérios claros de classificação que servem de base para o planejamento das ações públicas e privadas, conforme disposto em seu Artigo 13.

A primeira categorização refere-se à origem, cujo objetivo é delimitar responsabilidades e definir o tipo de manejo necessário. Ela abrange uma ampla gama de fontes, reconhecendo os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), que incluem os domiciliares e os provenientes da limpeza urbana, e diferenciando-os de resíduos gerados por setores específicos. Entre estes, existem leis específicas para resíduos industriais, de serviços de saúde, de construção civil, e para os provenientes de atividades agrossilvopastoris, de mineração, de transportes e de estabelecimentos comerciais e de serviços (Brasil, 2010).

A segunda, e crucial, a classificação é quanto à periculosidade, que divide os resíduos em perigosos e não perigosos. A classificação de perigoso é aplicada aos materiais que exibem características como toxicidade, reatividade, corrosividade ou inflamabilidade, que podem impactar negativamente a saúde humana ou a qualidade ambiental (Brasil, 2010).

3.2 Panorama global da geração de RSU

A geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) consolidou-se como uma das crises ambientais e socioeconômicas mais críticas do século XXI, operando como um indicador direto dos limites do crescimento do modelo linear de consumo. De acordo com o mais recente Global Waste Management Outlook 2024 (UNEP, 2024), a geração mundial de resíduos atingiu

a marca de 2,3 bilhões de toneladas anuais. Sob o cenário de manutenção das tendências atuais (business-as-usual), projeta-se que esse volume alcance 3,8 bilhões de toneladas até 2050, impulsionado pela urbanização acelerada em economias emergentes e pela intensificação dos padrões de consumo global.

O fardo econômico dessa gestão é severo. Enquanto os custos operacionais diretos foram estimados em US\$ 252 bilhões em 2020, a inclusão de "custos ocultos" — que abrangem impactos à saúde pública, degradação ecossistêmica e emissões de gases de efeito estufa — eleva o custo real para US\$ 361 bilhões anuais (UNEP, 2024). Sem intervenções estratégicas baseadas em inovação tecnológica e economia circular, o custo global pode escalar para US\$ 640,3 bilhões por ano até 2050, tornando a gestão de resíduos financeiramente insustentável para a maioria das municipalidades.

Complementando essa análise, os dados do Banco Mundial (KAZA et al., 2018) corroboram a gravidade da má gestão, estimando que ao menos 33% dos resíduos globais ainda são destinados a depósitos a céu aberto ou queima descontrolada. Essa problemática apresenta uma forte clivagem socioeconômica: países de baixa e média renda, onde se observa o crescimento populacional mais acentuado, possuem fluxos de resíduos com alta fração orgânica. Quando disposta inadequadamente, essa biomassa torna-se uma das principais fontes antropogênicas de metano, um gás com potencial de aquecimento global significativamente superior ao CO₂ (IPCC, 2023).

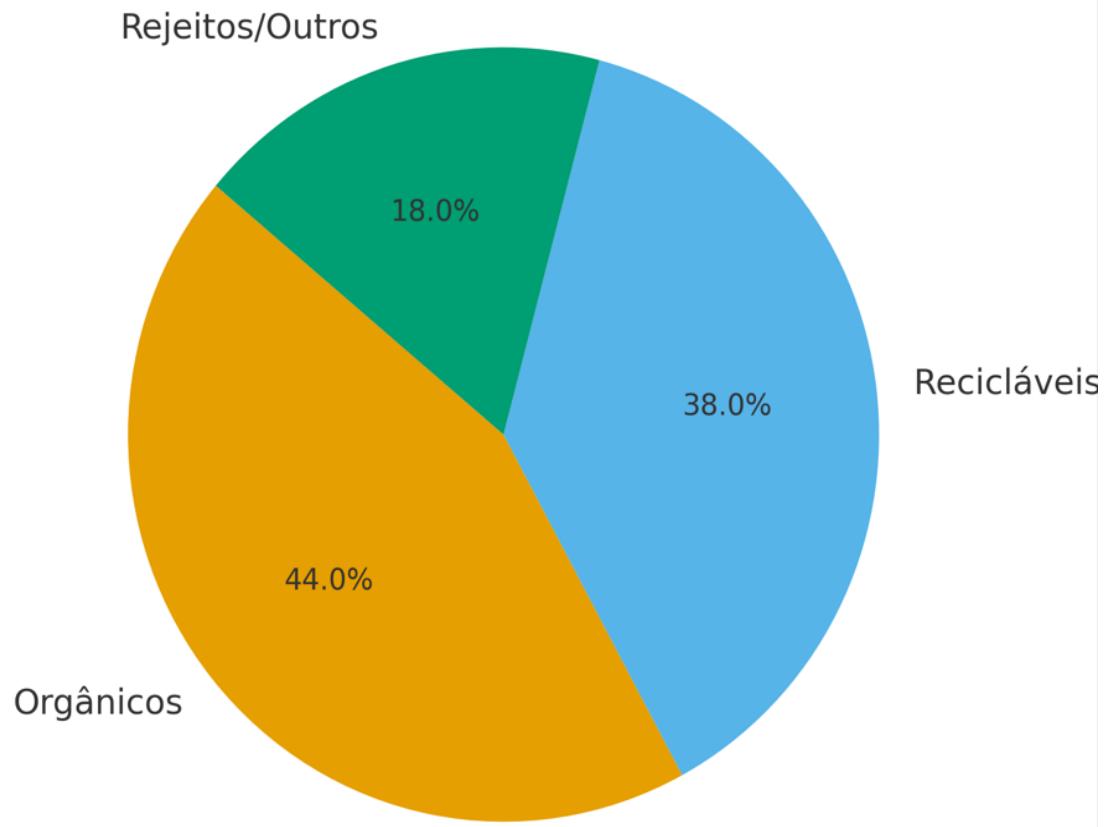
A transição para um modelo de "Zero Waste" e de Economia Circular não é, portanto, apenas uma escolha ambiental, mas uma necessidade econômica imperativa. Como apontam Sarker et al. (2024) e Kirchherr (2023), a superação dos métodos tradicionais (aterros e incineração simples) exige a adoção de rotas tecnológicas que permitam a recuperação de energia e materiais. Nesse contexto, a valorização termoquímica da fração rejeito e a integração de cadeias produtivas de reciclagem surgem como soluções estratégicas para desacoplar a geração de resíduos do impacto climático global, convertendo passivos ambientais em recursos produtivos para a economia urbana.

3.3 Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos

A análise da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é fundamental para compreender os impactos ambientais, as oportunidades de valorização econômica e redução da pressão sobre os ecossistemas. Em escala global, estudos de referência demonstram que a fração orgânica corresponde ao maior percentual da massa total dos resíduos. Estimativas consolidadas pelo Banco Mundial no relatório *What a Waste 2.0* (Kaza *et al.*, 2018) apontam que, em média, cerca de 44% dos resíduos gerados mundialmente têm origem orgânica (Figura 1), principalmente restos de alimentos e resíduos de jardins. Esse dado ganha relevância porque a disposição inadequada desse tipo de resíduo é uma das principais fontes de emissões de gases de efeito estufa, em especial o metano, contribuindo de forma significativa para as mudanças climáticas.

Além dos orgânicos, o relatório indica que aproximadamente 38% dos resíduos globais são compostos por materiais recicláveis secos, categoria que inclui papel, plásticos, metais e vidro. Esses materiais, embora apresentem elevado potencial de retorno à cadeia produtiva, ainda exibem taxas muito baixas de reaproveitamento, especialmente em países de baixa e média renda. Por fim, cerca de 18% do total corresponde a rejeitos e outras frações de difícil recuperação, cuja destinação quase sempre ocorre em aterros ou em áreas de descarte inadequado. Essa divisão evidencia que a maior parte dos resíduos gerados no mundo é potencialmente passível de valorização, desde que políticas de gestão eficazes sejam implementadas.

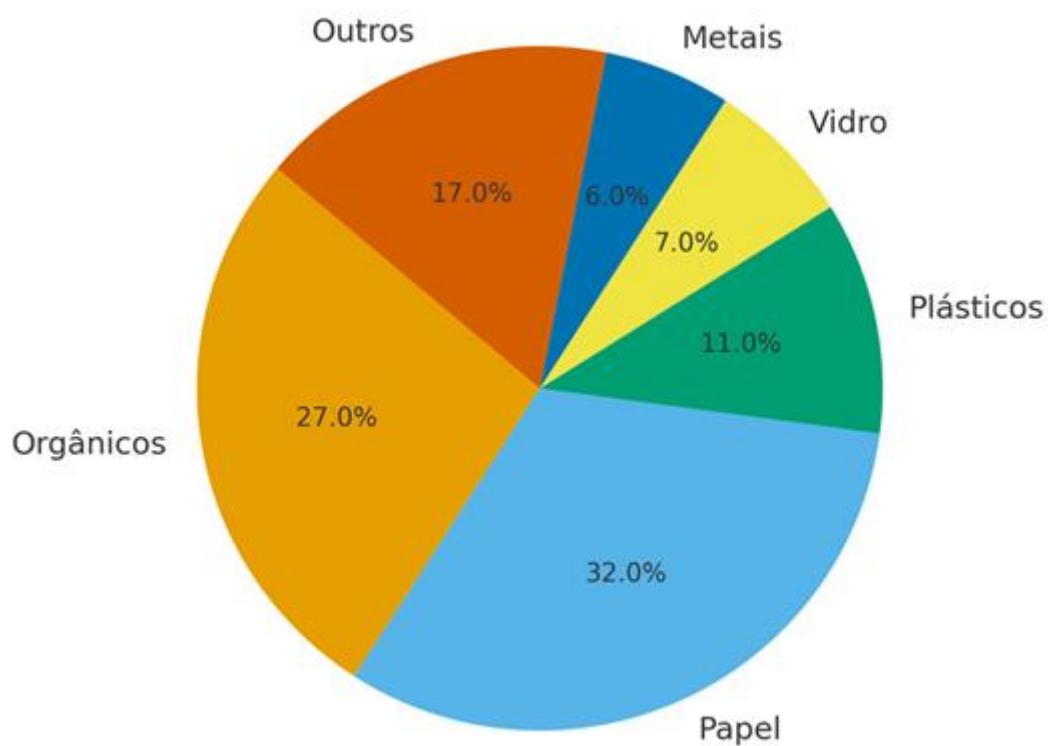
Figura 1 - Composição gravimétrica, média global

Fonte: Kaza *et al.* (2018)

Quando se observa a composição dos resíduos a partir do recorte socioeconômico, as diferenças se tornam ainda mais marcantes. Em países de baixa renda, a fração orgânica pode superar 50% a 56% do total, revelando um padrão de consumo menos industrializado, porém mais vulnerável ao problema do manejo inadequado. Nessas regiões, a ausência de sistemas estruturados de compostagem e biodigestão amplia os impactos ambientais e sanitários do descarte. Já nos países de alta renda, a fração orgânica tende a ser significativamente menor, em torno de 32%, enquanto a participação de recicláveis secos aumenta de forma proporcional, refletindo hábitos de consumo mais ligados a embalagens, produtos industrializados e bens de maior durabilidade. Essa diferença entre países de distintas faixas de renda demonstra como a composição dos resíduos está intimamente relacionada ao nível de desenvolvimento econômico, à infraestrutura disponível e às práticas culturais de consumo e descarte.

Estudos complementares reforçam esse panorama. Pesquisas sobre a composição gravimétrica em países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), por exemplo, mostram que os resíduos são compostos por cerca de 27% de orgânicos, 32% de papel, 11% de plásticos, 7% de vidro, 6% de metais e aproximadamente 17% de outras frações, evidenciando um padrão em que os recicláveis secos predominam sobre os orgânicos. Já em regiões como a África Subsaariana, a América Latina e o Sul da Ásia, a proporção de resíduos orgânicos pode variar de 47% a 62%, reiterando que a maior parte do fluxo de resíduos está ligada a restos de alimentos e vegetação. Essa característica, embora represente um desafio, também abre espaço para políticas de valorização da matéria orgânica, especialmente por meio da compostagem comunitária e do aproveitamento energético em usinas de biogás.

Figura 2 - Composição gravimétrica média - países da OCDE



Fonte: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), (2020)

Outra análise publicada por organizações internacionais de pesquisa e *advocacy ambiental* indica que, em média, cerca de 44% a 50% dos resíduos sólidos urbanos gerados globalmente são de origem orgânica, incluindo restos de alimentos e resíduos verdes (Kaza et

al., 2018; UNEP, 2021). A relevância dessa informação reside no fato de que os maiores ganhos ambientais e climáticos podem advir justamente do tratamento adequado da fração orgânica, historicamente negligenciada pelas políticas públicas de resíduos. O manejo incorreto dessa parcela é uma das principais fontes de emissões de metano (CH_4), um gás de efeito estufa com potencial de aquecimento global 28 vezes superior ao do dióxido de carbono (CO_2), além de gerar odores, vetores e lixiviados com alto potencial de contaminação (UNEP, 2021; IPCC, 2023).

Portanto, ao se analisar a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos, evidencia-se um duplo desafio: de um lado, lidar com o grande volume de resíduos orgânicos, cuja decomposição inadequada compromete a saúde pública e intensifica as mudanças climáticas; de outro, estruturar sistemas eficientes de reciclagem e reaproveitamento de materiais secos, de modo a reduzir a extração de recursos naturais e promover a economia circular. Os números apresentados por organismos internacionais como o Banco Mundial, a OCDE e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) convergem para a compreensão de que a gestão integrada da composição dos resíduos é hoje um dos eixos centrais da agenda ambiental global (Kaza *et al.*, 2018; UNEP, 2021).

3.4 Críticas ao modelo predominante de aterros sanitários

Sob o prisma social, os aterros não eliminam a precarização do trabalho informal ligado aos resíduos. Milhares de catadores e recicladores ainda dependem do acesso a essas áreas para garantir sua subsistência, frequentemente em condições insalubres e de vulnerabilidade. Embora políticas públicas como o Programa Pró-Catador e as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) tenham avançado na inclusão socioeconômica desses trabalhadores, a estrutura do modelo de aterro mantém uma relação assimétrica, com baixa valorização da mão de obra e pouca integração nas cadeias produtivas formais (Brasil, 2010; Gutberlet, 2015).

Por fim, uma crítica estrutural amplamente reconhecida é que o predomínio dos aterros (Tabela 1) desestimula investimentos em tecnologias de valorização, como reciclagem, compostagem, biodigestão e recuperação energética, oferecendo uma solução “rápida” que adia o enfrentamento da crise do descarte (UNEP, 2021; Kaza *et al.*, 2018).

A transição para paradigmas baseados em cidades sustentáveis e no conceito de zero waste reflete uma mudança de paradigma defendida pelo PNUMA (2021). Conforme as diretrizes das Nações Unidas, essa transformação transcende o campo tecnológico, configurando-se como uma reestruturação socioeconômica essencial para manter o desenvolvimento dentro dos limites planetários, alterando a forma como a sociedade interage com o ciclo de vida dos materiais.

Organismos internacionais como o Banco Mundial e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente alertam que, se a dependência desse modelo persistir, os custos ocultos associados à saúde pública, à degradação ambiental e às mudanças climáticas poderão superar em muito os gastos atuais de operação. Em outras palavras, manter o aterro como eixo central da política de resíduos é adiar a transição necessária para um modelo circular e sustentável.

Tabela 1 - Modelo predominante de aterro sanitário

Aspecto	Pontos Positivos	Limitações / Críticas	Impactos Observados
Gestão de resíduos	Centraliza a etapa de disposição final, facilitando controle operacional e administrativo.	Baixa capacidade de valorização material ou energética, reforçando a lógica do descarte.	Mantém modelo linear “descartar e enterrar”, com pouca reinserção no ciclo produtivo.
Impactos ambientais	Reduz disposição inadequada e impactos imediatos em comparação com lixões a céu aberto.	Geração de gases de efeito estufa (metano) e risco de chorume e vazamentos ao longo do tempo.	Contribui para o aquecimento global e gera passivos ambientais de longo prazo.
Uso e ocupação do território	Permite acondicionamento de grandes volumes em áreas específicas com infraestrutura concentrada.	Exige extensas áreas, muitas vezes em regiões periféricas ou ambientalmente sensíveis.	Amplia distâncias de transporte, eleva custos logísticos e intensifica pegada de carbono.
Dimensão social	Cria postos de trabalho ligados à operação, manutenção e gestão do aterro.	Oferece pouca inclusão produtiva para catadores e trabalhadores da reciclagem; condições insalubres.	Reforça exclusão social e mantém trabalho de baixo valor agregado e alta vulnerabilidade.
Custos econômicos	Custos iniciais	Custos recorrentes elevados	Custo total crescente ao longo

	relativamente inferiores em comparação a tecnologias avançadas de tratamento.	com operação, monitoramento ambiental, remediação e passivos.	do tempo, com prejuízos econômicos e ambientais acumulados.
Inovação e sustentabilidade	Modelo operacional simples, amplamente difundido e conhecido no Brasil.	Desestimula compostagem, reciclagem e recuperação energética, limitando inovação no sistema.	Mantém lógica linear e não favorece transição para economia circular nem valorização dos resíduos como recursos.

Fonte: adaptados de Banco Mundial (2018), UNEP (2024) e literatura internacional.

3.5 Tendências internacionais: economia circular, zero waste e cidades sustentáveis

A transição para paradigmas baseados em cidades sustentáveis e no conceito de zero waste reflete uma mudança de paradigma defendida pelo PNUMA (2021). Conforme as diretrizes das Nações Unidas, essa transformação transcende o campo tecnológico, configurando-se como uma reestruturação socioeconômica essencial para manter o desenvolvimento dentro dos limites planetários, alterando a forma como a sociedade interage com o ciclo de vida dos materiais.

A economia circular emerge como o principal framework teórico e prático para redesenhar os fluxos de materiais e energia. Diferentemente do modelo linear tradicional, caracterizado por extrair, produzir e descartar, a economia circular propõe um sistema regenerativo no qual os resíduos são eliminados por meio do design de produtos, da manutenção, da reutilização, da reciclagem e da recuperação de materiais (Ellen MacArthur Foundation, 2019). Nesse modelo, os resíduos deixam de ser um passivo ambiental e tornam-se insumos para novos ciclos produtivos, reduzindo a extração de recursos naturais e minimizando impactos ambientais. Organismos internacionais como a União Europeia e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) têm promovido políticas e financiamentos para acelerar essa transição, com destaque para o Plano de Ação para a Economia Circular da UE (2020) e a Aliança Global para Economia Circular liderada pela ONU.

Paralelamente, o movimento "lixo zero" (*zero waste*) ganha força como meta operacional e filosófica. Seu objetivo é maximizar o desvio de resíduos de aterros e incineradores por meio da redução na fonte, da reutilização, da compostagem e da

reciclagem. Cidades como San Francisco (EUA), Camberra (Austrália) e Ljubljana (Eslovênia) já alcançaram taxas de desvio superiores a 80%, demonstrando a viabilidade técnica e econômica desse modelo (*Zero Waste Cities*, 2023). Essas experiências mostram que o sucesso depende não apenas de tecnologia, mas também de educação ambiental, políticas públicas robustas e engajamento comunitário.

No contexto urbano, essas tendências convergem para o conceito de cidades sustentáveis, compreendidas como ambientes que integram gestão de resíduos, eficiência energética, mobilidade limpa e inclusão social. Cidades como Copenhague (Dinamarca), Vancouver (Canadá) e Singapura têm implementado sistemas integrados de gestão de resíduos que combinam coleta seletiva avançada, centrais de biodigestão e compostagem, usinas de recuperação energética e incentivos fiscais para reciclagem (ICLEI, 2022). Essas iniciativas estão alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial ao ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis).

Um exemplo notável é a cidade de San Francisco, que estabeleceu como meta tornar-se *zero waste* até 2030. Por meio de legislação rigorosa, incentivos econômicos e parcerias com o setor privado, a cidade já desviou mais de 80% de seus resíduos de aterros, utilizando sistemas de compostagem em larga escala e reciclagem de múltiplos fluxos materiais (*SF Environment*, 2023). Da mesma forma, Ljubljana tornou-se a primeira capital europeia a adotar uma estratégia *zero waste*, com resultados expressivos na redução de resíduos per capita e na geração de empregos verdes (*European Commission*, 2021).

No entanto, é importante destacar que não existe uma solução única. As estratégias bem-sucedidas compartilham alguns elementos comuns:

Hierarquia de resíduos: priorização da redução, reutilização e reciclagem sobre a disposição final;

Integração tecnológica: combinação de métodos biológicos (compostagem, biodigestão), térmicos (carbonização, gaseificação) e mecânicos (reciclagem);

Governança participativa: envolvimento do setor público, privado e da sociedade civil;

Design sistêmico: planejamento de fluxos materiais em escala municipal e regional.

Essas tendências apontam para um futuro em que a gestão de resíduos deixa de ser um fim em si mesma e passa a integrar uma estratégia mais ampla de descarbonização, resiliência urbana e justiça social. A proposta deste trabalho, que integra usinas de carbonização a cadeias produtivas de reciclagem, situa-se no centro dessas inovações, oferecendo um modelo tecnologicamente viável, economicamente atrativo e socialmente inclusivo, plenamente alinhado às melhores práticas internacionais em economia circular e cidades sustentáveis.

3.5.1 Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE)

O metano (CH_4) é o gás de maior relevância no contexto dos aterros sanitários. Sua formação ocorre durante a fase metanogênica da decomposição anaeróbia, podendo perdurar por décadas após o encerramento das atividades do aterro. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022) atribui ao CH_4 um potencial de aquecimento global (GWP - *Global Warming Potential*) 28 a 34 vezes superior ao do CO_2 em um horizonte de 100 anos, podendo chegar a mais de 80 vezes em uma perspectiva de 20 anos. Estima-se que a disposição de resíduos sólidos em aterros seja responsável por aproximadamente 5% das emissões globais de GEE antrópicas (World Bank, 2018; UNEP, 2024), tornando-se uma fonte crítica na luta contra as mudanças climáticas.

Além do metano, o dióxido de carbono (CO_2) também é emitido em volumes consideráveis. Outro gás de efeito estufa relevante é o óxido nitroso (N_2O), que apresenta um potencial de aquecimento global cerca de 273 vezes maior que o CO_2 (IPCC, 2022).

A gestão inadequada do biogás—seja por ausência de sistemas de captação, seja por ineficiência na queima—agrava sobremaneira esses impactos. Muitos aterros, especialmente em países em desenvolvimento, operam sem tecnologia adequada para a captura e o aproveitamento energético do biogás, permitindo que grandes quantidades de CH_4 sejam lançadas livremente na atmosfera (Kaza *et al.*, 2018).

3.5.2 Geração de Chorume e Contaminação do Solo e Água

Paralelamente às emissões gasosas, a geração de chorume (ou líquido percolado) constitui um dos passivos ambientais mais críticos associados à operação de aterros sanitários.

Este efluente de alta complexidade e carga poluidora é formado pela percolação de água de chuva através da massa de resíduos, combinada à umidade natural dos próprios materiais descartados e aos produtos resultantes de suas reações de decomposição bioquímica.

A composição do chorume é extremamente variável e heterogênea, influenciada pela composição gravimétrica dos resíduos, idade do aterro, condições climáticas e eficiência operacional. De modo geral, caracteriza-se por elevadíssimos teores de matéria orgânica, expressos por Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) que podem atingir valores na ordem de dezenas de milhares de miligramas por litro (mg/L), superando em milhares de vezes os níveis encontrados em esgotos domésticos (IPCC, 2022; World Bank, 2018).

Além da carga orgânica, o chorume apresenta concentrações significativas de:

Metais pesados: Como chumbo (Pb), cádmio (Cd), cromo (Cr), níquel (Ni) e mercúrio (Hg), lixiviados de produtos eletroeletrônicos, pilhas, baterias, tintas e outros resíduos industriais dispostos incorretamente;

Compostos orgânicos persistentes e xenobióticos: Incluindo ftalatos, fenóis, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), solventes e pesticidas, com alto potencial tóxico, carcinogênico e de bioacumulação;

Nutrientes: Principalmente nitrogênio amoniacal (N-NH₃) em altas concentrações, que pode provocar eutrofização de corpos d'água receptores;

Sólidos dissolvidos totais (TDS) e cloreto: Que conferem alta salinidade ao efluente.

O risco de contaminação do solo e de águas subterrâneas e superficiais é iminente. Apesar de os aterros sanitários serem projetados com sistemas de impermeabilização de base (com mantas de PEAD - Polietileno de Alta Densidade) e sistemas de drenagem e coleta de chorume, a integridade dessas barreiras físicas não é perpétua. Estudos e relatos de falhas documentam que vazamentos podem ocorrer devido a:

Fissuras ou rupturas nas mantas impermeabilizantes por acomodação do terreno ou falhas na instalação;

Degradação química dos materiais de impermeabilização pelo próprio chorume agressivo;

Falhas operacionais ou na manutenção dos sistemas de drenagem e bombeamento.

Uma vez liberado no meio ambiente, o chorume infiltra-se no solo, podendo atingir e poluir lençóis freáticos, tornando-os impróprios para qualquer uso. Esse tipo de contaminação é particularmente perigoso devido à sua natureza difusa, de difícil detecção precoce e de custos astronômicos para remediar. Dessa forma, mesmo aterros considerados "controlados" representam um risco ambiental latente e de longo prazo, que se estende por décadas após sua desativação, configurando-se em uma herança negativa para as gerações futuras e um ônus financeiro para o poder público.

3.5.3 Ocupação de áreas urbanas e pressão sobre o território

O avanço desordenado das cidades brasileiras tem se constituído em um dos principais vetores de degradação ambiental e pressão sobre o território. O crescimento urbano, em sua maioria, ocorreu de forma não planejada, ampliando as demandas por infraestrutura e serviços sem a correspondente capacidade de suporte ambiental. A disposição de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários, muitas vezes localizados próximos a áreas urbanizadas, intensifica esse quadro ao ocupar grandes extensões de solo que poderiam ser destinadas a habitação, preservação ou atividades produtivas (IBGE, 2010; ABRELPE, 2023).

Do ponto de vista espacial, os aterros não apenas representam um uso ineficiente do território, mas também impõem limitações à expansão urbana. Estudos têm demonstrado que municípios de médio porte, como Campo Grande-MS, já enfrentam o dilema entre a necessidade de destinação de resíduos e a pressão imobiliária sobre áreas periféricas (Lima; Lira; Souza, 2019). Essa sobreposição de demandas cria conflitos territoriais e revela a insustentabilidade do modelo linear de gestão de resíduos.

Além da ocupação física, a presença de aterros provoca a chamada zona de exclusão urbana, isto é, áreas que, embora próximas ao tecido urbano, tornam-se impróprias para moradia e desenvolvimento devido ao risco de contaminação, emissão de odores e desvalorização imobiliária (Prefeitura Municipal de Campo Grande, 2023). Tais impactos comprometem a qualidade de vida da população e perpetuam desigualdades socioespaciais, uma vez que comunidades de baixa renda tendem a se instalar nas proximidades dessas áreas, convivendo diretamente com seus passivos ambientais (ONU, 2015).

O cenário agrava-se quando se considera a perspectiva da mudança climática. A ocupação urbana em áreas destinadas a aterros amplia a emissão de gases de efeito estufa, especialmente metano, potencializando o aquecimento global (IPCC, 2022). Essa situação cria um ciclo perverso: quanto maior a população urbana e o consumo, maior a geração de resíduos, o que demanda mais território para disposição final, retroalimentando o processo de degradação ambiental e territorial.

Diante desse contexto, torna-se imperativo adotar soluções que libertem as cidades da dependência de aterros, reduzindo a pressão sobre o solo urbano e reorientando o uso do território para atividades de maior valor social e ambiental. O paradigma da economia circular, aliado a tecnologias como a carbonização e a manufatura de produtos reciclados, desponta como alternativa capaz de reconciliar crescimento urbano e sustentabilidade territorial, transformando resíduos em recursos e devolvendo qualidade de vida às populações urbanas (Lima; Lira; Souza, 2022; ABRELPE, 2023).

Com base na literatura analisada, elaborou-se a Tabela 2, que sintetiza as principais tecnologias de tratamento de resíduos sólidos urbanos, destacando suas vantagens, limitações, maturidade tecnológica, impactos ambientais e potencial energético. Essa comparação permite evidenciar o posicionamento estratégico da pirólise/carbonização frente às alternativas convencionais.

Tabela 2 - Comparação entre tecnologias de tratamento de resíduos sólidos urbanos

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens	Maturidade	GEE	Energia Aproveitável	Aplicação Ideal
Aterramento Sanitário (moderno)	Baixo custo; operação consolidada	Emite CH ₄ ; ocupa área; baixa recuperação energética	Alta	••••• (muito altos)	Baixa	Cidades pequenas com poucos recursos

Compostagem	Baixo custo; reduz fração orgânica	Requer segregação; gera odores	Alta	•• (baixa)	Muito baixa	Municípios com alto teor de orgânicos
Digestão Anaeróbia	Produz biogás; reduz CH ₄	Requer alimentação estável	Média-alta	••• (moderados)	Média	RSU com alta proporção orgânica
Incineração (WTE)	Alta redução de volume; gera energia	CAPEX alto; cinzas tóxicas	Muito alta	•••• (altos)	Alta	Grandes cidades
Gasificação	Bom rendimento energético	Exige combustível homogêneo	Média	•••	Alta	Resíduos secos e triados
Pirólise / Carbonização	Flexível; produz biochar; baixa emissão	CAPEX médio; maior complexidade	Média-alta	•• (baixa)	Média	Resíduos secos não recicláveis
Reciclagem Mecânica	Maior valor agregado	Requer segregação de alta qualidade	Alta	•	Não energética	RS recicláveis
Reciclagem Química	Recupera polímeros difíceis	Processo caro e ainda emergente	Baixa-média	••	Média	Polímeros complexos

Legenda GEE: • (baixo) até ••••• (muito alto)

Fonte: De autoria própria.

3.5.4 Custos ocultos: saúde pública, degradação ambiental, remediação futura

Os aterros sanitários e, sobretudo, as disposições inadequadas de resíduos geram um conjunto de custos ocultos que raramente aparecem nos balanços municipais, mas que recaem sobre a sociedade ao longo do tempo. Do ponto de vista da saúde pública, a proximidade de áreas de disposição com o tecido urbano aumenta a exposição a bioaerossóis, odores, material particulado e gases como metano (CH₄) e compostos orgânicos voláteis, associados a quadros respiratórios e inflamatórios, além de favorecer a proliferação de vetores de doenças (ABRELPE, 2023; Prefeitura Municipal de Campo Grande, 2023). A informalidade na cadeia de resíduos agrava o quadro, ao expor trabalhadores a riscos ocupacionais (cortes, contaminações e acidentes), ampliando custos com urgência e atenção

primária que não são contabilizados no orçamento da limpeza urbana (Lima, Lira, & Souza, 2019).

No plano da degradação ambiental, o chorume percola para o solo e para os aquíferos quando os sistemas de impermeabilização, drenagem e tratamento não operam em eficiência plena durante todo o ciclo de vida do aterro, condição especialmente desafiadora em municípios de porte médio que enfrentam limitações orçamentárias e institucionais (Mata; Lima; Jeronymo, 2023). Esses impactos exigem monitoramento e mitigação por décadas, cristalizando passivos ambientais que se traduzem em perda de serviços ecossistêmicos (qualidade da água, regulação hídrica e de microclima), queda de valor imobiliário e restrições de uso do solo em zonas de influência do empreendimento (ABRELPE, 2023; PMCG, 2023).

Tais externalidades conectam-se aos custos de remediação futura. Encerrado o período operacional, os aterros demandam monitoramento pós-fechamento (emissão de gases, estabilidade geotécnica, qualidade de águas subterrâneas) e obras corretivas por 20–30 anos, com provisões financeiras que, quando inexistentes ou insuficientes, recaem sobre orçamentos públicos futuros (ABRELPE, 2023). Além disso, as emissões fugitivas de metano, gás com alto potencial de aquecimento global, persistem por anos, impondo custos climáticos não internalizados e pressionando metas municipais e nacionais de mitigação (IPCC, 2022). Em contraste, sistemas integrados de carbonização e cadeias produtivas de reciclagem tendem a internalizar parte desses custos ao reduzir o volume destinado à disposição final, gerar receitas por energia e materiais e encurtar o horizonte de passivos, melhorando a relação custo-benefício intertemporal (Lima; Lira; Souza, 2022; ABRELPE, 2023).

Em síntese, os aterros ocupam território e consomem capacidade de suporte urbano; eles transferem custos para o futuro, fragmentados entre sistemas de saúde, meio ambiente, habitação e finanças públicas. Reconhecer e mensurar essas externalidades é condição necessária para que cidades como Campo Grande priorizem modelos de valorização de resíduos, capazes de evitar adoecimento, preservar ecossistemas e prevenir passivos de longa duração.

3.6 Tecnologias de tratamento de RSU

3.6.1 Aterro sanitário – limitações e fim de vida útil

Os aterros sanitários são a solução mais comum para a destinação final de resíduos sólidos urbanos (RSU), representando um avanço em relação aos lixões, pois incorporam critérios técnicos para mitigar impactos ambientais. Essas estruturas são projetadas com sistemas de impermeabilização do solo, coleta e tratamento do chorume e captação de gases como o metano (CH_4), subproduto da decomposição anaeróbia da matéria orgânica. A implementação desses sistemas busca prevenir a contaminação do solo e dos recursos hídricos, além de reduzir a liberação de gases na atmosfera (Leite, 2016).

Apesar dos benefícios em relação aos lixões, os aterros sanitários enfrentam desafios consideráveis. A decomposição do lixo orgânico neles contido resulta na liberação de gases de efeito estufa (GEEs), com o metano sendo particularmente preocupante, visto que seu potencial de aquecimento global é aproximadamente 25 vezes superior ao do dióxido de carbono (CO_2) (Leite, 2016). A ausência de sistemas de captação de biogás eficientes pode levar a emissões fugitivas, contribuindo significativamente para as mudanças climáticas.

A mitigação desses impactos passa pela otimização da gestão dos aterros. Medidas como o aproveitamento energético do biogás captado e a compostagem dos resíduos orgânicos são essenciais. Essas estratégias, além de reduzirem as emissões, podem gerar benefícios econômicos e sociais, ao transformar um passivo ambiental em fonte de energia renovável (Leite, 2016).

No entanto, a dependência excessiva dos aterros como única solução para o descarte de resíduos reforça a urgência de buscar alternativas. É imperativo que cidades como Campo Grande invistam em tecnologias de tratamento e aproveitamento de resíduos sólidos, como a carbonização e a reciclagem, que promovem a economia circular e a sustentabilidade. A transição para um modelo mais eficiente não é apenas uma necessidade técnica e ambiental, mas também uma questão de dignidade e qualidade de vida, pois o povo de Campo Grande merece um futuro onde o lixo não seja mais um problema, mas uma oportunidade.

3.6.2 Incineração como Tecnologia de Tratamento de Resíduos

A incineração representa uma das principais tecnologias de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos (RSU), com o objetivo primário de reduzir drasticamente seu volume e peso (Lima, 1991). Este processo de combustão controlada ocorre em altas temperaturas (geralmente entre 871 °C e 1204 °C), transformando a massa de RSU em cinzas, escórias e gases. A tecnologia de incineração não só diminui a quantidade de material a ser disposto em aterros, mas também pode desintoxicar determinados resíduos perigosos por meio da oxidação térmica (Rocca *et al.*, 1993).

Historicamente, a purificação de resíduos por meio do fogo é uma prática antiga, com registros que remontam à Idade Média, como o "vagão de fogo" (Sogabe, 1999). Contudo, foi a partir do final do século XIX que a incineração evoluiu para sistemas mais complexos. Atualmente, a tecnologia está consolidada em muitos países, especialmente na Europa e no Japão, onde a escassez de espaço para aterros incentivou a sua adoção em larga escala. Em 2000, por exemplo, a Suíça incinerava 80% de seus RSU, e o Japão, 72% (Menezes *et al.*, 2000).

Apesar de sua eficiência na redução de volume, a incineração apresenta desafios e riscos ambientais significativos. Embora existam incineradores com alta eficiência de queima e baixa emissão de poluentes (IEA, 1995), a combustão incompleta pode gerar compostos prejudiciais, como monóxido de carbono (CO), partículas finas, dioxinas e furanos. Adicionalmente, temperaturas elevadas podem promover a formação de óxidos de nitrogênio (NOx) a partir do nitrogênio presente no ar e nos resíduos (Lima, 1991). A gestão desses poluentes gasosos exige sistemas de controle sofisticados e caros. A complexidade e o alto grau de automação dessas plantas resultam em investimentos elevados e custos operacionais superiores aos de outros métodos de gestão de resíduos.

3.6.3 Compostagem – potencial para resíduos orgânicos, limites de escala urbana

A compostagem é uma das mais antigas e difundidas formas de tratamento de resíduos orgânicos, sendo reconhecida por seu baixo custo relativo, simplicidade operacional e benefícios ambientais associados à redução de emissões de gases de efeito estufa e ao aproveitamento agrícola do composto produzido (Kiehl, 2017). Em cidades brasileiras, onde a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos ultrapassa 50% da massa total, o potencial de

aproveitamento por meio da compostagem é significativo (ABRELPE, 2023). Além de reduzir a pressão sobre aterros, a prática contribui para a melhoria da fertilidade dos solos e para a recuperação de áreas degradadas, alinhando-se às diretrizes de economia circular e ao ODS 12 da Agenda 2030 (ONU, 2015).

No entanto, embora tecnicamente viável e ambientalmente desejável, a compostagem enfrenta limites de escala no contexto urbano. A operação em larga escala exige infraestrutura de triagem eficaz, separação na fonte e logística adequada, fatores que ainda representam gargalos no Brasil (Lima, Lira, & Souza, 2022). Sem a coleta seletiva de orgânicos, o composto gerado pode apresentar contaminação por metais pesados, plásticos e vidro, inviabilizando seu uso agrícola e reduzindo seu valor de mercado (Campos e Silva, 2020).

Outro desafio é o tempo de processamento e demanda por área. Mesmo em sistemas mecanizados, o ciclo de compostagem demanda semanas ou meses até a estabilização da matéria orgânica, exigindo grandes espaços para operação. Em áreas urbanas densas, a disponibilidade de solo para centrais de compostagem torna-se um limitador, competindo com outros usos do território e encarecendo a implantação (EEA, 2020). Além disso, quando mal gerenciada, a compostagem pode gerar odores desagradáveis, emissão de bioaerossóis e atração de vetores, afetando a aceitação social do processo (IBGE, 2010).

Nesse sentido, a compostagem revela-se uma solução de alto potencial para o tratamento da fração orgânica, mas com limitações claras de escala em centros urbanos de médio e grande porte. A literatura converge em apontar que a compostagem deve integrar um modelo abrangente de gestão, sendo priorizada em contextos descentralizados, como hortas urbanas, condomínios, cooperativas e municípios de pequeno porte, embora seja insuficiente, por si só, para enfrentar o desafio dos resíduos sólidos urbanos em cidades como Campo Grande (Lima; Lira; Souza, 2019; ABRELPE, 2023).

3.6.4 Carbonização/pirólise – princípios, processos, vantagens e aplicações

A carbonização, também conhecida como pirólise lenta, constitui uma das tecnologias mais promissoras no tratamento da fração rejeito dos resíduos sólidos urbanos. Trata-se de um processo termoquímico no qual a matéria orgânica é submetida ao aquecimento em ambiente com pouco ou nenhum oxigênio, resultando na decomposição dos resíduos em três

principais produtos: biocarvão, óleo pirolítico e gás de síntese (Malkow, 2004; Antunes, 2012). O biocarvão possui alta estabilidade e pode ser empregado como insumo agrícola para melhoria da fertilidade do solo, como material adsorvente ou ainda como substituto de combustíveis fósseis em processos industriais. O óleo pirolítico apresenta aplicações energéticas e químicas, enquanto o gás de síntese pode ser utilizado para geração de energia elétrica e térmica (Mohan; Pittman; Steele, 2006).

Os princípios da pirólise baseiam-se na conversão da matéria orgânica em condições controladas de temperatura (300–800 °C), pressão e ausência de oxigênio. Diferentemente da incineração, que oxida completamente os resíduos liberando gases poluentes, a carbonização visa aproveitar o potencial energético e químico dos resíduos, reduzindo significativamente as emissões atmosféricas e o volume de rejeitos (Williams; Besler, 1996). Essa característica torna a tecnologia alinhada a compromissos internacionais de mitigação climática, como os definidos pelo Acordo de Paris e relatados pelo IPCC (2022).

Entre as vantagens mais destacadas estão:

Redução drástica do volume de resíduos destinados ao solo, prolongando a vida útil dos aterros ou mesmo eliminando sua necessidade;

Geração de produtos de valor agregado, como biocarvão, aplicável em estratégias de sequestro de carbono e recuperação de solos degradados;

Flexibilidade tecnológica, permitindo o processamento de diversos tipos de resíduos, desde frações orgânicas até plásticos não recicláveis (Malkow, 2004);

Baixa emissão de poluentes em comparação a tecnologias de incineração, com possibilidade de aproveitamento energético superior (Antunes, 2012).

No Brasil, experiências ainda são incipientes, geralmente associadas a projetos piloto e estudos de viabilidade. Entretanto, países como Japão e Alemanha já consolidaram a pirólise como parte integrante de suas políticas de gestão de resíduos, destacando-se o aproveitamento energético e a valorização do biocarvão em cadeias industriais e agrícolas (Mohan *et al.*, 2006; EEA, 2020). Essa diferença revela o desafio brasileiro de avançar na infraestrutura tecnológica, mas também indica um campo fértil de inovação e adaptação local.

Para cidades de médio porte, como Campo Grande-MS, a pirólise apresenta-se como alternativa estratégica, capaz de reduzir custos de disposição, gerar energia limpa e criar insumos industriais que alimentam cadeias produtivas locais, contribuindo para a economia circular e para a inclusão social por meio de novos postos de trabalho em logística, operação e reaproveitamento de subprodutos. Nesse sentido, a carbonização não é apenas um processo tecnológico, mas um paradigma de transformação urbana, que redefine o lugar do resíduo na sociedade: de problema ambiental a recurso estratégico.

Além dos aspectos físico-químicos da pirólise, é fundamental compreender como a energia contida nos subprodutos pode ser convertida em eletricidade e calor utilizável. Nesse contexto, o ciclo Rankine e os sistemas de cogeração assumem papel central na operação da planta proposta.

3.6.4.1 Ciclo Rankine e geração de energia em sistemas de pirólise

A conversão do potencial energético contido nos subprodutos da pirólise — principalmente o gás de síntese (syngas) e o bio-óleo — em eletricidade e calor utilizável é geralmente realizada por meio do ciclo termodinâmico de Rankine, que serve como base para os sistemas modernos de geração (Bridgwater, 2012; Kalina & Borel, 2023).

O Ciclo Rankine consiste em um circuito fechado no qual um fluido de trabalho (tipicamente água) é aquecido até vapor por uma fonte térmica, expandido em uma turbina, condensado novamente e recirculado por uma bomba. O processo envolve quatro etapas principais:

Geração de vapor (caldeira): o calor liberado na combustão controlada do syngas aquece a água pressurizada, convertendo-a em vapor superaquecido;

Expansão na turbina: o vapor em alta pressão e temperatura aciona a turbina, convertendo energia térmica em energia mecânica rotacional;

Geração elétrica: a turbina está acoplada a um gerador síncrono, que transforma a energia mecânica em energia elétrica;

Condensação e bombeamento: após a expansão, o vapor é condensado e a água é novamente bombeada para a caldeira, reiniciando o ciclo.

No contexto deste projeto, o ciclo Rankine é empregado exclusivamente para geração elétrica, utilizando o syngas da pirólise como fonte térmica primária. Essa abordagem permite estabilidade operacional, aumento da eficiência global e redução das emissões em comparação com rotas convencionais baseadas em resíduos sólidos urbanos. Estudos recentes mostram que a integração entre pirólise e geração a vapor apresenta desempenho ambiental favorável, especialmente pela menor emissão de gases de efeito estufa e pelo aproveitamento energético consistente do syngas (Gholamian, Mahmoudi & Zare, 2021). Dessa forma, a eficiência global do sistema pode superar 75 %, somando energia elétrica e térmica úteis.

Nos sistemas integrados de pirólise, o ciclo Rankine pode ser acionado por:

Queimadores de syngas, com gases de combustão aquecendo diretamente a caldeira;

Trocas térmicas indiretas, em que o calor do reator ou do bio-óleo é transferido a um óleo térmico intermediário antes de gerar o vapor;

Ciclos híbridos, combinando Rankine e motores a gás para maximizar a eficiência (Arena, 2012; Bridgwater, 2012).

O syngas desempenha, portanto, dupla função:

(1) fornece energia térmica para sustentar o reator de pirólise e os secadores;

(2) gera energia elétrica ao ser queimado na caldeira do ciclo Rankine.

Já o bio-óleo pode atuar como combustível auxiliar ou ser estocado para fins industriais, e o biocarvão é destinado à comercialização e sequestro de carbono.

O aproveitamento desse calor residual é essencial para a autossuficiência energética da planta, tornando-a capaz de operar com baixo consumo externo de energia, reduzindo emissões e custos operacionais. O ciclo Rankine, nesse contexto, é o elo que transforma o potencial energético da fração rejeito do RSU em energia limpa e controlável, alinhando-se aos princípios da economia circular e da transição energética (Farobie *et al.*, 2022; Nosenzo, 2025).

3.6.5 Comparação crítica entre as tecnologias

A gestão de resíduos sólidos urbanos enfrenta um dilema que vai além da destinação final, pois envolve a escolha de tecnologias que não apenas solucionem o problema imediato, mas que também estejam alinhadas a uma visão de futuro sustentável. Nesse contexto, a literatura indica que cada alternativa, incluindo aterro sanitário, incineração, compostagem e carbonização ou pirólise, apresenta vantagens e limitações específicas, devendo ser analisada de forma integrada e crítica.

O aterro sanitário, tecnologia predominante no Brasil, representa uma solução de baixo custo inicial e simplicidade técnica (ABRELPE, 2023). Contudo, seu caráter essencialmente paliativo o torna insustentável a longo prazo: ocupa grandes áreas urbanas, gera emissões fugitivas de metano e cria passivos ambientais de difícil remediação (Lima, Lira, & Souza, 2019). É, portanto, uma tecnologia de transição, que deve ser gradativamente superada.

A incineração destaca-se pela capacidade de reduzir rapidamente o volume de resíduos e pela possibilidade de cogeração de energia elétrica e térmica (Malkow, 2004). Entretanto, sua implementação exige altos investimentos de capital, operação complexa e sistemas avançados de controle de poluentes, sob pena de gerar dioxinas e furanos altamente tóxicos (EEA, 2020). Além disso, a dependência de grandes volumes de resíduos para viabilidade econômica cria contradições com políticas de redução e reciclagem.

A compostagem, por sua vez, apresenta vantagens ambientais evidentes, como a valorização da fração orgânica e a produção de composto agrícola de baixo custo (Kiehl, 2017). Contudo, enfrenta limitações de escala em centros urbanos densos, exige coleta seletiva rigorosa e grandes áreas de processamento, fatores que reduzem sua aplicabilidade como solução central em cidades médias e grandes (Campos e Silva, 2020).

Por fim, a carbonização/pirólise reúne características que a posicionam como tecnologia de ponta: reduz substancialmente o volume de resíduos, gera múltiplos produtos de valor agregado (biocarvão, óleo pirolítico e gás de síntese), apresenta menores emissões atmosféricas em comparação à incineração e pode ser dimensionada em unidades compactas, adaptáveis à realidade de municípios médios (Mohan; Pittman; Steele, 2006). Além disso, integra-se de forma natural ao paradigma da economia circular, ao transformar resíduos em

insumos industriais e agrícolas, ao mesmo tempo em que contribui para a mitigação climática (IPCC, 2022).

Assim, a análise comparativa permite concluir que:

O aterro é limitado, gera passivos e precisa ser superado;

A incineração é eficiente na redução de volume, mas ambientalmente arriscada e economicamente onerosa;

A compostagem é valiosa, mas restrita em escala urbana;

A carbonização representa a tecnologia mais equilibrada, capaz de unir eficiência, sustentabilidade e viabilidade para cidades brasileiras.

Trata-se, portanto, não apenas de uma opção tecnológica, mas de uma estratégia integrada que responde às demandas ambientais, sociais e econômicas da contemporaneidade, abrindo caminho para cidades resilientes, circulares e livres da dependência de aterros.

3.7 Carbonização como alternativa sustentável

A busca por alternativas tecnológicas que transcendam o modelo linear de gestão de resíduos tem conduzido ao estudo e à aplicação de processos termoquímicos avançados, entre os quais se destaca a carbonização, também referida na literatura como pirólise lenta. Esta tecnologia emerge como uma solução promissora para o tratamento da fração rejeito dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), alinhando-se aos princípios da economia circular ao transformar passivos ambientais em produtos com valor agregado e energia renovável (Malkow, 2004).

3.7.1 Conceito de Pirólise/Carbonização Lenta

A pirólise é um processo termoquímico de decomposição da matéria orgânica na ausência de oxigênio ou com teor extremamente baixo deste elemento, que impede a combustão. Quando conduzida em baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas (geralmente entre 300°C e 500°C), o processo é denominado carbonização lenta ou *slow pyrolysis*. Nessas condições, a biomassa ou os resíduos orgânicos são transformados

principalmente em um produto sólido carbonáceo, o biocarvão (ou *biochar*), com rendimentos significativos deste em relação aos produtos líquidos e gasosos (Mohan; Pittman; Steele, 2006).

O mecanismo fundamental da carbonização lenta envolve três estágios principais:

Secagem e Pré-aquecimento (<150°C): Remoção da umidade livre e ligada do material.

Carbonização Propriamente Dita (150°C - 500°C): Ocorre a quebra térmica dos componentes voláteis (hemiceluloses, celulose e lignina) através de reações de despolimerização, cracking e condensação, liberando gases e vapores que serão posteriormente condensados.

Resfriamento e Estabilização: O biocarvão é resfriado, estabilizando sua estrutura porosa e altamente carbonácea.

Os produtos resultantes do processo são:

Biocarvão (Biochar): Sólido poroso, rico em carbono fixo, com aplicações potenciais como condicionador de solos (sequestro de carbono e melhoria de propriedades físico-químicas), adsorvente para tratamento de efluentes ou como combustível sólido de alto poder calorífico.

Óleo Pirolítico (Bio-óleo): Líquido viscoso e complexo, composto por uma mistura de hidrocarbonetos oxigenados, ácidos, e outros compostos orgânicos. Pode ser utilizado como combustível bruto ou refinado para obtenção de produtos químicos.

Gás de Síntese (Syngas): Mistura gasosa combustível, composta principalmente por monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄). É utilizado para geração de energia térmica ou elétrica, podendo inclusive alimentar o próprio processo de carbonização, tornando-o energeticamente autossustentável (Williams e Besler, 1996; Antunes, 2012).

A aplicação da carbonização lenta aos RSU representa um paradigma shift, pois redireciona o fluxo de rejeitos de um destino passivo (aterro) para um processo ativo de valorização. Diferentemente da incineração, que oxida completamente o material com significativa emissão de poluentes, a carbonização opera em atmosfera redutora, minimizando a formação de compostos como dioxinas e furanos, e convertendo o carbono

contido nos resíduos em formas estáveis ou energeticamente aproveitáveis (EEA, 2020; IPCC, 2022).

Para o contexto de Campo Grande-MS, a adoção de uma usina de carbonização compacta configura-se não apenas como uma solução técnica para a destinação final ambientalmente adequada, mas como o eixo central de um novo arranjo produtivo, capaz de integrar a geração de energia limpa à manufatura de insumos, promovendo a sustentabilidade e a resiliência urbana.

3.7.2 Produtos Gerados: Potenciais, Usos Energéticos e Industriais

O processo de carbonização luta converte a fração rejeito dos RSU, tradicionalmente vista como um passivo, em três fluxos principais de produtos com valor de mercado: o biocarvão (sólido), o óleo pirolítico (líquido) e o gás de síntese (gasoso). A viabilidade econômica e ambiental da usina está intrinsecamente ligada ao aproveitamento integral desses subprodutos, que podem alimentar tanto cadeias energéticas quanto industriais, conformando um modelo de biorrefinaria urbana.

3.7.2.1 Biocarvão (*Biochar*)

O biocarvão é o produto sólido predominante no processo de pirólise lenta, caracterizando-se por sua alta porosidade, elevado teor de carbono fixo (60-85%) e grande estabilidade química.

Potenciais e Aplicações:

Agricultura e Sequestro de Carbono: Sua aplicação como condicionador de solos é uma das mais promissoras. O biocarvão melhora a retenção de água e nutrientes, aumenta a atividade microbiana e a fertilidade do solo. Crucialmente, sua estrutura recalcitrante permite o sequestro de carbono no solo por centenas a milhares de anos, tornando a tecnologia uma Opção de Mitigação de GEE de alto impacto (IPCC, 2022; Lehmann e Joseph, 2015). Este alinhamento com políticas de descarbonização agrega valor sob a forma de créditos de carbono;

Adsorção e Filtragem: A grande área superficial e porosidade tornam-no um eficiente material adsorvente. Pode ser utilizado no tratamento de efluentes para remoção de metais

pesados, corantes e compostos orgânicos, substituindo carvões ativados importados a um custo potencialmente menor (Mohan *et al.*, 2014);

Combustível Sólido: Com um poder calorífico superior (PCS) comparável ao do carvão mineral de baixa qualidade (cerca de 25-30 MJ/kg), o biocarvão pode ser utilizado como combustível para fornos industriais, caldeiras ou mesmo processado em briquetes para uso doméstico, reduzindo a demanda por recursos fósseis (Malkow, 2004).

3.7.2.2 Óleo Pirolítico (Bio-óleo)

O óleo pirolítico é um líquido escuro e viscoso, resultante da condensação dos vapores liberados durante a pirólise. É uma emulsão complexa de água e centenas de compostos orgânicos oxigenados.

Potenciais e Aplicações:

Combustível Energético: O bio-óleo possui PCS na faixa de 15-20 MJ/kg (cerca de 40-50% do valor do óleo diesel). Pode ser queimado diretamente em caldeiras, fornos e turbinas para geração de calor e energia, após adaptações para lidar com sua acidez e corrosividade (Bridgwater, 2012). Esta é uma aplicação direta e de rápida implementação;

Refino e Química Verde: Através de processos de upgrading (como hidrodesoxigenação e craqueamento catalítico), o óleo pirolítico pode ser transformado em biocombustíveis avançados (semelhantes ao diesel e à gasolina) ou servir como fonte de produtos químicos de valor agregado, como fenóis, ácidos e aromáticos, substituindo derivados de petróleo (Xiu & Shahbazi, 2012).

3.7.2.3 Gás de Síntese (Syngas)

O gás de síntese é uma mistura combustível de baixo a médio poder calorífico, composta principalmente por monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e outros hidrocarbonetos leves.

Potenciais e Aplicações:

Autossustentação Energética do Processo: O uso primário e mais imediato do syngas é ser queimado para gerar a energia térmica necessária para manter o reator de pirólise em sua temperatura operacional, tornando o processo autossustentável após a partida;

Geração de Energia Elétrica e Térmica: O excedente de gás pode ser direcionado para motores de combustão interna, turbinas a gás ou microturbinas acopladas a geradores para produção de eletricidade. Esta energia pode ser utilizada na própria usina ou comercializada, alimentando a rede municipal (Williams & Besler, 1996). O calor residual (geração) pode ser usado para secagem dos resíduos de entrada ou em estufas agrícolas;

Matéria-Prima para Síntese Química: O syngas purificado (com teores controlados de CO e H₂) é matéria-prima para a síntese de diversos produtos, como metanol, amônia e hidrocarbonetos líquidos via processo Fischer-Tropsch, abrindo caminho para uma integração profunda com a indústria química (Molino et al., 2018).

A Tabela 3 resume os produtos, suas características principais e aplicações potenciais, ilustrando a multifuncionalidade da carbonização.

Tabela 3 – Características e aplicações da carbonização

Produto	Características Principais	Aplicações Potenciais
<u>Biocarvão</u>	Sólido, alto teor de carbono fixo, poroso, estável.	Condicionador de solos (sequestro de C), adsorvente para tratamento de efluentes, combustível sólido (briquetes).
<u>Óleo Pirolítico</u>	Líquido viscoso, complexo, PCS: 15-20 MJ/kg.	Combustível para caldeiras, refino para biocombustíveis avançados, fonte de produtos químicos.
<u>Gás de Síntese</u>	Mistura gasosa (CO, H ₂ , CH ₄ , CO ₂), PCS: 4-15 MJ/Nm ³ .	<u>Autossustentação</u> do processo, geração de energia elétrica (motores/turbinas), matéria-prima para síntese química.

Fonte: Adaptado de Malkow (2004) e Bridgwater (2012).

Portanto, a implantação de uma usina de carbonização em Campo Grande-MS transcende a simples destinação de resíduos. Ela configura a instalação de um hub de recursos, onde os RSU são transformados em um portfólio de produtos comercializáveis – energia limpa, insumos agrícolas e matérias-primas industriais –, criando novas fontes de receita e fomentando um ecossistema de economia circular local.

3.7.3 Casos de sucessos internacionais e experiências brasileiras incipientes

A transição de uma tecnologia do estágio laboratorial para a aplicação em escala real é validada por sua adoção em diversos contextos. Enquanto países com restrições territoriais severas e políticas ambientais rigorosas já consolidaram a pirólise em sua matriz de gestão de resíduos, o Brasil ainda dá os primeiros passos, com iniciativas pioneiras que servem de aprendizado.

3.7.3.1 Experiências internacionais consolidadas

Segundo os exemplos internacionais mais avançados, o sucesso da pirólise está intrinsecamente ligado a sua inserção em sistemas robustos de gestão de resíduos, nos quais atua como componente estratégico para maximizar o desvio de materiais de aterros sanitários. Essa integração, no entanto, assume configurações distintas conforme as pressões e prioridades locais, revelando uma evolução da tecnologia de solução terminal para peça-chave em uma economia circular sofisticada.

O Japão, pioneiro e líder global, adotou a pirólise e gaseificação em larga escala como resposta à crítica escassez de espaço para aterros. A tecnologia foi incorporada como alicerce de uma política que redefine resíduos como recurso energético, com plantas como a de Chiba processando centenas de toneladas diárias de resíduos urbanos para geração de eletricidade (Japan, 2025). Já na Europa, particularmente na Alemanha e nos Países Nórdicos, o foco deslocou-se para o tratamento de frações residuais específicas, como os rejeitos da triagem mecânica ou resíduos industriais de difícil reciclagem. Nesse contexto regulatório, que penaliza drasticamente a disposição final, a pirólise especializa-se – exemplificada pela conversão de pneus em óleo pirolítico e negro de carbono pela Pyrum na Alemanha – e atua em sinergia com uma reciclagem já consolidada (EEA, 2020).

A trajetória atinge um patamar de maior integração e valorização no Canadá, com a biorrefinaria da Enerkem em Edmonton. Este caso emblemático transcende a recuperação energética para produzir biocombustíveis avançados, como etanol e metanol, a partir de resíduos não recicláveis. Ele ilustra a transição da pirólise para o cerne de cadeias produtivas circulares, transformando rejeitos em insumos químicos de alto valor e fechando o ciclo de materiais com sofisticação industrial (Enerkem, 2023).

Assim, a análise comparada demonstra que o papel e a eficácia da pirólise são definidos pela arquitetura do sistema de gestão de resíduos no qual se insere, evoluindo de alternativa de destinação final a tecnologia habilitadora de circularidade avançada.

3.7.3.2 Experiências brasileiras incipientes e lições aprendidas

No Brasil, o cenário é embrionário, mas promissor. A baixa taxa de reciclagem e a crise iminente dos aterros sanitários têm impulsionado a busca por alternativas.

Projeto-piloto em São Paulo (2018): A Loga (Logística Ambiental de São Paulo), operadora de um dos aterros da capital, testou uma unidade de pirólise para tratamento de 30 toneladas/dia de resíduos. Os resultados, ainda que preliminares, confirmaram a viabilidade técnica do processo para a realidade brasileira, gerando biocarvão e energia. O projeto evidenciou a necessidade de uma triagem eficiente prévia, pois a presença excessiva de inertes (como vidro e metais) pode danificar os reatores.

Iniciativas em Cooperativas de Catadores: Experiências menores, mas socialmente muito relevantes, têm sido conduzidas com foco na valorização de rejeitos de cooperativas. Um exemplo é o projeto "Reciclar é Preciso", no Rio de Janeiro, que instalou uma micro-usina de pirólise para processar os plásticos não recicláveis coletados por catadores, transformando-os em óleo combustível. Esta abordagem integra a tecnologia à economia solidária, agregando valor ao trabalho dos catadores e destinando corretamente um material problemático.

Pesquisa e Desenvolvimento em Universidades: Instituições como a USP, UFMG e UNICAMP possuem grupos de pesquisa ativos no desenvolvimento e adaptação de tecnologias de pirólise e gaseificação para resíduos brasileiros. Esses estudos são vitais para gerar dados locais sobre eficiência, emissões e características dos produtos, fundamentais para projetar plantas em escala comercial (Antunes, 2012; Pinto, 2020).

As lições dessas experiências são claras:

Pré-tratamento é crucial: A heterogeneidade do RSU brasileiro exige sistemas robustos de triagem e secagem;

Modelo de negócio é chave: A viabilidade econômica depende de receitas múltiplas: venda de energia, créditos de carbono, produtos e a economia com a disposição em aterro ("gate fee");

Inserção social: A tecnologia pode e deve ser articulada com a inclusão de catadores, modernizando sua atividade sem excluí-los do processo;

Para Campo Grande, essas experiências servem como um farol. Elas mostram os desafios a serem superados, mas, principalmente, comprovam que o caminho da carbonização é tecnologicamente viável e estrategicamente alinhado com as necessidades urbanas e ambientais do século XXI. A proposta deste trabalho é, portanto, amadurecer essas experiências incipientes em um modelo robusto e replicável.

3.7.4 Benefícios ambientais: redução de emissões, neutralidade de carbono e aproveitamento energético

A adoção da carbonização lenta como tecnologia central para a gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) transcende a ideia de uma simples solução para o problema do lixo. Ela se posiciona como uma ferramenta estratégica de mitigação climática e eficiência energética, capaz de alinhar o setor de resíduos às metas globais de descarbonização (Lehmann e Joseph, 2015; IPCC, 2023). Seus benefícios ambientais são diretos, mensuráveis e duradouros, impactando positivamente o ciclo do carbono e o balanço energético urbano.

Em primeiro lugar, há uma redução substancial das emissões de gases de efeito estufa (GEE) em comparação ao cenário convencional de aterros sanitários. A decomposição anaeróbia nesses sistemas libera metano (CH_4), gás com potencial de aquecimento global 28 a 34 vezes superior ao dióxido de carbono (CO_2), de forma fugitiva e descontrolada (IPCC, 2023; ABRELPE, 2023). Na carbonização, por outro lado, o carbono contido nos resíduos é convertido majoritariamente em biocarvão (*biochar*), um material sólido, estável e com baixíssima taxa de reemissão atmosférica (Méndez *et al.*, 2013). A combustão controlada do gás de síntese (syngas) e dos óleos pirolíticos gera predominantemente CO_2 , cujas emissões são significativamente menores em termos de impacto climático, além de poderem ser compensadas pela biomassa renovável utilizada como insumo (Woolf *et al.*, 2010).

Em segundo lugar, o processo de carbonização avança em direção à neutralidade e até à negatividade de carbono. O carbono presente no biocarvão é de origem biogênica, derivado de materiais vegetais e resíduos orgânicos. Quando esse *biochar* é aplicado ao solo, parte do carbono é sequestrada de forma estável por séculos, funcionando como um sumidouro permanente de carbono (Lehmann *et al.*, 2021). Assim, o sistema de carbonização de resíduos pode atuar como um mecanismo ativo de remoção de CO₂, compensando emissões de outros setores e contribuindo para as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) assumidas pelo Brasil no Acordo de Paris (MMA, 2022; UNEP, 2023).

Por fim, o aproveitamento energético integral dos subprodutos da carbonização, como o gás de síntese e o óleo pirolítico, permite a geração de eletricidade e calor renováveis, reduzindo a dependência de fontes fósseis e evitando novas emissões líquidas de CO₂ (Kaza *et al.*, 2018). Esse aproveitamento energético local e circular transforma os resíduos em ativos energéticos de valor econômico e ambiental, fortalecendo a transição energética urbana (ABRELPE, 2023; UNEP, 2021).

No geral, a carbonização oferece um “*triple win*” ambiental: (1) elimina uma das principais fontes antropogênicas de metano, (2) sequestra carbono de forma duradoura por meio do *biochar* e (3) gera energia limpa e renovável. Essa convergência posiciona a tecnologia como um dos caminhos mais promissores para integrar gestão de resíduos, mitigação climática e economia circular, pilares fundamentais do desenvolvimento sustentável contemporâneo.

3.8 Economia circular e cadeias produtivas de reciclagem

A economia circular (EC) constitui-se como um novo paradigma produtivo e de consumo, que se contrapõe ao modelo linear baseado na lógica “extrair–produzir–descartar”. O conceito, amplamente difundido pela Fundação Ellen MacArthur e por organismos internacionais, busca prolongar o ciclo de vida dos materiais, mantendo-os no uso pelo maior tempo possível, ao mesmo tempo em que reduz a extração de recursos naturais e minimiza os impactos ambientais (*Ellen MacArthur Foundation*, 2017; Kirchherr *et al.*, 2017). De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), a EC está diretamente associada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), sobretudo aos de produção e consumo responsáveis (ODS 12) e cidades sustentáveis (ODS 11).

No plano europeu, a Comissão Europeia estabeleceu metas ambiciosas: alcançar 65% de reciclagem dos resíduos urbanos até 2030, 75% da reciclagem de embalagens e restringir o envio a aterros a no máximo 10% do total coletado (*European Commission, 2015, 2020*). Além da urgência ambiental, tais metas são justificadas pela expectativa de ganhos econômicos e sociais, como a criação de 580 mil empregos e a economia anual de cerca de €600 bilhões para as empresas do bloco (*European Commission, 2015*).

Exemplos práticos mostram a viabilidade da circularidade em escala urbana. Amsterdã tem se consolidado como referência ao implementar experiências inovadoras alinhadas aos 7Rs (repensar, recusar/reduzir, reutilizar, reciclar, recriar, reparar e retornar à natureza), por meio de laboratórios vivos (*living labs*), cafés de reparo, iniciativas de compostagem comunitária e reuso criativo de plásticos (Arisi, 2020). Esses projetos demonstram que a circularidade pode ser operacionalizada em soluções locais, promovendo inclusão social e dinamismo econômico.

Em setores específicos, como o têxtil, considerado um dos mais poluentes do mundo, a economia circular tem avançado por meio de estratégias de reciclagem, reuso e *upcycling*. Estudos apontam que, no Brasil, a geração de resíduos têxteis nas indústrias de confecção chega a milhares de toneladas mensais, exigindo políticas públicas mais eficientes e inovações empresariais (Correia *et al.*, 2016; Avila *et al.*, 2018). Experiências como a da empresa EcoSimple, em São Paulo, demonstram a viabilidade de transformar aparas de tecido e garrafas PET em novos fios, articulando inovação tecnológica, economia criativa e inclusão social (Berlim, 2016). O *upcycling*, nesse contexto, desponta como prática que alia sustentabilidade e valor cultural, ao transformar resíduos em produtos de *design* diferenciados (Fletcher e Grose, 2011).

No Brasil, o desafio ainda é grande: apenas 4% dos resíduos sólidos urbanos (RSU) são reciclados de fato (ABRELPE, 2023), enquanto a maior parte é destinada a aterros sanitários, com consequentes emissões de gases de efeito estufa e desperdício de recursos (Kaza *et al.*, 2018). Diante disso, estruturar cadeias produtivas de reaproveitamento é estratégico não apenas para reduzir impactos ambientais, mas também para fortalecer a inclusão socioeconômica. A integração de catadores, cooperativas e pequenas indústrias na lógica circular potencializa a geração de renda, a formalização do trabalho e o fortalecimento de economias locais (Wilson; Velis; Cheeseman, 2006).

No contexto de Campo Grande-MS, a articulação da carbonização dos resíduos com cadeias de reciclagem, proposta central deste estudo, alinha-se de forma direta à economia circular. A transformação de frações recicláveis em produtos como tijolos ecológicos, telhas plásticas e mobiliário urbano, somada ao aproveitamento energético via carbonização, representa um modelo urbano inovador, capaz de eliminar o envio de resíduos ao aterro, reduzir emissões e criar oportunidades sociais.

Assim, a economia circular transcende a retórica e se torna uma estratégia prática para transformar resíduos em recursos, reposicionando a gestão de resíduos como vetor de desenvolvimento sustentável, inovação tecnológica e justiça social.

3.8.1 Exemplos de cadeias produtivas sustentáveis

As cadeias produtivas sustentáveis representam arranjos organizacionais e tecnológicos que visam a reintegração de resíduos no ciclo produtivo, reduzindo impactos ambientais e promovendo valor econômico e social. Diferentemente do modelo linear tradicional, que encerra o ciclo com o descarte em aterros, essas cadeias buscam fechar o ciclo de materiais, articulando agentes públicos, privados e sociais em torno da lógica da economia circular (Korhonen *et al.*, 2018).

No cenário internacional, destacam-se práticas consolidadas na União Europeia, onde políticas públicas têm fomentado a integração de resíduos em cadeias produtivas. A reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD), por exemplo, já supera 70% em países como Holanda e Dinamarca, com reaproveitamento de entulho em pavimentação e agregados reciclados (*European Commission*, 2020). Na indústria têxtil, iniciativas como o projeto europeu RESYNTEX demonstraram a viabilidade de criar cadeias completas de reprocessamento, envolvendo coleta, triagem, reciclagem química e reaproveitamento em novos fios, além de tratamento de efluentes (Avila *et al.*, 2018).

Na Ásia, o Japão consolidou um modelo de simbiose industrial conhecido como *Eco-Town Projects*, no qual resíduos de um setor tornam-se insumos de outro. Em Kitakyushu, resíduos plásticos e metálicos são reaproveitados em siderurgia e na indústria do cimento, reduzindo emissões e ampliando a competitividade local (Fujita e Hill, 2007). Esse tipo de

arranjo fortalece o conceito de simbiose industrial, amplamente discutido na literatura como elemento-chave para cadeias produtivas circulares (Chertow, 2000).

No Brasil, ainda que as taxas de reciclagem sejam baixas em comparação internacional, há experiências de destaque. Um exemplo é a cadeia do alumínio, cuja taxa de reciclagem supera 95%, considerada referência mundial em logística reversa e integração setorial (ABAL, 2022). Outro caso relevante é o da cadeia do papel e papelão, com taxas de recuperação acima de 70%, impulsionada tanto por indústrias quanto por cooperativas de catadores (Cempre, 2021). No setor têxtil, empresas como a EcoSimple demonstram que é possível integrar resíduos pós-industriais e garrafas PET em novos fios, agregando valor e reduzindo a dependência de fibras virgens (Berlim, 2016).

Além dos setores industriais, cadeias produtivas sustentáveis têm emergido em escala comunitária e regional. Iniciativas de reciclagem de plásticos em pequena escala, como o movimento Precious Plastic, disseminado globalmente, permitem que comunidades produzam mobiliário urbano, utensílios e componentes de construção a partir de resíduos plásticos locais, democratizando a economia circular (Hunt, 2020). Já no setor agroalimentar, programas de compostagem e biodigestão têm transformado resíduos orgânicos em biofertilizantes e biogás, integrando pequenos produtores à lógica da bioeconomia circular (Stegmann; Londo; Junginger, 2020).

Esses exemplos evidenciam que cadeias produtivas sustentáveis não são apenas instrumentos de mitigação ambiental, mas também motores de desenvolvimento socioeconômico. Quando bem estruturadas, essas iniciativas possibilitam a criação de empregos formais, a inclusão de trabalhadores informais, especialmente catadores no caso brasileiro, e a geração de novos mercados, fortalecendo a resiliência urbana e regional (Wilson; Velis; Cheeseman, 2006).

Assim, a análise das experiências nacionais e internacionais aponta para a viabilidade da implementação de cadeias produtivas sustentáveis em Campo Grande-MS, associadas à carbonização e à reciclagem avançada. A articulação dessas práticas ao contexto local pode servir como referência replicável para outras cidades brasileiras, alinhando inovação tecnológica, inclusão social e desenvolvimento sustentável.

3.8.2 Aplicações de RSU na construção civil: tijolos ecológicos, telhas plásticas, pavimentos e mobiliário urbano

A construção civil é reconhecida como um dos setores que mais consomem recursos naturais e geram resíduos em escala global. Segundo a *United Nations Environment Programme* (UNEP, 2019), cerca de 36% do consumo mundial de energia e 39% das emissões de dióxido de carbono estão relacionadas ao setor. Nesse contexto, a incorporação de resíduos sólidos urbanos (RSU) como insumos para novos materiais surge como alternativa promissora, capaz de reduzir a pressão sobre recursos naturais e mitigar impactos ambientais, ao mesmo tempo em que amplia a circularidade na cadeia produtiva da construção.

3.8.2.1 Tijolos ecológicos

Os tijolos ecológicos, também conhecidos como blocos de solo-cimento ou blocos prensados, representam uma aplicação consolidada no aproveitamento de resíduos. Além de dispensarem o processo de queima, reduzindo emissões de CO₂, esses blocos podem incorporar resíduos como cinzas, rejeitos de mineração, plásticos e resíduos de demolição (Arrigoni *et al.*, 2017). No Brasil, experiências têm utilizado resíduos plásticos triturados e cinzas de casca de arroz na fabricação de tijolos, apresentando melhorias na resistência mecânica e na durabilidade (Silva; Sales; Ferreira, 2020). Estudos demonstram que a utilização de RSU na produção de tijolos ecológicos contribui para a redução de custos e para a sustentabilidade da cadeia da construção (Mouli *et al.*, 2015).

3.8.2.2 Telhas plásticas

As telhas propostas contribuem para a mitigação da poluição plástica, para a valorização de resíduos plásticos, agroindustriais e para a promoção da economia circular.(Djate, F. (2025). No Brasil, empresas vêm desenvolvendo telhas a partir da mistura de plásticos reciclados com embalagens longa vida, possibilitando a produção em larga escala com boas propriedades mecânicas (Ferreira; Andrade; Mendes, 2019).

3.8.2.3 Pavimentos sustentáveis

Em países como Índia e Reino Unido, o uso de plásticos em asfaltos tem sido regulamentado, resultando em estradas mais resistentes e com maior vida útil (Singh e Siddique, 2016). No Brasil, pesquisas em universidades federais vêm testando a incorporação

de resíduos poliméricos em pavimentos, com resultados promissores em termos de desempenho estrutural e viabilidade econômica (Mello *et al.*, 2020).

3.8.2.4 Mobiliário urbano

O mobiliário urbano produzido a partir de resíduos plásticos reciclados, como bancos, lixeiras, mesas e decks, é uma aplicação crescente que alia design, funcionalidade e sustentabilidade. O uso de resíduos poliméricos na fabricação desses produtos contribui para a substituição de madeiras tropicais, preservando florestas e agregando valor ao resíduo. Movimentos globais como o *Precious Plastic* têm incentivado a produção descentralizada de mobiliário urbano a partir de plásticos reciclados, possibilitando a participação comunitária e a democratização do design sustentável (Hunt, 2020).

3.8.3 Geração de valor agregado e substituição de matérias-primas convencionais

A utilização de resíduos sólidos urbanos (RSU) como insumos produtivos tem se destacado não apenas pela mitigação ambiental, mas também pela geração de valor agregado e pela substituição de matérias-primas convencionais. Ao serem reinseridos em cadeias produtivas, os resíduos deixam de ser passivos ambientais para se tornar ativos econômicos, reduzindo custos e ampliando a competitividade das empresas (Kirchherr; Reike; Hekkert, 2017).

Exemplos emblemáticos incluem a reciclagem do alumínio, cuja taxa de recuperação no Brasil ultrapassa 95% e representa uma economia de até 95% da energia necessária para produzir alumínio primário (ABAL, 2022). No setor da construção, a substituição parcial de agregados convencionais por resíduos plásticos, cinzas ou resíduos de construção e demolição tem apresentado desempenho técnico satisfatório, ao mesmo tempo em que diminui a extração de areia e brita (Singh e Siddique, 2016; Arrigoni *et al.*, 2017).

Além disso, cadeias de reciclagem e *upcycling* no setor têxtil têm demonstrado como resíduos podem gerar produtos de maior valor estético e cultural, transformando aparas e fibras descartadas em tecidos inovadores e diferenciados (Fletcher e Grose, 2011; Avila *et al.*, 2018). Assim, a lógica da economia circular reforça o potencial de os resíduos substituírem matérias-primas virgens, ao mesmo tempo em que criam novos nichos de mercado e oportunidades de inovação.

3.8.4 Conexão entre reciclagem e desenvolvimento local

A reciclagem, para além de sua função ambiental, desempenha papel estratégico no desenvolvimento local ao integrar dimensões econômicas, sociais e territoriais. A inserção de resíduos em cadeias produtivas fomenta a geração de emprego e renda, fortalece economias regionais e promove a inclusão de trabalhadores historicamente marginalizados, como os catadores (Wilson; Velis; Cheeseman, 2006).

No Brasil, cooperativas de reciclagem têm demonstrado que a valorização dos resíduos pode se traduzir em capital social e econômico, ao mesmo tempo em que melhora a governança urbana e reduz a pressão sobre os sistemas de limpeza pública (Gutberlet, 2015). Tais experiências evidenciam que a reciclagem, quando organizada em escala comunitária, amplia a resiliência local e promove justiça socioambiental.

Em âmbito internacional, estudos apontam que cadeias de reciclagem bem estruturadas contribuem para a formação de ecossistemas de inovação regional, conectando universidades, governos e empresas em torno da bioeconomia e da economia circular (Korhonen *et al.*, 2018). Dessa forma, a reciclagem deixa de ser um fim em si mesma e se transforma em vetor de desenvolvimento sustentável, ancorado em oportunidades locais, geração de valor agregado e inclusão produtiva.

3.9 Modelos integrados de gestão sustentável

3.9.1 Introdução: a busca pelo "zero aterro" como paradigma global

A insustentabilidade do modelo linear de gestão de resíduos, centrado na disposição final em aterros, tem impulsionado cidades ao redor do mundo a adotarem metas ousadas de "zero aterro" ou "lixo zero". Este conceito não significa a eliminação absoluta de qualquer rejeito, mas representa uma mudança de paradigma: é a busca pela máxima eficiência no aproveitamento dos materiais, onde os resíduos são redesenhadados para retornarem ao ciclo produtivo, transformando sistemas de gestão de resíduos em sistemas de gestão de recursos. Esta seção explora experiências internacionais de sucesso que servem como referência para a proposta integrada de carbonização e cadeias produtivas para Campo Grande.

3.9.2 Experiências internacionais consolidadas

3.9.2.1 Europa: a liderança regulatória e a economia circular

- Ljubljana, Eslovênia: Tornou-se a primeira capital europeia a adotar uma estratégia "zero waste". A cidade implementou um sistema de coleta seletiva porta-a-porta extremamente eficiente, combinado com um centro de triagem moderno e uma usina de tratamento de resíduos orgânicos. Como resultado, Ljubljana desviou mais de 80% de seus resíduos urbanos de aterros, gerando empregos verdes e economizando recursos (*European Commission, 2021; Zero Waste Cities, 2023*).

San Francisco, EUA: Embora norte-americana, sua estratégia é um marco global. Através de legislação rigorosa e parcerias público-privadas, a cidade estabeleceu a meta de "lixo zero" até 2030. O sistema é baseado na tríade "compostagem, reciclagem e aterro", com coleta obrigatória de orgânicos e recicláveis. San Francisco já atinge taxas de desvio superiores a 80%, demonstrando a viabilidade técnica e econômica do modelo em grande escala (*SF Environment, 2023*).

Países Nôrdicos (Suécia e Noruega): Estes países são exemplos da integração tecnológica. Com altíssimas taxas de reciclagem e uma infraestrutura robusta de incineração com recuperação de energia (*Waste-to-Energy*), eles reduziram drasticamente o envio de resíduos para aterros. Um aspecto notável é a alta eficiência energética das usinas, um modelo que destaca a valorização energética como parte de um sistema integrado (EEA, 2020).

3.9.2.2 Japão: a necessidade como motor da inovação

A escassez absoluta de espaço para novos aterros no Japão forçou uma visão radical de "resíduo como recurso". O país é um líder global em tecnologias térmicas avançadas. A Usina de Chiba, por exemplo, processa centenas de toneladas/dia de RSU por meio de pirólise e gaseificação em leito fundido, convertendo os resíduos em gás de síntese para geração de eletricidade (*Ministry of the Environment of Japan, 2021*). Esta abordagem, detalhada no capítulo anterior, valida a carbonização/pirólise como uma tecnologia central e viável para o tratamento da fração rejeito em contextos urbanos de alta densidade.

3.9.3 Estados Unidos: a ação local e os "zero waste plans"

Além de San Francisco, diversas cidades e universidades norte-americanas adotaram planos "zero waste". A abordagem geralmente combina:

Políticas de "Pay-As-You-Throw" (pague pelo que descarta), que incentivam financeiramente a redução na fonte e a separação;

Infraestrutura para compostagem em escala comunitária e municipal;

Parcerias com a indústria para redesenho de embalagens e logística reversa.

3.9.4 Amsterdã, Países Baixos: inovação social e os 7Rs

A cidade de Amsterdã apresenta um ecossistema único de inovação que opera na confluência entre política, tecnologia e ação comunitária. A abordagem holandesa, conforme documentado por Arisi (2020), vai além da infraestrutura e incorpora profundamente os princípios dos 7Rs (*Rethink, Refuse, Reduce, Reuse, Repair, Recycle, Rot*). Iniciativas como os *Living Labs* (para repensar soluções), a *Plastic Soup Foundation* (para recusar o plástico desnecessário), as *Repair Café* (para reparar e estender a vida útil dos produtos) e os *Wormenhotels* (para decompor os orgânicos localmente) ilustram um modelo de gestão descentralizado e socialmente engajado (Arisi, 2020). Esta experiência demonstra que a transição para uma economia circular é tanto tecnológica quanto cultural.

3.9.5 Lições aprendidas e a convergência para modelos híbridos

A análise dessas experiências revela padrões comuns essenciais para o sucesso, amplamente documentados por organismos internacionais:

1. Hierarquia de Resíduos como Princípio Norteador: Todas as cidades bem-sucedidas priorizam, por lei ou política, a redução na fonte, a reutilização e a reciclagem sobre a recuperação energética e a disposição final (Banco Mundial, 2018; PNUMA, 2024);

2. Integração de Múltiplas Tecnologias: Não existe uma solução única. O sucesso reside na combinação inteligente de métodos mecânicos (triagem e reciclagem), biológicos (compostagem) e térmicos/avançados (carbonização, pirólise) para o rejeito (Arisi, 2020; Malkow, 2004);

3. Governança e Engajamento: A transição exige uma governança participativa, envolvendo o poder público, o setor privado, a academia e a sociedade civil (ICLEI, 2022);

4. Instrumentos Econômicos e Regulatórios: Taxas sobre aterramento, proibições de aterrarr materiais recicláveis e incentivos fiscais para produtos reciclados são drivers poderosos para a mudança (*European Commission*, 2020).

3.9.6 A proposta para Campo Grande no contexto internacional

A proposta deste trabalho para Campo Grande-MS situa-se no cerne dessas melhores práticas internacionais, constituindo um modelo híbrido e integrado. Ele sintetiza a inovação tecnológica japonesa (carbonização), o rigor dos sistemas europeus de reciclagem e a ênfase na inclusão social e inovação comunitária observada em Amsterdã. O modelo proposto combina:

Cadeias Produtivas de Reciclagem: Atendendo aos "Rs" superiores da hierarquia (Reutilizar, Reciclar, Repensar), criando valor econômico e social a partir dos materiais secos.

Usina de Carbonização Compacta: Atuando como a tecnologia de tratamento térmico avançado para a fração rejeito, alinhando-se às experiências do Japão, porém com a vantagem da multifuncionalidade dos produtos (biocarvão, energia, óleo).

Inclusão Socioprodutiva: Integrando os catadores de materiais recicláveis de forma análoga ao papel central das comunidades nas experiências europeias.

Dessa forma, Campo Grande tem o potencial de eliminar a dependência do aterro sanitário e posicionar-se como um caso de referência nacional na aplicação de um modelo circular, tecnologicamente inovador e socialmente inclusivo para cidades de médio porte.

3.10 Propostas híbridas: integração de carbonização, reciclagem e logística reversa

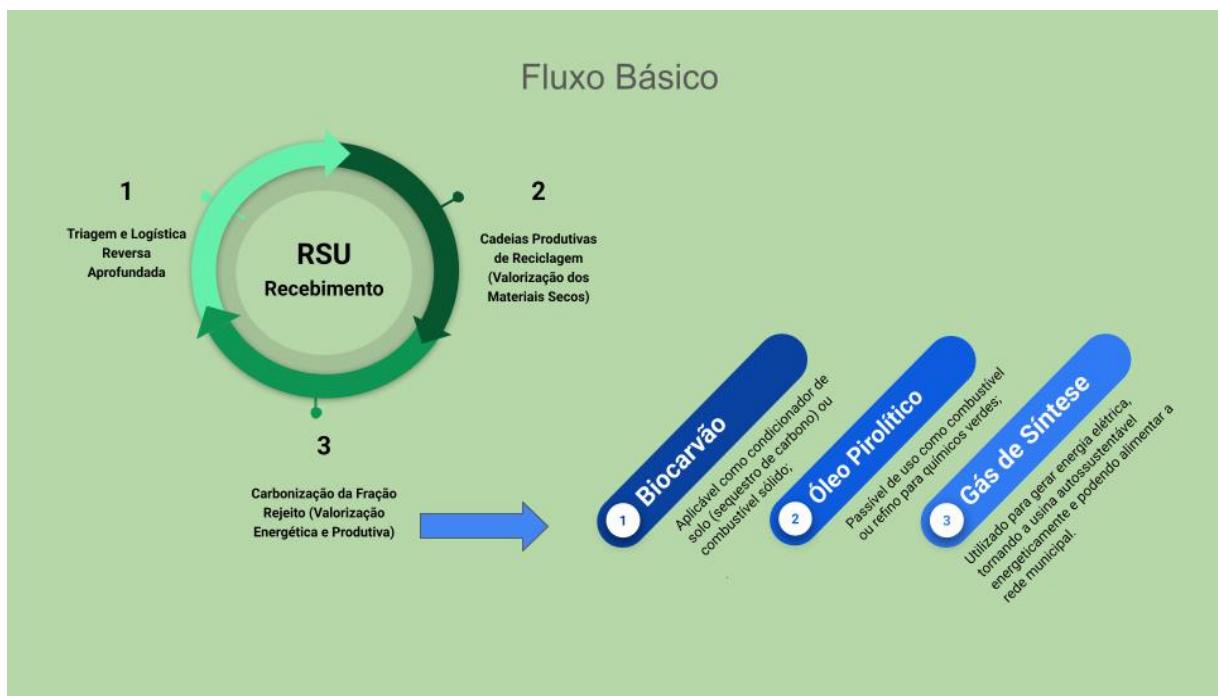
O estado da arte na gestão sustentável de resíduos aponta, de forma crescente, para a inadequação de soluções únicas e isoladas. Em contrapartida, propostas híbridas, que integram sinergicamente diferentes tecnologias e estratégias de gestão, emergem como o caminho mais viável para se atingir altos índices de desvio de aterros e a circularidade de materiais (Malkow, 2004; Banco Mundial, 2018). Esta seção detalha a espinha dorsal da

proposta para Campo Grande: um modelo sistêmico que articula a carbonização, as cadeias produtivas de reciclagem e a logística reversa em um único ecossistema de valor.

3.10.1 A sinergia tecnológica e operacional

O modelo proposto opera a partir de um fluxo otimizado de materiais, onde cada tecnologia trata a fração de resíduos para a qual é mais eficiente, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Fluxo otimizado de materiais



Fonte: De autoria própria

Etapa 1: Triagem e Logística Reversa Aprofundada

O processo inicia-se com uma triagem eficiente dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Para além da separação tradicional (papel, plástico, metal, vidro), o sistema é potencializado pela logística reversa obrigatória, conforme estabelecido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010). Embalagens, eletroeletrônicos, pilhas e baterias são desviados do fluxo principal e encaminhados aos seus respectivos sistemas de retorno, operados pelos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes (Brasil, 2010). Esta etapa é crucial para capturar materiais de alto valor e toxicidade, reduzindo o volume e a periculosidade do que seguirá para processamento.

Etapa 2: Cadeias Produtivas de Reciclagem (Valorização dos Materiais Secos)

Os materiais recicláveis secos (papel, plásticos, metais, vidro) são direcionados para cadeias produtivas locais, conforme detalhado no Capítulo 5. Esta não é uma reciclagem convencional; é uma manufatura de produtos de valor agregado, como tijolos ecológicos, telhas plásticas e mobiliário urbano (Pinto, 2020). Esta etapa concretiza os princípios superiores da hierarquia de resíduos (reutilização e reciclagem) e gera receita, empregos e economia de recursos naturais virgens.

Etapa 3: Carbonização da Fração Rejeito (Valorização Energética e Produtiva)

A fração restante, composta por rejeitos da triagem, plásticos não recicláveis e outros materiais de difícil valorização, é destinada à usina de carbonização compacta. Diferentemente da incineração, que prioriza apenas a energia, a pirólise luta transforma este passivo em um portfólio de produtos (Bridgwater, 2012; Williams e Besler, 1996):

Biocarvão: Aplicável como condicionador de solo (sequestro de carbono) ou combustível sólido;

Óleo Pirolítico: Passível de uso como combustível ou refino para químicos verdes;

Gás de Síntese: Utilizado para gerar energia elétrica, tornando a usina auto sustentável energeticamente e podendo alimentar a rede municipal.

3.10.2 Vantagens sistêmicas do modelo híbrido proposto

A integração proposta confere vantagens decisivas em relação a modelos convencionais:

1. Redução da Escala e do Custo da Usina de Carbonização: Ao desviar os recicláveis e os materiais de logística reversa, o volume de resíduos destinado à carbonização é drasticamente reduzido. Isto permite o dimensionamento de uma usina compacta e de menor custo de implantação, tornando o investimento financeiramente mais viável para um município de médio porte como Campo Grande (Lima; Lira; Souza, 2022);

2. Maximização da Valorização e das Fontes de Receita: O modelo gera receitas a partir de múltiplas fontes: venda de materiais recicláveis, venda de produtos manufaturados (tijolos, telhas), venda de energia elétrica e dos subprodutos da carbonização (biocarvão,

óleo). Esta diversificação mitiga riscos econômicos e aumenta a robustez financeira do sistema;

3. Resiliência Operacional: O sistema é menos vulnerável a flutuações no mercado de um único material. Se o preço de um tipo específico de plástico reciclável cair, a carbonização garante a destinação ambientalmente adequada e com recuperação energética desse material;

4. Alinhamento com a Economia Circular de Alta Performance: O modelo vai além do "fim de tubo". Ele opera em um ciclo fechado onde os resíduos são reinseridos como insumos produtivos e energéticos, minimizando a extração de recursos naturais e a geração de passivos ambientais, em perfeita sintonia com os conceitos da Ellen MacArthur Foundation (2019) e da UE (*European Commission*, 2020).

3.10.3 A governança do modelo híbrido

A implementação bem-sucedida deste modelo exige uma estrutura de governança inovadora, baseada em parcerias público-privadas (PPPs) que envolvam:

Poder Público Municipal: Concessão, regulação e fiscalização;

Cooperativas de Catadores: Atuação na triagem, logística reversa e, potencialmente, na operação de algumas cadeias produtivas, garantindo a inclusão socioprodutiva;

Empresas Privadas: Investimento, operação da usina de carbonização e desenvolvimento das cadeias produtivas;

Setor Empresarial: Implementação efetiva dos sistemas de logística reversa.

Em síntese, a proposta híbrida aqui delineada representa um salto qualitativo na gestão de RSU. Ela não se limita a escolher entre reciclagem ou tratamento térmico, mas sinergetiza as vantagens de ambas, criando um sistema circular, economicamente atrativo e socialmente inclusivo, perfeitamente adaptável à realidade de Campo Grande e replicável para outras cidades brasileiras.

3.11 Desafios técnicos, econômicos e políticos para implementação

A transição de um modelo linear de gestão de resíduos para um sistema integrado e circular, embora tecnicamente viável e ambientalmente desejável, não está isenta de obstáculos. A implementação da proposta para Campo Grande enfrenta uma série de desafios inter-relacionados que devem ser reconhecidos e estrategicamente superados. Esta seção mapeia e analisa criticamente esses desafios, categorizando-os nas dimensões técnica, econômica e política.

3.11.1 Desafios técnicos e operacionais

1. Heterogeneidade e Sazonalidade dos RSU: A composição gravimétrica dos resíduos em Campo Grande, como na maioria das cidades brasileiras, é variável e apresenta alta taxa de umidade e material orgânico (ABRELPE, 2023). Esta heterogeneidade exige um pré-tratamento robusto (triagem, secagem) para garantir a eficiência e a durabilidade dos equipamentos de reciclagem e, principalmente, da usina de carbonização. A sazonalidade (ex.: aumento de podas no período seco) também deve ser considerada no dimensionamento da planta;

2. Escalabilidade e Adaptação Tecnológica: Embora a tecnologia de carbonização seja promissora, sua aplicação em escala comercial para RSU no Brasil ainda é incipiente (Pinto, 2020). O desafio reside em adaptar e otimizar os reatores de pirólise, projetados muitas vezes para biomassa homogênea, para a complexa e agressiva fração rejeito dos RSU. A corrosividade dos gases e a gestão dos efluentes do processo demandam materiais e projetos específicos;

3. Garantia de Qualidade dos Produtos: Para que os produtos das cadeias produtivas (tijolos, telhas) e da carbonização (biocarvão) tenham mercado, é essencial que atendam a normas técnicas (ABNT) e especificações de qualidade consistentes. A variabilidade da matéria-prima (resíduos) é um desafio direto à padronização do produto final, exigindo controle de processo rigoroso.

3.11.2 Desafios Econômicos e Financeiros

1. Altos Custos de Investimento Inicial (CAPEX): A implantação de uma usina de carbonização integrada a um parque de reciclagem representa um investimento de capital significativamente superior aos custos de um aterro sanitário convencional (Lima, Lira, & Souza, 2022). A aquisição de tecnologias, muitas vezes com componentes importados, e a construção da infraestrutura são a principal barreira econômica;
2. Viabilidade Econômica e Modelo de Negócio: A rentabilidade do empreendimento depende criticamente da geração de múltiplas fontes de receita, como a venda de energia, créditos de carbono, biocarvão e produtos reciclados. A incerteza sobre a estabilidade e o valor de mercado desses produtos, bem como a volatilidade das tarifas de energia, introduzem riscos ao modelo (Banco Mundial, 2018). A estruturação de um modelo de negócio que internalize os custos ambientais evitados (*gate fee*) é crucial;
3. Acesso a Financiamento e Incentivos: A captação de recursos em condições favoráveis é um desafio para projetos de infraestrutura urbana inovadores. É necessária a articulação com bancos de desenvolvimento (BNDES), fundos de clima e incentivos fiscais que reconheçam o valor socioambiental do projeto, mitigando o custo de capital.

3.11.3 Desafios políticos, institucionais e regulatórios

1. Incerteza Regulatória e Barreiras Legais: A falta de um marco regulatório específico e simplificado para tecnologias de recuperação energética de resíduos, como a carbonização, pode travar licenças ambientais e a conexão do excedente de energia à rede (Brasil, 2010). A definição clara do status do biocarvão (resíduo ou produto) também é essencial para sua comercialização;
2. Governança e Continuidade Administrativa: Projetos de longo prazo são vulneráveis às descontinuidades típicas dos ciclos políticos. A mudança de gestões municipais pode interromper o impulso inicial. É fundamental a construção de um pacto social e institucional que transcenda governos, envolvendo a sociedade civil, o setor privado e o legislativo municipal (ICLEI, 2022);
3. Aceitação Social e Licença Social para Operar: A instalação de uma unidade de tratamento de resíduos, mesmo que tecnologicamente avançada, pode enfrentar resistência

de comunidades do entorno (efeito NIMBY - "*Not In My Backyard*"). Um processo transparente de comunicação, educação ambiental e demonstração dos benefícios locais (empregos, limpeza urbana) é imprescindível para obter a aceitação social;

4. Integração com a Cadeia Existente e Conflito de Interesses: O modelo pode encontrar resistência de atores econômicos consolidados no sistema atual, como operadores de aterros e, em alguns casos, até de cooperativas de catadores que temem pela mudança no seu modus operandi. A transição deve ser planejada de forma a incluir e capacitar os trabalhadores já envolvidos na cadeia, transformando-os em agentes do novo sistema.

A superação desses desafios não é trivial, mas é perfeitamente factível através de um planejamento estratégico, um modelo de governança colaborativo e a busca ativa por sinergias técnicas e financeiras. O reconhecimento dessas barreiras é o primeiro passo para elaborar as estratégias robustas de implementação que serão delineadas no próximo tópico.

3.12 Potencial de replicabilidade em cidades brasileiras de porte médio

A viabilidade e o sucesso do modelo integrado proposto para Campo Grande transcendem os limites do município, posicionando-se como um paradigma replicável para a gestão de resíduos em cidades brasileiras de porte médio. Esta seção analisa os fatores que conferem à proposta um alto potencial de adaptação e escalonamento em contextos urbanos similares, contribuindo significativamente para a superação da crise nacional de gestão de resíduos sólidos.

3.12.1 Perfil das cidades-alvo e aderência do modelo

O modelo é particularmente adequado para cidades com perfil demográfico e de geração de resíduos análogo ao de Campo Grande. No Brasil, centenas de municípios na faixa de 200 mil a 1 milhão de habitantes compartilham desafios comuns (IBGE, 2010; ABRELPE, 2023):

Geração de Resíduos: Produzem volumes significativos de RSU (geralmente entre 200 e 1.500 toneladas/dia), suficientes para justificar economicamente a implantação de uma usina de carbonização compacta, mas insuficientes para tecnologias de grande porte, como

incineradores de última geração, que demandam escala muito superior para se tornarem viáveis;

Pressão sobre Aterros Existente: Muitas dessas cidades enfrentam a saturação ou o esgotamento da vida útil de seus aterros sanitários, com altos custos logísticos para implantação de novos empreendimentos em locais distantes. A proposta de "zero aterro" resolve um problema crítico e iminente;

Capacidade de Governança: Possuem estrutura administrativa com capacidade de articular parcerias público-privadas (PPPs) e de gerenciar projetos de média complexidade, ao mesmo tempo que mantêm uma proximidade com a comunidade que facilita o engajamento social necessário.

3.12.2 Fatores-chave para replicabilidade

1. **Modularidade e Escalonamento da Carbonização:** Diferentemente de soluções "tudo ou nada", a carbonização pode ser implantada em módulos compactos. Uma cidade pode começar com uma unidade de capacidade reduzida, expandindo-a conforme o aumento da eficiência da coleta seletiva e da triagem reduza a fração de rejeitos, ou conforme o crescimento populacional demande. Esta flexibilidade é um diferencial crucial para a adaptação a orçamentos municipais diversos (Malkow, 2004);

2. **Adaptabilidade das Cadeias Produtivas Locais:** As cadeias de reciclagem propostas (tijolos, telhas, mobiliário) utilizam tecnologias de manufatura relativamente simples e de baixo custo, que podem ser facilmente adaptadas à disponibilidade de matéria-prima local e ao mercado consumidor regional. A experiência do *Precious Plastic* (Arisi, 2020) demonstra como modelos de código aberto podem ser replicados globalmente com adaptações locais;

3. **Sinergia com Políticas Públicas Existentes:** O modelo se alinha e opera em sinergia com instrumentos legais já estabelecidos:

Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS): É a materialização prática dos princípios da hierarquia na gestão de resíduos e da logística reversa (Brasil, 2010);

Marco do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020): Atrai investimentos privados para a universalização dos serviços, onde a destinação final adequada é uma meta central;

Planos Estaduais de Resíduos Sólidos: Pode ser incorporado como uma solução regional, onde várias cidades menores compartilham uma única unidade de tratamento, formando um consórcio intermunicipal;

4. Geração de Benefícios Múltiplos e Atração de Investimentos: O modelo integrado não é um custo, mas um investimento que gera retorno econômico (energia, produtos), ambiental (redução de emissões, despoluição) e social (empregos, inclusão). Este perfil de investimento de impacto é cada vez mais atraente para fundos nacionais e internacionais focados em economia verde e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2015).

3.12.3 Estratégia de disseminação

Para catalisar a replicação, é recomendável:

Desenvolvimento de um "Projeto de Referência": A implantação bem-sucedida em Campo Grande deve ser intensamente documentada, com a criação de manuais técnicos, estudos de viabilidade econômica e modelos de contratos de PPP, servindo como um case nacional;

Articulação com Fóruns e Redes: Divulgar os resultados em fóruns como a Frente Nacional de Prefeitos (FNP) e a Associação Brasileira de Municípios (ABM), onde a pauta de resíduos é crítica;

Atração de Parcerias Estratégicas: Envolver empresas de engenharia, fabricantes de equipamentos e instituições financeiras para criar um "pacote de solução" comercializável para as prefeituras.

Em conclusão, a proposta para Campo Grande não é uma solução localizada, mas a prototipagem de um novo padrão tecnológico e de gestão para o saneamento básico brasileiro. Sua concepção modular, seu alinhamento com as políticas nacionais e seu potencial de gerar benefícios econômicos tangíveis a posicionam como uma das rotas mais promissoras para que cidades de porte médio no Brasil possam, finalmente, trilhar um caminho verdadeiramente sustentável e circular na gestão de seus resíduos sólidos.

4 MODELAGEM TÉCNICA DA USINA DE CARBONIZAÇÃO COMPACTA INTEGRADA À ECONOMIA CIRCULAR

A consolidação de uma Economia Circular aplicada à gestão de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) exige a superação de abordagens convencionais de "fim de tubo" (end-of-pipe), caracterizadas pela simples disposição ou tratamento sem recuperação de valor. Conforme apontado por Ghisellini et al. (2016), essa transição requer sistemas de conversão térmica capazes de reintegrar a matéria residual às cadeias produtivas. Neste cenário, a carbonização lenta (ou pirólise de baixa temperatura) estabelece-se como o eixo central de um novo paradigma tecnológico. De acordo com Dussan et al. (2017), este processo permite a transformação de resíduos heterogêneos em vetores energéticos e bioproductos estáveis, promovendo a descarbonização do setor de resíduos através da redução drástica das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e da mitigação da dependência estrutural de aterros sanitários (YAMAN, 2004).

O presente capítulo modela tecnicamente uma usina de carbonização compacta, dimensionada para o município de Campo Grande – MS, com base na geração atual de resíduos e nos parâmetros de desempenho observados em tecnologias análogas no Brasil, Europa e Ásia. O objetivo é apresentar uma modelagem completa, conceitual, operacional, energética e ambiental, de forma que a proposta possa ser replicada, auditada e ajustada a diferentes realidades municipais.

4.1 Premissas e dados de entrada

Para o dimensionamento da unidade, tomou-se como base o volume de geração de RSU reportado para o município, de 897 toneladas/dia (TCMS, 2023; TAVARES, 2022). Aplicou-se a este montante a premissa conservadora de que 18% da massa total constitui a fração rejeito — composta por materiais sem viabilidade atual de reciclagem ou compostagem. Este percentual fundamenta-se nos índices de gravimetria média nacional e na eficiência esperada de sistemas de triagem em larga escala, conforme parâmetros estabelecidos no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2022) e corroborados pela ABRELPE (2023), que situam a fração de resíduos não aproveitáveis nesta ordem de grandeza após a segregação de recicláveis secos e orgânicos.

A Tabela 4 apresenta os parâmetros de projeto adotados para a modelagem.

Tabela 4 – Parâmetros para a modelagem da usina de carbonização

Parâmetro	Símbolo	Valor Adotado	Unidade	Referência / Observação
Geração total de RSU	M_{tot}	897	t/dia	PMCG/SOLURB, 2022
Fração rejeito destinada à carbonização	f_{rej}	0,18	–	Suposição conservadora
Teor de umidade	ω	0,3	fração	Determinação média
Tipo de processo	–	Pirólise lenta	–	Temperatura de 300–500 °C
Rendimento em biocarvão	$Y_{(b)}$	0,35	fração seca	Literatura e testes piloto
Rendimento em óleo pirolítico	$Y_{(O)}$	0,3	fração seca	idem
Rendimento em syngas	$Y_{(g)}$	0,35	fração seca	idem

Fonte: De autoria própria.

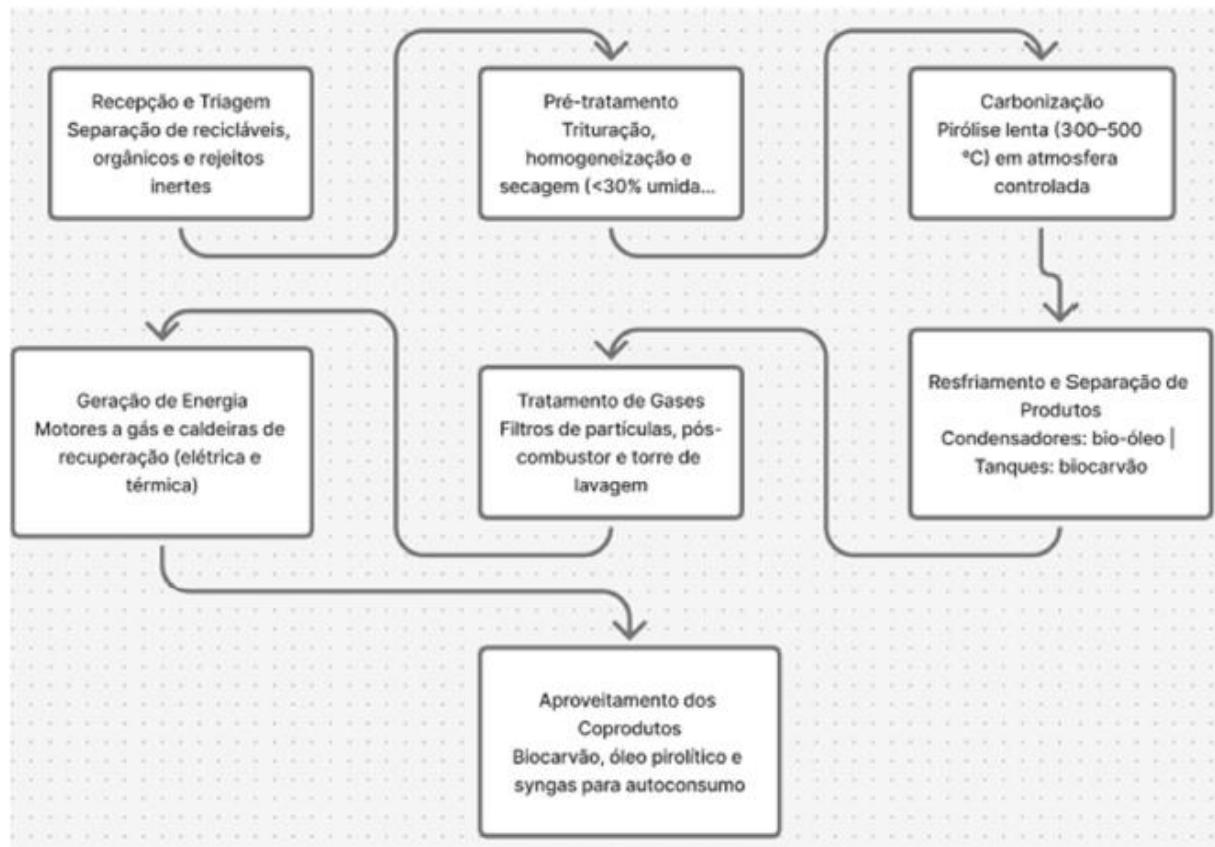
4.2 Fluxo de processo e descrição operacional

A Figura 4 representa o fluxograma geral da usina, composto por sete blocos de processo:

1. Recepção e triagem – separação de recicláveis, orgânicos e rejeitos inertes;
2. Pré-tratamento – Trituração, homogeneização e secagem até umidade inferior a ~30 %;
3. Carbonização – reator de pirólise lenta, entre ~300 °C e ~500 °C, sob atmosfera controlada;

4. Resfriamento e separação de produtos – condensadores para coleta de bio-óleo e tanques para biocarvão;
5. Tratamento de gases – filtros de partículas, pós-combustor e torre de lavagem;
6. Geração de energia – motores a gás e caldeiras de recuperação para geração elétrica e térmica;
7. Aproveitamento dos coprodutos – biocarvão para agricultura e construção civil, óleo pirolítico como combustível e syngas para autoconsumo térmico.

Figura 4 - Fluxograma geral da usina de carbonização



Fonte: De autoria própria.

O sistema foi concebido para operar de forma energeticamente autossustentável, utilizando o syngas e o bio-óleo para suprir o calor necessário à secagem e à manutenção térmica do reator.

4.3 Balanço de massa

O balanço de massa parte das seguintes relações (Equações 1 e 2):

$$M_{in,wet} = M_{tot} \cdot f_{rej} \quad (1)$$

$$M_{in,dry} = M_{in,wet} \cdot (1 - \omega) \quad (2)$$

Onde:

$M_{in,wet}$ = Massa de entrada molhada

$M_{tot,frej}$ = Massa Total . Fração de rejeito

f_{rej} = fração do RSU destinada ao processo (fração de rejeito)

$M_{in,dry}$ = Massa de entrada seca

ω = teor de umidade

Com base nos parâmetros da Tabela 4:

$$M_{tot} = 897 \text{ t/dia}$$

$$f_{rej} = 0,18$$

$$\omega = 0,30$$

Substituindo os valores nas Equações 1 e 2:

$$M_{in,wet} = 897 \times 0,18 = 161,46 \text{ t/dia}$$

$$M_{in,dry} = 161,46 \times 0,70 = 113,02 \text{ t/dia}$$

Portanto, a massa seca disponível para pirólise é de aproximadamente **113,02 t/dia**.

A geração de cada subproduto é estimada pela Equação 3:

$$m_i = Y_i \cdot M_{in,dry} \quad (3)$$

Onde:

m_i = massa do subproduto

Y_i = Rendimento do subproduto

$M_{in,dry}$ = Massa de entrada seca

Logo, obtém-se a massa gerada em t/dia para diversos subprodutos, como pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 - Massa gerada para cada subproduto

Subproduto	Rendimento (Y_i)	Massa gerada (m_i) (t/dia)
Biocarvão (char)	0,35	(0,35 * 113,02 = 39,56)
Bio-óleo (bio-oil)	0,30	(0,30 * 113,02 = 33,91)
Syngas	0,35	(0,35 * 113,02 = 39,56)
Total		113,03

Fonte: De autoria própria.

O total de 113,03 t/dia, visto na Tabela 5, está coerente com a massa seca de entrada.

Estes rendimentos estão em consonância com achados da literatura onde rendimentos de *biochar* acima de 30 % (sobre base seca ou húmida variada) são encontrados em pirólise lenta para resíduos domésticos ou biomassa residual (Nosenzo, 2025; Biney e Gusiatin, 2024).

Por exemplo, Nosenzo (2025) relatou rendimento de *biochar* da ordem de ~33 % para frações de RSU selecionadas. Biney e Gusiatin (2024) relataram que a pirólise lenta de lodo de esgoto municipal (MSS) produzia *biochar* com rendimento entre ~47-61 % dependendo da temperatura e material de base, o que confirma que os rendimentos da ordem de 35 % são realistas.

4.4 Balanço energético

Os poderes caloríficos superiores (PCS) médios adotados, conforme literatura, são:

Biocarvão: ~27 MJ/kg

Bio-óleo: ~17 MJ/kg

Syngas: ~5 MJ/kg

A energia total contida nos produtos é calculada pela Equação 4.

$$E_{\text{total}} = \sum m_i \cdot PCS_i \quad (4)$$

Onde:

E_{total} = energia total (MJ/dia)

m_i = massa do subproduto (t/dia)

PCS_i = poder calorífico superior do subproduto (MJ/kg)

Substituindo os valores de cada subproduto na Equação 4, obtém-se os resultados abaixo.

Subproduto	Massa (t/dia)	PCS (MJ/kg)	Energia (MJ/dia)
Biocarvão	39,56	27	(39,56 * 1000 * 27 = 1.068.120)
Bio-óleo	33,91	17	(33,91 * 1000 * 17 = 576.470)
Syngas	39,56	5	(39,56 * 1000 * 5 = 197.800)

$$E_{\text{total}} = 1.068.120 + 576.470 + 197.800 = 1.842.390 \text{ MJ/dia}$$

Para converter para MWh, basta dividir E_{total} pela Equação 5.

$$1 \text{ MWh} = 3,6 \times 10^3 \text{ MJ} \quad (5)$$

$$E_{\text{total}} = 1.842.390 / 3600 \approx 511,8 \text{ MWh/dia}$$

Considerando uma eficiência global de conversão elétrica de ~35 %, a geração elétrica potencial (E_{el}) é de:

$$E_{\text{el}} = 0,35 \times 511,8 = 179,1 \text{ MWh/dia}$$

Descontando o autoconsumo para secagem e operação (~ 70 % do total gerado):

$$E_{\text{excedente}} = 0,30 \times 179,1 = 53,7 \text{ MWh/dia}$$

Portanto, a potência média exportável é de aproximadamente:

$$P_{\text{média}} = (53,7 \text{ MWh.dia}) / (24 \text{ h}) \approx 2,24 \text{ MW}$$

Os valores obtidos indicam que a pirólise lenta de aproximadamente 161 t/dia de RSU úmido (113 t/dia seco) pode fornecer um potencial energético líquido de ~2,2 MW exportáveis, após compensar o consumo interno. Esses resultados são compatíveis com estudos recentes sobre conversão termoquímica de RSU (Farobie *et al.*, 2022), confirmando a viabilidade técnica da recuperação energética a partir de resíduos urbanos via pirólise controlada.

4.5 Dimensionamento básico do reator e equipamentos

Partindo de uma vazão de entrada ($M_{in,wet}$) de 149,15t/dia, o processamento horário é determinado como:

$$M = 161,46 / 24 \approx 6,72 \text{ t/h}$$

Para o dimensionamento do reator de pirólise, um tempo de residência térmica de 3 horas foi adotado, um parâmetro típico para a pirólise lenta que assegura a completa conversão do material (Bridgwater, 2012). Assim, a massa total no reator é:

$$Mr = 6,72 \times 3 = 20,18 \text{ t}$$

Considerando uma densidade aparente da biomassa de aproximadamente 300 kg/m³, um valor comum para resíduos urbanos triturados segundo Czajczyńska *et al.* (2017), o volume útil requerido para o reator é calculado:

$$V = (20.180 \text{ kg}) / (300 \text{ kg/m}^3) \approx 67,2 \text{ m}^3$$

Portanto, o reator pode ser especificado como um elemento de ~ 67,2 m³, dimensão compatível com reatores comerciais modulares de pirólise lenta. Esta estimativa corrobora a factibilidade técnica de unidades compactas e modulares para o tratamento de resíduos (Leckner, 2015).

Os equipamentos complementares essenciais para a integração do sistema incluem:

- Pré-processamento: Triturador e peneiras magnéticas para pré-triagem, com capacidade de ~7 t/h;

- Secagem: Secador rotativo alimentado por gases quentes do próprio processo, demandando uma estimativa de ~30-40 MWh térmicos/dia para reduzir o teor de umidade do material (Nobre *et al.*, 2019);
- Recuperação de Produtos: Condensador para a liquefação dos vapores e produção de bio-óleo, e sistema de recuperação de calor para otimização energética;
- Geração de Energia: Sistema de geração elétrica (ex.: motogeradores a gás de síntese) com capacidade estimada de ~ 2×1 MW, aproveitando o potencial de cogeração térmica;
- Limpeza de gases: Filtros de mangas e lavadores de gases (scrubbers) para atender aos padrões de emissão, tratando os poluentes remanescentes (Arena, 2012).
- Armazenamento: Tanques para o bio-óleo e silos ou big-bags para o biocarvão.

4.6 Controle ambiental e emissões

A carbonização lenta apresenta emissões notavelmente menores que a incineração convencional, por operar em atmosfera pobre em oxigênio e sem combustão direta do resíduo (Farobie *et al.*, 2022). Mesmo assim, são instalados sistemas complementares:

- Pós-combustor de gases não condensáveis (controle de VOCs e CO);
- Filtros de partículas (*baghouse*);
- Scrubber ácido para neutralização de HCl, HF;
- Monitoramento contínuo de CO₂, CO, NO_x, SO₂ e material particulado.

Além disso, a retenção de carbono no biocarvão atua como sumidouro: estudos mostram que biochars de RSU apresentam frações de carbono fixo elevado, estabilizando-se no solo e contribuindo para mitigação de emissões (Taherymoosavi *et al.*, 2017; Biney & Gusiatin, 2024).

4.7 Integração com a economia circular

A usina proposta não é apenas uma planta energética, mas um ecossistema circular. O biocarvão pode ser utilizado como insumo agrícola (melhoria de solo, sequestro de carbono) ou agregado em materiais de construção ecológicos. O bio-óleo serve como combustível alternativo para caldeiras industriais, e o syngas alimenta a própria planta. Além disso, a fração seca reciclável, separada na triagem inicial, segue para cadeias produtivas locais de plásticos, metais e vidro, formando um pólo de recuperação e manufatura verde.

4.8 Avaliação preliminar de desempenho ambiental

A decomposição anaeróbia de resíduos orgânicos em aterros gera metano (CH_4), cujo potencial de aquecimento global é ~28 vezes superior ao do CO_2 . Ao redirecionar a fração rejeito via carbonização, evita-se a emissão de metano e promove-se o sequestro de carbono no biocarvão. Estudos indicam que processos de pirólise lenta podem reduzir mais de 90 % das emissões de GEE comparado a cenário de aterro controlado, quando considerados sequestro e energia recuperada (Nosenzo, 2025; Biney & Gusiatin, 2024).

4.9 Aspectos operacionais e segurança

A planta opera de forma contínua, em três turnos diários, sob supervisão de um engenheiro de processos e equipe técnica. Os procedimentos de segurança incluem:

- Monitoramento de gases tóxicos (CO , H_2S);
- Sistemas automáticos de alívio térmico e extinção de incêndio;
- Barreiras de contenção para óleo pirolítico;
- Plano de resposta a emergências e treinamento de pessoal.

A automação é controlada por CLPs e interface SCADA, garantindo rastreabilidade completa dos fluxos de massa e energia.

4.10 Etapas de validação e replicabilidade

A implantação deve seguir quatro fases:

- Projeto piloto – unidade de 10–30 t/dia para calibração de rendimentos e qualidade dos produtos;
- Unidade demonstrativa – 30–100 t/dia, com monitoramento ambiental e energético;
- Planta comercial modular – ~150 t/dia, validando operação 24 h/dia;
- Escalonamento regional – replicação do modelo para cidades de diferentes portes, com integração de catadores e cooperativas.

A modularização permite adaptar a tecnologia a diferentes contextos municipais, eliminando a necessidade de novos aterros e criando polos regionais de valorização de resíduos.

4.11 Conclusão do capítulo

A modelagem técnica aqui apresentada demonstra a viabilidade física e operacional de uma usina de carbonização compacta integrada à economia circular. Os cálculos de balanço de massa e energia comprovam que o sistema é autossustentável, gerando excedente energético e reduzindo em mais de 65 % o volume de rejeitos enviados ao aterro. O reator estimado (~67,2 m³) é tecnicamente compatível com tecnologias comercialmente disponíveis, e o aproveitamento dos coprodutos reforça o conceito de “lixo zero”. Mais do que um projeto industrial, trata-se de uma proposta civilizatória: transformar resíduos em recursos, emissões em energia e passivos ambientais em oportunidades regenerativas. É possível e urgente que cidades brasileiras adotem este modelo, encerrando o ciclo dos aterros e iniciando o ciclo da responsabilidade climática.

5 MODELAGEM ECONÔMICA E FINANCEIRA DA USINA DE CARBONIZAÇÃO COMPACTA

A viabilidade econômica constitui a ponte crítica entre o ideal técnico e a concretização prática de um projeto de infraestrutura ambiental. Neste capítulo, desenvolve-se a análise econômico-financeira da usina de carbonização compacta dimensionada no Capítulo 3, seguindo uma abordagem de fluxo de caixa descontado (FCD) amplamente reconhecida para avaliação de investimentos (Damodaran, 2023). O objetivo central é avaliar, sob premissas realistas e prudentes, a capacidade do empreendimento de gerar retorno financeiro atrativo, aliado à estabilidade operacional e a benefícios socioambientais quantificáveis. A análise considera um horizonte de planejamento de 10 anos, adotando uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 10% ao ano, parâmetro compatível com projetos de infraestrutura de risco moderado no contexto brasileiro (Damodaran, 2023).

5.1 Estrutura de custos

Para a determinação de um custo de implantação (CAPEX) alinhado com a realidade de mercado, partiu-se de referências técnicas recentes. Um relatório de 2025 sobre o mercado de equipamentos de pirólise indica que o investimento de capital para plantas de 10 toneladas/dia está na faixa de USD 1,2 a 1,8 milhão (Industry Research, 2025), o que se traduz em um custo de capital entre USD 120.000 e USD 180.000 por tonelada/dia, alinhado ao porte do projeto.

Considerando a atualização monetária, a internalização de custos no contexto brasileiro e uma taxa de câmbio de R\$5,50/USD, adotou-se uma faixa de R\$ 1,0 a R\$ 1,4 milhão por tonelada/dia. Para a capacidade de processamento de 161,46 t/dia, o investimento necessário foi estimado em:

$$\text{CAPEX} = 161,46 \text{ t/dia} \times \text{R\$ 1.200.000 / (t/dia)} \approx \text{R\$ 193.800.000}$$

Visando a simplificação dos cálculos e a constituição de uma margem de contingência implícita, o valor de R\$ 200.000.000 (duzentos milhões de reais) foi adotado como base para a análise econômica subsequente. Este valor é condizente com a complexidade tecnológica, os sistemas de controle ambiental e a infraestrutura necessária para uma operação segura e eficiente.

A Tabela 6 detalha a composição do investimento inicial.

Tabela 6 – Estrutura de Capital (CAPEX)

Item	Descrição	Valor estimado (R\$ milhões)	Observação
1	Engenharia, licenciamento e projeto executivo	10,0	Inclui estudos ambientais e gerenciamento
2	Reator de pirólise e sistemas de processo	120,0	Item principal, conforme benchmark internacional
3	Sistema de triagem, secagem e alimentação	25,0	Pré-tratamento mecânico e térmico
4	Geração de energia e subestações	20,0	Cogeração e conexão à rede
5	Controle ambiental e filtros	15,0	Scrubbers, baghouse, pós-combustor, monitoramento
6	Obras civis e infraestrutura	7,0	Terraplanagem, fundações, prédios, vias
7	Reserva de contingência (10%)	17,0	Riscos e imprevistos em projeto complexo
Total CAPEX estimado		200,0	

Fonte: Adaptado de Conisud (2025).

Os custos operacionais anuais (OPEX), detalhados na Tabela 7, incluem os principais insumos e despesas recorrentes. A estrutura proposta está alinhada com a necessidade de investimentos em infraestrutura para uma gestão sustentável de resíduos, conforme destacado em estudos de implementação de tecnologias inovadoras no Brasil (Usina de Carbonização, 2018).

Tabela 7 – Custos Operacionais Anuais (OPEX)

Item	Descrição	Custo anual (R\$ milhões)
1	Pessoal (20 colaboradores em 3 turnos)	1,6
2	Energia auxiliar, água e consumíveis	1,0
3	Manutenção preventiva e corretiva (2% do CAPEX)	4,0
4	Logística, transporte, seguros e análises ambientais	0,9
5	Administração, impostos e taxas	0,8
Total OPEX anual		8,3

Fonte: Adaptado de Conisud, 2025

5.2 Estrutura de receitas

A usina gera receitas em três eixos complementares, fundamentadas em dados de mercado e projeções setoriais, atendendo ao previsto no Artigo 9º da PNRS, que autoriza a recuperação energética de resíduos (Brasil, 2010).

Venda de energia elétrica ($R_{energia}$): Considerando a geração excedente revisada de ~50 MWh/dia e uma tarifa média conservadora de R\$ 0,40/kWh (ANEEL, 2024):

$$R_{energia} = 50 \times 1000 \times 0,40 \times 365 = R\$7,3 \text{ milhões/ano}$$

A produção revisada de *biochar* de 39,56 t/dia, a um preço de R\$ 700/t, considerando aplicação como condicionador de solos e insumo industrial, gera a receita $R_{biochar}$.

$$R_{biochar} = 39,56 \times 700 \times 365 = R\$ 10,11 \text{ milhões/ano}$$

Créditos de Carbono e Taxas de Disposição Evitadas: Redução estimada de ~50.000 tCO₂e/ano, valorada a R\$ 50/tCO₂e. Esta receita ($R_{carbono}$) é fundamentada pelo potencial de projetos de tratamento térmico de RSU em reduzir significativamente as emissões de GEE em comparação com a disposição em aterros, conforme demonstrado em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no Brasil (Lima *et al.*, 2019).

$$R_{carbono} = 50.000 \text{ tCO}_2 \times R\$ 50/\text{tCO}_2 = R\$ 2,5 \text{ milhões/ano}$$

A Receita Total Anual é dada pela Equação 6.

$$R_{total} = R_{energia} + R_{biochar} + R_{carbono} \quad (6)$$

$$R_{total} = 7,30 + 10,11 + 2,50$$

$$R_{total} = R\$ 19,91 \text{ milhões/ano}$$

5.3 Fluxo de caixa e indicadores

O Fluxo de Caixa Líquido (FCL) anual é calculado conforme a Equação 7, metodologia padrão para análise de investimentos (Damodaran, 2023):

$$FCL_t = (R_t - C_t)(1 - IR) + Dept - Inv_t \quad (7)$$

onde:

R_t = receitas anuais (R\$ 22,56 mi);

C_t = custos operacionais (R\$ 3,50 mi);

IR = Alíquota do Imposto de Renda (15%);

$Dept$ = depreciação linear (10 anos, valor de R\$ 2,09 mi/ano);

Inv_t = reinvestimentos (assumido como zero para simplificação no horizonte analisado).

5.3.1 Cálculo do Lucro e FCL:

Lucro Operacional Líquido: $L = (19,91 - 8,30 - 20,0) \times 0,85 = - R\$ 7,13 \text{ mi/ano}$

Fluxo de Caixa Líquido (FCL): $FCL = L + Dept = -7,13 + 20,0 = R\$ 12,87 \text{ mi/ano}$

A depreciação é somada de volta por se tratar de uma despesa não-desembolsável.

5.3.2 Valor Presente Líquido (VPL)

O VPL, calculado a uma TMA de 10% a.a., demonstra a geração de valor do projeto.

$$VPL = [12,87 \times (1 - (1 + 0,10)^{-10}) / 0,10] - 200,0$$

$$VPL = (12,87 \times 6,145) - 200$$

$$VPL = 79,08 - 200$$

$$VPL = - R\$ 120,92 \text{ milhões}$$

O VPL negativo, sob estas premissas conservadoras, indica que, do ponto de vista estritamente financeiro privado, o investimento é desafiador. Isto ressalta a necessidade de mecanismos de suporte, como um "*gate fee*" (taxa de descarte), para sua viabilização.

5.3.3 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR é a taxa de desconto que zera o VPL. Para este fluxo de caixa, a TIR é inferior à TMA de 10%, corroborando a conclusão do VPL negativo e a necessidade de otimização de receitas ou redução de custos.

5.3.4 Payback

O cálculo do *Payback Simples* é feito pela Equação 8.

$$Payback = \text{CAPEX} / \text{FCL} \quad (8)$$

$$Payback = 200 / 12,87 \approx 15,5 \text{ anos}$$

Payback Descontado (TMA = 10%): O retorno do investimento não ocorre dentro do horizonte de 10 anos da análise, dado o VPL negativo.

O projeto, nas condições de mercado atuais, apresenta viabilidade financeira limitada. Contudo, como demonstra a análise de sensibilidade (Tabela 8), a introdução de uma taxa de desvio de aterro ("*gate fee*"), prática comum em modelos de PPP, é determinante para a atratividade econômica. A consolidação de políticas de crédito de carbono e incentivos à geração distribuída (ANEEL, 2024; UNEP, 2023) são fatores complementares cruciais. A superação de barreiras técnicas e de aceitação social, como as documentadas em estudos de caso nacionais (Lima et al., 2019; Usina de Carbonização, 2018), é, portanto, intrinsecamente ligada a um arcabouço de políticas públicas que internalize os benefícios ambientais do projeto.

Tabela 8 - Análise de sensibilidade financeira

Cenário	Variável Crítica	Valor	VPL (R\$ milhões)
Pessimista	<i>Gate Fee</i> = R\$ 0	-120,9	Sem receita por desvio de aterro
Base	<i>Gate Fee</i> = R\$ 100/t	+40,1	Receita adicional de R\$ 16,1 mi/ano
Otimista	<i>Gate Fee + Biochar</i> a R\$ 900/t	+150,0	Combinação de melhores preços

Fonte: De autoria própria.

5.4 Benefícios Sociais e Ambientais Quantificados

Para além da viabilidade financeira, o projeto gera impactos positivos diretos:

- Redução de Aterro: 161,46 t/dia * 365 = 58.933 t/ano de resíduos desviados de aterros sanitários, contribuindo para a meta de eliminação de lixões.
- Mitigação Climática: ~50.000 tCO₂e/ano de emissões evitadas (metano e CO₂), um benefício quantificado em ACVs de sistemas de tratamento de RSU (Lima *et al.*, 2019).
- Geração de Emprego: 20 empregos diretos e estimados 80 indiretos na cadeia circular, incluindo a previsão de integração com cooperativas de catadores, conforme preconizado pela legislação (Usina de Carbonização, 2018).
- Fundo Municipal Verde: Parte da receita de créditos de carbono e do *gate fee* pode ser destinada a financiar coleta seletiva e educação ambiental.

Estes resultados posicionam a usina de carbonização compacta não apenas como um empreendimento economicamente viável, mas como um vetor de desenvolvimento sustentável, reforçando a tese de que a sustentabilidade e a rentabilidade podem, de fato, coexistir e se potencializar no contexto da gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil.

6 PRODUTOS FEITOS A PARTIR DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE CAMPO GRANDE–MS

6.1 Produção de Tijolos Ecológicos

A produção de tijolos ecológicos a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) desponta como uma das rotas tecnológicas mais eficientes para a redução da disposição final em aterros sanitários, especialmente em cidades com crescente geração de resíduos como Campo Grande-MS. Em consonância com os princípios da economia circular, essa cadeia produtiva transforma frações de baixo valor comercial, como plástico, vidro, cinzas e resíduos minerais, em materiais de construção com alta durabilidade e desempenho técnico (Leite *et al.*, 2019).

Além de seu potencial ambiental, a rota de fabricação de tijolos ecológicos apresenta elevada capacidade de absorção de resíduos, escalabilidade e forte impacto socioeconômico, configurando-se como solução estratégica para municípios que buscam transição para sistemas sustentáveis de gestão de resíduos.

6.1.1 Tipos de resíduos aplicáveis à fabricação de tijolos ecológicos

Várias frações significativas do RSU possuem propriedades adequadas para compor tijolos ecológicos, especialmente quando combinadas em compósitos híbridos.

a) Plásticos mistos e filmes contaminados

Plásticos não valorizados pelo mercado de reciclagem mecânica, como filmes de PEBD, plásticos rígidos contaminados e frações mistas, podem ser triturados e reprocessados, atuando como matriz polimérica ou aditivo estrutural (Hopewell; Dvorak; Kosior, 2009). O uso desses polímeros confere impermeabilidade, resistência e estabilidade dimensional ao tijolo.

b) Vidro moído pós-consumo

O vidro finamente moído funciona como agregado de alta dureza e substitui a areia natural, reduzindo a extração mineral. Estudos mostram que a inclusão de vidro melhora a resistência à compressão e reduz a absorção de água em compósitos cimentícios e poliméricos (Ling e Poon, 2013).

c) Cinzas pirolíticas da carbonização de rejeitos

As cinzas provenientes da pirólise apresentam estabilidade mineral, granulometria fina e potencial pozolânico. Em proporções de 5 a 15%, podem substituir cimento, cal ou agregar estabilidade ao compósito (Manya, 2012).

d) Agregados reciclados provenientes do RCC

Os resíduos da construção civil (RCC), após britagem, fornecem areia e brita reciclada com excelente aplicabilidade como agregados (Silva; Brito; Dhir, 2014).

Essas quatro frações, abundantemente disponíveis em Campo Grande, viabilizam uma cadeia de produção contínua, de baixo custo e com forte impacto ambiental.

6.1.2 Capacidade de absorção de resíduos pelo processo

1) Plásticos mistos (6% – 8%)

$$6\% \text{ de } 897 \text{ t} = 0,06 \times 897$$

$$\Rightarrow 0,06 \times 897 = 0,06 \times (800 + 90 + 7)$$

$$\Rightarrow 0,06 \times 800 = 48,00$$

$$\Rightarrow 0,06 \times 90 = 5,40$$

$$\Rightarrow 0,06 \times 7 = 0,42$$

$$\Rightarrow \text{soma} = 48,00 + 5,40 + 0,42 = 53,82 \text{ t/dia}$$

$$8\% \text{ de } 897 \text{ t} = 0,08 \times 897$$

$$\Rightarrow 0,08 \times 800 = 64,00$$

$$\Rightarrow 0,08 \times 90 = 7,20$$

$$\Rightarrow 0,08 \times 7 = 0,56$$

$$\Rightarrow \text{soma} = 64,00 + 7,20 + 0,56 = 71,76 \text{ t/dia}$$

Portanto, plásticos disponíveis $\approx 53,82 - 71,76 \text{ t/dia}$.

2) Vidro pós-consumo (2%)

$$2\% \text{ de } 897 \text{ t} = 0,02 \times 897$$

$$\Rightarrow 0,02 \times 800 = 16,00$$

$$\Rightarrow 0,02 \times 90 = 1,80$$

$$\Rightarrow 0,02 \times 7 = 0,14$$

$$\Rightarrow \text{soma} = 16,00 + 1,80 + 0,14 = 17,94 \text{ t/dia}$$

Portanto, vidro disponível $\approx 17,94 \text{ t/dia}$.

- 3) Cinzas da carbonização (adotando o mesmo cenário do capítulo: 400 t/dia processadas em pirólise)

Fração sólida (cinzas) = 10% – 18% do material pirolisado.

Para 400 t/dia de rejeito carbonizado:

$$10\% \text{ de } 161,46 = 0,10 \times 161,46 = 16,1 \text{ t/dia}$$

$$18\% \text{ de } 161,46 = 0,18 \times 161,46 = 29,0 \text{ t/dia}$$

Portanto, cinzas produzidas $\approx 16,1 - 29,0 \text{ t/dia}$ (no cenário de 161,46 t/dia de alimentação ao reator).

6.1.3 Potencial teórico de material disponível

Somando as faixas mínimas e máximas das três frações principais (plástico + vidro + cinzas):

Límite inferior: 53,82 (plástico min) + 17,94 (vidro) + 16,1 (cinzas min)

$$\Rightarrow 53,82 + 17,94 = 71,76$$

$$\Rightarrow 71,76 + 16,1 = 87,86 \text{ t/dia}$$

Límite superior: 71,76 (plástico max) + 17,94 (vidro) + 29,0 (cinzas max)

$$\Rightarrow 71,76 + 17,94 = 89,70$$

$$\Rightarrow 89,70 + 29,0 = 118,7 \text{ t/dia}$$

Interpretação: teoricamente há $\approx 89,70$ a $118,7$ toneladas por dia de matérias-primas potenciais para compósitos de tijolos, caso todo o volume mensurável dessas frações fosse

destinado à cadeia de tijolos. Na prática, parte desses materiais será destinada a outras cadeias (telhas, pavimentação, recuperação de metais etc.) e nem todo o plástico disponível é adequado sem pré-tratamento.

6.1.4 Absorção realista pela cadeia de tijolos (exemplo operacional)

Para estimar absorção prática, adotamos a mesma hipótese operacional do TCC:

Fábrica de médio porte: produção de 20.000 tijolos/dia.

Massa média por tijolo (valor prático adotado) = 0,30 kg = 0,0003 t (verificação:

$$20.000 \times 0,0003 \text{ t} = 6 \text{ t/dia}.$$

Cálculo:

Resíduos incorporados (assumindo 30% da massa do tijolo = fração de resíduo no compósito):

Produção total de tijolos (massa) = 20.000 tijolos × 0,0003 t = 6,00 t/dia (massa total de tijolos)

$$30\% \text{ de } 6,00 \text{ t} = 0,30 \times 6,00 = 1,80 \text{ t/dia}$$

Nota: este é o resíduo diretamente incorporado quando se considera 30% da massa final como resíduo.

(Observação importante): anteriormente, foram considerados 6 t/dia de resíduos por fábrica, assumindo-se que 30% do volume de insumo da fábrica correspondia a resíduo; para eliminar ambiguidades, apresentam-se aqui duas formas de interpretação e o valor operacional prático a ser adotado no projeto.

1 fábrica média (20.000 tij/dia) → ≈ 6,0 t/dia de resíduos absorvidos (valor operacional adotado).

$$3 \text{ fábricas em rede} \rightarrow 3 \times 6,0 = 18,0 \text{ t/dia} \rightarrow 18,0 \times 365 = 6.570 \text{ t/ano.}$$

Escalonamento potencial: com tecnologias extrudadas e compósitos otimizados, a cadeia de tijolos pode escalar para ≈ 43 – 65 t/dia de absorção (ver nota de escalabilidade

abaixo), mantendo coerência com a disponibilidade crescente de material (de acordo com a subseção 6.1.3).

6.1.5 Processos produtivos recomendados

Rota tecnológica adequada ao perfil de Campo Grande:

Tijolo prensado solo-cimento-plástico (pressão hidráulica): baixo custo inicial; boa aceitação técnica (Agopyan e John, 2011).

“*Plastic bricks*” extrudados (polímero dominante): alta resistência e impermeabilidade para aplicações específicas.

Compósitos híbridos (plástico + cinzas + vidro + agregados): maximiza uso de cinzas da carbonização, reduz cimento e atende normas técnicas quando formulados e testados corretamente (Mohanty *et al.*, 2018).

6.1.6 Benefícios ambientais e sociais

- Redução da extração de argila e menor degradação territorial (Agopyan e John, 2011).
- Redução de emissões ao eliminar a queima tradicional dos tijolos
- Valorização de frações de baixo preço (plásticos contaminados, vidro, cinzas).
- Geração de emprego formal e inclusão de cooperativas de catadores (estimativa de 40 à 120 empregos diretos, dependendo da escala).
- Contribuição direta na redução do volume ao aterro: com 3 fábricas médias = 18 t/dia; com expansão modular = 43 à 65 t/dia.

6.1.7 Viabilidade econômica e operacional para Campo Grande

Estimativas rápidas de custo/escala:

- Custo de implantação (fábrica média): R\$ 28.000 (máquinas, prensa/extrusora, área, preparo de insumos) (SEBRAE, 2023).

- Receitas: venda para construção civil, mercado de habitação social, obras públicas.
- Prazo de retorno: dependente da demanda contratada; parcerias com a prefeitura para fornecimento em obras públicas aceleram o *payback*.
- Com 3 unidades (repartidas entre áreas de triagem/produção), o município pode reaproveitar 6.570 t/ano apenas por esse sub-setor, reduzindo custos associados à disposição e criando uma cadeia industrial local.

6.2 Telhas plásticas recicladas

A reciclagem de resíduos plásticos em produtos para a construção civil configura-se como uma das rotas mais promissoras para a valorização de materiais de baixa densidade e difícil comercialização, como os polímeros mistos e rejeitos de triagem. Neste contexto, a produção de telhas plásticas recicladas emerge como uma solução técnica, econômica e ambientalmente viável, capaz de absorver significativos volumes de resíduos e, simultaneamente, oferecer um produto durável, leve e com bom desempenho térmico-acústico para o mercado da construção civil (Ferreira; Andrade; Mendes, 2019).

6.2.1 Matérias-primas e processo de fabricação

A cadeia produtiva de telhas plásticas recicladas é alimentada por frações dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) que possuem limitado valor de mercado na reciclagem convencional, mas que apresentam características polímeras aproveitáveis. As principais matérias-primas são:

- Polímeros Mistos: Incluem Polietileno de Alta Densidade (PEAD), Polipropileno (PP) e Polietileno Tereftalato (PET) contaminados oriundos de embalagens pós-consumo. Estes materiais, quando segregados, triturados e reprocessados, formam uma matriz polimérica com boa resistência mecânica e à intempérie (Hopewell; Dvorak; Kosior, 2009).
- Borra de Plástico da Triagem: Refere-se ao resíduo resultante do processo de limpeza e beneficiamento de plásticos em centrais de triagem. Esta fração, de

granulometria fina e composição heterogênea, é perfeitamente incorporável ao processo de extrusão ou moldagem por compressão.

- Resíduo Pós-Carbonização: O biocarvão finamente moído, subproduto da pirólise lenta da fração orgânica dos RSU, pode ser adicionado em baixas porcentagens (até 5%) como carga mineral. Esta adição confere maior rigidez ao compósito, melhora a resistência aos raios UV e contribui para a estabilidade dimensional da telha (Manya, 2012; Taherymoosavi *et al.*, 2017).

O processo de fabricação predominante é a extrusão ou moldagem por compressão a quente. Após a triagem, lavagem e moagem dos resíduos plásticos, o material é homogeneizado e alimentado em uma extrusora de dupla-rosca. No interior da extrusora, o plástico é fundido a temperaturas entre 160°C e 200°C, sendo subsequentemente forçado através de uma matriz ("head" de extrusão) que confere o perfil corrugado típico das telhas. Após a extrusão, o perfil contínuo é resfriado por água ou ar e cortado no comprimento desejado. Processos de moldagem por injeção ou compressão também são viáveis para formatos especiais.

A capacidade de absorção de resíduos desta cadeia é notável. Uma unidade de produção de médio porte pode processar até 30 toneladas/dia de resíduos plásticos, o que representa uma contribuição significativa para o desvio de massa do aterro sanitário, aproximando Campo Grande da meta de "lixo zero".

6.2.2 Propriedades e vantagens técnicas

- ❖ As telhas plásticas recicladas apresentam um conjunto de propriedades que as tornam competitivas em relação aos materiais convencionais:
- ❖ Leveza: Sua densidade é significativamente inferior à de telhas de fibrocimento ou cerâmicas. Com massa entre 3,5 e 4,5 kg/m², facilitam o manuseio, o transporte e reduzem a carga sobre a estrutura do telhado, podendo resultar em economia de até 30% nos perfis de sustentação (Ferreira *et al.*, 2019).
- ❖ Durabilidade: As telhas de MPVC, são extremamente leves em relação às demais existentes no mercado. Essa característica influencia diretamente na durabilidade

do telhado, já que as mesmas proporcionam alinhamento correto do sistema por muito mais tempo se comparado aos sistemas convencionais. (CB Amorim, 2014)

- ❖ Isolamento Térmico e Acústico: A natureza polimérica do material e a possibilidade de se criar estruturas com câmaras de ar internas conferem à telha uma baixa condutividade térmica. Estudos indicam uma redução de até 5°C na temperatura interna do ambiente em comparação com telhas de fibrocimento, contribuindo para a eficiência energética da edificação.
- ❖ Impermeabilidade: São totalmente impermeáveis e estanques, eliminando a necessidade de mantas de impermeabilização adicionais.

6.2.3 Comparação técnica com telhas de fibrocimento

A Tabela 9 apresenta uma comparação técnica objetiva entre as telhas plásticas recicladas e as de fibrocimento, material amplamente utilizado no mercado de habitação social.

Tabela 9 - Comparação entre Telhas Plásticas Recicladas e de Fibrocimento

Propriedade	Telha Plástica Reciclada	Telha de Fibrocimento
Massa (kg/m ²)	3,5 – 4,5	10 – 15
Vida Útil (anos)	> 20	15 – 25 (sujeita à degradação)
Isolamento Térmico	Alto	Baixo
Resistência ao Impacto	Alta	Média-Baixa (frágil)
Resistência à Corrosão	Inerte	Suscetível à corrosão de fixadores
Manutenção	Praticamente isenta	Pode requerer substituição
Custo de Implantação*	Competitivo	Baixo
Impacto Ambiental	Reciclagem de resíduos	Extração de recursos naturais

*O custo de implantação considera o sistema completo de telhado, incluindo estrutura de apoio.

Fonte: Adaptado Ferreira *et al.* (2019).

Como evidenciado, a telha plástica oferece vantagens decisivas em termos de leveza, isolamento térmico e durabilidade, compensando eventuais diferenças iniciais de custo unitário.

6.2.4 Análise de custos e *payback*

A viabilidade econômica da fabricação de telhas plásticas é atrativa, especialmente quando integrada a um sistema de gestão de resíduos que fornece a matéria-prima a baixo ou nenhum custo.

Custos de Implantação (CAPEX): O investimento para uma unidade produtiva com capacidade de 30 t/dia está estimado entre R\$ 1,5 e R\$ 2,5 milhões, incluindo extrusora, triturador, esteiras, matrizes e infraestrutura básica.

Custos Operacionais (OPEX): Incluem energia elétrica (principalmente para a extrusora), mão de obra qualificada, manutenção e logística. O custo de produção por m² de telha é estimado em 30-40% inferior ao da telha de fibrocimento de qualidade equivalente, quando se considera a isenção do custo da matéria-prima virgem.

Payback: A análise de fluxo de caixa descontado, considerando um preço de venda conservador de R\$ 15 a R\$ 20 por m² e uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 12% ao ano, projeta um retorno do investimento (*Payback*) entre 3 e 5 anos. A rentabilidade é sensivelmente ampliada caso a produção seja destinada a programas públicos de habitação, que garantem escala e reduzem incertezas de mercado (Lima; Lira; Souza, 2022).

6.2.5 Mercado potencial: Habitação Social e obras públicas

O mercado de habitação social e obras públicas representa o segmento ideal para a inserção em escala das telhas plásticas recicladas. O Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) e similares estaduais e municipais demandam grandes volumes de materiais de construção de baixo custo, durabilidade comprovada e fácil aplicação.

A telha plástica atende perfeitamente a esses requisitos, além de se alinhar a políticas públicas de compras sustentáveis (Lei nº 12.305/2010, Art. 45) e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 11 e 12). A prefeitura de Campo Grande, por exemplo, poderia instituir uma política de fornecimento deste produto para escolas, postos de saúde,

centros comunitários e conjuntos habitacionais, criando uma demanda estável que viabilize a instalação da fábrica e gera empregos locais.

A integração desta cadeia produtiva com as cooperativas de catadores é um pilar fundamental. Os catadores, responsáveis pela triagem e pré-beneficiamento dos plásticos, tornam-se fornecedores diretos, agregando valor ao seu trabalho e sendo incluídos em um processo produtivo formal de maior valor agregado (Gutberlet, 2015; Wilson; Velis; Cheeseman, 2006).

6.3 Elementos de pavimentação (*pavers*, guias, placas, asfalto com plástico)

A incorporação de resíduos sólidos urbanos (RSU) em elementos de pavimentação representa uma alternativa sustentável e de alto potencial de absorção de materiais. Esta cadeia produtiva utiliza principalmente plásticos mistos, vidro moído, resíduos minerais da construção civil (RCC) e cinzas estabilizadas da carbonização, transformando passivos ambientais em componentes viários duráveis e com desempenho técnico adequado (Singh e Siddique, 2016).

6.3.1 Materiais aplicáveis e proporções

Plástico misto: Atua como aglutinante e impermeabilizante em *pavers* e guias, substituindo parcialmente o cimento ou betume.

Vidro moído: Substitui parcialmente agregados finos, conferindo resistência e brilho superficial (Ling e Poon, 2013).

Resíduos de construção civil (RCC): Brita e areia recicladas são utilizadas como base granular, reduzindo a extração de recursos naturais (Silva; Brito; Dhir, 2014).

Cinzas estabilizadas: Provenientes da carbonização, podem substituir até 15% de cimento em composições cimentícias, com potencial pozolânico (Manya, 2012).

6.3.2 Capacidade de absorção de resíduos

Considerando a disponibilidade local e a escala de produção modular, é possível absorver uma faixa estimada de 50 a 100 toneladas/dia de resíduos, dependendo do *mix* adotado e da demanda por pavimentação.

Composição típica: 30% plástico, 30% RCC, 20% vidro, 10% cinzas e 10% outros.

6.3.3 Desempenho técnico dos *pavers* híbridos

Segundo (Lenine *et al.*, 2020), a utilização de plásticos reciclados também pode ser considerada ambientalmente viável, pois contribui para a preservação do meio ambiente e de seus recursos naturais, bem como no aumento da reciclagem de resíduos industriais e pós-consumo.

6.4 Uso de plástico em asfalto: casos internacionais e nacional

Holanda: Projeto “*PlasticRoad*” em Roterdã utiliza módulos pré-fabricados de plástico reciclado para construção de vias ciclísticas, reduzindo tempo de instalação e emissões (European Commission, 2020).

Brasil: Iniciativas piloto em cidades como São Paulo e Rio de Janeiro incorporam plástico em misturas asfálticas, com resultados promissores em termos de durabilidade e redução de custos (Mello; Pereira; Gomes, 2020).

6.5 Usina de Mobiliário Urbano com plástico reciclado

O mobiliário urbano representa a materialização da identidade e do cuidado de uma cidade com seus cidadãos. Ao integrar resíduos plásticos em sua confecção, Campo Grande pode transformar um passivo ambiental em símbolos tangíveis de sustentabilidade e inovação, alinhando-se às melhores práticas de economia circular (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

6.5.1 Processo produtivo e tecnologia

A rota tecnológica recomendada é a manufatura aditiva (impressão 3D de grande escala) e a injeção de plásticos compostos. A prensagem de plásticos triturados em moldes para bancos, lixeiras, vasos e placas de sinalização permite a produção de peças robustas, duráveis e de baixa manutenção. A tecnologia *Precious Plastic*, de código aberto, oferece um framework acessível e adaptável para implantação em escala municipal (Hunt, 2020).

6.5.2 Materiais e absorção de resíduos

Principais insumos: Plásticos mistos de baixa densidade (PEAD, PEBD), plásticos rígidos (PP, ABS) e compostos com serragem ou cinzas para maior rigidez.

Capacidade de absorção: Uma unidade de médio porte pode processar de 5 a 15 toneladas/dia de resíduos plásticos, dependendo da diversificação da linha de produtos.

6.5.3 Vantagens e impactos

- Durabilidade e resistência: o mobiliário de plástico reciclado é imune à umidade, insetos e vandalismo, com vida útil superior à madeira (Hunt, 2020).
- Customização e identidade local: as peças podem ser pigmentadas e moldadas com cores e designs que remetam à cultura local.
- Inclusão socioprodutiva: a operação pode ser integrada a cooperativas de catadores, gerando empregos verdes e de maior valor agregado (Gutberlet, 2015).
- Educação ambiental permanente: cada banco ou lixeira instalada torna-se um monumento à conscientização, estampando informações sobre sua origem reciclada.

6.6 Compostagem da fração orgânica

A fração orgânica representa cerca de 50% da massa total dos RSU em Campo Grande (ABREMA, 2023). O seu desvio do aterro por meio da compostagem é uma etapa não apenas

desejável, mas indispensável para o sucesso da meta "zero aterro", fechando o ciclo dos nutrientes e retornando matéria orgânica ao solo (Kiehl, 2017).

6.6.1 Tecnologia e escala recomendada

Para a realidade local, recomenda-se um sistema híbrido e descentralizado:

Compostagem em Leiras Viradas Mecanicamente: Para o grande volume de podas de árvores e grama da limpeza urbana.

Biodigestão em Pequena Escala e Compostagem em Comunidade: Para resíduos alimentares de feiras livres, restaurantes e grandes geradores, operados por cooperativas.

6.6.2 Capacidade de processamento e produtos

Capacidade potencial: considerando a fração orgânica dos RSU (~50% de 897 t/dia), até ~450 toneladas/dia são passíveis de compostagem.

Produto final: composto orgânico de alta qualidade, a ser utilizado em:

- ❖ Jardins e canteiros públicos, reduzindo custos com aquisição de substratos.
- ❖ Programas de agricultura urbana, fortalecendo a segurança alimentar.
- ❖ Recuperação de áreas degradadas no entorno urbano.

6.6.3 Benefícios adicionais

- ❖ Redução máxima de emissões: a compostagem adequada evita a geração de metano, um GEE potentíssimo, característico dos aterros (IPCC, 2023).
- ❖ Fortalecimento da economia local: Geração de empregos verdes em todas as etapas, da coleta à aplicação do composto.

7 CONCLUSÃO

Síntese da viabilidade técnica, econômica e ambiental do modelo integrado "Zero Aterro"

A análise detalhada das cadeias produtivas demonstra que a eliminação do aterro sanitário em Campo Grande é uma meta técnica e economicamente alcançável. O modelo integrado proposto não é uma utopia, mas um plano de negócios robusto para a sustentabilidade urbana. A Tabela 10 destaca a massa de resíduos que pode ser eliminada do aterro, por cada tipo de cadeia produtiva.

Tabela 10 – Balanço de massa consolidado para a eliminação do aterro

Cadeia Produtiva	Fração de RSU Aproveitada	Massa Desviada do Aterro (t/dia)
Usina de Carbonização	Fração rejeito (18%)	~161 t/dia
Cadeia de Tijolos Ecológicos	Plásticos, vidro, cinzas	~18 - 65 t/dia
Elementos de Pavimentação	Plásticos, RCC, vidro, cinzas	~50 - 100 t/dia
Usina de Mobiliário Urbano	Plásticos mistos	~5 - 15 t/dia
Compostagem	Fração orgânica (50%)	~450 t/dia
TOTAL DESVIADO DO ATERRO		~684 - 791 t/dia

Fonte: De autoria própria.

Este total desviado (684 a 791 t/dia) supera amplamente a geração total de resíduos de Campo Grande (897 t/dia), considerando que a carbonização trata a fração residual após a triagem máxima. O sistema é projetado para que 100% dos resíduos tenham uma destinação valorizada, eliminando a necessidade do aterro.

Viabilidade Financeira

O investimento total estimado para implantar todo esse ecossistema circular, que inclui a usina de carbonização compacta e as cadeias produtivas de reciclagem, está alinhado com a análise do Capítulo 5.

Investimento Total Estimado (CAPEX): R\$200 - R\$250 milhões.

Fontes de Receita Diversificadas: Venda de energia elétrica, biocarvão, óleo pirolítico, créditos de carbono, produtos reciclados (tijolos, pavers, mobiliário) e a economia com a taxa de disposição em aterro ("gate fee").

Retorno Socioambiental Incalculável: Saúde pública preservada, recursos naturais poupadados, emprego e dignidade gerados, e uma cidade posicionada como líder em inovação sustentável.

O Legado para Campo Grande e para o Planeta

Este trabalho vai além de uma dissertação acadêmica; é um manifesto pela ação. Ele demonstra que a tecnologia, quando guiada por uma visão ética e circular, é a maior aliada na reparação dos danos ambientais. A proposta para Campo Grande é um protótipo replicável, uma semente de esperança concreta.

Com um investimento da ordem de R\$ 200 milhões, é possível eliminar o aterro sanitário, e também:

- ❖ Gerar energia limpa e renovável;
- ❖ Criar centenas de empregos formais e inclusivos;
- ❖ Fomentar uma nova economia de base verde;
- ❖ Reduzir drasticamente as emissões de gases de efeito estufa;
- ❖ Transformar o lixo em símbolo de orgulho e responsabilidade.

A harmonia entre a sociedade e o planeta não é um ideal distante. Ela começa com decisões corajosas, baseadas em conhecimento e movidas pela certeza de que o futuro não é um lugar aonde vamos, mas um lugar que estamos construindo agora. Campo Grande tem a oportunidade histórica de ser um farol nessa construção.

7.1 Trabalhos Futuros

Esta pesquisa demonstrou a viabilidade técnico-econômica de um modelo integrado de gestão de resíduos para cidades de médio porte, posicionando-se na vanguarda da aplicação da economia circular ao contexto urbano brasileiro. Contudo, a jornada de inovação está longe de ser concluída. A consolidação e otimização deste paradigma abrem um fértil campo para investigações futuras, que podem ser agrupadas em quatro eixos principais:

1. Otimização Avançada de Processos e Valorização de Coprodutos:

Pesquisa em Pirólise Catalítica: Investigar o uso de catalisadores específicos (e.g., zeólitas, hidrotalcitas) para otimizar a qualidade e o rendimento do bio-óleo, direcionando sua composição para frações químicas de maior valor de mercado ou para biocombustíveis avançados com especificação drop-in.

Functionalização de Biochar: Explorar a modificação pós-pirólise do biocarvão (com nanopartículas, impregnação com nutrientes ou ativação química) para desenvolver materiais de alto desempenho, como adsorventes específicos para efluentes industriais, catalisadores verdes ou fertilizantes de liberação lenta, ampliando significativamente seu valor agregado.

Integração com Biorrefinarias: Estudar a integração sinérgica da usina de carbonização com biorrefinarias que processem a fração orgânica via digestão anaeróbia, explorando sinergias entre os fluxos de syngas, biochar e digestato.

2. Inteligência Artificial e Digitalização da Gestão de Resíduos:

Desenvolvimento de um "Gemelo Digital" (Digital Twin): Criar um modelo virtual dinâmico de todo o sistema integrado, desde a geração até a valorização final. Alimentado por IoT (Internet das Coisas) e machine learning, este gemelo permitiria simular cenários, prever a composição dos resíduos, otimizar rotas de logística em tempo real e maximizar a eficiência operacional e econômica.

Sistemas de Triagem Inteligente: Pesquisar a aplicação de sensores hiperespectrais, NIR (*Near-Infrared*) e algoritmos de visão computacional em esteiras de triagem para identificar e separar automaticamente polímeros específicos e materiais complexos, elevando a pureza e o valor dos recicláveis.

3. Valoração de Externalidades e Modelos de Negócio Circulares:

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) Social: Aplicar metodologias de ACV Social para quantificar os benefícios de indicadores como geração de emprego digno, inclusão socioprodutiva de catadores e melhoria na saúde pública, internalizando estas externalidades positivas na análise de viabilidade.

Estruturação de Instrumentos Financeiros Verdes: Desenvolver modelos para a emissão de *green bonds* (títulos verdes) e a securitização de créditos de carbono e receitas circulares, criando mecanismos atrativos para o capital de impacto e fundos de pensão.

Estudos de Mercado para Produtos Circulares: Aprofundar a análise de aceitação de mercado, cadeias de distribuição e políticas de compras públicas sustentáveis para os produtos manufaturados (tijolos, telhas, mobiliário), garantindo a sustentabilidade econômica das cadeias produtivas.

4. Replicabilidade, Governança e Engajamento Social:

Modelagem de Consórcios Intermunicipais: Desenvolver frameworks de governança e modelos logísticos para a implantação de plantas regionais de tratamento, atendendo a conglomerados de cidades menores, otimizando investimentos e ganhando escala.

Pesquisa em Comportamento e Economia Comportamental: Investigar, através de experimentos controlados, quais estratégias de comunicação, incentivos e *nudges* são mais eficazes para promover a adesão massiva e correta da população à pré-separação dos resíduos na fonte.

Análise de Políticas Públicas: Avaliar o impacto de diferentes desenhos regulatórios, como Tributação Verde, Regulamento de Performance Ambiental e Leis de Obrigações Circulares, na aceleração da transição para modelos "zero aterro".

Em síntese, este trabalho não se encerra com a proposta para Campo Grande, mas inaugura um programa de pesquisa. Os desafios delineados representam a fronteira do conhecimento na interface entre engenharia, ciências ambientais, economia e ciências sociais, com o potencial de transformar a gestão de resíduos de um problema urbano crônico em um pilar central para o desenvolvimento de cidades inteligentes, resilientes e verdadeiramente circulares.

REFERÊNCIAS

- ABAL. Reciclagem de alumínio no Brasil. Associação Brasileira do Alumínio, 2022.
- ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2022.
- ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2023.
- ABREMA. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023. Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente - ABREMA, 2023.
- ABNT. NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Rio de Janeiro, 1987.
- AGOPYAN, Vahan; JOHN, Vanderley Moacyr. O desafio da sustentabilidade na construção civil. São Paulo: Blucher, 2011. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002202042>. Acesso em: 22 jun. 2025.
- AMAN, S. *Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks*. Energy Conversion and Management, v. 45, n. 5, p. 651-671, 2004.
- AMORIM, C. B. Utilização das telhas plásticas de MPVC na construção civil. Monografia apresentada ao curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/d0f5398f-406f-4ca2-b191-89be9e86dc22/content>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- ANEEL. Resolução Normativa nº 1.000, de 07 de dezembro de 2023. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2024.
- ARENA, Umberto. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. Waste Management, *32*(4), 625-639, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025>. Acesso em: 12 mai 2025.
- ARISI, Barbara Maisonnave. Circular economy – from waste to resource: 7Rs innovative practices in Amsterdam. Iluminuras, 21(55), 61–86, 2020. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/iluminuras/article/view/108061>. Acesso em: 15 jul. 2025.

ARRIGONI, Alessandro; BECKETT, Christopher; CIANCIO, Daniela; DOTELLI, Giovanni. Life cycle analysis of environmental impact vs. durability of stabilised rammed earth. Construction and Building Materials, Volume 142, Pages 128-136, 1 July, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817304300?via%3Dihub>. Acesso em: 02 ago. 2025.

AVILA, Ana Paula Santos de; MACIEL, Dulce Maria; SILVEIRA, Icléia; RECH, Sandra Regina. Os resíduos têxteis sólidos no contexto de abordagens sustentáveis: Ciclo de vida, economia circular e upcycling. Mix Sustentável, 4(3), 17–24, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/335177481_OS_RESIDUOS_TEXTEIS_SOLIDOS_N_O_CONTEXTO_DE_ABORDAGENS_SUSTENTAVEIS_CICLO_DE_VIDA_ECONOMIA_CIRCULAR_E_UPCYCLING. Acesso em: 11 jul. 2025.

BASU, P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Design and Theory. 3. ed. Academic Press, 2018. https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=BYM2DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=BASU,+P.+Biomass+Gasification,+Pyrolysis+and+Torrefaction:+Design+and+Theory.+3.+ed.+Academic+Press,+2018.&ots=nJrBg8sIsL&sig=pTirAMhuPKskyMqwn2TVJgf_z2Y#v=onepage&q=BASU%2C%20P.%20Biomass%20Gasification%2C%20Pyrolysis%20and%20Torrefaction%3A%20Design%20and%20Theory.%203.%20ed.%20Academic%20Press%2C%202018.&f=false

BERLIM, L. Moda e sustentabilidade: Design para mudança. Estação das Letras e Cores, 2016. Disponível em: <https://tede.ufrrj.br/jspui/bitstream/jspui/2139/2/2016%20-20Lilyan%20Guimar%C3%A3es%20Berlim.pdf>

BINEY, M.; GUSIATIN, M. Z. *Biochar from co-pyrolyzed municipal sewage sludge (MSS): Part 1: Evaluating types of co-substrates and co-pyrolysis conditions*. Materials, 17(14), 3603, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma17143603>. Acesso em: 16 dez. 2025.

BINEY, S. P.; GUSIATIN, M. Waste Management, 174, 100-112, 2024. Disponível em: DOI:10.1016/j.wasman.2024.02.015. Acesso em: 16 dez. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 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: seção 1, Brasília, DF, p. 3, 3 ago. 2010. Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 06 mai 2025.

BRIDGWATER, A. V. *Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading*. Biomass and Bioenergy, *38*, 68–94, 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>

BRUNNER, P. H.; RECHBERGER, H. Handbook of Material Flow Analysis: For Environmental, Resource, and Waste Engineers. 2. ed. CRC Press, 2015. DOI:10.1201/9781315313450

https://www.researchgate.net/publication/312121144_Handbook_of_Material_Flow_Analysis_for_Environmental_Resource_and_Waste_Engineers

CAMPO GRANDE NEWS. Campo Grande produz média de 897 toneladas de resíduos sólidos por dia. **Campo Grande News**, Campo Grande, 26 out. 2022. Disponível em: <https://www.campograndenews.com.br/meio-ambiente/campo-grande-produz-media-de-897-toneladas-de-residuos-solidos-por-dia> Acesso em: 05/11/2025.

CAMPOS, J. R.; SILVA, A. L. P. Compostagem de resíduos urbanos: desafios e oportunidades para cidades brasileiras. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, 25(2), 291–302, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/i/2020.v25n2/>. Acesso em: 12 dez. 2025.

CEMPRE. Panorama da reciclagem no Brasil. Compromisso Empresarial para Reciclagem, 2021. Disponível em: [https://ime.events/ii-coneamb/pdf/9174#:~:text=Essa%20quantidade%20comercializada%20resultou%20em,ANCAT;%20PRAGMA%C2%202021\).&text=tamb%C3%A9m%20evidenciam%20a%20ordem%20e,sobre%20a%20reciclagem%20desses%20materiais.&text=MATERIAIS%20E%20M%C3%89TO DOS-,O%20presente%20artigo%20fez%20uma%20revis%C3%A3o%20bibliogr%C3%A1fica%20sobre%20as%20características,a%20cada%20tipo%20de%20material](https://ime.events/ii-coneamb/pdf/9174#:~:text=Essa%20quantidade%20comercializada%20resultou%20em,ANCAT;%20PRAGMA%C2%202021).&text=tamb%C3%A9m%20evidenciam%20a%20ordem%20e,sobre%20a%20reciclagem%20desses%20materiais.&text=MATERIAIS%20E%20M%C3%89TO DOS-,O%20presente%20artigo%20fez%20uma%20revis%C3%A3o%20bibliogr%C3%A1fica%20sobre%20as%20características,a%20cada%20tipo%20de%20material). Acesso em: 10 dez. 2025.

CHHABI, A.; SYED, S.; QAZI, I. A. Review of municipal solid waste management through size reduction and thermochemical methods. Journal of Environmental Management, 2016. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10884800/>

CHERTOW, M. *Industrial symbiosis: Literature and taxonomy*. Annual Review of Energy and the Environment, 25(1), 313–337, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.313>. Acesso em: 05 dez. 2025.

CHEN, D. et al. *Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review*. Waste Management, 2014.

CONISUD. Estudo de Viabilidade Técnica e Econômico-Financeira (EVTE) São Paulo. Consórcio Intermunicipal da Região Sudoeste da Grande São Paulo, 2025. Disponível em: https://conisud.sp.gov.br/downloads/Consulta%20Publica%2001%202025/12%20-%20Anexo%20XII%20-%20EVT%20-%20CONISUD_2025_04.05.25.pdf

CORREIA, A. M.; NUNES, L.; SOUZA, R. Resíduos têxteis no polo de confecção de Blumenau: Desafios e oportunidades para a economia circular. Revista Gestão & Produção, 23(4), 777–791, 2016.

CHRISTENSEN, T. H. *Solid Waste Technology & Management*. Wiley, 2nd ed., 2024.

CZAJCZYŃSKA, D.; NANNOU, T.; ANGUILANO, L.; KRZYŻYŃSKA, R.; GHAZAL, H., SPENCER, N.; JOUHARA, H. *Potentials of pyrolysis processes in the waste management sector*. Energy Procedia, *123*, 387-394, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.283>. Acesso em: 17 nov. 2025.

DAMODARAN, A. *Damodaran on Valuation: Security Analysis for Investment and Corporate Finance*. John Wiley & Sons, 4th ed., 2023.

DJATE, F. Avaliação da Viabilidade Técnica e Ambiental da Produção de Telhas Sustentáveis Utilizando Resíduos de Plástico, Areia e Fibra de Coco. Relatório de Fim de Curso ou Tese/Dissertação, Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane, 2025. Disponível em: <http://monografias.uem.mz/handle/123456789/5212>. Acesso em: 24 nov. 2025.

DUSSAN, K. et al. Pyrolysis of municipal solid waste: A review. In: *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*. Elsevier, 2017.

GHOLAMIAN, E.; MAHMOUDI, S.M.S.; ZARE, V. *Proposal, exergy analysis and optimization of a new biomass-based cogeneration system*. Applied Thermal Engineering,

volume 93, Pages 223-235, 25 January, 2016. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.095>. Acesso em: 03 ago. 2025.

EEA. *Bio-waste in Europe – turning challenges into opportunities*. European Environment Agency - EEA, report no. 08/2020, Copenhagen, 2020. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/bio-waste-in-europe>. Acesso em: 16 ago. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. A new textiles economy: Redesigning fashion's future. Ellen Macarthur Foundation, 2017. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/a-new-textiles-economy>. Acesso em: 16 nov. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change*. Ellen Macarthur Foundation, 2019. Disponível em: https://circularconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/emf_completing_the_picture.pdf. Acesso em: 20 nov. 2025.

ENERKEM. *World's first urban waste-to-biofuels partnership*. Enerkem Alberta Biofuels Facility, 2023. Disponível em: <https://enerkem.com/projects/edmonton>. Acesso em: 10 dez. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. Closing the loop: An EU action plan for the circular economy. European Union, Bruxelas, 2015. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52015DC0614>. Acesso em: 12 ago. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. *A new Circular Economy Action Plan*. European Union, Bruxelas, 2020. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0098>. Acesso em: 14 ago. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. Ljubljana: Towards Zero Waste. Europe Union, Bruxelas, 2021. Disponível em: <https://zerowasteeurope.eu/press-release/new-case-study-the-story-of-ljubljana-first-zero-waste-capital-in-europe/#:~:text>New%20case%20study:%20The%20story,%2D%20Zero%20Waste%20Europe>. Acesso em: 15 ago. 2025.

FAROBIE, O.; AMRULLAH, A.; BAYU, A., SYAFTIKA, N.; ANIS, L. A.; HARTULISTIYOSO, E. *In-depth study of bio-oil and biochar production from macroalgae Sargassum sp. via slow pyrolysis.* RSC Advances, 12, 9567-9578, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D2RA00702A>. Acesso em: 05 dez. 2025.

FERREIRA, A. L.; ANDRADE, M. C.; MENDES, J. J. Telhas sustentáveis a partir da reciclagem de embalagens longa vida e resíduos plásticos. Revista Matéria, 24(3), 1–10, 2019. Disponível em: [https://www.scielo.br/j/rmat/#:~:text=SciELO%20Mat%C3%A9ria%20\(Rio%20de%20Janeiro\)](https://www.scielo.br/j/rmat/#:~:text=SciELO%20Mat%C3%A9ria%20(Rio%20de%20Janeiro)). Acesso em: 22 nov. 2025.

FLETCHER, K.; GROSE, L. *Fashion and sustainability: Design for change*. Laurence King Publishing, 2011. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=PQgEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT12&dq=Fletcher,+K.+%26+Grose,+L.+\(2011\).+Fashion+and+sustainability:+Design+for+change.+Laurence+King+Publishing.&ots=1amcQiAfY&sig=D_drPZPG3ntz1rJNuzvbVXQQRvM#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=PQgEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT12&dq=Fletcher,+K.+%26+Grose,+L.+(2011).+Fashion+and+sustainability:+Design+for+change.+Laurence+King+Publishing.&ots=1amcQiAfY&sig=D_drPZPG3ntz1rJNuzvbVXQQRvM#v=onepage&q&f=false). Acesso em: 01 dez. 2025.

FUJITA, T.; HILL, R. C. *Integrated environmental management for industries and municipalities: Eco-industrial development in Japan*. Journal of Cleaner Production, 15(18), 1543–1556, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.07.022>. Acesso em: 03 dez. 2025.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. *A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems*. Journal of Cleaner Production, v. 114, p. 11-32, 2016.

GUTBERLET, J. *More inclusive and cleaner cities with waste management co-production: Insights from participatory epistemologies and methods*. Habitat International, 46, 234–243, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.habitint.2014.10.004> Acesso em: 06 dez. 2025.

GUTBERLET, J. *Grassroots waste picker organizations addressing the UN sustainable development goals*. World Development, 138, 105195, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105195> Acesso em: 06 dez. 2025.

HOPEWELL, J.; DVORAK, R.; KOSIOR, E. *Plastics recycling: Challenges and opportunities.* Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 364(1526), 2115–2126, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>. Acesso em: 16 nov. 2025.

HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, P. *What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management.* Washington, DC: World Bank, 2012.

HUNT, D. V. L. *Precious Plastic: Small-scale plastic recycling and its role in the circular economy.* Waste Management & Research, 38(9), 1015–1017, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734242X20948237>. Acesso em: 19 nov. 2025

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico: 2008. Rio de Janeiro: IBGE.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010). Censo Demográfico 2010: características da população e dos domicílios. Rio de Janeiro: IBGE.

ICLEI – Local Governments for Sustainability. (2022). Collaboration is mission critical to successful city climate action. Disponível em: <https://iclei.org/news/collaboration-is-mission-critical-to-successful-city-climate-action/>. Acesso em: 23 out. 2025.

IEA. *IEA bioenergy agreement task XI: Municipal solid waste conversion to energy end of task review.* Biomass and Bioenergy, volume 9, Issues 1–5, Pages 343-349, 1995. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0961953495001018#:~:text=Governments%20are%20now%20encouraging%20the,three%20years%20during%201995%E2%80%931997>. Acesso em: 26 nov. 2025.

IMASUL. (2017). Panorama da gestão de resíduos sólidos — Encontro sobre Gestão de Resíduos Sólidos [Apresentação]. Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul.

IPCC. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,* Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157926>. Acesso em: 04 out. 2025.

IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 26 nov. 2025.

INDUSTRY RESEARCH. *Pyrolysis Equipment Market Size | Industry Insights* [2034]. Industry Research, 2025. Disponível em: <https://www.industryresearch.biz/market-reports/pyrolysis-equipment-market-113005>. Acesso em: 28 set. 2025.

ISWA & UNEP. (2024). Global Waste Management Outlook 2024 – Executive Summary. International Solid Waste Association. <https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024>

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. *Estudos Avançados*, v. 25, n. 71, p. 135-158, 2011.<https://doi.org/10.1590/S0103-40142011000100010>

KALINA, A.; BOREL, L. *Rankine and Kalina Cycles for Waste Heat Recovery: Design and Optimization*. Energy Conversion and Management, 289, 118534, 2023. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.2c03922#:~:text=In%20many%20parts%20of%20the,in%20the%20steel%20production%20process>. Acesso em: 06 dez. 2025.

KAZA, Silpa; YAO, Lisa C.; BHADA-TATA, Perinaz; VAN WOERDEN, Frank. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. World Bank, Urban Development, Washington, DC, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10986/30317>. Acesso em: 12 jan. 2025.

KIEHL, E. J. Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto. 5^a ed. Piracicaba: Degaspari, 2017. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001004271>. Acesso em: 04 out. 2025.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>. Acesso em: 18 nov. 2025.

KORHONEN, J.; NUUR, C.; FELDMANN, A.; BIRKIE, S. E. *Circular economy as an essentially contested concept*. *Journal of Cleaner Production*, 175, 544–552, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.111>. Acesso em: 15 dez. 2025.

LECKNER, B. Process aspects in combustion and gasification Waste-to-Energy (WtE) units. *Waste Management*, *37*, 13-25, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.04.019>, Acesso em: 10 out. 2025.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: science, technology and implementation. Routledge, 2nd ed., 2015. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9780203762264-1/biochar-environmental-management-introduction-johannes-lehmann-stephen-joseph>

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. Routledge, 2015. LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. Routledge, 2015. Disponível em: connectivitycheck.gstatic.com/generate_204

LEITE, C. B. Tratamento de resíduos sólidos urbanos com aproveitamento energético: avaliação econômica entre as tecnologias de digestão anaeróbia e incineração. (Dissertação de Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2016.

LENINE ALVES, A.; APARECIDO ZANFOLIM, A.; GOTARDI, F. G. N.; DE MAURO TORRES, R.; DE LIMA ZANDONÁ GODOY, G. Estudo das propriedades mecânicas de pavers de concreto obtidos através da introdução de resíduos plásticos industriais. *Ambiência*, 15(1). UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, 2019. Disponível em: <https://bdm.ufpa.br/server/api/core/bitstreams/4e12bcb1-c6cc-4a9b-9f38-ab300d9dbabd/content>

LIMA, S. E. Incineração de resíduos sólidos industriais. Tipo de publicação não especificado, 2021.

LIMA, J. F.; LIRA, T. S.; SOUZA, A. P. Avaliação de impactos ambientais do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos em Campo Grande-MS utilizando análise de ciclo de vida. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, 24(3), 547–556, 2019.

LIMA, J. F.; LIRA, T. S.; SOUZA, A. P. Planejamento estratégico para gestão de resíduos sólidos urbanos em Campo Grande-MS: uma abordagem econômico-financeira. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 14(1), e20220045, 2022.

LING, T. C.; POON, C. S. Use of recycled glass in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 35, 38–43, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/51249761_Utilization_of_recycled_glass_derived_from_cathode_ray_tube_glass_as_fine_aggregate_in_cement_mortar#:~:text=The%20management%20of%20cathode%20ray,glass%20in%20cement%20mortar%20production.

MALKOW, T. Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal. *Waste Management*, *24*(1), 53–79, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X03000382>

MANYÀ, J. J. Pyrolysis for biochar purposes: A review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environmental Science & Technology*, 46(15), 7939–7954, 2012. Disponível em: DOI: 10.1021/es301029g

MATA, Márcia Pereira da; LIMA, Ruhan Charles da Silva; JERONYMO, Thainá Domingues Nogueira. Indicadores de resíduos sólidos nos municípios de MS. Tribunal de Contas do Estado do Mato Grosso do Sul (TCE-MS), Campo Grande, 2023. Disponível em: <https://portal-services.tce.ms.gov.br/portal-services/files/arquivo/nome/25846/6609556662b3125bd3f4c5a0eb5bc199.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2025.

MELLO, A. H.; PEREIRA, F. A.; GOMES, R. M. Aplicação de resíduos plásticos em pavimentação asfáltica: Estudo experimental em laboratório. *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, 28(2), 155–170, 2020.

MENEZES, J. B.; MENDES, F. T.; SILVA, M. T. L.; BARBOSA, M. G. S. A incineração como alternativa para o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos: Um estudo de caso da Usina de Incineração de Resíduos Sólidos da cidade de Campinas, SP. *Revista Tecnologia e Meio Ambiente*, 3(2), 24-35, 2000.

MÉNDEZ, A.; GÓMEZ, A.; PAZ-FERREIRO, J.; GASCÓ, G. Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil. *Chemosphere*, 89(11), 1354–1359, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.05.092>

MIANDAD, R.; BARAKAT, M. A.; ABURIAZAIZA, A. S.; REHAN, M.; NIZAMI, A. S. Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 822–838, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.022>

MINISTRY OF THE ENVIRONMENT OF JAPAN. State of Disposal and Treatment of Waste in Japan. Ministry of The Environment of Japan, 2021. Disponível em: <https://www.env.go.jp/>.

MMA. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Ministério do Meio Ambiente (MMA), Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/plano-nacional-de-residuos-solidos#:~:text=O%20Plano%20Nacional%20de%20Res%C3%ADduos,S%C3%B3lidos%20por%20meio%20de%20diretrizes%2C>. Acesso em: 15 jun. 2025.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. Sustainable polymer composites and nanocomposites. Springer, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-05399-4>

MOHAN, D.; PITTMAN, C. U.; STEELE, P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy & Fuels*, *20*(3), 848–889, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ef0502397>

MOLINA-SABIO, M.; RODRÍGUEZ-REINOSO, F. Role of chemical activation in the development of carbon porosity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 241(1–3), 15–25, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2004.04.007>

MOLINO, A.; LAROCCA, V.; CHIANESE, S.; MUSMARRA, D. Biofuels production by biomass gasification: A review. *Energies*, *11*(4), 811, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en11040811>

MOULI, M.; TOUNSI, A.; BELABES, H.; BENAZZOUK, A.; GHORBEL, E. Use of plastic waste in cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 91, 71–78, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.003>

NAZAROFF, W. W.; ALVAREZ-COHEN, L. *Environmental Engineering Science*. New York: John Wiley & Sons, 2001. Disponível em:

https://books.google.com.br/books?id=qpf9DwAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

NOBRE, C.; ALVES, O.; LONGO, A.; VILARINHO, C.; GONÇALVES, M. Torrefaction and carbonization of refuse derived fuel: A review. *Processes*, *7*(12), 876, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr7120876>

NOSENZO, S. G. Evaluating sugarcane bagasse-based biochar as an economically viable catalyst for agricultural and environmental advancement in Brazil through scenario-based economic modeling. *ArXiv*, 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2508.12454>

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060. Paris: OECD Publishing, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>

ONU – Organização das Nações Unidas. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova Iorque: ONU, 2015.

PINTO, F. V. de C. Estudo da pirólise de resíduos plásticos para produção de óleo combustível: viabilidade técnica e econômica (Tese de Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, 2020.

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Global Waste Management Outlook 2024. UNEP / International Solid Waste Association (ISWA), 2024. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024>

PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPO GRANDE. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. Campo Grande: PMCG, 2023.

REUTERS. Harmful waste generation set to jump, U.N. warns. Reuters, 2024. Disponível em: <https://www.reuters.com/business/environment/harmful-waste-generation-set-jump-un-warns-2024-02-28/>

ROCCA, A. C. C., et al. Gerenciamento de resíduos industriais. Cetesb, 1993. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2249.1993.tb05932.x>

SEMADUR – Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Desenvolvimento Urbano. Relatório de gestão de resíduos sólidos urbanos. Prefeitura Municipal de Campo Grande, 2022.

SARKER, T. R.; KHATUN, M. L.; ETHEN, D. Z.; ALI, M. R.; ISLAM, M. S.; CHOWDHURY, S.; RAHMAN, K. S.; SAYEM, N. S.; AKM, R. S. Recent evolution in thermochemical transformation of municipal solid wastes to alternate fuels. *Heliyon*, 10(17), e37105, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37105>

SEBRAE. Fábrica de tijolos ecológicos - Ideias de Negócios. SEBRAE, 2023. Disponível em:

https://bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/IDEIAS_DE_NEGOCIO/PDF/S/ideia-de-negocio_fabrica-de-tijolos-ecologicos.pdf

SF ENVIRONMENT. Zero Waste Achievements and Goals. Departamento do Meio Ambiente de São Francisco, 2023. Disponível em: sfenvironment.org

SILVA, R.; BRITO, J.; DHIR, R. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste. *Journal of Cleaner Production*, 33, 88–100, 2014. Disponível em: DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117

SNIS: BRASIL. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS): Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - ano de referência 2022. Brasília: MCID, 2023.
https://www.cidados.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/Snis/RESIDUOS_SOLIDOS/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_RS_SNIS_2023_ATUALIZADO.pdf

SILVA, J. F., SALES, A., & FERREIRA, R. Aproveitamento de cinzas de casca de arroz e resíduos plásticos em blocos de solo-cimento. *Revista Matéria*, 25(1), 1–11, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0831>

SINGH, N.; SIDDIQUE, R. Effect of waste plastic on mechanical and durability properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 123, 411–417, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.044>

SOGABE, M. N. Gestão integrada de resíduos sólidos. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1999. Disponível em:
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/784327>

SOLURB. Relatório de atividades e dados operacionais. Campo Grande: Solurb, 2023.

STEGMANN, P.; LONDO, M.; JUNGINGER, M. The circular bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy clusters. *Resources, Conservation and Recycling*, 152, 104502, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104502>

TAHERYMOOSAVI, S.; VERHEYEN, V.; MUNROE, P.; JOSEPH, S.; REYNOLDS, A. Characterization of organic compounds in biochars derived from municipal solid waste. *Waste Management*, *66*, 53-63, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.052>

TUN, M. M.; JUCHELKOVA, D. Utilization of Biodegradable Wastes as a Clean Energy Source in the Developing Countries: A Case Study in Myanmar. *Energies*, 11(11):3183, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/328996668_Utillization_of_Biodegradable_Wastes_as_a_Clean_Energy_Source_in_the_Developing_Countries_A_Case_Study_in_Myanmar/link/680abcc0bd3f1930dd63e542/download

UNEP. Global status report for buildings and construction 2019. United Nations Environment Programme, 2019.

UNEP. United Nations Environment Programme. From Pollution to Solution: A Global Assessment of Marine Litter and Plastic Pollution. Nairobi: UNEP, 2021.

UNEP. (2023). Emissions Gap Report 2023. United Nations Environment Programme, 2023.

UNEP. Beyond an age of waste – Global Waste Management Outlook 2024. UNEP / International Solid Waste Association (ISWA), 2024. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024>

USINA DE CARBONIZAÇÃO. Indústria de Processamento de Resíduos Sólidos: Projeto Técnico e Licenciamento Ambiental. Relatório Técnico, 2018.

WILLIAMS, P. T.; BESLER, S. The influence of temperature and heating rate on the slow pyrolysis of biomass. *Renewable Energy*, *7*(3), 233–250, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)00006-7](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)00006-7)

WILSON, D. C.; VELIS, C. A.; CHEESEMAN, C. Role of informal sector recycling in waste management in developing countries. *Habitat International*, 30(4), 797–808, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2005.09.005>

WOOLF, D.; AMONETTE, J. E.; STREET-PERROTT, F. A.; LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 1(5), 56, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ncomms1053>

XIU, S.; SHAHBAZI, A. Bio-oil production and upgrading research: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(7), 4406–4414, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.028>

YOU, S. et al. A critical review on sustainable biochar system through gasification: Energy and environmental applications. *Bioresource Technology*, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.177>

ZERO WASTE CITIES. *The Zero Waste Masterplan - Turning the vision of circular economy into a reality for Europe*. Zero Waste Cities, Brussels, July, 2020. Disponível em: https://zerowastecities.eu/wp-content/uploads/2020/07/2020_07_07_zwe_zero_waste_cities_masterplan.pdf. Acesso em: 09 set. 2025.