

APÊNDICE B: MODELO CONCEITUAL TECNOLÓGICO DO SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA BAIXADA SANTISTA

Plano de gestão integrada de resíduos sólidos

Implementação de ações – Resíduos Sólidos Urbanos
Região Metropolitana da Baixada Santista

AGEM
AGÊNCIA
METROPOLITANA
DA BAIXADA
SANTISTA



COND^{ESB}
CONSELHO DE DESENVOLVIMENTO
DA REGIÃO METROPOLITANA
DA BAIXADA SANTISTA

SÃO PAULO
GOVERNO DO ESTADO



gestão integrada
de resíduos sólidos
Baixada Santista

ipt
INSTITUTO DE
PESQUISAS
TECNOLÓGICAS

Este modelo conceitual faz parte dos frutos do projeto de implementação das ações do “Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Baixada Santista”, proposto pela AGEM e coordenado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, com recursos do FEHIDRO e em parceria com o CONDESB e com os 9 municípios que compõem a Região Metropolitana da Baixada Santista: Bertioga, Cubatão, Guarujá, Itanhaém, Monguaguá, Peruíbe, Praia Grande, Santos e São Vicente.

Este documento apresenta os modelos tecnológicos propostos para as Unidades Microrregionais e Regionais de Processamento de Resíduos Sólidos da Baixada Santista, incluindo unidades de triagem e reaproveitamento de resíduos, considerando as alternativas tecnológicas, premissas e contexto identificados no PRGIRS. O propósito principal é fornecer informações que subsidiem a tomada de decisões em âmbito regional, abrangendo as dimensões técnica, econômica, ambiental e social. Além disso, destaca-se a sua função de auxiliar na estruturação de projetos com o intuito de avançar em direção ao cumprimento das metas de redução e desvio de resíduos sólidos destinados aos aterros sanitários.

Durante o período do projeto uma equipe interdisciplinar, com a parceria de colaboradores técnicos e dos municípios da região, dedicou-se a sistematizar os dados obtidos nos estudos de elaboração do PRGIRS e de projetos de pesquisa e desenvolvimento em Resíduos Sólidos.

Este material, portanto, representa o esforço da equipe do IPT em contribuir para os processos de gerenciamento de resíduos sólidos, em termos de abordagens metodológicas que auxiliem na implantação desses sistemas e promovam melhorias na gestão integrada de resíduos sólidos.



Sumário

1. INTRODUÇÃO	4
2. ASPECTOS TÉCNICOS DA CONCEPÇÃO DO MODELO CONCEITUAL DE PROCESSAMENTO DOS RSU DA BAIXADA SANTISTA.....	5
2.1 DADOS ATUALIZADOS DA GERAÇÃO RESÍDUOS NA BAIXADA SANTISTA.....	11
3. MODELO CONCEITUAL DE PROCESSAMENTO DOS RSU DA BAIXADA SANTISTA	15
4. MODELO TECNOLÓGICO DAS UNIDADES DE TRIAGEM SEMIMECANIZADAS	22
4.1 UNIDADE DE TRIAGEM SEMIMECANIZADA DA COLETA SELETIVA	24
4.1.1 Capacidade de atendimento	25
4.1.2 Mão de obra necessária.....	30
4.1.3 Edificações e instalações gerais.....	30
4.1.4 Custos de instalação e operação	31
4.2 UNIDADE DE TRIAGEM SEMIMECANIZADA DA COLETA REGULAR.....	32
4.2.1 Equipe necessária	38
4.2.2 Área necessária	39
4.2.3 Sistema de impermeabilização, drenagem e remoção de percolado.....	40
4.2.4 Custos de instalação e operação	41
5. MODELO TECNOLÓGICO DAS UNIDADES DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS	42
5.1 UNIDADE DE COMPOSTAGEM.....	42
5.1.1 Escolha da área	44
5.1.2 Tamanho de área necessária	45
5.1.3 Preparação do terreno.....	45
5.1.4 Infraestrutura e equipamentos necessários	46
5.1.5 Custos	47
5.1.5.1 Pátio de Compostagem com sistema L.A.P.A.	47

5.1.5.2	Pátio de compostagem com sistema de leiras estáticas com manta semipermeável	48
5.2	UNIDADE DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA	49
5.2.1	Equipamentos necessários	52
5.2.2	Custos de instalação e de operação	52
5.2.3	Identificação de Tendências e Evolução	54
6.	MODELO TECNOLÓGICO DA UNIDADE DE TRATAMENTO DE REJEITOS.....	56
6.1	UNIDADE DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA (URE).....	57
6.1.1	Custos de instalação e de operação	62
6.1.2	Benefícios e impactos ambientais.....	63
6.1.3	Identificação de tendências de evolução.....	63
6.2	UNIDADE DE DISPOSIÇÃO FINAL ATERRO SANITÁRIO COM APROVEITAMENTO ENERGÉTICO	65
7.	ALTERNATIVAS INSTITUCIONAIS E DE GESTÃO	69
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
9.	REFERÊNCIAS.....	75



1. Introdução

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e a Agência Metropolitana da Baixada Santista (AGEM) conduziram, entre 2016 e 2018, os estudos para a elaboração do Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PRGIRS) da Baixada Santista, que avaliou as especificidades dos resíduos gerados (domiciliares, construção civil, industrial, serviços da saúde etc) e indicou propostas para solucionar os problemas de modo integrado entre os nove municípios da Baixada Santista.

O PRGIRS foi entregue em 2018 e, junto com o panorama da região, aponta por meio de metas, estratégias e um plano de ações, a orientação para construir os mecanismos para o constante aprimoramento da gestão dos resíduos. No final de 2020, o IPT e a AGEM deram início à segunda etapa do projeto, contemplando os trabalhos para avaliar a efetividade do PRGIRS, analisando as ações implementadas e propondo instrumentos para auxiliar na continuidade de implantação das ações.

Um dos pontos levantados no diagnóstico foi como aumentar a capacidade instalada para a recuperação de resíduos recicláveis. Desta forma, um guia com diretrizes técnicas foi elaborado contendo orientações básicas para a estruturação de cada etapa deste sistema, incluindo segregação, coleta, triagem e inserção social das cooperativas e tratamento e disposição final ambientalmente adequadas (IPT, 2024a). Dentro da mesma necessidade de diretrizes técnicas e operacionais foram elaborados os guias para implantação de unidades de compostagem e orientações sobre o papel dos municípios na logística reversa (IPT, 2023 e IPT 2024b).

Esses materiais visam suprir tecnicamente as informações necessárias para elaborações dos projetos e aumento da capacidade instalada para o processamento de resíduos. Os mesmos permitem que os municípios possam implantar e operar sistemas de pequeno porte descentralizados e para um dado volume de resíduos. Destaca-se que as diretrizes técnicas apresentadas consideram a realidade da Baixada Santista, em termos de capacidade já instalada, quantidades de resíduos, áreas disponíveis para novos sistemas, entre outros. Desta forma, apoiando na implementação de ações, fornecendo subsídios técnicos para elaboração de projetos e repassando informações que subsidiem a tomada de decisões do poder público para alcançar as metas de redução de resíduos sólidos destinados aos aterros sanitários.

A Baixada Santista, em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e o Novo Marco do Saneamento vem atendendo aos requisitos e diretrizes estabelecidos por essas legislações ao apresentar o PRGIRS e sua atualização. Os estudos

que compõem o PRGIRS da Baixada Santista apontaram a necessidade de implementar ações integradas e estratégicas para promover a gestão sustentável dos resíduos sólidos na região. Essas ações incluem a redução da geração de resíduos, o estímulo à reciclagem, a melhoria da coleta seletiva, o tratamento adequado de resíduos orgânicos, a promoção da logística reversa e a busca por alternativas institucionais e de gestão que permitam planejamento a longo prazo e investimento em tecnologias avançadas. Portanto, o presente documento, intitulado modelo conceitual tecnológico do sistema de processamento de resíduos sólidos da baixada santista, traz a especificação técnica de um conjunto de tecnologias e processos, visando que a destinação final em aterros sanitários seja apenas dos rejeitos. O nível de detalhamento permite a combinação destas tecnologias em função do fluxo de resíduos e pode subsidiar a elaboração do projeto básico das unidades.

2. Aspectos Técnicos da Concepção do Modelo Conceitual de Processamento dos RSU da Baixada Santista

No Plano Regional de Resíduos Sólidos da Baixada Santista foram propostas 12 combinações de alternativas tecnológicas para o cenário de referência da Baixada Santista (IPT, 2018, página 200, do documento), por meio de uma avaliação que considerou os seguintes aspectos: técnicos, econômicos, ambientais e sociais (**Figura 1**). Entre as alternativas apresentadas é possível identificar que a alternativa I (Separação, Biológico, Térmico, Aterro) é aquela que contempla a maior quantidade de módulos tecnológicos que se complementam na missão de reduzir ao máximo a quantidade dos resíduos dispostos em aterro. Possibilitando endereçar uma solução daquilo que é mais premente no problema na Região da Baixada Santista: a falta de área para novos sistemas de aterro sanitário.

Destaca-se que o método de construção destas combinações considerou as opiniões de especialistas, diretrizes apontadas pela UNEP & ISWA (2015) o princípio da hierarquia previsto na PNRS e em dados e informações pautadas na realidade da Baixada Santista. Para o diagnóstico foi estabelecido como referência o ano de 2020, e a projeção da geração de resíduos foi realizada para atender até 20 anos de operação, ou seja, 2043. Destaca-se que, de forma geral, o cenário geral balizador considerou que as proposições tecnológicas são pautadas nas seguintes necessidades:

1. Gerenciar o cenário crítico posto (curto prazo) – Aterro com vida útil esgotada e não disponibilidade de áreas para instalação de novos aterros;
2. Iniciar o processo de transição para atender à Política Nacional de Resíduos Sólidos no que tange a destinar apenas rejeitos aos aterros sanitários (curto prazo e médio prazo);
3. Atingir as metas de redução estabelecidas no Plano Nacional, Estadual e Regional de Resíduos Sólidos (curto e médio prazo); e
4. Promover a adoção de sistemas integrados de gerenciamento de resíduos com tecnologias de processamento e tratamento viáveis dos pontos de vista técnico, econômico, social e ambiental (curto, médio e longo prazo);

Um conceito técnico principal balizador da construção indica que um sistema integrado de gerenciamento deve contemplar todos os aspectos operacionais que assegurem o correto tratamento, disposição e reaproveitamento dos resíduos sólidos, minimizando assim o impacto ambiental e maximizando os benefícios socioeconômicos. Isto envolve a coleta eficiente dos resíduos nas fontes geradoras, a triagem, reciclagem e valorização de materiais, a destinação final adequada, o monitoramento ambiental, a educação e conscientização, a participação ativa da sociedade e o cumprimento das regulamentações ambientais.

No PRGIRS foi realizado o estudo de áreas favoráveis para a instalação de sistemas de processamento de resíduos ambientalmente adequados, tendo sido baseado na seleção e aplicação de critérios de restrição técnicos como elementos primários de avaliação no âmbito regional. A aplicação sequencial dos critérios permitiu definir um conjunto de áreas potencialmente favoráveis para a implantação de tecnologias de processamento de resíduos sólidos. Especificamente em relação à instalação de aterros sanitários, verifica-se que restam poucas áreas onde não existem restrições legais, devido principalmente a restrição relativa a área de segurança aeroportuária **Figura 2**.

Nesta segunda etapa os estudos foram aprofundados e os resultados são apresentados no “item 6.3. Identificação e apontamento de Áreas Potencialmente Favoráveis para o Tratamento e a Destinação Ambientalmente Adequada de Resíduos Sólidos (escala municipal)” deste Ebook, o qual apresenta o estudo para as áreas públicas indicadas pelos municípios para a instalação dessas unidades. Neste estudo também foram sugeridas medidas governamentais para viabilizar a implantação dessas novas unidades.

Figura 1 – Consequências das diferentes alternativas tecnológicas consideradas no PRGIRS/BS

Dimensões	Econômica				Ambiental	Técnica	Social	
	CAPEX [mi R\$]	OPEX [mi R\$/ano]	Receita [mi R\$/ano]	Transporte [mi R\$/ano]	Energia [MWh/dia]	Emissões de CO ₂ [t/ano]	Massa para aterro [t/ano]	Empregos [funcionários]
At - Aterro, localização centralizada.	161	7	0	36	118	3,03E+05	660.420	0
A - Separação, aterro, localização centralizada.	177	49	85	36	98	3,03E+05	546.194	221
B - Separação, aterro, localização descentralizada.	186	55	85	47	98	3,03E+05	546.194	229
C - Separação, biológico, aterro, localização centralizada.	445	83	92	36	102	3,09E+05	421.208	257
D - Separação, biológico, aterro, localização descentralizada.	486	89	92	42	102	3,09E+05	421.208	322
E - Separação, térmico, aterro, localização centralizada.	821	82	141	36	672	4,14E+08	160.992	549
F - Separação, térmico, aterro, localização descentralizada.	831	88	141	30	672	4,14E+08	160.992	539
G - Térmico, aterro, localização centralizada.	1.092	43	102	36	1.215	7,41E+08	145.292	60
H - Separação, biológico, térmico, aterro, localização centralizada.	956	112	137	36	632	3,15E+08	133.777	585
I - Separação, biológico, térmico, aterro, localização descentralizada.	998	118	137	29	632	3,15E+08	133.777	632
J - Separação, biológico, CDRU, aterro, localização centralizada.	425	98	92	36	102	2,19E+08	262.284	525
K - Separação, biológico, CDRU, aterro, localização descentralizada.	469	108	92	35	102	2,19E+08	262.284	572

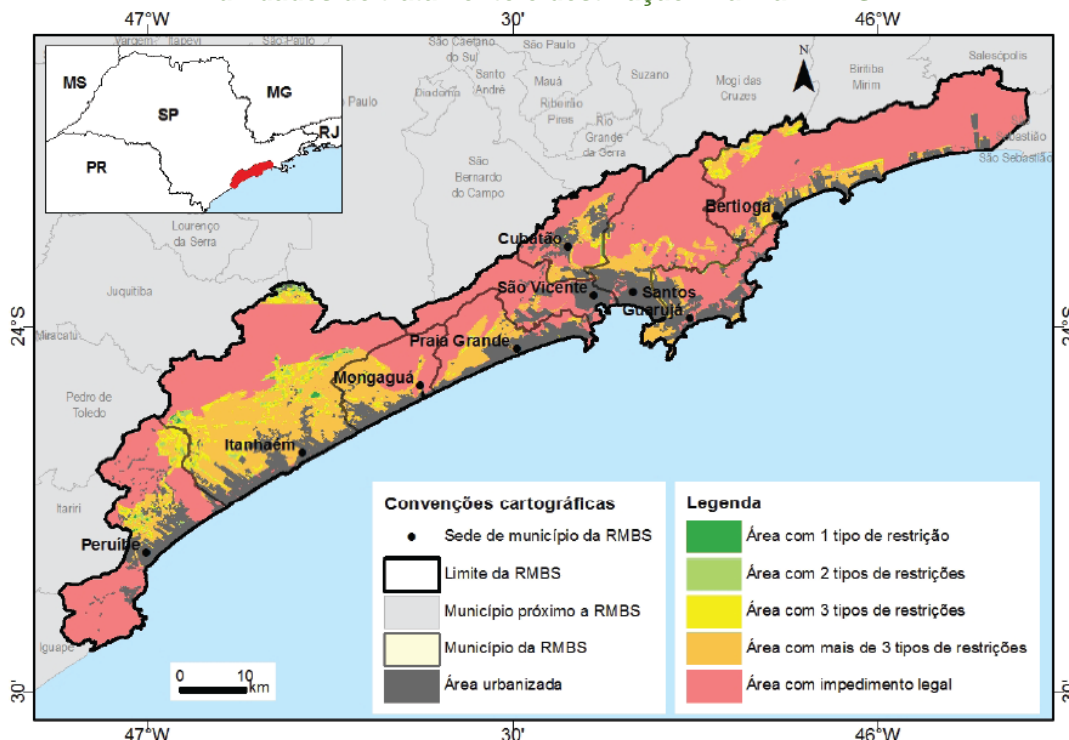
Nota: Estes resultados são uma estimativa, devendo ser analisada apenas a ordem de grandeza de cada valor. Não são considerados os valores de impostos e taxas ou pagamento pelos serviços nos valores informados

Escala de cor de desempenho



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2018.

Figura 2 – Resultado da análise integrada dos critérios regionais para a implantação de unidades de tratamento e destinação final na RMBS



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2018.

Ao se considerar diversos aspectos, pode-se dizer que existe uma limitação de áreas para a construção de um novo aterro sanitário na Baixada Santista. Desta forma, a inclusão de uma rota térmica com conversão de energia foi considerada para garantir a máxima redução de massa possível para aqueles materiais e resíduos, que nas etapas anteriores do sistema de integrado de gerenciamento de resíduos não foram processados ou evitados de serem gerados (redução, reutilização, reciclagem, processamento/tratamento e por fim a disposição final). Esta unidade entra na posição para o processamento de rejeitos, que pela projeção, estando o sistema todo instalado e integrado teria capacidade de cerca de 1.200 t/dia, cálculo que considera a quantidade de rejeitos gerados em 2043, considerando o atingimento das metas de coleta seletiva (**Tabela 2**). Caso contrário a capacidade precisaria ser em torno de 2.000 t/dia. Ou seja, um projeto para a RMBS deve estar dentro da faixa de 1.200 t e 2000 t/dia, conforme detalhamento do item 6 – Modelo tecnológico da Unidade de tratamento de rejeitos.

Contudo, destaca-se que ainda que tecnologias térmicas sejam vistas negativamente pela sociedade, entende-se que tecnicamente é preciso citar esta alternativa como tratamento de rejeitos, considerando as restrições presentes na RMBS e o seu potencial de redução de massa. Entretanto é crucial que a sua implantação considere e atenda as premissas que serão tratadas a seguir, tais como o atendimento da ordem de

prioridade no tratamento dos resíduos, a adoção das melhores tecnologias disponíveis, o atendimento às legislações e a inclusão social de catadores neste sistema.

A definição da melhor alternativa tecnológica depende de uma combinação de fatores e condicionantes, sendo que os resultados e as consequências das alternativas avaliadas podem ser utilizados como subsídio para a definição da melhor combinação tecnológica para a região. Para auxiliar na seleção do conjunto técnico mais adequado para uma região, foi elaborado o **Quadro 1** que apresenta perguntas a serem consideradas durante a escolha. As respostas oferecem subsídios para a tomada de decisão pautada por aspectos técnicos, sociais, econômicos e ambientais.

Quadro 1 – Fatores condicionantes para escolha da combinação tecnológica (UNEP & ISWA, 2015)

Fatores	Perguntas
Composição dos resíduos	A composição do resíduo é conhecida? Por exemplo, quanto material orgânico ele tem? Tem muito plástico? Ele tem um poder calorífico capaz de queimar sem precisar combustível auxiliar? A composição do resíduo varia significativamente em função da sazonalidade?
Coleta	Quanto resíduo é coletado? Quanto é em termos de percentual dos resíduos gerados? Qual é a cobertura da coleta de resíduos?
Geração – tendências	As massas/volume de resíduos estão em crescimento, estagnação ou diminuindo? Quais são os fatores ou as causas subjacentes a essas tendências? Os novos fluxos de resíduos emergentes que requerem tratamento específico, por exemplo, os resíduos eletrônicos?
Conhecimento da aplicabilidade da tecnologia	A tecnologia considerada está funcionando em outro lugar, em condições semelhantes em termos de composição dos resíduos, clima, hábitos da população e a um preço acessível? Se sim, qual a documentação disponível que comprava o desempenho? Quão difícil é para organizar uma visita a uma instalação para avaliação in loco?
Vida útil	Qual é o período de utilização projetado?
Recursos financeiros	Fontes de financiamento foram identificadas? Qual o orçamento necessário para o funcionamento durante o período de utilização projetado? Podem ser implementados mecanismos de amortização de custos necessários?
Viabilidade econômica	São os custos realistas e acessíveis para usuários de serviços locais? São os mercados locais disponíveis para os produtos provenientes da instalação (calor, gás, compostagem, materiais recicláveis)? Se sim, como é possível identificar? Se não, há planos para desenvolver esses mercados? Quem vai financiar o desenvolvimento desses mercados?
Operação	A tecnologia pode ser operada e passível de manutenção, utilizando mão de obra e peças de reposição locais?
Licenciamento	Existe capacidade institucional para regular as operações de instalação, incluindo licenciamento, fiscalização e monitoramento?
Flexibilidade	Será que a escolha de uma determinada tecnologia torna o sistema mais robusto e resiliente? Em outras palavras, ele é flexível, se a situação mudar significativamente no futuro, em termos das características mencionadas acima - quantidade de resíduos, composição dos resíduos, os hábitos das pessoas, nível de renda, ou mesmo clima?
Condições contratuais	Existe uma flexibilidade e segurança nas condições contratuais com o operador?
Imparcialidade	Uma opinião independente foi considerada?

Desta forma, este produto visa especificar os processos referentes as tecnologias existentes, avaliar as necessidades e requisitos para a instalação de cada uma delas, capacidade instalada e desempenho dos sistemas projetados. As proposições tecnológicas regionalizadas compõem as etapas de transbordo, tratamento e destinação final dos resíduos, de forma que a etapa de coleta continuaria a ser realizada por contratos municipalizados.

As alternativas podem ser planejadas em forma de módulos, sendo que a criticidade do período de transição impõe a implementação destes módulos em etapas, dentro do curto (2023 a 2026), médio (2027 a 2032) e longo prazo (2033 a 2043). Além das ações de redução da geração e do aumento da coleta seletiva, são apresentadas alternativas pautadas no resíduo misto com o objetivo principal de promover a redução de resíduos sólidos domiciliares dispostos em aterro por meio da valorização destes resíduos, recuperando materiais e energia e gerando empregos.

Os módulos tecnológicos são:

- a triagem semimecanizada;
- o tratamento biológico com e sem recuperação energética (compostagem e biodigestão anaeróbia);
- o tratamento térmico com recuperação energética (incineração);
- o aterro sanitário com recuperação energética.

Entende-se por alternativa tecnológica o conjunto de opções de tecnologias disponíveis que são combinadas de diferentes formas visando atender às premissas do PRGIRS, considerando cenários que incorporem as diferentes situações econômica e temporais (curto, médio e longo prazo).

A definição da melhor combinação tecnológica para um dado caso (segundo *Technology Readiness Assessment (TRA) Guidance, United States Department of Defense, 2011*) deve considerar a abordagem BAT (*"Best Available Techniques"*), traduzido como melhores técnicas disponíveis, entendido como o estágio mais eficaz e avançado no desenvolvimento da técnica e dos seus métodos de operação. Isoladamente, a palavra técnica significa tanto a tecnologia utilizada como o modo em que a instalação é projetada, construída, conservada, explorada e desativada. A palavra "disponíveis" significa que as técnicas serão desenvolvidas a uma escala que possibilite a sua aplicação, em condições econômica e tecnicamente viáveis, tendo em conta os custos e os benefícios, sendo produzidas ou não no local de operação, contanto que elas sejam razoavelmente acessíveis ao operador. "Melhor" significa mais eficazes para alcançar um nível geral elevado de proteção do ambiente como um todo.

2.1 Dados atualizados da Geração resíduos na Baixada Santista

No ano de 2020 a coleta regular municipal da Região da Baixada Santista encaminhou diariamente para aterros sanitários a quantidade de 1.810 toneladas de resíduos domiciliares, resultando em mais de 660 mil toneladas de material descartado (AGEM & IPT, 2023). Neste mesmo ano, a coleta seletiva encaminhou 17.717 toneladas de material para a reciclagem, totalizando assim a geração de 677.717 toneladas de resíduos (AGEM & IPT, 2023) para a Baixada Santista.

A **Tabela 1** indica as coletas regular e seletiva para o ano de 2020 considerando o agrupamento por microrregião.

Os municípios foram agregados conforme as características socioeconômicas e considerando também a geração de resíduos, formando assim, 3 agrupamentos (**Figura 3**), denominados de:

- Microrregião 1: Bertioga e Guarujá;
- Microrregião 2: Cubatão, Santos e São Vicente; e
- Microrregião 3: Itanhaém, Mongaguá, Peruíbe e Praia Grande.

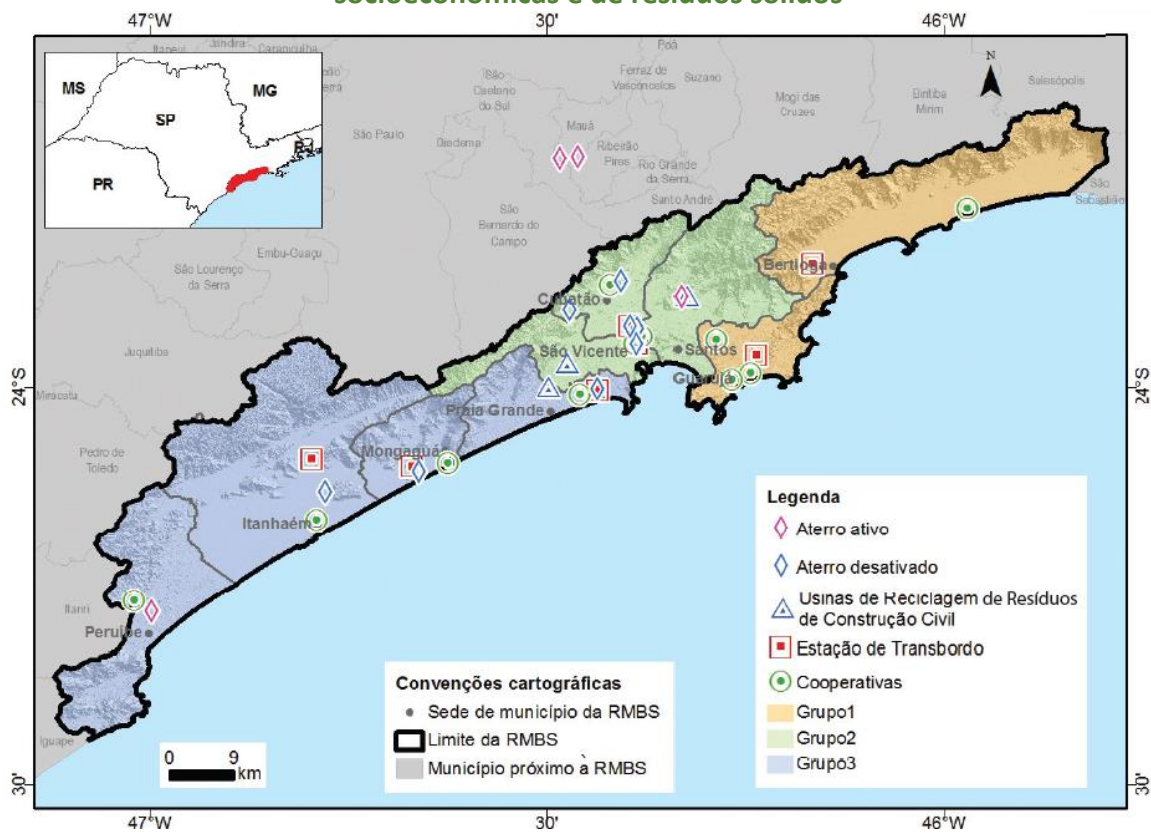
Tabela 1 - Coleta regular e seletiva nas microrregiões da Baixada Santista

Microrregião	Coleta regular em 2020 (t/dia)	Coleta seletiva em 2020 (t/dia)		
		Coletado	Encaminhados para a reciclagem	Encaminhados para o aterro (rejeitos)
1	474	8	8	0*
2	769	43	33	10
3	567	11	8	3
TOTAL	1.810	62	49	13

*Rejeito gerado na microrregião 1: 0,09 t/dia

Fonte: Elaborado pelos autores.

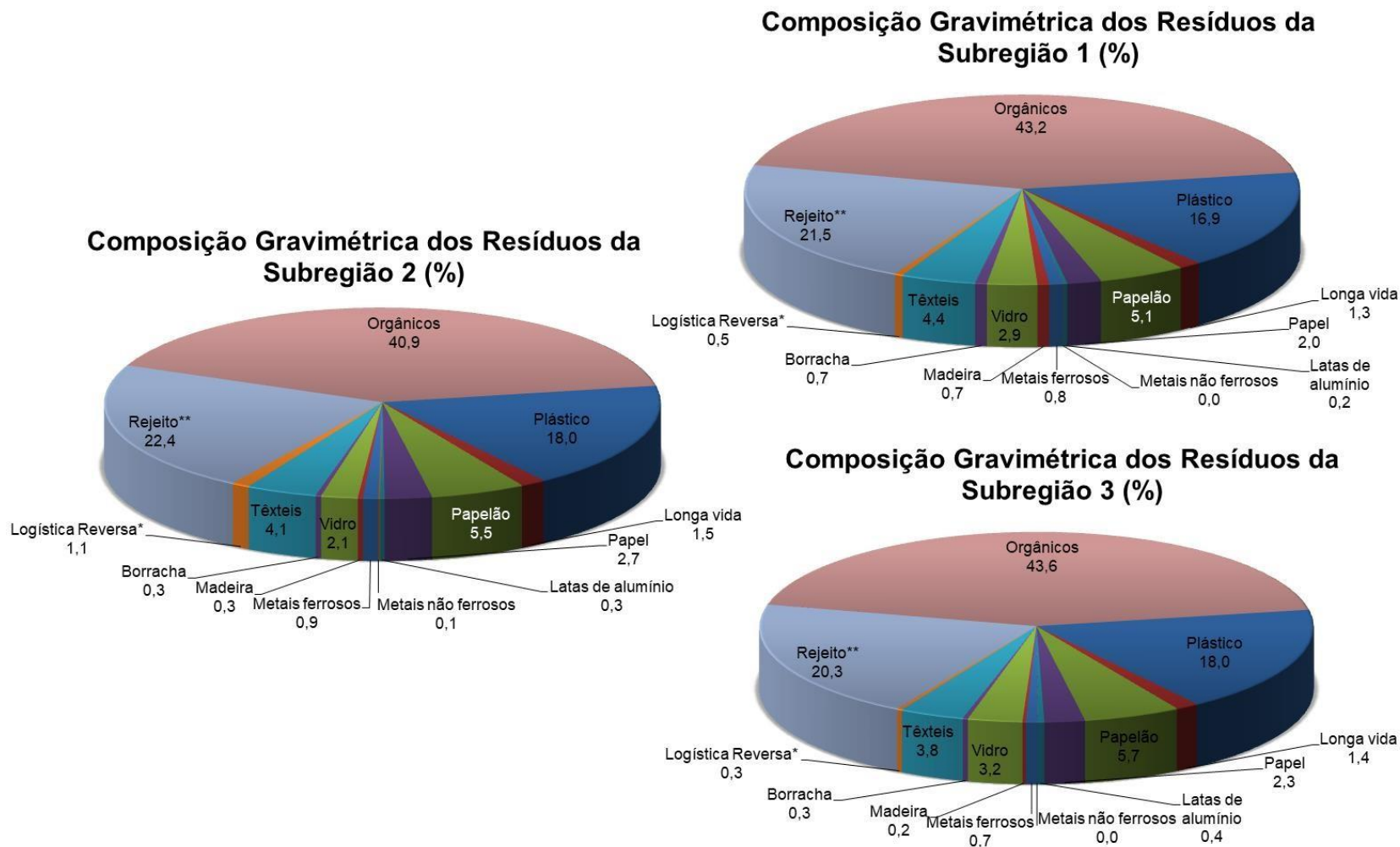
Figura 3 – Unidades microrregionais agrupadas conforme características socioeconômicas e de resíduos sólidos



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2018.

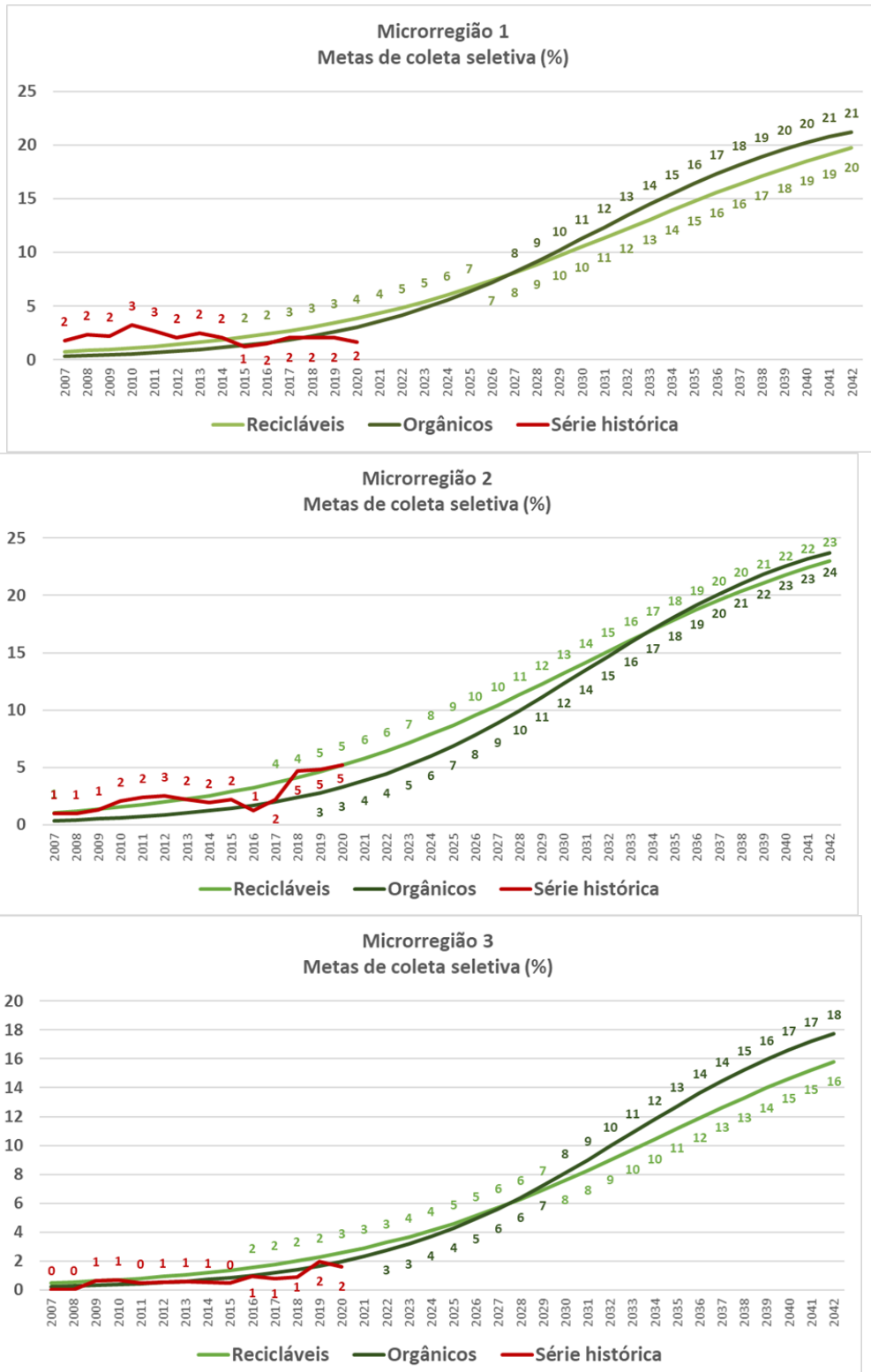
A composição dos resíduos da coleta regular de cada microrregião obtidas em 2022 é apresentada na **Figura 4**. As metas de redução de resíduos, orgânicos e recicláveis, destinados ao aterro foram estimadas até o ano de 2042, considerando uma estimativa no aumento da coleta seletiva de recicláveis e orgânicos ao longo dos anos, os resultados estão apresentados na **Figura 5**, onde na escala vertical é indicada a meta em porcentagem e na horizontal os anos. Quanto às metas de redução de resíduos destinados ao aterro para o ano de 2043, considerando a projeção da geração para esse mesmo ano, temos a estimativa das seguintes massas de resíduos encaminhadas para cada destino, conforme apresentado na **Tabela 2**.

Figura 4 – Composição dos resíduos por sub-região



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 5 – Metas de redução de recicláveis e orgânicos destinados ao aterro



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 2 – Projeção de geração de resíduos para o 2043, metas quantitativas de reaproveitamento e rejeitos gerados

Microrregião	Recuperação da fração inerte (t/ano)	Recuperação da fração orgânica (t/ano)	Rejeito (t/ano)	Geração total (t/ano)
1	45.710	48.780	130.895	225.385
2	63.461	65.220	140.725	269.406
3	51.436	57.378	206.422	315.236
Baixada Santista	160.607	171.378	478.042	810.027

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os dimensionamentos das unidades de tratamento de resíduos apresentados nos itens que seguem foram realizados considerando a capacidade de atendimento a partir das estimativas de geração de resíduos do ano de 2034 e com base nos demais dados apresentados neste item e nos dados atualizado do PRGIRS/BS.

3. Modelo Conceitual de Processamento dos RSU da Baixada Santista

O texto que segue apresenta o Modelo Conceitual de Processamento dos RSU da Baixada Santista. Para construir este modelo foram consideradas as rotas tecnológicas do cenário atual (juntamente com suas metas estabelecidas) e os módulos tecnológicos disponíveis que foram apresentadas no capítulo anterior. Assim, foi definido o modelo conceitual de alternativas tecnológicas para o cenário futuro, considerando um planejamento para 20 anos, até 2043 (**Figura 6**). Neste modelo, as ações e proposições de redução de resíduos sólidos domiciliares dispostos em aterro permeiam todas as alternativas propostas com foco na valorização dos resíduos por meio da recuperação de materiais recicláveis, valorização de resíduos orgânicos e da recuperação energética dos rejeitos.

Desta forma, propõe-se de forma estruturante que as melhores alternativas tecnológicas disponíveis para atingir os objetivos deste plano podem ser desenvolvidas em duas frentes:

- **ALTERNATIVAS DE REDUÇÃO E SEGREGAÇÃO NA FONTE; e**
- **ALTERNATIVAS DE SISTEMAS DE PROCESSAMENTO E TRATAMENTO DE RESÍDUOS MISTOS.**

Salienta-se que considerando a situação emergencial de término da vida útil dos destinos finais (aterros Terrestre Ambiental e de Peruíbe) dos municípios da região, ambos com encerramento previsto para o ano de 2025, é necessário ações tanto no incremento da

separação na fonte (redução) quanto melhoria e ampliação nos sistemas das cooperativas, bem como associá-las com sistemas de processamento para os resíduos que ainda serão destinados pela população a coleta regular, sem separação prévia. Isto se deve ao fato de que o engajamento da população aos programas de segregação na origem é feito de forma voluntária e isso requer tempo para mudança de hábito e o estabelecimento de uma nova cultura.

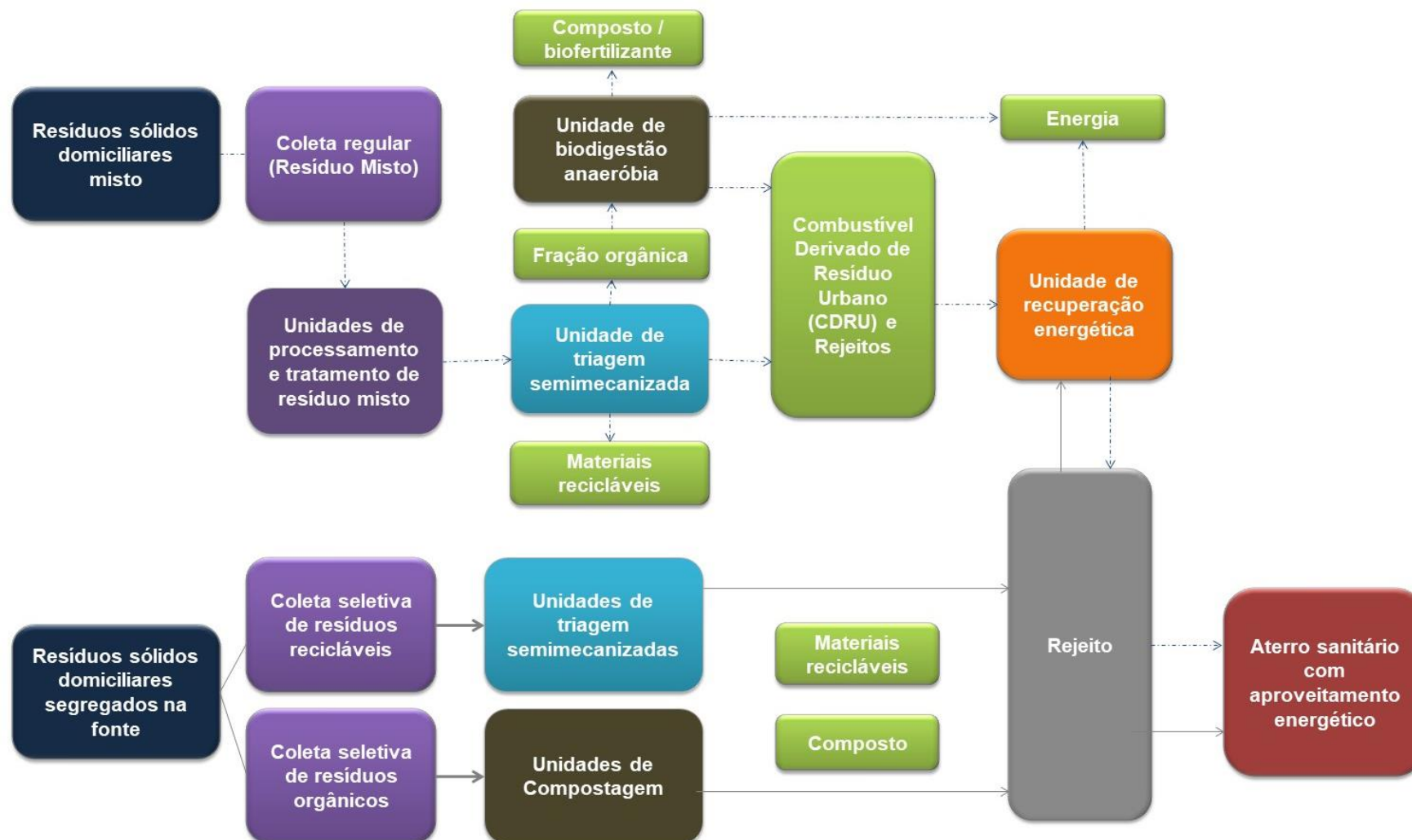
Quanto à questão locacional, o desenho conceitual propõe unidades descentralizadas de triagem semimecanizada, compostagem e biodigestão anaeróbia, com pelo menos uma unidade para cada microrregião, as porcentagens representam a contribuição de cada município na quantidade total de resíduos de resíduos gerados na Região (**Figura 7**). Estas unidades permitem a formação de conceitos inovadores, como a criação de Ecoparques ou Centrais de Gerenciamento Integrado de Resíduos, que compartilham questões de logística e infraestrutura. Em contrapartida, a Unidade de recuperação energética e o aterro para disposição final foram concebidos de maneira centralizada, atendendo a toda a região.

Para efeito deste modelo conceitual tecnológico entende-se:

- resíduos sólidos os provenientes dos serviços de limpeza pública (coleta e limpeza), da coleta direta ou indireta dos domicílios do município, incluindo os resíduos vegetais provenientes de podas e capina, previstos em legislação específica cuja responsabilidade de tratamento seja do Município;
- rejeitos são resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada; e
- a empresa contratada deverá considerar a operação do sistema sendo realizada por Cooperativas e a inclusão social de catadores.

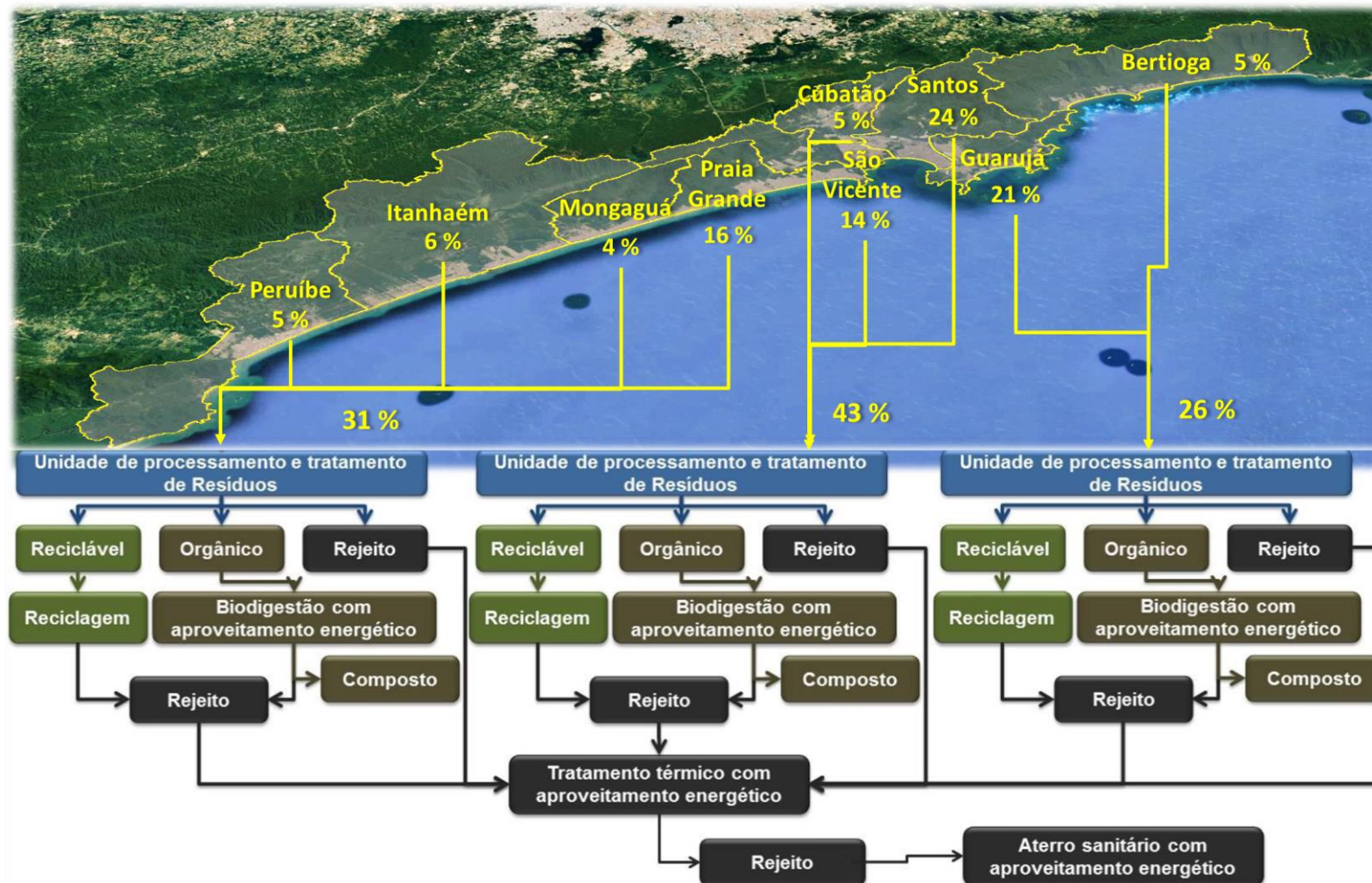
O tratamento e destinação final dos resíduos sólidos urbanos nas unidades microrregionais serão executados mediante o uso de tecnologias de segregação, de aproveitamento dos materiais à reciclagem, produção de composto, biodigestão, utilização da fração orgânica como insumo energético, dentre outros, que compõem o Sistema.

Figura 6 – Modelo conceitual das alternativas tecnológicas propostas para o cenário futuro



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 7 – Aspectos de localização de sistemas de processamento e tratamento de RSD misto



Fonte: Elaborado pelos autores.

A concepção deste modelo conceitual teve como objeto a prestação dos serviços de Processamento, Tratamento e Destinação dos Resíduos Sólidos com características domiciliares. Não faz parte deste conceito a coleta e transporte do material, sendo detalhados apenas as especificações das unidades e etapas possíveis do sistema, a saber:

Para os resíduos segregados na fonte:

- UNIDADES MICRORREGIONAIS DE TRIAGEM SEMIMECANIZADA.
- UNIDADES MICRORREGIONAIS DE COMPOSTAGEM.

Para os resíduos mistos:

- UNIDADES MICRORREGIONAIS DE TRIAGEM SEMIMECANIZADA COM RECUPERAÇÃO DOS MATERIAIS PASSÍVEIS DE TRATAMENTO (MATERIAIS RECICLÁVEIS E RESÍDUOS COMPOSTÁVEIS).
- UNIDADES MICRORREGIONAIS DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA.

Para os rejeitos de ambos os sistemas

- UNIDADE REGIONAL DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA E DISPOSIÇÃO FINAL
 - UNIDADE DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA (INCINERAÇÃO).
 - ATERRO.

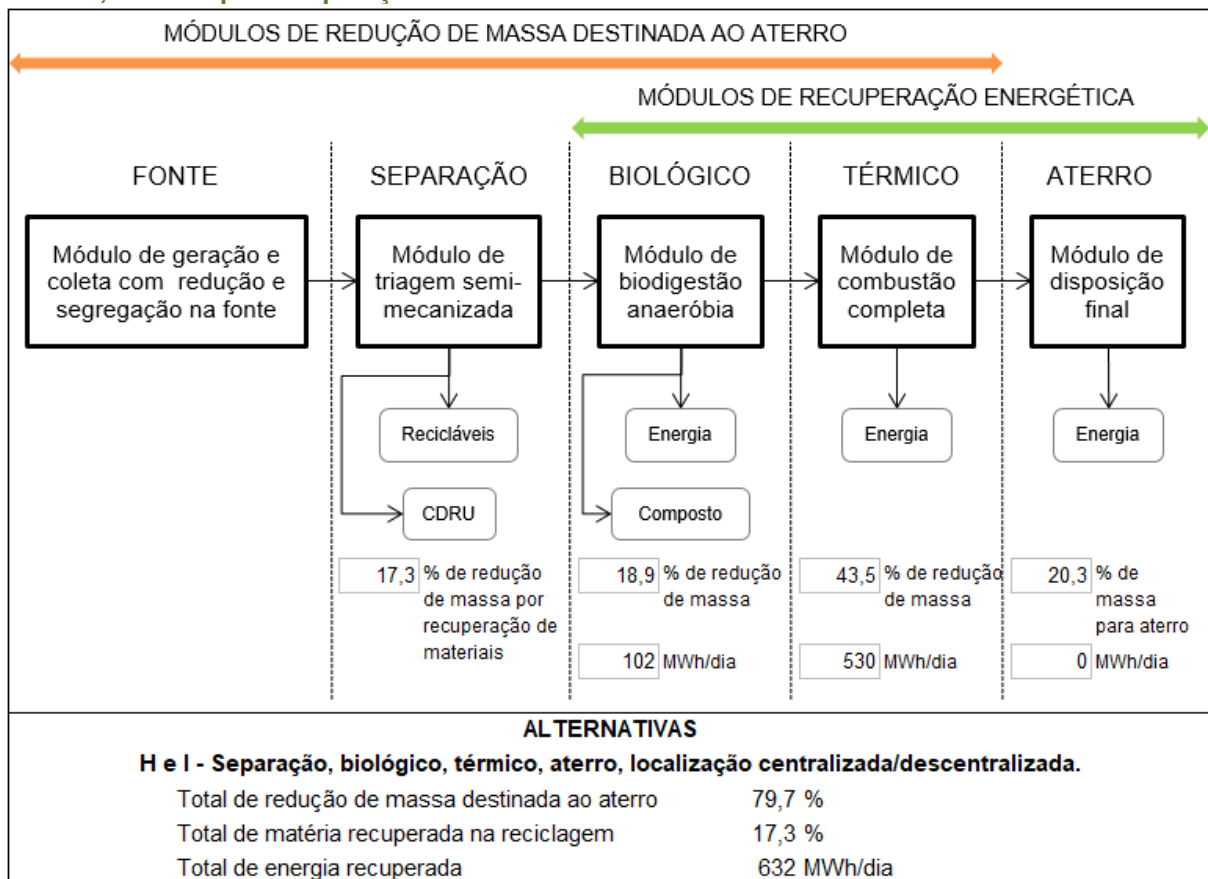
O modelo de contratação a ser definido deverá considerar o mapeamento e definição de indicadores de desempenho para esses contratos, tendo em vista a necessidade de atender diretrizes estabelecidas na PNRS e as metas estabelecidas nos planos federal, estadual e municipal de gestão de resíduos, tais como a minimização de resíduos; a valorização e tratamento de resíduos (reciclagem, compostagem etc.); a inclusão de catadores; e a participação social (Munhoz, 2015). Outro elemento importante nesses contratos são as receitas acessórias, oriundas de diversas fontes, por exemplo, da comercialização de energia; de formas alternativas de tratamento de resíduos; comercialização de subprodutos; e do recebimento de resíduos de outros municípios, os ganhos da concessionária com as receitas acessórias devem ser compartilhados com o poder público e constituem um elemento importante de flexibilidade contratual, para ajustes de longo prazo (Munhoz, 2015). Os contratos devem definir metas fixas para mudança na prioridade e adoção de novas tecnologias para o tratamento e para minimização de resíduos em aterros. A seguir são apresentados alguns exemplos de metas e indicadores de desempenho sugeridos em contratos de longo prazo:

- Exemplo de metas para implantação das unidades:
 - Percentual mínimo de RSU processado nas unidades e Percentual máximo de RSU admitido em aterro.

- Exemplo de metas para aproveitamento de resíduos
 - Percentual mínimo de separação / recuperação de materiais recicláveis; percentual mínimo de biodigestão / compostagem; percentual mínimo de aproveitamento energético da fração orgânica por biodigestão; percentual máximo destinado ao aterro.

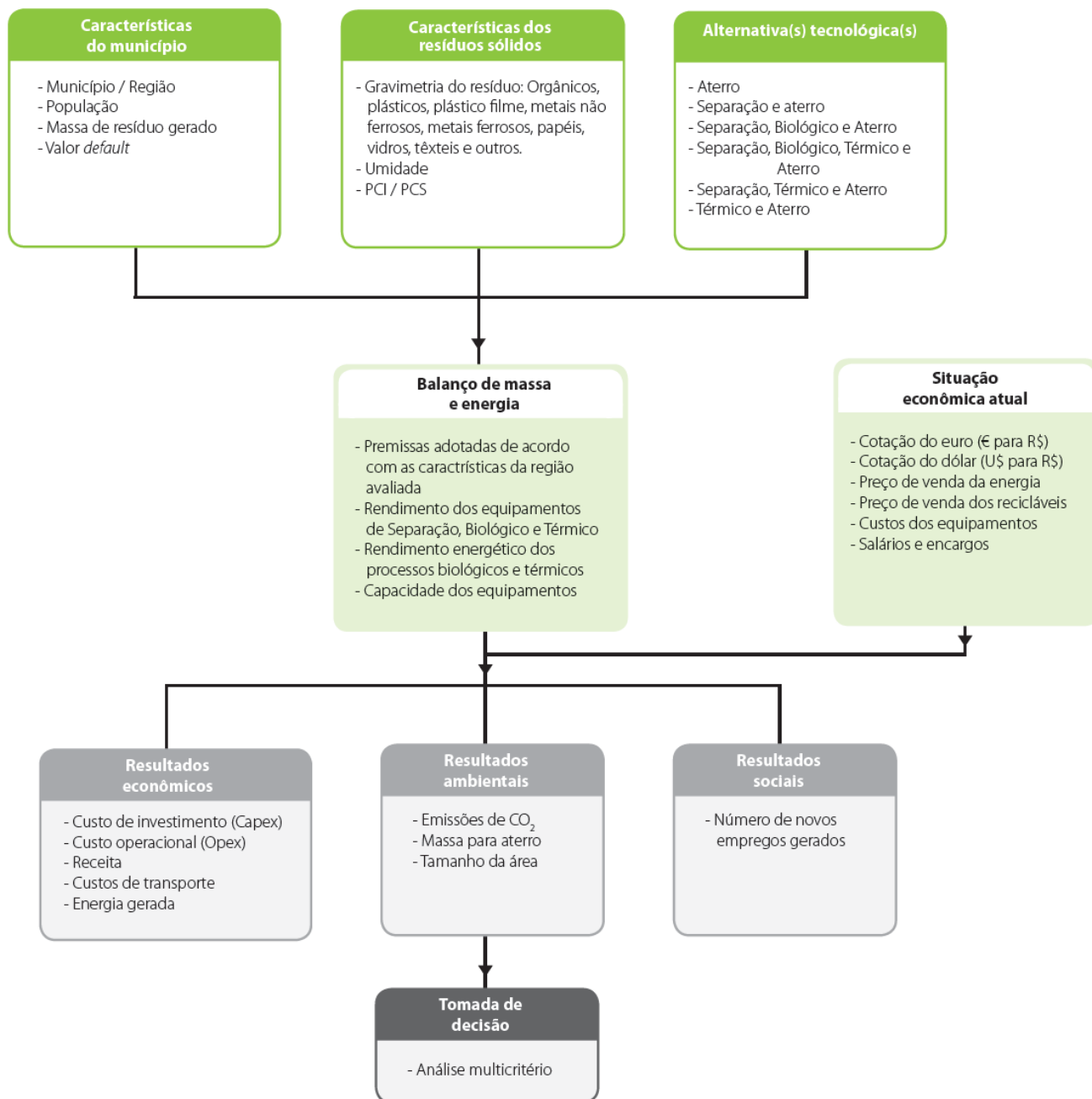
O Fluxograma das **Figura 8 e 9** apresentam de forma resumida as operações que ocorrem ao se definir um Sistema de Processamento de Resíduos. Neste modelo devem ser alimentadas as características do município, para determinar a massa de resíduo gerado; as características dos resíduos sólidos, como a gravimetria dos resíduos, a umidade e os valores de PCS/PCI (poder calorífico superior/ inferior); e são definidas as alternativas tecnológicas de modo a ser possível calcular diferentes balanços de massa e energia para as diferentes alternativas tecnológicas abordadas.

Figura 8 – Modelo conceitual do Sistema de Processamento de Resíduos Sólidos da Baixada Santista que inclui: Unidade de Separação, Tratamento biológico, Tratamento térmico, e aterro para disposição final



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 9 – Fluxograma resumido do Modelo Conceitual Tecnológico desenvolvido pelo IPT



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2018.

Com os balanços de massa e energia calculados, aplica-se as condições econômicas para obter os resultados econômicos, ambientais e sociais (conforme apresentado na **Figura 1**). Para a obtenção deste balanço de massa e energia são consideradas algumas premissas tais como:

- RSU volumoso não ensacado é composto 100% de inorgânico;
- Apenas metais ferrosos, metais não ferrosos, plásticos, longa vida, logística reversa, possuem valor comercial na fração +80mm.
- Papel, papelão, tecido, couro, madeira e borracha são aproveitados como CDRU ou na queima;
- A redução de massa, Custos de Investimentos (CAPEX), Custos de Operação (OPEX) (na separação, biológico, térmico e aterro) é dependente do rendimento dos equipamentos e processos (CIMPAN, 2015 e 2016; LOMBARDI, L. et al, 2014; BIOFERM, 2015a e b; JOINT POWERS AUTHORITY, 2017; TSILEMOU, 2006);
- A energia líquida é calculada em função da umidade e PCI dos diferentes componentes (GOMEZ, 2016; CARVALHO, 1999); e
- A receita é calculada apenas em função da venda de materiais recicláveis conforme e a venda de energia, o valor considerado na época da elaboração do PRGIRS foi de R\$ 200,00 por MWh.

Portanto, este produto apresenta o modelo conceitual e tecnológico destas unidades, compondo o Sistema de Processamento de Resíduos sólidos planejado para a Baixada Santista, para atendimento das metas de redução estipuladas para o ano de 2043, conforme dados atualizados do PRGIRS/BS. Será apresentada a seguir cada unidade tecnológica do modelo conceitual, a saber:

- Unidades de triagem semimecanizadas;
- Unidades de tratamento de resíduos orgânicos; e
- Unidade de tratamento de rejeitos.

4. Modelo Tecnológico das Unidades de Triagem Semimecanizadas

A triagem semimecanizada associa a triagem manual com a mecanizada, visando um aumento da capacidade de processamento do material da coleta seletiva. Atualmente, existe tecnologia disponível comercialmente para segregar praticamente todas as classes de materiais, tais como ferrosos, não ferrosos, plásticos, papel e papelão por cores e densidades, entre outros. Porém o uso destas tecnologias implica em complexidade e custos crescentes do circuito de separação. Por este motivo, a aplicação da segregação

manual e mecanizada, trabalhando de forma consorciada, visa a obtenção do melhor custo-benefício, utilizando-se a mecanizada na segregação da maior massa e a manual no detalhamento e controle de qualidade. Vale ressaltar a importância da segregação manual no formato de esteiras elevada, o que aumenta ainda mais a eficiência dessa triagem (Figura 10).

Figura 10 – Sistema de segregação manual em esteiras elevadas



Fonte: Lippel, 2024.

Embora as operações unitárias presentes em uma planta de triagem mecanizada de resíduos já sejam bem conhecidas e estabelecidas, a definição do layout do processamento, ou seja, a sequência das operações, bem como o grau de mecanização, deve ser customizados de acordo com as características específicas da região considerada, a saber: composição dos materiais de entrada, composição desejada dos produtos, disponibilidade de recursos e aspectos sociais da região.

Conforme já mencionado, para atendimento das metas de redução de inertes destinados ao aterro, propõem-se a instalação de unidades microrregionais de segregação semimecanizada, sendo assim possível atingir uma capacidade de processamento suficiente para o cumprimento das metas. Entretanto, a coleta municipal, assim como as cooperativas de triagem municipais devem ser mantidas e modernizadas constantemente. Desta forma, as unidades microrregionais atenderiam o excedente da massa prevista nas metas de redução, material que hoje está indo para o aterro sanitário (em torno de 96% do RSU gerado na Região).

Complementarmente, para um aumento da capacidade de reciclagem de materiais inertes, assim como do tratamento de resíduos orgânicos, propõem-se a instalação de unidades microrregionais de segregação semimecanizada de resíduos mistos. Portanto, conforme apresentado na Figura 11, foram dimensionadas 02 unidades de segregação

semimecanizada para serem instaladas em cada uma das 3 microrregiões, sendo 01 de segregação de resíduos da coleta seletiva (resíduos segregados na fonte) e 01 de segregação da coleta regular (resíduos mistos). Cabe ressaltar que estas unidades podem estar localizadas no mesmo complexo/área, compartilhando assim questões logísticas e de infraestrutura.

Figura 11 - Unidades microrregionais de segregação semimecanizada da coleta seletiva e coleta regular



Fonte: Elaborado pelos autores.

4.1 Unidade de triagem semimecanizada da coleta seletiva

Para atingir a capacidade de triagem da massa de materiais da coleta seletiva, estipuladas pelas metas de redução apresentadas no PRGIRS/BS (AGEM/IPT, 2023), é necessário um forte investimento em mão de obra, infraestrutura, apoio operacional e de gestão para ampliação do sistema já existente, que hoje conta com 15 cooperativas, com diferentes realidades nos 9 municípios. As metas de redução de resíduos recicláveis (materiais inertes) destinados ao aterro para a região da Baixada Santista para os próximos 20 anos, previstas pelo PRGIRS (2023) chegam à 145 mil Toneladas no ano de 2043. Considerando a capacidade instalada hoje de atendimento de 18 mil t/ano, se faz necessário um aumento de capacidade de 127 mil toneladas, para os próximos 20 anos. Portanto, unidades microrregionais seriam instaladas para complementar a massa necessária para atingir as metas.

Além disso, as metas estabelecidas no PRGIRS (AGEM/IPT, 2023), são de materiais encaminhados para a reciclagem e não de coleta seletiva. Portanto, considerando que a

triagem gera uma quantidade de rejeito, deve ser acrescentado uma estimativa dessa massa para o dimensionamento da capacidade das unidades de triagem. O valor adotado foi definido conforme a quantidade gerada atualmente, de aproximadamente 30 %. Lembrando que rejeitos de cooperativas de triagem são compostos não apenas de resíduos úmidos (orgânicos), como também dos secos sem valor comercial, como por exemplo: tecidos, alguns tipos de plásticos, cacos de vidro inviáveis de serem triados, alguns tipos de madeira, papéis e papelão sujos ou engordurados, entre outros.

A **Tabela 3** apresenta o detalhamento dos cálculos realizados para alcançar os valores a serem utilizados para o dimensionamento das plantas de segregação semimecanizada. Os dados apresentados na tabela foram representados em t/dia, considerando o total de dias do ano de 2043. Foi realizado também um exercício considerando uma jornada de trabalho de segunda-feira a sábado, descontando os domingos, o que resultou em uma média de 300 dias úteis e, portanto, uma capacidade variando de 200 a 236 t/dia útil.

Tabela 3 – Capacidade de atendimento das unidades de segregação semimecanizada dos resíduos da coleta seletiva

Microrregião	Metas de redução de inertes (t/dia)	Capacidade instalada atualmente (t/dia)	Aumento necessário (t/dia)	Capacidade necessária acrescentado os 30 % de rejeito (t/dia)	Capacidade de atendimento da unidade de segregação	
					(t/dia útil)	(t/hora)
1	134	8	126	164	200	25
2	179	33	146	190	231	29
3	157	8	149	194	236	30
Baixada Santista	470	49	421	548	667	83

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.1.1 Capacidade de atendimento

Visto que a quantidade apresentada para cada microrregião é relativamente próxima, adotou-se como base para a concepção da unidade microrregional, o valor médio de 230 t/dia de capacidade instalada, que poderá ser utilizada como modelo para as 3 microrregiões da Baixada Santista.

A **Tabela 4** apresenta o volume dos materiais a serem segregados nas unidades de triagem considerando uma jornada de trabalho de 300 dias úteis por ano, com uma carga horária de 8 horas por dia. Para o dimensionamento dos equipamentos, visto que estes são comercializados conforme capacidade volumétrica, foi calculada a densidade do material, considerando-se como base a composição dos resíduos, em quilograma, da microrregião 2

e aplicando-se os índices de densidade de cada material, conforme apresentado na **Tabela 5**.

Com base nos dados de densidade total e de cada fração dos resíduos, foi realizado o dimensionamento dos equipamentos que farão parte da segregação, considerando que a composição, a massa e a densidade dos resíduos são alteradas conforme são retiradas frações do fluxo de entrada e saída de cada equipamento.

Tabela 4 – Volume dos materiais a serem segregados nas unidades de triagem

Jornada de trabalho		Capacidade de atendimento		
Dias/ano	Horas/dia	kg/dia	kg/hora	m ³ /hora
300	8	230.000,00	28.750,00	203,26

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 5 – Volume do material a ser tratado, conforme densidade de cada tipo de material

Material	Densidade (kg/m ³)	Composição do material da coleta seletiva (kg/hora)	Densidade dos resíduos que serão tratados na unidade (m ³ /hora)
Papel/papelão	338	5.187	15
Plástico filme	224	8.520	38
Plástico rígido	135	3.871	29
Tecido	119	3.199	27
Borracha	73	501	7
Tetra pack	60	947	16
Metal	53	759	14
Vidro	50	2.135	43
Madeira	41	495	12
Rejeitos/orgânicos	1213	3.136	3
TOTAL	231	28.750	203

Fonte: Elaborado pelos autores.

Portanto, o volume de material que entra e sai de cada equipamento de segregação, rejeitos gerados (material descartado) e materiais reaproveitados (material recuperado) são apresentados na **Tabela 6**. Já a **Figura 12** indica o sequenciamento dos equipamentos de triagem. Adicionalmente, a listagem a seguir indica a funcionalidade dos equipamentos necessários para a realização da segregação:

- **Rasga sacos:** Abertura das embalagens plásticas;
- **Separador magnético:** Separação dos metais ferrosos;
- **Separador balístico:** Separação dos materiais 3D (rolam para as esteiras inferiores) dos 2D (sobem para as esteiras superiores)

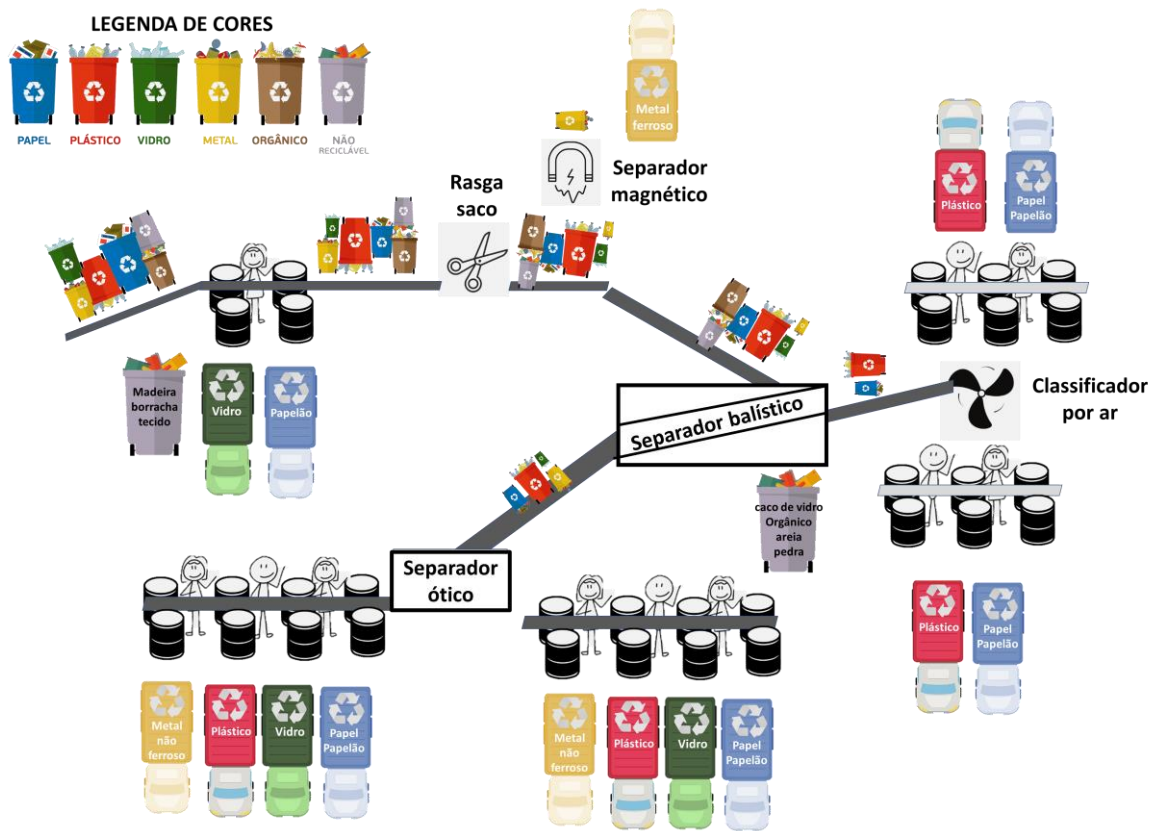
- **Classificador de ar:** Separa os 2D em mais leves e mais pesados
- **Separador ótico:** Permite a separação em vários tipos de materiais por composição, cor e forma.

Tabela 6 – Volume de material que entra e sai de cada equipamento de segregação, rejeitos gerados (material descartado) e materiais reaproveitados (material recuperado)

Equipamentos	Volume de material (m ³ /hora)		Material recuperado/ reaproveitado		Material descartado*	
	Entrada	Saída	(m ³ /hora)	Composição	(m ³ /hora)	Composição
Descarregado no Fosso de acumulação e pré-triagem (manual) (E1)	203	195	6	Vidro Papelão Latas	2	Tecido Madeira Borracha
Rasga sacos	195	195	-		-	-
Separador magnético (retirada de material)	195	184	11	Metais ferrosos	-	-
Separador balístico	184	52 (2D) 123 (3D)	-	-	1 8	Orgânicos Vidros quebrados e outros
Classificador de ar	52	14 (E2) 38 (E3)	-	-	-	-
Separador ótico	123	78 (E4) 16 (E5) 29 (E6)	-	-	-	-
Esteira de Triagem Manual 2 (E2)	14	0	12	Papel Papelão	2	Papel sujo
Esteira de Triagem Manual 3 (E3)	38	0	34	Plástico filme (2D)	4	Plástico filme (2D) não reciclável
Esteira de Triagem Manual 4 (E4)	78	0	33	Vidro Metal não ferroso	45	Orgânico Tecido Madeira Borracha
Esteira de Triagem Manual 5 (E5)	16	0	14	Tetrapak	2	Tetrapak sujo e outros
Esteira de Triagem Manual 6 (E6)	29	0	26	Plásticos 3D	3	Plásticos 3 D não recicláveis
TOTAL			136		67	

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 12 – Sequenciamento dos equipamentos de triagem da coleta seletiva



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os itens a seguir apresentam as premissas adotadas no dimensionamento desse sistema:

- I. O fosso de acumulação foi dimensionado com capacidade de acumular 1 dia de coleta;
- II. Os resíduos descarregados no fosso de acumulação serão transferidos, com o auxílio de retroescavadeira, para uma correia transportadora que encaminhará o material até a esteira de pré-triagem manual (E1).
- III. Na esteira de pré-triagem manual serão retirados os materiais volumosos (como madeiras, latas de maiores proporções); os tecidos que estiverem visíveis, e que poderão enroscar nos equipamentos e os vidros que estiverem visíveis e que podem se quebrar no interior dos equipamentos;
- IV. Em seguida, uma esteira transportadora encaminhará os materiais para o rasga saco;
- V. Depois de passar pelo rasga saco, os resíduos seguem para o separador balístico, passando pelo separador magnético que retêm os metais ferrosos.

- VI. No separador balístico, os materiais são separados em planos e leves (2D) dos rolantes e pesados (3D).
- VII. Os materiais leves seguem para o classificador de ar, que os separa em plásticos e papéis/papelão, encaminhando-os para 2 esteiras de triagem manual (E2 e E3), onde é realizado o controle de qualidade da separação, com descarte dos rejeitos que podem ter sobrado no processo.
- VIII. Os materiais que saem do separador ótico não encaminhados para 3 esteiras de triagem manual (E4, E5 e E6), onde é realizado o controle de qualidade da separação dos tetrapak, vidros e plásticos, com descarte dos rejeitos que podem ter sobrado no processo.

A **Tabela 7** apresenta o balanço de massa estimado dos materiais com base na eficácia da operação dos equipamentos. Quanto à capacidade e dimensões de cada equipamento a ser instalado, estes são conforme apresentado na **Tabela 8**.

Tabela 7 – Balanço de massa do material coletado, reaproveitados e descartados

Encaminhado para a triagem		Recicláveis recuperados			Descartados (rejeitos)		
t/dia	m ³ /dia	t/dia	%	m ³ /dia	t/dia	%	m ³ /dia
230	1.623	154	67	1.088	76	33	535

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 8 – Equipamentos a serem instalados e capacidade de cada um

Equipamentos de triagem	Capacidade aproximada (m ³ /hora)	Dimensões aproximadas (C x L x A) (m)
Rasga sacos	110*	1,8 x 1,8 x 1,8
Separador magnético	20	2,5 x 1,3 x 1,3
Separador balístico	200	6,1 x 3,0 x 6,1 m
Classificador de ar	100	1,4 x 1,0 x 4,7
Separador ótico	125	1,9 x 3,7 x 2,0

*2 unidades

Fonte: Elaborado pelos autores.

Além dos equipamentos de triagem, são necessários os seguintes equipamentos para a operação da unidade de segregação:

- Retroescavadeira;
- Empilhadeira;

- Prensa;
- Balança de pesagem dos materiais;
- Balança de pesagem dos caminhões;
- Esteiras de triagem e transportadoras;
- Entre outros.

4.1.2 Mão de obra necessária

Considerando que o sistema será constituído por triagem manual, assim como a equipe de pesagem, enfardadores, administrativos, etc., será necessária a seguinte equipe para operar cada unidade de triagem, conforme apresentado na **Tabela 9**.

Tabela 9 – Equipe de funcionários da unidade

Equipe de funcionários	Tamanho da equipe
Equipe de triagem	40
Encarregado de produção	2
Operador de pá carregadeira	1
Controlador de planta	1
Operador de prensa	6
Mecânico	1
Eletricista	1
Gerente	1
Engenheiro de manutenção	1
Pessoal da limpeza	2
TOTAL	56

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.1.3 Edificações e instalações gerais

Considerando a dimensão dos equipamentos e a quantidade de material que chegará na área, assim como a equipe envolvida na operação da unidade, foram realizados os dimensionamentos conforme apresentados na **Tabela 10**.

Tabela 10 – Edificações e instalações gerais

	Tamanho	Unidade	Descrição
Portaria	20	m ²	Controle de entrada e pesagem dos caminhões
Fosso de acumulação	310	m ²	Andar térreo com 4 metros de profundidade
Área de triagem	350	m ²	Andar térreo - Pé direito duplo (7 a 8 metros de altura) com esteiras de triagem elevadas
Área de estoque	150	m ²	Andar térreo - Estoque dos recicláveis
Recepção	15	m ²	Andar térreo
Escritório	80	m ²	Andar superior – mezanino com vista para a área de triagem
Sala de reunião	50	m ²	Andar superior – mezanino com vista para a área de triagem
Sala de educação ambiental	50	m ²	Andar superior – mezanino com vista para a área de triagem
Refeitório	80	m ²	Andar térreo
Copa/cozinha	21	m ²	Andar térreo
Sanitário/vestiário feminino	30	m ²	Andar térreo - Constituído por 2 sanitários, 2 chuveiros, 01 sanitário acessível, 03 pias, área para vestiário com armário contendo 30 compartimentos.
Sanitário/vestiário masculino	30	m ²	Andar térreo - Constituído por 2 sanitários, 2 chuveiros, 01 sanitário acessível, 03 pias, área para vestiário com armário contendo 30 compartimentos.
Sanitário visitas feminino	16	m ²	Andar superior - Constituído por 2 sanitários e 03 pias.
Sanitário visitas masculino	16	m ²	Andar superior - Constituído por 2 sanitários e 03 pias.
Sanitário acessível com pia	16	m ²	Andar superior - Constituído por 1 sanitário e 1 pia.
Total pavimento inferior	1.006	m ²	Tamanho da área da edificação
Total Pavimento superior	228	m ²	Mezanino

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.1.4 Custos de instalação e operação

Considerando o custo médio de construção de R\$ 1.716,30 por m², estipulado por Torres (2023), estima-se um investimento de R\$ 2.117.914,20 com a edificação da unidade de triagem com as salas de reunião, educação ambiental, refeitório, portaria, etc. Neste valor não estão inclusos os custos de instalações elétrica, hidráulicas e acabamentos.

Quanto à aquisição dos equipamentos de triagem, correias transportadoras entre um equipamento e outro, esteiras de triagem elevadas, balanças, retroescavadeira e demais

equipamentos citados neste documento, estima-se um investimento de R\$ 22.780.239,60, totalizando, com o valor da edificação, R\$ 24.898.153,80.

Quanto à operação, considerando a equipe envolvida e os turnos de trabalho, estima-se um total de R\$ 729.780,00 por mês, conforme apresentado na **Tabela 20**. Não foram considerados consumo energético dos equipamentos, consumo de água e nem manutenções preventivas/corretivas nos equipamentos.

Tabela 11 – Custos com equipe de operação

Equipe de operação	Quantidade	Valor (R\$/mês)*
Equipe de triagem	40	216.000,00
Encarregado de produção	2	16.434,00
Operador de pá carregadeira	1	6.900,00
Controlador de planta	1	6.900,00
Operador de prensa	6	34.200,00
Mecânico	1	8.616,00
Eletricista	1	12.000,00
Gerente	1	26.040,00
Engenheiro de manutenção	1	27.000,00
Pessoal da limpeza	2	10.800,00
Total	112	364.890,00

*Salários mais encargos

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.2 Unidade de triagem semimecanizada da coleta regular

Conforme apresentado no **Item 2** juntamente com o PRGIRS, (2023), estima-se que no ano de 2043 serão geradas 810 mil toneladas de resíduos domiciliares. Deste total, foram estabelecidas metas de redução de rejeitos em 41 %, ou seja, o reaproveitamento de 331.985 toneladas de resíduos, sendo 171.378 toneladas da fração orgânica e 160.607 toneladas da fração de recicláveis, restando ainda 478 mil toneladas anualmente descartadas na forma de rejeito, conforme apresentado na **Tabela 12**.

Para isso, propõem-se a concepção de unidades microrregionais que atendam a coleta regular, dos resíduos denominados de “rejeitos”, dos municípios que constituem cada microrregião. Apesar destes serem denominados de rejeito, ainda possuem bastante material passível de reaproveitamento. Portanto, a unidade realizaria o processamento dos resíduos coletados por segregação semimecanizada, com reaproveitamento dos recicláveis

ainda presentes na massa de resíduo misto. Cada unidade deverá atender uma massa total variando entre microrregiões, sendo de 131 mil t/ano para a microrregião 1; 141 mil t/ano para a microrregião 2 e 206 mil t/ano para a microrregião 3.

Portanto, para a concepção desta unidade foi adotada uma massa de até 175 mil t/ano e a estimativa da composição dos resíduos da microrregião 2, conforme apresentado na **Tabela 6**. Devido às semelhanças nas características gerais dos resíduos gerados na região da Baixada Santista, este mesmo projeto poderá ser aplicado para atendimento da coleta regular de cada uma das 3 microrregiões.

Tabela 12 – Características operacionais da unidade de segregação semimecanizada dos resíduos da coleta seletiva

Características operacionais adotadas	Turnos de trabalho		Capacidade da unidade de triagem (kg/hora)
	(dias/ano)	(horas/dia)	
Dados	300	16	36.329

Fonte: Elaborado pelos autores.

Quanto à capacidade de atendimento em m³/hora, conforme a massa segregada por hora de trabalho e a composição aplicada, o volume inicial será conforme apresentado na **Tabela 13**.

Tabela 13 – Massa e volume dos materiais a serem segregados

Material	Densidade (kg/m ³)	Composição do material coletado na microrregião 2 (kg/hora)	Densidade dos resíduos que serão tratados na unidade (m ³ /hora)
Papel/papelão	338	3.517	10
Plástico filme	224	5.069	23
Plástico rígido	135	2.643	20
Tecido	119	1.764	15
Borracha	73	135	2
Tetra pack	60	629	10
Metal	53	540	10
Vidro	50	908	18
Madeira	41	126	3
Rejeitos/orgânicos	1213	20.999	17
TOTAL	231	72.659	128

Fonte: Elaborado pelos autores.

Com base nos dados de densidade total e de cada fração dos resíduos, foi realizado o dimensionamento dos equipamentos que farão parte da segregação, considerando que a composição, massa e densidades dos resíduos é alterada conforme são retiradas frações do fluxo de entrada e saída de cada equipamento.

Portanto, conforme apresentado na **Tabela 14**, **Figura 13**, e na listagem que segue, temos que o fluxo de processamento e os equipamentos envolvidos na segregação serão aqueles utilizados para os resíduos da coleta seletiva, a citar:

- **Rasga sacos:** Abertura das embalagens plásticas;
- **Separador magnético:** Separação dos metais ferrosos;
- **Trommel (peneira rotativa):** Separação dos resíduos orgânicos;
- **Separador balístico:** Separação dos materiais 3D (rolam para as esteiras inferiores) dos 2D (sobem para as esteiras superiores)
- **Classificador de ar:** Separa os 2D em mais leves e mais pesados
- **Separador ótico:** Permite a separação em vários tipos de materiais por composição, cor e forma.

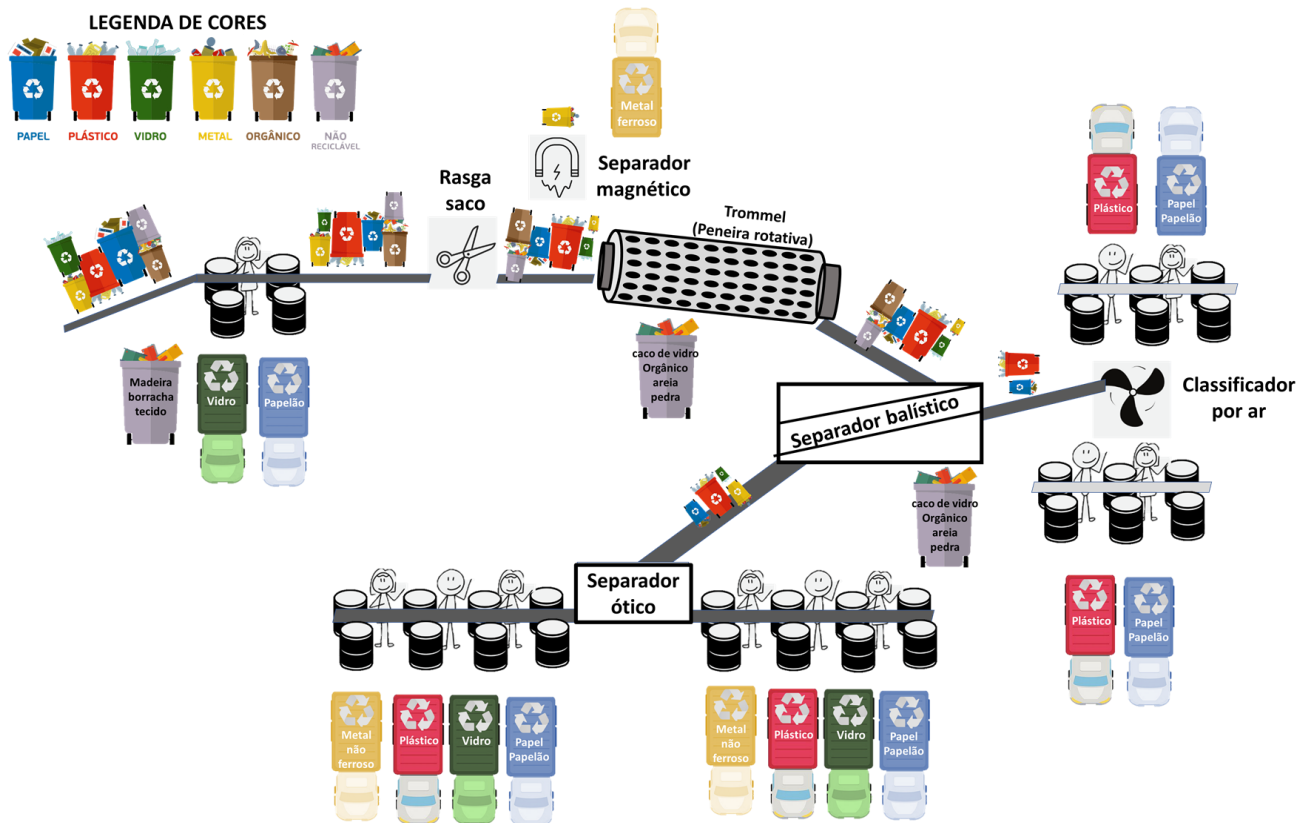
Tabela 14 - Volume de material que entra e sai de cada equipamento de segregação, rejeitos gerados (material descartado) e materiais reaproveitados (material recuperado)

Equipamentos	Volume de material (m ³ /hora)		Material recuperado/ reaproveitado		Material descartado*	
	Entrada	Saída	(m ³ /hora)	Composição	(m ³ /hora)	Composição
Descarregado no fosso de acumulação e encaminhamento para a pré-triagem (manual) (E1)	128	152	3	Vidro Papelão Latas	1	Tecido Madeira Borracha
Rasga sacos	124	124	-		-	-
Trommel	124	105	-	-	16 3	Orgânicos Vidros quebrados e outros
Separador magnético (retirada de material)	105	98	7	Metais ferrosos	-	-
Separador balístico	98	32 (2D) 62 (3D)	-	-	2 3	Orgânicos Vidros quebrados e outros
Classificador de ar	32	9 (E2) 23 (E3)	-	-	-	-
Separador ótico	62	32 (E4) 11 (E5) 19 (E6)	-	-	-	-
Esteira de Triagem Manual 2 (E2)	9	0	8	Papel Papelão	1	Papel sujo
Esteira de Triagem Manual 3 (E3)	23	0	20	Plástico filme (2D)	3	Plástico filme (2D) não reciclável
Esteira de Triagem Manual 4 (E4)	32	0	13	Vidro Metal não ferroso	19	Tecido Madeira Borracha
Esteira de Triagem Manual 5 (E5)	10	0	9	Tetrapak	1	Tetrapak sujo e outros
Esteira de Triagem Manual 6 (E6)	19	0	17	Plásticos 3D	2	Plásticos 3 D não recicláveis
TOTAL			108			48

*Rejeito de operação, sendo os orgânico passíveis de reaproveitamento em unidades de compostagem ou biodigestão

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 13 – Sequenciamento dos equipamentos de triagem da coleta regular



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os itens a seguir apresentam as premissas adotadas no dimensionamento desse sistema:

- I. O fosso de acumulação foi dimensionado com capacidade de acumular 1 dia de coleta;
- II. Os resíduos descarregados no fosso de acumulação serão transferidos, com o auxílio de retroescavadeira, para uma correia transportadora que encaminhará o material até a esteira de pré-triagem manual (E1).
- III. Na esteira de pré-triagem manual serão retirados os materiais volumosos (como madeiras, latas de maiores proporções); os tecidos que estiverem visíveis, e que poderão enroscar nos equipamentos e os vidros que estiverem visíveis e que podem se quebrar no interior dos equipamentos;
- IV. Em seguida, esteira transportadora encaminhará os materiais para o rasga saco;
- V. Depois de passar pelo rasga saco, os resíduos seguem para o trommel, onde serão retidos os materiais maiores do que 40 ou 70 mm, dependendo da

malha escolhida. O trommel permanece em um nível superior e abaixo deste, poderão ser dispostas caçambas de carretas que transportarão o que é descartado para aterro ou para planta de compostagem ou biodigestão.

- VI. O que fica retido no trommel, segue para o separador balístico, passando pelo separador magnético que retêm os metais ferrosos. No separador balístico, os materiais são separados em planos e leves (2D) dos rolantes e pesados (3D).
- VII. Os materiais leves seguem para o classificador de ar, que os separa em plásticos e papéis/papelão, encaminhando-os para 2 esteiras de triagem manual (E2 e E3), onde é realizado o controle de qualidade da separação, com descarte dos rejeitos que podem ter sobrado no processo.
- VIII. Os materiais que saem do separador ótico não encaminhados para 3 esteiras de triagem manual (E4, E5 e E6), onde é realizado o controle de qualidade da separação dos tetrapak, vidros e plásticos, com descarte dos rejeitos que podem ter sobrado no processo.

Considerando que os materiais descartados constituídos por orgânicos podem ser reaproveitados em unidades de compostagem ou biodigestão anaeróbia, cerca de 18 m³/hora podem ainda ser reaproveitados, ou seja, 22 t/hora ou 350 t/dia, conforme balanço de massa apresentado na **Tabela 15**.

Tabela 15 – Balanço de massa do material coletado, reaproveitados e descartados

Encaminhado para a triagem		Recicláveis recuperados		Orgânicos passíveis de tratamento aeróbio/anaeróbio		Descartados (rejeitos)	
t/dia	m ³ /dia	t/dia	m ³ /dia	t/dia	m ³ /dia	t/dia	m ³ /dia
581	2.048	201	1.712	350	288	30	48

Fonte: Elaborado pelos autores.

Quanto à capacidade e dimensões de cada equipamento a ser instalado, estes são conforme apresentado na **Tabela 16**.

Tabela 16 – Equipamentos a serem instalados e capacidade de cada um

Equipamentos de triagem	Capacidade aproximada (m ³ /hora)	Dimensões aproximadas (C x L x A)
Rasga sacos	160	2,5 x 2,5 x 2,5
Separador magnético	40	2,5 x 1,3 x 1,3
Trommel	130	10,0 x 2,5 x 2,5
Separador balístico	100	6,1 x 3,0 x 6,1 m
Classificador de ar	50	1,3 x 1,5 x 4,7
Separador ótico	70	1,9 x 3,7 x 2,0

Fonte: Elaborado pelos autores.

Além dos equipamentos de triagem, são necessários os seguintes equipamentos para a operação da unidade de segregação:

- Retroescavadeira;
- Empilhadeira;
- Prensa;
- Balança de pesagem dos materiais;
- Balança de pesagem dos caminhões;
- Esteiras de triagem e transportadoras;
- Entre outros.

4.2.1 Equipe necessária

Considerando que o sistema será constituído por triagem manual, assim como a equipe de pesagem, enfardadores, administrativos, etc., será necessária a seguinte equipe para operar esta unidade de triagem, conforme apresentado na **Tabela 17**.

Tabela 17 – Equipe envolvida na operação da unidade de triagem

Equipe de operação	Tamanho da equipe (nº/turno de trabalho)	Tamanho da equipe (nº total)
Equipe de triagem	40	80
Encarregado de produção	2	4
Operador de pá carregadeira	1	2
Controlador de planta	1	2
Operador de prensa	6	12
Mecânico	1	2
Eletricista	1	2
Gerente	1	2
Engenheiro de manutenção	1	2
Pessoal da limpeza	2	4
TOTAL	56	112

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.2.2 Área necessária

Considerando a dimensão dos equipamentos e a quantidade de material que chegará na área, assim como a equipe envolvida na operação da unidade, foram realizados os dimensionamentos conforme apresentados na **Tabela 18**.

Tabela 18 – Edificações

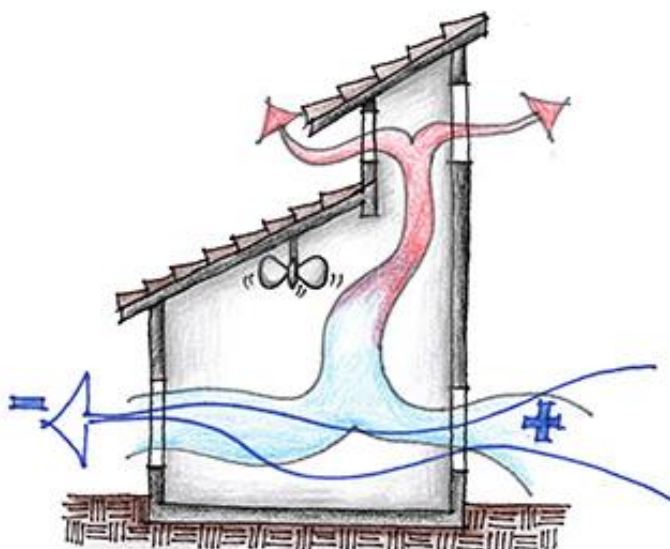
	Tamanho	Unidade	Descrição
Portaria	20	m ²	Controle de entrada e pesagem dos caminhões
Fosso de acumulação	200	m ²	Andar térreo com 4 metros de profundidade
Área de triagem	400	m ²	Andar térreo - Pé direito duplo (7 a 8 metros de altura) com esteiras de triagem elevadas
Área de estoque	180	m ²	Andar térreo - Estoque dos recicláveis
Recepção	15	m ²	Andar térreo
Escritório	80	m ²	Andar superior – mezanino com vista para a área de triagem
Sala de reunião	50	m ²	Andar superior – mezanino com vista para a área de triagem
Sala de educação ambiental	50	m ²	Andar superior – mezanino com vista para a área de triagem
Refeitório	100	m ²	Andar térreo
Copa/cozinha	21	m ²	Andar térreo
Sanitário/vestiário feminino	30	m ²	Andar térreo - Constituído por 2 sanitários, 2 chuveiros, 01 sanitário acessível, 03 pias, área para vestiário com armário contendo 30 compartimentos.
Sanitário/vestiário masculino	30	m ²	Andar térreo - Constituído por 2 sanitários, 2 chuveiros, 01 sanitário acessível, 03 pias, área para vestiário com armário contendo 30 compartimentos.
Sanitário visitas feminino	16	m ²	Andar superior - Constituído por 2 sanitários e 03 pias.
Sanitário visitas masculino	16	m ²	Andar superior - Constituído por 2 sanitários e 03 pias.
Sanitário acessível com pia	16	m ²	Andar superior - Constituído por 1 sanitário e 1 pia.
Total pavimento inferior	996	m ²	Tamanho da área de edificação
Total Pavimento superior	228	m ²	Mezanino

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para o dimensionamento ainda devem ser considerados:

- I. A unidade deverá conter sistemas de iluminação e ventilação natural, que garantirá a circulação eficiente de ar, eliminando o ar quente e permitindo a entrada de ar renovado (**Figura 14**);
- II. O sistema de iluminação e ventilação será aplicado por meio de construção com utilização de tijolos vazados (elementos vazados) à cerca de 1/3 da altura da parede para cima;
- III. O pendural, entre o telhado e a parede, será vazado, porém, com a presença de grade, evitando assim a entrada de ave-fauna no interior da edificação; e
- IV. Além disto, deverão ser instalados exaustores eólicos no telhado da unidade, que realizam a circulação do ar sem a utilização de energia elétrica.

Figura 14 – Sistema que favorece a ventilação natural



Fonte: Ministério do Meio Ambiente, 2023.

4.2.3 Sistema de impermeabilização, drenagem e remoção de percolato

Tendo em vista que neste modelo tecnológico a Unidade de triagem gerencia resíduos mistos, que contém resíduos orgânicos ou resíduos úmidos misturados à massa de resíduos recicláveis, durante a operação poderá haver geração de líquidos, que pode vazar do caminhão compactador durante o descarregamento, ou caso seja necessário o armazenamento do material por algum período. Tais líquidos deverão ser drenados em

canaletas similares às de postos de combustível, que devem ser instaladas no fosso de acumulação de material. Além disto, toda a área de triagem deverá conter impermeabilização do piso.

O sistema de impermeabilização, drenagem e remoção de percolato devem seguir as seguintes premissas:

- I. Ao redor do fosso de acumulação serão instaladas canaletas de captação de chorume;
- II. O piso do fosso de acumulação conterà ligeira queda (declive de 2 % a 3 %) em direção às canaletas de captação do chorume;
- III. As canaletas deverão ser fechadas com grelha metálica e com tratamento para resistência à corrosão e deve ser direcionada para uma caixa de armazenamento de chorume que possua fácil acesso.
- IV. As canaletas deverão ser de chapa de aço dobrada e deverão ser instaladas juntamente com a concretagem dos pisos;
- V. O líquido captado nas canaletas será encaminhado, por gravidade, a uma caixa de captação instalada na subsuperfície;
- VI. A caixa de acumulação de chorume conterà um volume de 3 m³, com uma capacidade de 3 mil litros;
- VII. A caixa de acumulação também deverá ser totalmente impermeabilizada;
- VIII. No topo da caixa de acumulação de chorume conterà uma tampa com acesso para retirada mensalmente do líquido armazenado, por caminhões tipo “limpa fossa” e encaminhamento para tratamento em estações de tratamento de esgoto.

4.2.4 Custos de instalação e operação

Considerando o custo médio de construção de R\$ 1.716,30 por m², estipulado por Torres (2023), estima-se um investimento de R\$ 2.100.751,20 com a edificação da unidade de triagem com as salas de reunião, educação ambiental, refeitório, portaria, etc. Neste valor não estão inclusos os custos de instalações elétrica, hidráulicas, sistema de captação e acumulação de chorume e acabamentos em geral.

Quanto à aquisição dos equipamentos de triagem, correias transportadoras entre um equipamento e outro, esteiras de triagem elevadas, balanças, retroescavadeira e demais equipamentos citados neste TR, estima-se um investimento de R\$ 24.200.266,20, totalizando com a edificação, um valor de instalação de R\$ 26.301.017,40.

Quanto à operação, considerando a equipe envolvida e os turnos de trabalho, estima-se um total de R\$ 729.780,00 por mês, conforme apresentado na **Tabela 19**.

Tabela 19 – Custos com equipe de operação

Equipe de operação	Quantidade	Valor (R\$/mês)*
Equipe de triagem	80	432.000,00
Encarregado de produção	4	32.868,00
Operador de pá carregadeira	2	13.800,00
Controlador de planta	2	13.800,00
Operador de prensa	12	68.400,00
Mecânico	2	17.232,00
Eletricista	2	24.000,00
Gerente	2	52.080,00
Engenheiro de manutenção	2	54.000,00
Pessoal da limpeza	4	21.600,00
Total	112	729.780,00

*Salários mais encargos

Fonte: Elaborado pelos autores.

5. Modelo Tecnológico das Unidades de Tratamento de Resíduos Orgânicos

No modelo conceitual tecnológico proposto as unidades compostagem se adequam para os resíduos já segregados na fonte e para os grandes geradores e as unidades de biodigestão para os resíduos mistos e são opções de sistemas descentralizados a serem instalados pelos municípios e/ou microrregiões.

5.1 Unidade de compostagem

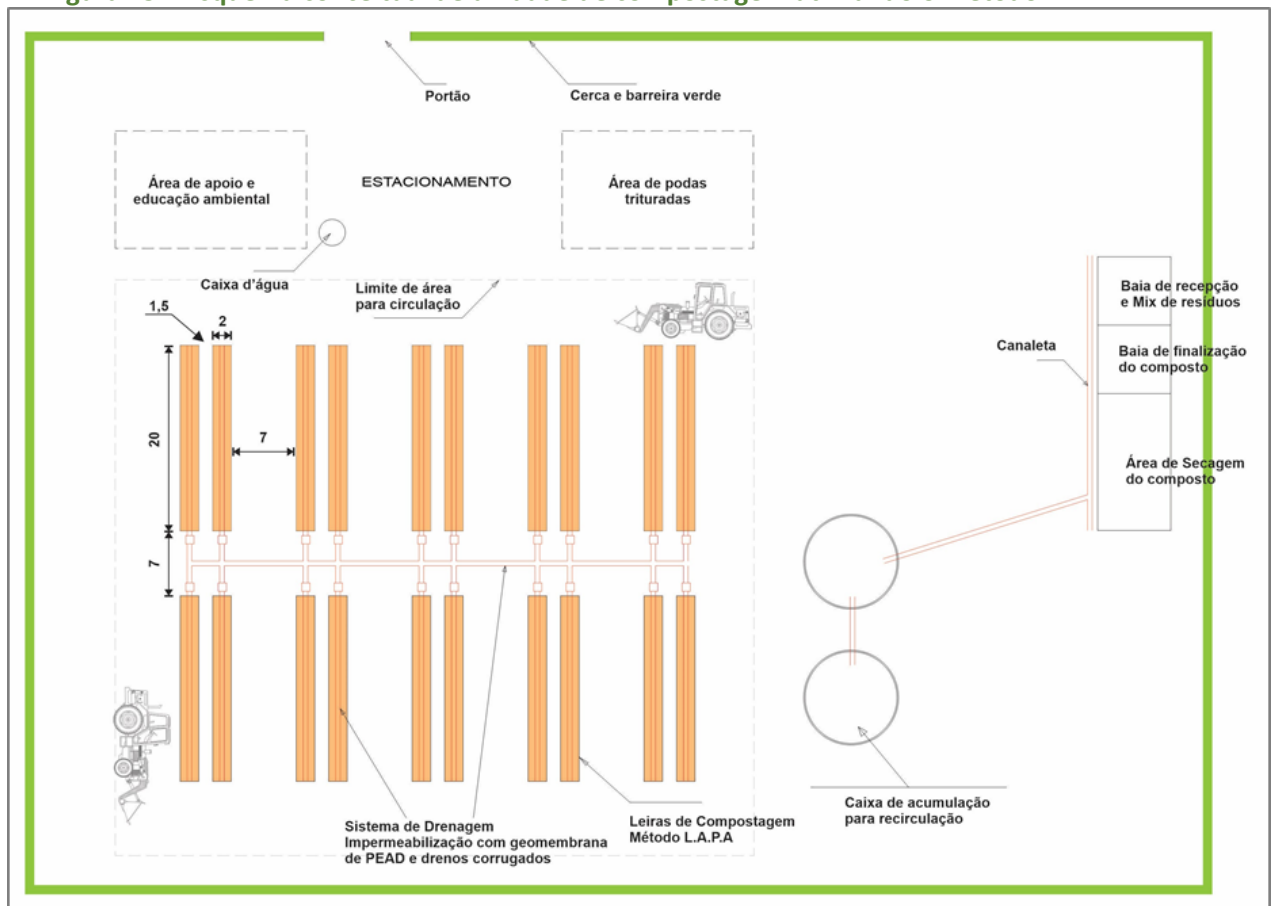
O Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Baixada Santista (PRGIRS/BS) prevê a implementação de ações de curto prazo, incluindo a segregação na fonte e coleta seletiva de resíduos orgânicos, promoção da reciclagem desses resíduos e destinação de rejeitos apenas para aterros sanitários. O Guia: Implantação de unidades de compostagem de resíduos orgânicos foi apresentado para orientar os gestores municipais nas etapas de preparação, implantação e operação de unidades de compostagem, bem como na gestão do composto produzido.

O PRGIRS/BS destaca estratégias para a reciclagem de resíduos orgânicos na Baixada Santista, com ênfase na segregação e tratamento local tanto em residências

quanto em grandes geradores públicos e privados. A compostagem é considerada a principal alternativa tecnológica, visando uma redução de 21 % dos resíduos orgânicos enviados a aterros sanitários em um período de 20 anos, tratando cerca de 167 mil toneladas anuais de resíduos orgânicos domiciliares e 55 mil toneladas anuais de resíduos de poda até 2042. Os itens a seguir representam o modelo conceitual tecnológico proposto para as unidades de compostagem.

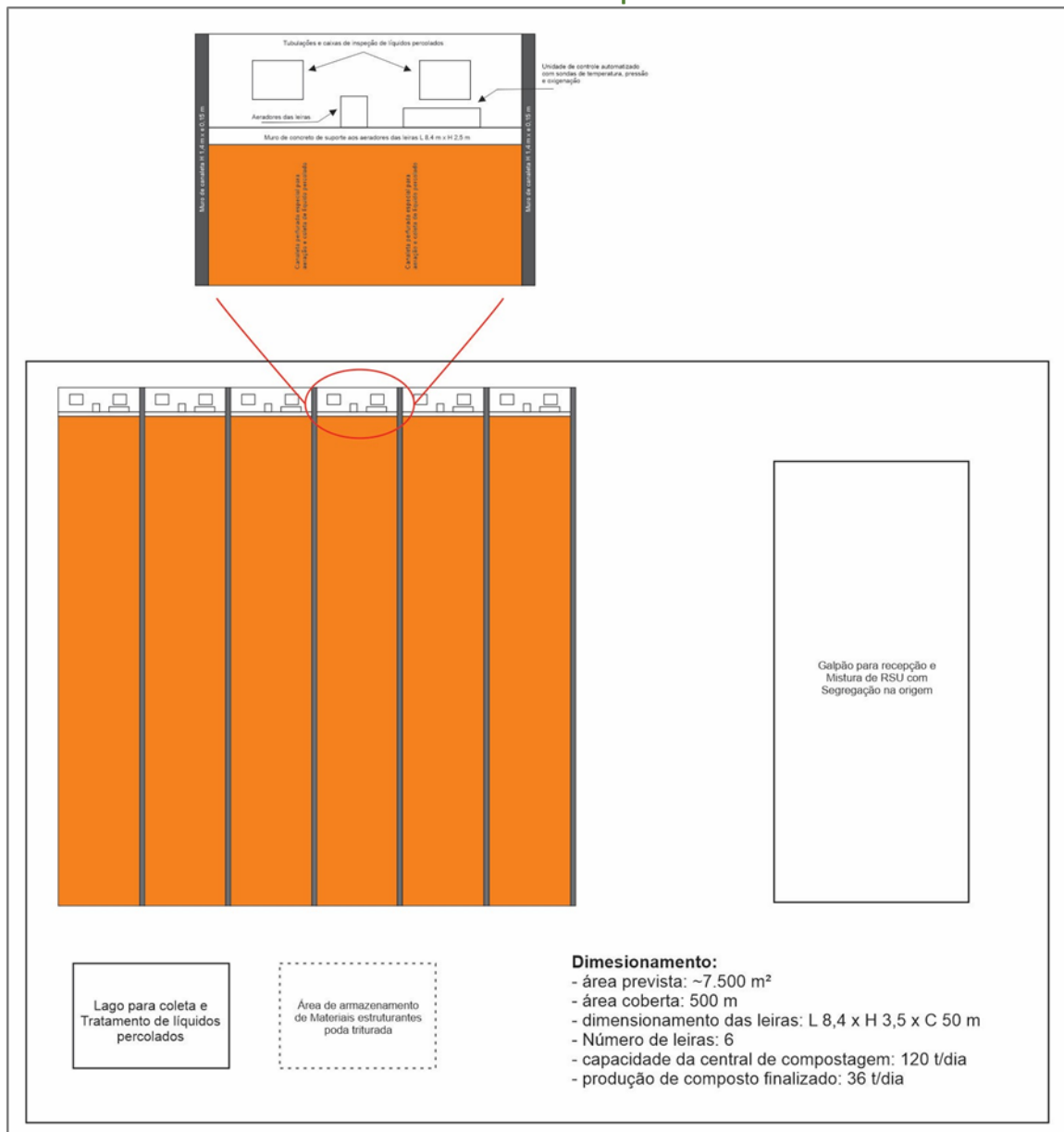
Considerando as características das tecnologias disponíveis e a realidade e características da RMBS, selecionou-se como melhor aplicáveis à realidade da Baixada Santista o sistema de leiras com arquitetura projetada para aeração (sistema L.A.P.A.) (Figura 15) e o sistema de leiras estáticas com membrana semipermeável (Figura 16), que apresentam boa performance de processamento por área, baixo impacto de vizinhança, fluxo contínuo de alimentação e baixa a média complexidade de operação. Essas tecnologias serão detalhadas no item a seguir.

Figura 15 – Esquema conceitual de unidade de compostagem utilizando o método L.A.P.A.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 16 – Esquema conceitual de unidade de compostagem utilizando o sistema de leiras estáticas com manta semipermeável.



Fonte: Elaborado pelos autores.

5.1.1 Escolha da área

Em relação às distâncias, é importante que a área da unidade de compostagem seja implantada próxima às fontes geradores principais dos resíduos orgânicos ou às concentrações de consumidores de composto, buscando reduzir os custos com o transporte de resíduos e composto. O terreno ideal deve ser não alagável, distante no

mínimo a 1,5 m da altura máxima do lençol freático, plano ou terraplenado, levemente inclinado - 1 a 2 % de declividade – para facilitar o escoamento das águas de superfície. Deve ter acesso fácil por caminhões e máquinas e possibilidade de fechamento por cercas e portões para evitar acesso de animais e pessoas não autorizadas e barreiras verdes para evitar ventos e minimizar a saída de odores.

5.1.2 Tamanho de área necessária

Para o sistema L.A.P.A., pode-se usar a referência de planejamento de 250 m² de área necessária para cada tonelada de capacidade diária de processamento de resíduos orgânicos, já incluindo as áreas de armazenamento de podas trituradas e aparas de gramíneas, áreas de recepção e mix de resíduos e áreas de finalização do composto produzido. Assim, para um pátio de compostagem pelo sistema L.A.P.A. de 10 t/dia de capacidade de processamento devem ser reservados 2.500 m² ou para 20 t/dia, 5.000 m². Destaca-se que a área necessária poderá variar conforme as características de cada projeto.

Para o sistema de leiras estáticas com manta semipermeável, que começa a ter viabilidade técnica e econômica a partir de 30 t/dia de capacidade, a referência de planejamento é de 35 m² para cada tonelada de capacidade diária de processamento. Essa performance no uso da área é conseguida pela redução do tempo da compostagem para apenas 8 semanas devido ao maior controle dos fatores de operação no ambiente interno da leira. Assim, uma usina de compostagem pelo sistema de mantas semipermeáveis de 30 t/dia de capacidade necessitará de 1.050 m² e uma de 300 t/dia de capacidade necessitará de 10.500 m².

5.1.3 Preparação do terreno

O terreno deverá ser terraplenado com leve inclinação e compactado para permitir o tráfego constante de caminhões e máquinas com pavimento apropriado (pedriscos ou outros) que evite derrapagens e atolamentos. A condução das águas de superfície deve ser feita de modo a evitar alagamentos temporários e erosão, pois o pátio ou unidade de compostagem deverão funcionar inclusive em dias de chuva, já que o fluxo de resíduos dos sistemas de coleta doméstica e municipal é contínuo. O terreno deverá contar com cercamento e portões e uma barreira verde circundando seus limites para evitar ventos e preservar o ambiente microbiano da compostagem.

5.1.4 Infraestrutura e equipamentos necessários

O **Quadro 2** apresenta o detalhamento da infraestrutura e os equipamentos necessários para implantação dos dois métodos.

Quadro 2 – Detalhamento da infraestrutura e equipamentos necessários nos métodos L.A.P.A. e leira estática com manta impermeável.

Método de compostagem	Infraestrutura	Equipamentos
Método L.A.P.A.	Cercas, portões e barreira verde; Ponto de água e energia; Iluminação de emergência para operação noturna; Pavimento adequado ao tráfego de caminhões e máquinas (pediscos ou outro); Galpão de Apoio e Finalização do Composto; Baías de Recepção e Mix de Resíduos; Sistema de Drenagem, Coleta e Recirculação de Líquidos Percolados; Base da leira em geomembrana de PEAD ou em concreto; Caixas de inspeção; Caixas de acumulação.	Trator com Pá carregadeira ou Mini-carregadeira; Triturador de galhos; Peneira manual inclinada ou de balanço, mecânica horizontal ou rotativa; Ensacadora e seladora; Balança; Termômetro; Bomba hidráulica semissubmersível tipo “sapo”; Carrinhos jerica, garfo reto, garfo curvo, pá, enxada, vassourão.
Método de leiras estáticas com manta semipermeável	Cercas, portões e barreira verde; Ponto de água e energia; Iluminação de emergência para operação noturna; Pavimento Concretado; Galpão de apoio, recepção/mix de resíduos e finalização do composto; Baía concretada com canaletas perfuradas para aeração e coleta de líquidos percolados; Muros laterais de concreto para fixação das bordas da manta; Muro de contenção e suporte de aeradores e do sistema de controle dos aeradores; Casa de Força e Controle dos aeradores.	Mantas semipermeáveis nanoporosas de tripla camada com camada interna de ePTFE; Equipamento enrolador/desenrolador de mantas; Sondas de pressão, temperatura e oxigênio; Internet (Wifi); Notebooks; Software de gerenciamento e controle do sistema aerador; Pá carregadeira; Peneira rotativa; Balança rodoviária.

Fonte: Elaborado pelos autores.

5.1.5 Custos¹

5.1.5.1 Pátio de Compostagem com sistema L.A.P.A.

O **Quadro 3** apresenta um exemplo ilustrativo do dimensionamento e custos estimados para uma unidade de compostagem com capacidade de 20 t/dia.

Quadro 3 – Dimensionamento e custos de uma unidade de compostagem pelo sistema L.A.P.A. e capacidade de 20 t/dia.

Dimensionamento:

- Área Necessária: 5.000 m²;
- Área Coberta: 170 m²;
- Nº de turnos: 01;
- Nº de operadores/turno: 04 (período de funcionamento de 04 horas/dia);
- Dimensionamento das Leiras: L: 2,00m x H: 2,75 x C: 20,00m;
- Número de Leiras: 20;
- Ciclo da Leira: 120 dias (Fase Ativa: 90 dias + Fase de Maturação: 30 dias);
- Dias Úteis por ano: 313,07;
- Dias Úteis por mês: 26,08;
- Entrada de resíduos: Restos de Alimentos: 15 t/dia; Poda Triturada: 5 t/dia; Aparas de Gramíneas: 1,8 t/dia;
- Geração de Líquido Percolado: 19.723 L/mês (Reservatório: 25.000 L, 45 dias sem necessidade de recircular);
- Geração de Rejeitos: 0,14 t/dia;
- Produção de Composto Finalizado: 6 t/dia.

Custos de implantação (CAPEX) (R\$/mês):

- Infraestrutura e Utilidades: R\$ 281.077,50
- Ferramentas e Montagem: R\$ 5.882,00
- Capex Total: R\$ 286.959,50
- Capex Anualizado: R\$ 28.695,90

Custos de operação (OPEX) (R\$/mês):

- Salários: R\$ 11.312,00
- Energia: R\$ 479,00
- Manutenção: R\$ 1.500,00
- Serviços de terceiros (esp. máquinas): R\$ 12.750,00
- Óleo combustível: R\$ 471,40
- Opex por mês: R\$ 26.512,40
- Opex Anualizado: R\$ 318.148,80

Custos por tonelada de resíduo orgânico compostado:

- CAPEX + OPEX (R\$/ano): R\$ 472.149,50
- CAPEX (R\$/t): R\$ 13,10
- OPEX (R\$/t): R\$ 145,30
- **CAPEX + OPEX (R\$/t): R\$ 158,40**

Fonte: Elaborado pelos autores.

¹ Os custos reais podem variar em função das dificuldades locais de preparação do terreno, do escopo e escala do projeto e outros fatores. Os exemplos indicados nesse item foram retirados de projetos reais, mas não se aplicam como casos gerais.

5.1.5.2 Pátio de compostagem com sistema de leiras estáticas com manta semipermeável

O **Quadro 4** apresenta um exemplo ilustrativo do dimensionamento e custos estimados para uma unidade de compostagem com capacidade de 120 t/dia.

Quadro 4 - Dimensionamento e custos de uma unidade de compostagem pelo sistema de leiras estáticas com manta semipermeável e capacidade de 120 t/dia.

Dimensionamento:

- Área Necessária: 7.500 m²
- Área Coberta: 500 m²
- Nº de turnos: 01; Nº de operadores/turno: 03 (período de funcionamento de 08 horas/dia)
- Dimensionamento das Leiras: L: 8,40m x H: 3,50 x C: 50,00m
- Número de Leiras: 6
- Ciclo da Leira: 45-60 dias (Fase Ativa: 30 dias + Fase de Maturação: 15 dias)
- Dias Úteis por ano: 313,07; Dias Úteis por mês: 26,08
- Entrada de resíduos: Restos de Alimentos: 80 t/dia; Poda Triturada: 40 t/dia; Aparas de Gramíneas: 0,20 t/dia
- Geração de Líquido Percolado: próximo de zero
- Geração de Rejeitos: 3 t/dia
- Produção de Composto Finalizado: 36 t/dia

Custos de implantação (CAPEX) (R\$/mês):

- Infraestrutura e Utilidades: R\$ 1.636.600,00
- Tecnologia (importada): R\$ 9.802.000,00
- Equipamentos e Montagem: R\$ 1.003.332,00
- Capex Total: R\$ 12.441.932,00
- Capex Anualizado: R\$ 622.096,60

Custos de operação (OPEX) (R\$/mês):

- Salários: R\$ 15.352,00
- Energia: R\$ 1.764,50
- Manutenção: R\$ 2.000,00
- Serviços de terceiros: R\$ 1.000,00
- Óleo combustível: R\$ 2.546,00
- Opex por mês: R\$ 22.662,50
- Opex Anualizado: R\$ 271.950,00

Custos por tonelada de resíduo orgânico compostado:

- CAPEX + OPEX (R\$/ano): R\$ 894.046,60
- CAPEX (R\$/t): R\$ 16,56
- OPEX (R\$/t): R\$ 7,24
- **CAPEX + OPEX (R\$/t): R\$ 23,80**

Fonte: Elaborado pelos autores.

5.2 Unidade de biodigestão anaeróbia

A biodigestão anaeróbia é caracterizada pelo processo de conversão da matéria orgânica na ausência de oxigênio. É um processo bioquímico que ocorre em quatro estágios principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, sendo que em cada estágio estão envolvidas diferentes populações bacterianas. Esta tecnologia objetiva a destinação adequada dos resíduos orgânicos visando o aproveitamento dos seus subprodutos: biogás e composto e, conseqüentemente, contribui para evitar a emissão descontrolada de metano para a atmosfera.

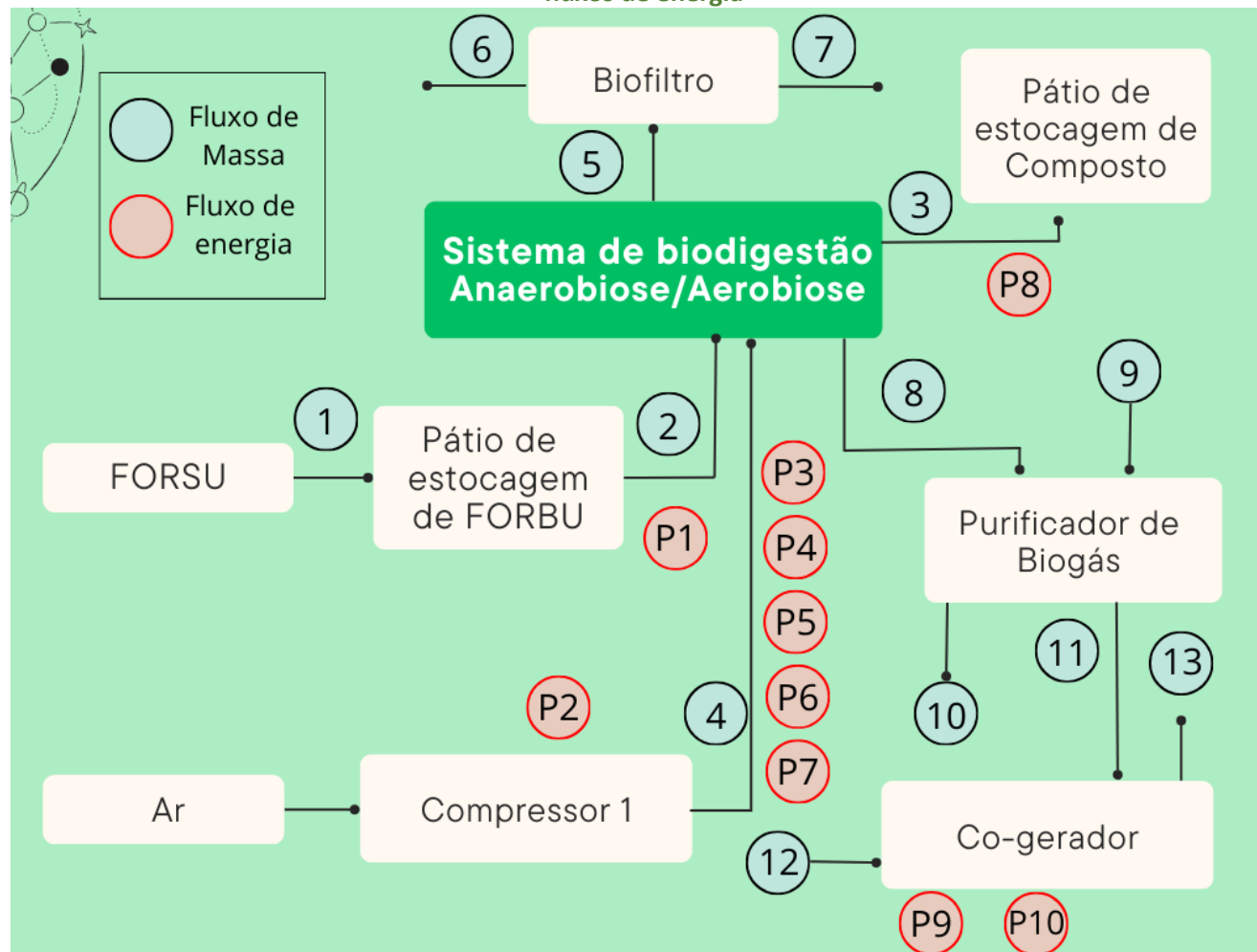
O modelo conceitual dos processos que ocorrem numa planta de biodigestão é apresentado na **Figura 17**. Este é composto pelo sistema de sistema de Biodigestão anaerobiose e aerobiose, por um tanque de recirculação de inóculo, sistema de biofiltro, pátio de estocagem, purificador de biogás e co-gerador, estimando-se um desempenho de redução de massa total de resíduos em torno de 18 %.

No modelo conceitual para a Baixada Santista, as unidades de triagem de resíduos mistos são necessárias para efetuar essa seleção e preparar os resíduos para etapas subsequentes, sendo a fração orgânica resultante desse processo, encaminhada para a digestão anaeróbia (biometanização). Entretanto, salienta-se que, mesmo a planta tendo sido projetada para operar com RSU misto, a produtividade e a qualidade do composto orgânico gerado, juntamente com o desempenho e a qualidade da geração do biogás não serão as mesmas obtidas com alimentação de resíduos orgânicos separados na fonte (coleta seletiva de orgânicos).

O biogás obtido no processo de digestão anaeróbia pode ser utilizado para a geração de energia elétrica e calor. Para uso automotivo ou disponibilização na rede de gás natural, o biogás deverá ser purificado para evitar prejuízos à rede e aos equipamentos da linha de gás natural (IPT, 2018). A composição típica do biogás é de metano (50 % a 70 %), dióxido de carbono (25 % a 45 %), vapor d'água (2 % a 7 %), oxigênio (< 2 %), nitrogênio (< 2 %) e contaminantes em concentração em geral inferiores a 1 % (EPE, 2014). Após o processo de purificação o gás passa a ser chamado de biometano, cuja composição típica é de 95 % a 97 % de CH₄ e 1 % a 3 % de CO₂ (Ryckebosch, Drouillom & Vervaeren, 2011).

Em nota técnica realizada por EPE (2014), a produção específica de energia por tonelada de RSU total foi estimada em 0,109 MWh/t. O valor de produtividade considerado no estudo realizado por Via Pública (2012) foi de 0,28 MWh/t.

Figura 17 - Fluxograma conceitual da planta de biodigestão, onde estrela preta significa fluxos de massa e estrela vermelha significa fluxos de energia



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os biodigestores anaeróbios podem ser classificados de acordo com a concentração de sólidos totais em que operam. Reatores úmidos, seco e extra seco, operam com intervalos entre 3 - 15 %, 15 - 35 % e 25 -50 % de sólidos totais, respectivamente. Entre estas, a tecnologia extra seca em túneis de metanização tem se mostrado a mais aplicável para a FORSU por aceitar a entrada de matéria com alto teor de sólidos totais contendo impurezas, o que pode danificar os agitadores e bombas aplicados aos sistemas úmido e seco para o tratamento de FORSU (FRICKE et al, 2014; BROWN & LI, 2013; LI et al., 2011).

A tecnologia de biodigestão extrasseca, desenvolvida na última década, opera em regime de bateladas sequenciais com quatro ou mais reatores, possibilitando assim a introdução e remoção da FORSU de maneira contínua (JHA et al, 2011, PROBIOGÁS, 2015).

Como vantagens da digestão anaeróbia podem-se listar (FADE - UFPE, 2014):

- exploração do potencial energético dos resíduos orgânicos por meio da recuperação do gás metano produzido no processo;
- aproveitamento do composto orgânico como insumo para agricultura, em especial os de melhor qualidade, que são obtidos quando a fração orgânica é separada na fonte; recuperação de nutrientes, em especial o fósforo, que fica na matéria orgânica em digestão e é essencial para a sua utilização como fertilizante;
- aumento da vida útil dos aterros sanitários, que passam a receber uma fração orgânica reduzida dos RSU, e, portanto, redução das emissões de gases de efeito estufa;
- os processos anaeróbios podem ser aplicados em grande e pequena escala, tendo médio custo de implantação, baixa demanda de área e alta tolerância a cargas orgânicas elevadas.

As principais dificuldades da aplicação desta tecnologia são (FADE - UFPE, 2014):

- a segregação adequada do resíduo orgânico é fundamental para não comprometer o processo de biodigestão anaeróbia;
- o processo necessita de um tempo de partida elevado, mas que pode ser acelerado com a adição de inóculos, os quais podem ser provenientes de lodos;
- a homogeneização e equilíbrio do sistema necessitam ser bem cuidados para não comprometer o processo, principalmente em relação à viabilidade da microbiota, que é bastante sensível a alterações do ambiente anaeróbio;
- a operação e monitoramento da planta de biodigestão exige mão de obra qualificada.

5.2.1 Equipamentos necessários

Visando a otimização e eficiência dos processos de digestão e de seus resultados, é importante a aplicação de tecnologias apropriadas no pré e no pós-tratamento da matéria orgânica, além de um rigoroso controle das condições ambientais e dos parâmetros operacionais do reator.

Sendo assim, as unidades de digestão anaeróbia devem apresentar 4 estágios principais, sendo:

1. Pré-tratamento: segregação do material não biodegradável e a possível trituração da matéria orgânica;
2. Digestão dos resíduos;
3. Recuperação e tratamento do biogás;
4. Tratamento e análise quanto ao reaproveitamento dos subprodutos gerados (líquidos e substrato pós tratado).

Em geral a planta instalada acompanha uma unidade de pré-tratamento do RSU, envolvendo pelo menos as etapas de retirada das embalagens, separação de materiais contaminantes grosseiros, como plásticos e metais, e redução do tamanho dos fragmentos. Da mesma forma, deve estar prevista ao menos uma unidade de armazenamento para o biogás produzido (gasômetro), e idealmente uma unidade de tratamento de gases (biofiltros).

5.2.2 Custos de instalação e de operação

Para possibilitar a comparação entre os custos das tecnologias disponíveis é necessário trabalhar com dados normalizados ou ter bem estabelecidos os patamares de operação de acordo com a demanda prevista.

Em uma análise de custo realizada pela Via Pública (2012), foram considerados os custos para implantação de uma unidade de TMB para 1 tonelada diária de RSU. “Considerou-se um investimento de R\$ 120 milhões no sistema de biodigestão para o tratamento de 510 t/dia de orgânicos do RSU, provenientes de 1.000 t/dia. Esse investimento inclui a instalação de uma área para a recuperação de materiais recicláveis (*Material Recovery Facility – MRF*) capaz de processar 320 t/dia entre plásticos, papel, papelão, metais ferrosos, materiais não ferrosos, vidros e outros. O custo de investimento desta MRF foi avaliado em R\$ 32 milhões e é composto por mesas com correias transportadoras, caçambas e containers de armazenamento, tanques secos, prensas e – principalmente – sistema anti-incêndio, além de instalações para os trabalhadores, uma vez que essa atividade é essencialmente intensiva em mão de obra” (Via Pública, 2012).

Os custos para operação também foram considerados nesta avaliação, igualmente normalizados para o processamento de 1 t/dia, os quais estão apresentados na **Tabela 20**. É importante ressaltar que para verificar a viabilidade da tecnologia foi considerada a receita proveniente da venda dos materiais recicláveis recuperados.

Tabela 20 - Parâmetros para análise econômico-financeira para o sistema de tratamento mecânico-biológico com emprego de biodigestão anaeróbia

Item	Unidade	Valor
Volume diário processado	t/dia	1.000
Volume diário digerido	t/dia	510
Material recuperado para reciclagem	t/dia	320
Dias de operação por ano	dia/ano	330
Geração de eletricidade	MWh/t	0,28
Investimento	R\$ (milhões)	120
Custo de O & M	R\$/t	70
Valor cobrado na recepção do RSU (<i>Gate fee</i>)	R\$/t	80
Preço de vendas de recicláveis ^a	R\$/t	506,20
Preço de venda da eletricidade	R\$/MWh	140
Taxa de desconto	% a.a.	8
Taxa de alavancagem	%	30/70
Condições de financiamento (taxa de juros, carência, prazos)	Referência	BNDES - Infraestrutura
Participação na receita de venda dos recicláveis	%	30

Nota dos autores (Via Pública, 2012): a) corresponde ao valor obtido pela simples multiplicação das quantidades previstas pela PNRS, pelos preços médios dos recicláveis divulgados pelo CEMPRE para São Paulo.

Fonte: Via Pública, 2012

Embora trabalhar com valores médios normalizados seja interessante para comparações entre rotas tecnológicas, deve-se ressaltar que a mudança da escala de operação tem impacto significativo sobre os custos.

Em um levantamento de custos realizado pela FADE - UFPE (2014), foram considerados dois tipos de unidades, uma com capacidade de processamento de 20.000 t/ano (66 t/dia) e a outra com capacidade de 72.000 t/ano (225 t/dia). Os custos de

implantação, operação e manutenção estão apresentados na **Tabela 21**, permitindo uma análise comparativa.

Tabela 21 - Parâmetros para análise econômico-financeira para o sistema de tratamento mecânico-biológico com emprego de biodigestão anaeróbia, considerando plantas com diferentes capacidades

Item	Valores	%	Valores	%
Capacidade de tratamento (t/ano)	20.000,00		72.700,00	
Custo unitário de investimento (R\$/t)	37,12		35,54	
Custos fixos de operação (Mão de Obra) (R\$/ano)	439.582,00	22	439.582,00	12
Custos de insumos, manutenção e seguros (R\$)	1.560.418,00	78	3.195.418,00	88
CUSTOS TOTAIS DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO (R\$/ano)	2.000.000,00		3.635.000,00	
Custo unitário de operação e manutenção (R\$/t)	100,00		50,00	

Fonte: FADE, 2014.

5.2.3 Identificação de Tendências e Evolução

As tecnologias de tratamento mecânico-biológico para RSU foram desenvolvidas principalmente na Europa, em meados da década de 90. O mercado principal continua sendo o Europeu, embora seu uso comercial esteja continuamente se difundindo para outras regiões. As principais tecnologias disponíveis para tratamento da fração orgânica de RSU (FORSU) e recuperação de energia por meio do processo controlado de biodigestão anaeróbia são: DRANCO (OWS), Valorga, Laran-Linde e Kompogas, que operam em sistema com via seca, e Bioferm, Kompoferm, Bekon e Methanum (em implantação inicial) com via extrasseca, em túneis de metanização. Cabe ressaltar que muitas das unidades não operam somente com a FORSU, mas com uma digestão conjunta de resíduos agropecuários.

No Brasil as tecnologias de biodigestão são aplicadas em larga escala para o tratamento de esgoto e para os resíduos agroindustriais, principalmente tecnologias em via úmida, sendo identificadas apenas duas iniciativas de biodigestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos em fase de operação no Brasil (Brasil, 2022). Foi instalada em 2018 uma unidade no Município de Bertioga (SP), em escala piloto, que utiliza uma tecnologia extrasseca em contêineres, com capacidade de tratamento de 120 t/mês (Figura 18), o CAPEX desta planta piloto foi em torno de R\$ 1,3 milhões. E a outra unidade no Rio de Janeiro, a Usina de Biogás do Caju, que opera desde 2018 no EcoParque do Caju, com capacidade instalada para receber 30 t/dia. Em termos de produtos, em operação plena a instalação tem capacidade para geração de 4.500 Nm³/dia de biogás e 1.000 Nm³/dia de biometano.

Figura 18 – Túneis de melanização de RSU em Bertioga



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2018.

A redução da fração orgânica a ser disposta em aterros é uma meta do Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Um fator desfavorável para a viabilidade econômica do processo em questão é o custo de implantação, em especial por serem tecnologias geralmente importadas. Por outro lado, os custos de disposição final em aterros sanitários, o valor da energia renovável e a possibilidade de comercialização de créditos de carbono, caso volte a ser viável, podem ser incentivadores.

6. Modelo Tecnológico da Unidade de Tratamento de Rejeitos

A PNRS instituída pela Lei nº 12.305/10 e seu Decreto regulamentador, trouxe como alguns dos objetivos, a adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias apropriadas de forma de minimizar impactos ambientais inerentes à gestão e disposição dos resíduos (art. 7º, IV), prevendo, inclusive, a recuperação e o aproveitamento energético como alternativas para tal finalidade (art. 7º, XIV) (Brasil, 2022).

Salienta-se que, considerando a situação emergencial de término da vida útil dos destinos finais (aterros Terrestre Ambiental e de Peruíbe) dos municípios da região, ambos com encerramento previsto para o ano de 2025, são necessárias ações tanto no incremento da separação na fonte (redução), na melhoria e ampliação nos sistemas das cooperativas, bem como na associação com sistemas de processamento para os resíduos que ainda serão destinados pela população a coleta regular, sem separação prévia. Isto se deve ao fato de que o engajamento da população aos programas de segregação na origem é feito de forma voluntária e isso requer tempo para mudança de hábito e o estabelecimento de uma nova cultura.

Uma unidade para atendimento regional na Baixada Santista deve ser projetada para uma capacidade de 1.200 t/dia, que considera a quantidade de rejeitos geradas em 2043, ainda que se considere o atingimento das metas de coleta seletiva (Tabela 2). Caso essas metas não sejam atingidas, seria em torno de 2.000 t/dia. Ou seja, um projeto para a RMBS deve estar entre a faixa entre 1.200 e 2.000 t/dia. Um potencial de geração entre 30 MW e 50 MW de energia, e no caso de uso do vapor para aquecimento considera-se um potencial ainda maior tendo em vista esse escoamento para atendimento da demanda do Polo Industrial de Cubatão, por exemplo.

Segundo Brasil, 2022:

“...Para atendimento do disposto no Decreto regulamentador da PNRS, em abril de 2019, o Ministério do Meio Ambiente, juntamente com o Ministério de Minas e Energia (MME) e o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), publicaram a Portaria Interministerial nº 274, que disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos no Brasil e estabelece as bases e diretrizes operacionais para o aproveitamento energético de tais materiais. Em 2020, o MMA e MME desenvolveram solução que permitiu a inclusão da recuperação energética de resíduos sólidos urbanos, como uma fonte específica, nos leilões de compra de energia elétrica proveniente de novos empreendimentos de geração, a partir de 2021. Referidas medidas

estão previstas na Portaria MME nº 435/2020 e as diretrizes para os leilões foram divulgadas por meio da Portaria MME nº 480/2021. Os leilões buscam a contratação de energia a partir da recuperação energética de RSU, tendo por objetivo suprir o crescimento do mercado das distribuidoras a partir de 2026 e com previsão de suprimento variando entre 15 e 25 anos.

No Estado de São Paulo existe uma Resolução da Secretaria do Meio Ambiente (SMA 79) que estabelece os padrões de emissões de compostos poluentes para incineradores de RSU com recuperação de energia.”

6.1 Unidade de Recuperação Energética (URE)

A incineração com recuperação de energia é o processo de tratamento térmico de RSU mais empregado a nível mundial atualmente, sendo feita a temperaturas acima de 800 °C. Os gases de combustão são mantidos em torno de 1.200 °C por cerca de 2 segundos, com excesso de ar e turbulência elevados, a fim de garantir a conversão total dos compostos orgânicos presentes no RSU a gás carbônico e água.

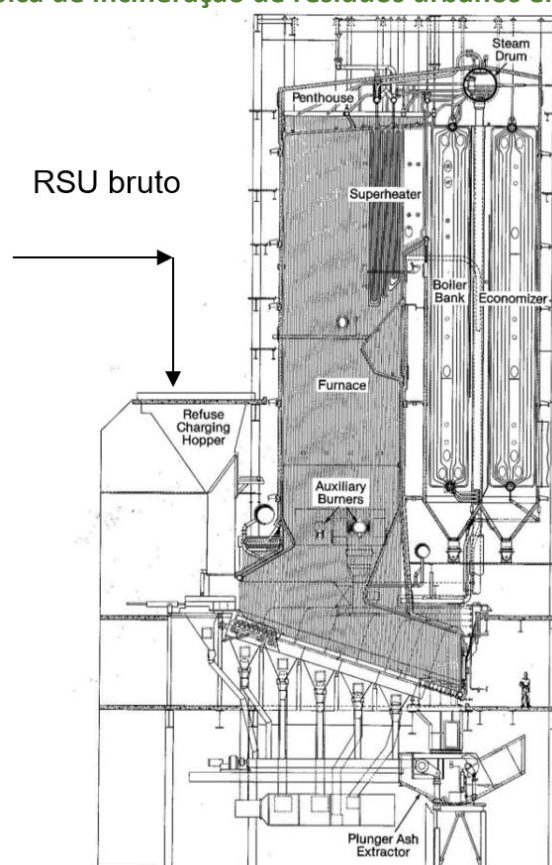
Devido à presença no RSU de compostos não encontrados nos combustíveis convencionais, como metais pesados e compostos clorados, que levam à formação de compostos poluentes mesmo com a adoção de boas técnicas de combustão (temperaturas, tempos de residência, teores de oxigênio e turbulências elevados na câmara de combustão), todo equipamento de incineração, independente da sua potência, deve ser equipado com um sistema eficiente de limpeza de gases.

As tecnologias de limpeza hoje disponíveis permitem atingir padrões de emissão abaixo dos exigidos pelas legislações mais restritivas e, contrariamente ao conceito geral existente, a incineração em equipamentos mais modernos pode apresentar vantagens, em termos ambientais, em relação a outros meios de disposição, como, por exemplo, o aterro sanitário. Mesmo os aterros sanitários dotados de sistemas de captação e aproveitamento energético do gás de aterro (cerca de 50 % em volume de metano) não conseguem captar todo o metano gerado, atingindo um percentual de aproveitamento de no máximo 50 % ao longo do tempo de vida do aterro. Os gases não aproveitados são descarregados diretamente na atmosfera, impactando no efeito estufa. Na incineração, a emissão de gases de efeito estufa se restringe ao dióxido de carbono, sem emissão de metano, gás com efeito estufa 21 vezes maior do que o CO₂. Além do metano, os aterros também emitem outros poluentes (dioxinas e furanos, chorume etc.), o que tem levado países desenvolvidos (principalmente do Mercado Comum Europeu e Japão) a imporem uma redução gradativa no tempo para o teor de material orgânico do resíduo enviado a aterros sanitários.

A incineração com geração de energia elétrica ou vapor para aquecimento também contribui para a redução de emissão global de CO₂, na medida em que parte significativa do material orgânico presente nos resíduos é oriunda de fonte renovável (alimentos, papéis, podas de árvores etc.), substituindo combustíveis fósseis.

Atualmente a tecnologia que predomina na incineração de RSU é a queima em grelha basculante (cerca de 90 % da capacidade mundial instalada), mostrada na **Figura 19**.

Figura 19 - Unidade típica de incineração de resíduos urbanos em grelha basculante



Fonte: Babcock & Wilcox Company, 2005.

Nos incineradores de RSU bruto, o material é alimentado na forma em que chega à usina de incineração, sem nenhum tipo de tratamento prévio. O RSU, depois de pesado, é descarregado em um fosso onde o material inicialmente é revolvido por garras suspensas em pontes rolantes para homogeneização da carga. Este mesmo dispositivo carrega o silo de alimentação, de onde o material é descarregado, através de êmbolos hidráulicos, para dentro da câmara de combustão do incinerador.

A grelha inclinada, do tipo basculante, desloca o resíduo através da câmara de combustão, provocando o seu revolvido e a sua exposição às regiões de alta

temperatura. Durante este deslocamento o material vai se aquecendo e passa por região de secagem, perda de compostos orgânicos voláteis, combustão do resíduo carbonoso, e sai da câmara de combustão, ao final da grelha, com uma pequena quantidade de material orgânico ainda presente, na forma de carvão. Este tipo de grelha pode operar com materiais com granulometrias bastante variadas, o que o torna bastante adequado à incineração de RSU em estado bruto.

Cerca de 60 % do ar de combustão é introduzido por baixo da grelha e o restante entra por sobre a carga. O ar injetado, por baixo da grelha, normalmente é preaquecido, e tem a função de resfriá-la, bem como auxiliar na secagem e combustão do RSU. O ar introduzido por sobre a grelha é injetado em alta velocidade para promover a sua mistura com os gases e vapores combustíveis gerados durante a decomposição térmica do RSU. A temperatura na região sobre a grelha atinge temperaturas da ordem de 1200 °C, decompondo a maioria dos compostos orgânicos a CO₂ e água.

Os gases de combustão, ao saírem desta região, trocam calor com as paredes do incinerador e trocadores de calor, gerando vapor, que pode ser utilizado para gerar energia elétrica ou para fins de aquecimento.

Na combustão de RSU, além do CO₂ e água, também podem se formar gases extremamente corrosivos e tóxicos como ácido clorídrico, cloro, ácido sulfúrico, óxido nitroso, dioxina e furanos etc. Desta forma, as tubulações metálicas localizadas em regiões próximas às grelhas têm de ser revestidas com material refratário e a temperatura de superaquecimento de vapor tem de se limitar a 420 °C, para evitar a corrosão acelerada dos superaquecedores. Temperaturas maiores podem ser atingidas, exigindo o revestimento dos superaquecedores com ligas metálicas resistentes aos gases ácidos como inconel, de custo muito elevado. Na saída desta região, os gases ainda a cerca de 400 °C, passam por mais uma seção de recuperação de calor, normalmente pré-aquecendo o ar de combustão. Os gases de combustão, resfriados a cerca de 250 °C, são enviados para sistemas de tratamento de gases para remoção de gases ácidos, óxido nitroso, material particulado, dioxinas e furanos e metais pesados eventualmente presentes. Existem diversos sistemas de limpeza de gases atualmente em uso em escala comercial, alguns dos quais apresentam eficiências de remoção de poluentes bastante elevadas. Para abatimento dos poluentes em geral se adiciona aos gases uréia, leite de cal e carvão ativado.

Ao final da grelha, a fração orgânica do RSU deve estar quase totalmente consumida, restando uma fração predominantemente inorgânica, denominada cinza de fundo. Na prática, uma pequena fração orgânica ainda sai com as cinzas, na forma de carvão. Estas cinzas são apagadas em um tanque de água e depois de desaguadas, são enviadas para disposição final. A redução de volume obtida na incineração é de cerca de 90 % e de massa 70 %, gerando como efluente um resíduo inerte em sua maioria, que pode

ser disposto em aterros sanitários comuns (Classe II), prolongando o seu tempo de vida, e permite a reciclagem de metais (retirados das cinzas). Essas cinzas também podem ser utilizadas como agregados de material de construção e quando enviadas para aterros não emitem gases de efeito estufa e não geram chorume, permitindo a ocupação da área do aterro imediatamente após o seu encerramento.

Os sistemas de limpeza de gases, por sua vez, geram um material sólido fino (aproximadamente 10 % do total de cinzas geradas), em geral com carga de material tóxico elevada, e que podem, dependendo da concentração destes produtos, passar por um processo de inertização (mistura com concreto) ou disposição em aterros especiais tipo Classe I (resíduos perigosos).

Uma primeira lista de fornecedores de equipamentos de incineração em grelha basculante é apresentada no **Quadro 5**.

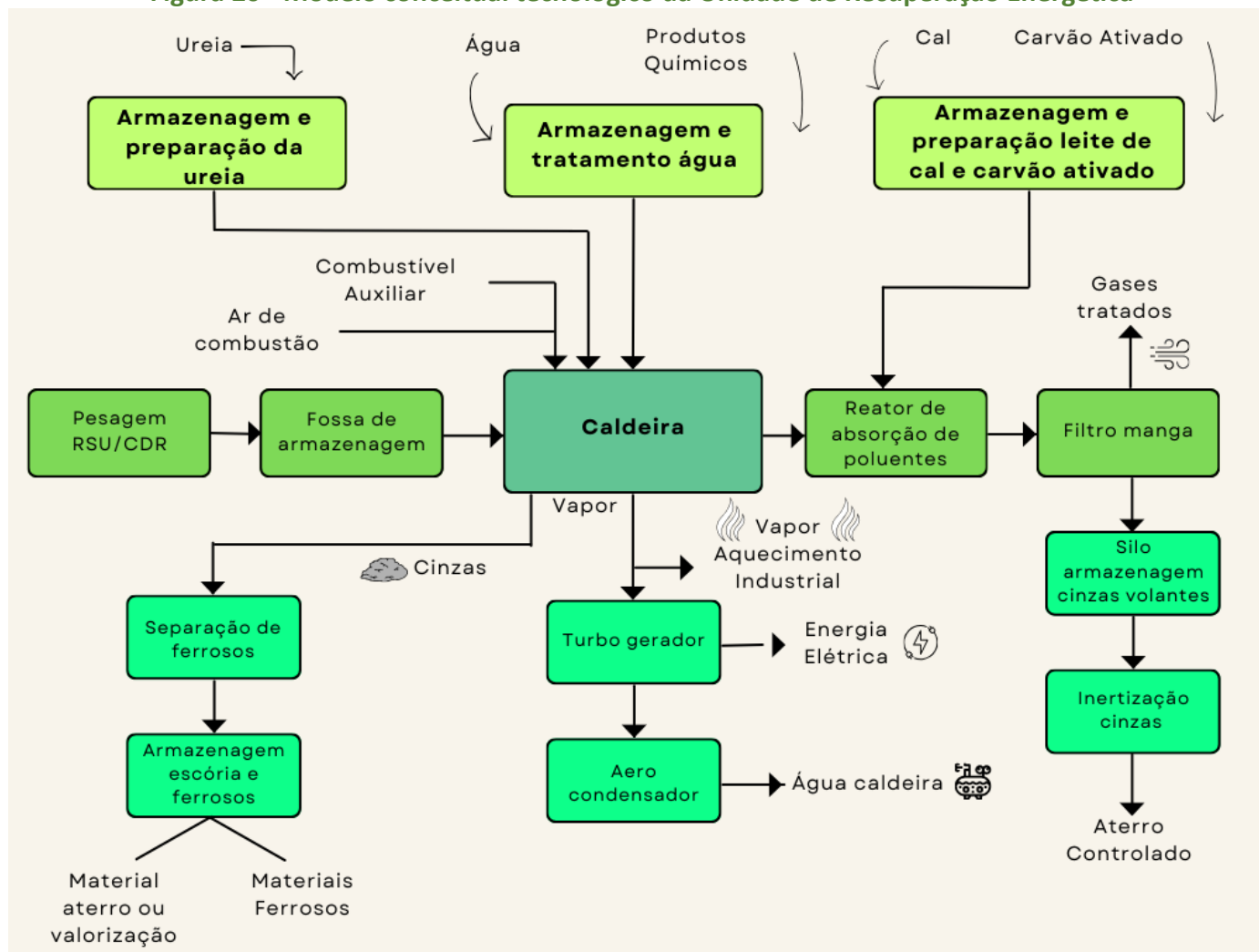
Quadro 5 - Lista de alguns fornecedores de equipamentos de

Fabricante	Maior capacidade produzida (t/dia)	Número de plantas instaladas
Martin	1.200	389
Keppel Seghers	800	~35
Fisia Babcock	960	59
Babcock & Wilcox Vølund	640	50
Hitachi Zosen Inova	920	~480
Kawasaki Heavy Industries	450	200-300 plantas pequenas no Japão
Mitsubishi Heavy Industries	?	~250
JFE	450	120

Fonte: WSP ENVIRONMENTAL LIMITED, 2013.

O modelo conceitual tecnológico da Unidade de Incineração com Recuperação Energética é apresentado na **Figura 20**. A infraestrutura mínima dessa Unidade é composta por área de recebimento, estocagem e manipulação de resíduos; Grelhas móveis; Caldeira para geração de vapor; Distribuição de ar primário; Removedor de escórias (cinza pesada); Injeção de reagente para tratamento dos gases; Reator para tratamento dos gases; Filtros para retenção de cinza leve; Silo para cinza leve; Lavador de gases; Chaminé; Torre de resfriamento; Turbogenerador a vapor; Trocador de calor; Tanque de alimentação de água e sistema de controle e análise de emissões. O desempenho de redução de massa desta tecnologia gira em torno dos 80 %.

Figura 20 - Modelo conceitual tecnológico da Unidade de Recuperação Energética

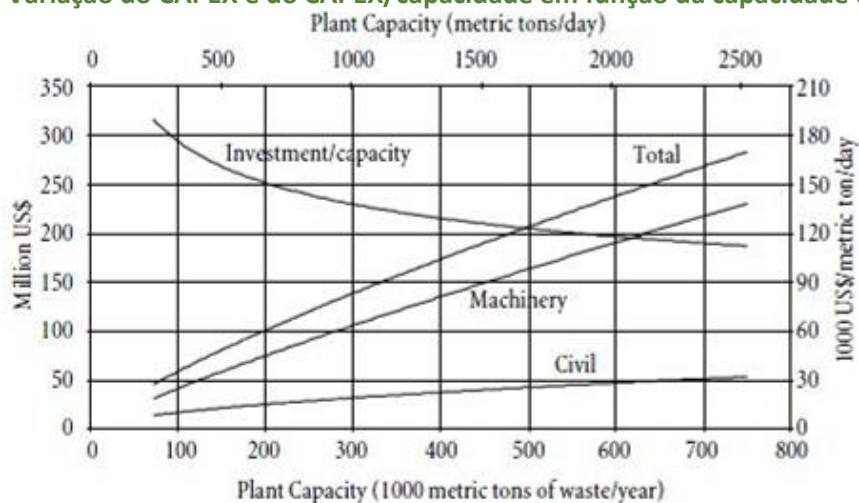


Fonte: Elaborado pelos autores.

6.1.1 Custos de instalação e de operação

O investimento num incinerador com recuperação de energia e sistema de limpeza de gases varia de acordo com a sua capacidade, segundo o gráfico mostrado na **Figura 21**. O custo de incineração do RSU, por sua vez, além de depender da capacidade do incinerador, depende do preço de venda da energia recuperada e do poder calorífico do RSU. Quanto maior a capacidade do incinerador, maior o preço de venda da energia elétrica e maior o poder calorífico do RSU, menor é o custo de incineração.

Figura 21 - Variação do CAPEX e do CAPEX/capacidade em função da capacidade do incinerador



Fonte: World Bank, 1999.

Segundo estudo do Banco Mundial (World Bank, 1999), cerca de 58 % do custo de incineração é devido ao CAPEX e 42 % ao OPEX.

A recuperação da energia contida no RSU pode dar-se na forma de geração de energia elétrica, elétrica e térmica, ou somente térmica. A forma com menor custo de disposição de RSU é a geração térmica, pois dispensa o investimento em turbinas a vapor e geradores elétricos, reduzindo significativamente o CAPEX, além de apresentar eficiências de aproveitamento energético da ordem de 60 % a 70 %. Nos países tropicais, essa alternativa fica prejudicada, pois nesses locais não há a necessidade de calefação nas residências, principal consumidor dessa fonte de energia. Somente em situações especiais, como no caso da existência de um polo industrial consumidor de energia térmica próximo ao incinerador é que essa forma pode se viabilizar, uma vez que o transporte de vapor d'água a longa distância é inviável.

Nos países tropicais, a alternativa mais viável é a geração de energia elétrica, o que aumenta o CAPEX e o custo de disposição de RSU. Além disso, devido à presença de gases corrosivos no interior dos incineradores, o superaquecimento do vapor d'água fica limitado

a temperaturas em torno de 450 °C, o que leva a baixos rendimentos de geração de energia elétrica em incineradores com recuperação de energia, da ordem de 22 % a 25 %. Como referência, a eficiência de geração em termoelétricas de combustíveis fósseis tem ficado acima de 35 %. Incineradores mais modernos, com utilização de materiais mais resistentes à corrosão, ou operando com ciclos híbridos (associação de turbinas a gás natural e incineradores), têm atingido rendimentos maiores, da ordem de 31 %.

6.1.2 Benefícios e impactos ambientais

A incineração de RSU, além de levar a uma redução significativa de massa (70 %) e volume (90 %) do RSU, gera cinzas em sua maioria inertes, que podem ser descartadas com segurança em aterros, prolongando o seu tempo de vida e reduzindo as emissões de poluentes (chorume e gases de efeito estufa).

Além disso, os sistemas de limpeza de gases dos incineradores comerciais atuais, chamados de sistemas de terceira e quarta geração, garantem níveis de emissões bem abaixo dos padrões de emissão mais exigentes, menores até do que de equipamentos de combustão de combustíveis fósseis, como carvão mineral e óleo combustível. Esses sistemas são compostos principalmente por lavagem e filtragem.

Os gases que saem da câmara de combustão do incinerador passam por um lavador seco ou úmido para a retirada de gases ácidos como HCL, HF, SO₂, e, em seguida, por filtros de tecidos onde ficam retidas as partículas finas e só então são lançados para a atmosfera pela chaminé.

Além dos dispositivos de controle citados, atualmente as plantas de incineração com recuperação de energia utilizam um leito de carvão ativado, ou pulverizado, para a retenção de dioxinas, furanos, compostos orgânicos voláteis não queimados e metais pesados.

6.1.3 Identificação de tendências de evolução

A tecnologia de incineração já se encontra plenamente desenvolvida, em estágio comercial há mais de 25 anos, e a sua implantação no Brasil esbarra principalmente na questão do custo elevado de incineração em relação ao aterro sanitário. Essa realidade está mudando rapidamente em função do esgotamento de aterros existentes e necessidade de deslocamentos cada vez maiores para aterrar o RSU, o que tem elevado o custo de disposição para inúmeros municípios. Os incineradores em operação comercial no mundo normalmente estão situados próximos aos locais de geração de RSU, reduzindo drasticamente a logística e o custo de transporte, favorecendo esta tecnologia.

O CAPEX ainda é um dos fatores que mais pesam no custo de disposição via incineração e a busca de formas de redução via, por exemplo, a nacionalização dos

principais componentes de incineradores ou adoção de tecnologias de limpeza de gases mais baratas (mas não menos eficientes e seguras. Outras formas de redução de custo, como isenções fiscais do empreendimento ou preços incentivados para a energia elétrica gerada, como os já existentes para as energias renováveis, também podem favorecer significativamente o empreendimento, viabilizando economicamente a execução de projetos de parceria pública e privada.

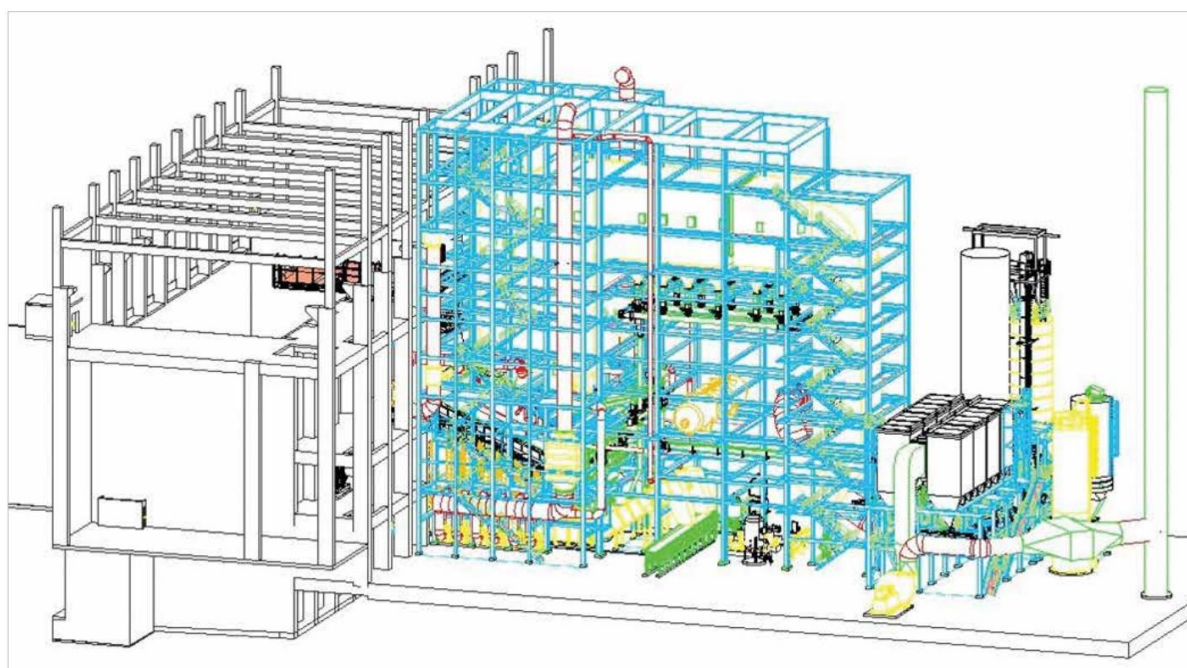
Finalmente, com o agravamento do aquecimento global, ações que levem a uma redução na emissão de gases de efeito estufa, como a taxação da emissão desses gases (o que tende a aumentar o custo de aterro de RSU com teores elevados de material orgânico) serão cada vez mais incentivadas, favorecendo a implantação da incineração com recuperação de energia no Brasil.

No âmbito nacional, as iniciativas de aproveitamento energético de resíduos ainda são muito tímidas, sendo fundamental fortalecê-las como ferramenta complementar de destinação adequada de resíduos (Brasil, 2022). Atualmente, não existem incineradores de RSU com recuperação de energia operando em escala comercial no Brasil. Entretanto, diversos projetos têm avançado na obtenção de suas licenças ambientais e contratos em leilão de energia, destacam-se Barueri, Mauá, Rio de Janeiro, Consimares e Santos. Os itens a seguir apresentam informações sobre as capacidades destas plantas:

- Barueri: a URE Barueri está projetada para tratamento térmico de RSU e CDR, e terá capacidade para tratar 825 t/dia, com potência instalada de 20 MW de energia.
- Mauá: a URE está projetada com uma capacidade instalada para tratar 4.000 t/dia de resíduos e potência instalada de 80 MW.
- Rio de Janeiro: a URE do Caju está projetada para tratar 1.200 t/dia (cerca de 14 % dos resíduos coletados em toda cidade do Rio de Janeiro) e potencial de geração de 30 MW de energia, o suficiente para abastecimento de uma população de 200 mil pessoas.
- Consimares: está projetada para ser instalada no município de Nova Odessa com capacidade para tratar 1.000 t/dia, e potência instalada de 20 MW de energia.
- Santos: a URE Valoriza está projetada com capacidade de geração de 50 MWh de energia elétrica e termovalorização de 2.000 toneladas/dia de resíduos provenientes da Baixada Santista.

A URE Barueri, a mais avançada de todas, já possui Licença de Instalação, e foi contratada no leilão A-5 em set/2021, teve suas obras iniciadas em 2022, com previsão do início da operação, em 2025, a **Figura 22** apresenta os dados do projeto desta URE.

Figura 22 – Exemplo projeto da URE Barueri



Tipo Combustível	Resíduos Sólidos Urbanos
Área da planta	37.237 m ²
Volume do bunker	6.045 m ³
Poder Calorífico Inferior	6.700 kJ/kg
Número de linhas	1
Capacidade térmica	64 MWth
Capacidade processamento	825 TPD
Saída de vapor da caldeira	76.500 kg/hr
Pressão vapor	53 bara
Temperatura vapor	400 °C
Produção eletricidade bruto	17 MWeI
Capacidade tratamento de gases	155.000 Nm ³ /hr
Tratamento de gases	Seco (cal + carvão), filtro de mangas & SNCR

Fonte: Revolução verde, 2015.

6.2 Unidade de Disposição Final Aterro Sanitário com Aproveitamento Energético

Nota-se que o módulo aterro aparece em todas as combinações, tendo em vista a necessidade de um período de transição até que seja possível instalar plantas de processamento e tratamento dos resíduos. A proposição é de que seja instalado um aterro, com projeto de recuperação energética, podendo ser iniciado em no mínimo 5 anos a partir

da sua operação, e que dentro do seu licenciamento já haja o planejamento da redução de resíduos dispostos ao longo dos anos por meio de redução e segregação na fonte e por meio de processamento e tratamento dos resíduos. Ou seja, considerando a grande dificuldade de áreas para disposição de resíduos, o aterro faz parte do conceito de sistema integrado e deverá no futuro receber apenas **rejeitos**.

Porém devido ao cenário crítico de exaurir as possibilidades de destinação final na região, foram avaliados alguns cenários “emergenciais” licenciáveis foram considerados para serem implementados a curto prazo, junto das alternativas. Estas soluções podem ser permanentes ou temporárias em período de transição neste cenário crítico, e são dependentes do processo de licenciamento da CETESB, são elas:

- Construção de aterro novo;
- Autorização da ampliação do aterro Terrestre Ambiental em Santos (hoje com vida útil até 2025);
- Disposição em aterro externo à Região (Lara em Mauá);
- Autorização da utilização de áreas de antigos lixões para novos aterros;
- Ampliação do uso do transbordo para separação de resíduos de coleta regular (redução para aterro e produção de Combustível Derivado de Resíduo Urbano - CDRU).

*A recuperação energética de um aterro novo só será possível a partir de no mínimo 5 anos, tempo necessário para início da geração de biogás.

Considerações

a) Construção de aterro novo

Uma alternativa avaliada seria a construção de um novo aterro para a destinação dos resíduos da Baixada Santista. Para a implantação do aterro, estima-se que este poderia ser utilizado apenas a partir do ano de 2026, visto que necessitaria de um período de pré-implantação, provavelmente desenvolvido entre os anos de 2024 e 2026. As etapas de pré-implantação, implantação, operação, encerramento e pós-encerramento foram previstas conforme Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos (2009), e estão apresentados na **Tabela 22**. Conforme apresentado no prognóstico, existe uma série de dificuldades em termos de escolha e licenciamento de áreas para implantação dos aterros sanitários, como principal forma de destinação.

Tabela 22 – Instalação de um novo aterro

Ação	Descrição	Prazos
Pré-implantação	Estudo detalhado de viabilidade técnica, econômica, legal e socioambiental da área escolhida; avaliação técnica e de documentação da área, entre outros. Aquisição do terreno (com ou sem desapropriação); regularização da documentação; registro do imóvel; impostos e taxas; Projeto de licenciamento: levantamento planialtimétrico e cadastral, sondagens, ensaios geotécnicos e geofísicos, projeto básico, plano de trabalho (RAP ou EIA/RIMA, audiência públicas. Licença prévia; licença do DEPRN, outorga do DAEE.	2024
Implantação	Infraestrutura geral: engenharia detalhada, contratação de empreiteiros, implantação de canteiros, topografia da área, cercamento, instalação de poços de monitoramento, amostragem de água subterrânea e superficial, pavimentação das vias de acesso; instalação de sistemas de abastecimento de água, esgoto, elétrica e telefônica; Células de disposição: terraplenagem, limpeza das áreas de disposição e adicionais; instalação de sistemas de drenagem, impermeabilização e de controle de qualidade de obras e insumos; Sistema de tratamento de líquido percolado: rede coletora, estação elevatória, reservatório de acumulação; Instalação de sistemas de tratamento de líquidos percolados, sistema de drenagem de águas superficiais e de áreas verdes; Instalação de apoio: portarias, guaritas, vigilância, adores de rodas, galpão de manutenção e de apoio operacional, escritórios, administração áreas de lazer, etc. Licenciamento de instalação, taxa de compensação ambiental; alvará de funcionamento.	2025
Operação	Operação das células de disposição de resíduos; disposição dos resíduos; controle e tratamento de percolados e gases; controle e drenagem de águas superficiais; manutenção de áreas verdes; monitoramento ambiental e geotécnico entre outras atividades diversas.	2024 a 2044
Encerramento e pós-encerramento	Obras de encerramento; tratamento de percolados, manutenção de áreas verdes, monitoramento ambiental e geotécnico	2044 a 2064

Fonte: Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos (2009).

b) Autorização da ampliação do aterro Terrestre Ambiental em Santos

Quanto a alternativa da ampliação do aterro Terrestre Ambiental, mesmo que esta seja autorizada, estima-se que a vida útil seria ampliada para cerca de no máximo 5 anos, ou seja, seria o tempo para implementar novas unidades e ir reduzindo paulatinamente o envio de resíduos para esta área, podendo até mesmo aumentar esta vida útil.

c) Disposição em aterro externo à Região (Lara em Mauá)

Outra alternativa de destino dos resíduos no ano de 2019, seria o aterro Lara de Mauá. O aterro recebe, em torno de 3.000 t/dia de resíduos, dos municípios de: Diadema,

Itanhaém, Mauá, Rio Grande da Serra, Ribeirão Pires, São Bernardo do Campo e São Caetano do Sul. A área do aterro tem capacidade para receber 3.500 t/dia. E já possui o projeto de instalação da URE que poderá receber ainda 4.000 t/dia de resíduos.

Neste caso, foram avaliados alguns dos impactos ambientais e econômicos que o transporte dos resíduos à Mauá causariam à Baixada Santista (**Tabela 23**). Segundo dados da Abetre (2009), um caminhão compactador emite cerca de 1,24 Kg de CO₂ por quilômetro rodado. Apesar do transporte para Mauá ser realizado com caminhão caçamba basculante, de 38 m³, foi considerado o mesmo valor de emissão de CO₂. Pelo fato deste valor de emissão ser considerado para o caminhão cheio, os cálculos consideraram apenas as emissões da ida do caminhão até o aterro, as emissões na volta não foram estimadas.

Tabela 23 – Transportar resíduos para Mauá – dados para o ano de 2019

Município	Quantidade de resíduos transportado (t/dia)	Quantidade de caminhões necessários ³	Distância percorrida do transbordo ao aterro		Estimativa de emissões gasosas do transporte até o aterro (mil kg/ano)	
			Aterro atual	Aterro de Mauá	Aterro atual	Aterro de Mauá
Bertioga	77	4	41	100	223	543
Cubatão ¹	154	7	28	60	266	570
Guarujá	405	19	14	80	361	2.064
Itanhaém ¹	96	5	113	113	747	747
Mongaguá	58	3	74	95	301	387
Peruíbe ²	77	4	5	127	27	690
Praia Grande	270	13	47	72	830	1.271
Santos	520	25	40	70	1.358	2.376
São Vicente ¹	270	13	33	65	583	1.147
Baixada Santista	1.927	93	383	782	4.630	9.795

¹Distância do marco zero do município até o aterro; ²Distâncias do marco zero até o aterro municipal e do aterro municipal até o aterro de Mauá; ³Cada caminhão realizando três viagens por dia.

Fonte: Elaborado pelos autores.

d) Autorização da utilização de áreas de antigos lixões para novos aterros;

A alternativa de utilizar, temporariamente, os lixões encerrados, a caráter de urgência, deve ser avaliada junto aos órgãos ambientais e estarão condicionadas a apresentação de um plano de encerramento e readequação dos lixões.

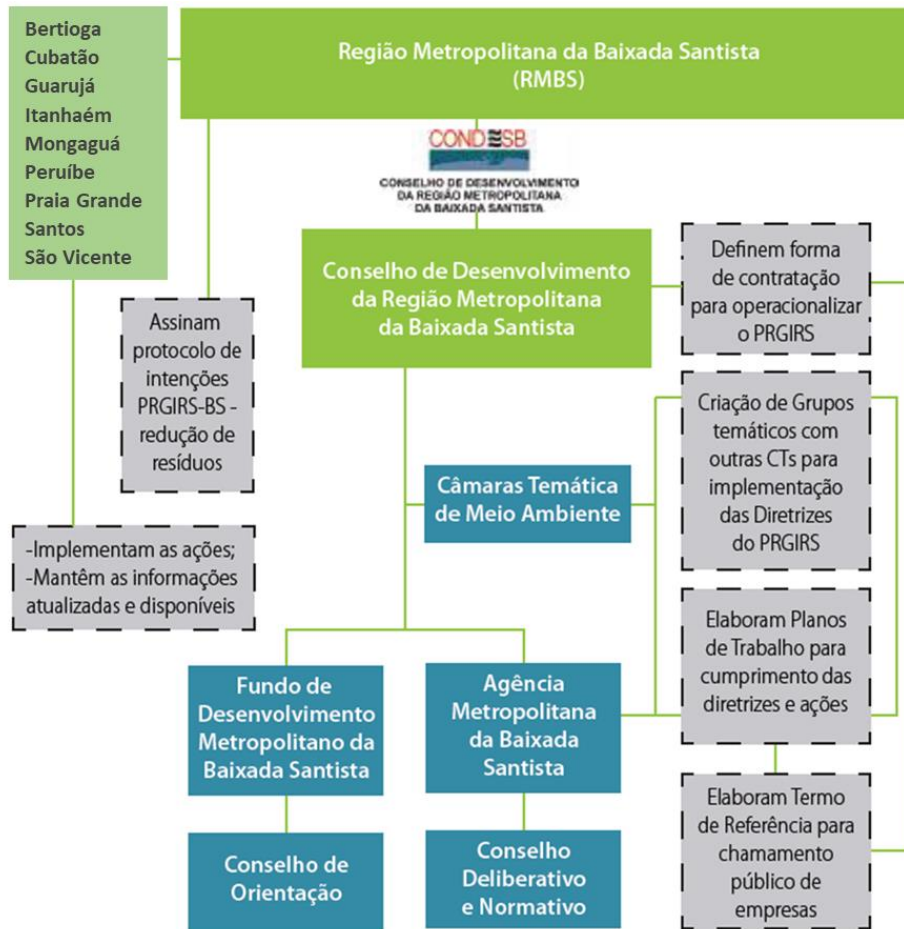
7. Alternativas Institucionais e de Gestão

Os municípios brasileiros são os responsáveis, em primeira instância, por lidar e equacionar o problema dos RSU, organizando os sistemas de gerenciamento e de gestão que depende do correto entendimento e equacionamento dos fatores que afetam a gestão de resíduos nas diferentes etapas do sistema, desde a coleta até a disposição final (GUERREIRO; MAAS; HOGGLAND, 2013). Por ausência de recursos (financeiros, técnicos e operacionais), os municípios enfrentam uma série de dificuldades para operar o sistema de forma direta, e o modelo mais adotado é terceirização, com contratos de empresas privadas, geralmente por 12 meses, estendidos no máximo por até 60 meses. Esses prazos são considerados curtos para viabilizar uma visão de longo prazo (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, 2018). Por esse motivo alternativas institucionais e de gestão como, por exemplo, concessões, Parcerias Público-Privadas (PPPs), gestão consorciada, podem ser estratégicas, permitindo ganho de escala e planejamento de longo prazo, com a possibilidade de investimento em novas tecnologias, por exemplo.

A lei Complementar Estadual no 815, de 30 de julho de 1996, que criou a região metropolitana da Baixada Santista, prevê as funções públicas de interesse comum, incluindo os seguintes campos funcionais: planejamento e uso do solo; transporte e sistema viário regional; habitação; saneamento básico, meio ambiente; desenvolvimento econômico; e atendimento social. Em relação ao interesse comum “resíduo sólido”, pode-se dizer que a região metropolitana da Baixada Santista e o primeiro arranjo institucional uma vez que congrega os nove municípios da Baixada Santista, os quais são os geradores e os responsáveis pela gestão dos resíduos sólidos urbanos. O plano regional idealizado pelo Condesb e Agem e a materialização da intenção de unir esforços entre os municípios na busca de soluções com caráter regional. Atualmente, cada município possui contratos individualizados com empresas, muitos deles abarcando da coleta a destinação final em um mesmo contrato. A seguir estão apresentados possíveis critérios de agregação dos municípios e possíveis arranjos institucionais.

O PRGIRS-BS tem como arranjo institucional central a estrutura organizacional da Região Metropolitana da Baixada Santista (**Figura 23**), a qual desempenhará funções na implementação do plano. Uma forma de buscar o atendimento da PNRS (BRASIL, 2010), com a implantação de sistemas de tratamento de resíduos, é conjugar esforços por meio de agregação dos municípios e possíveis arranjos institucionais e ações microrregionais, conforme proposto no PRGIRS/BS (IPT, 2018).

Figura 23 – Possível arranjo institucional da região metropolitana da Baixada Santista



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2018.

Na elaboração do PRGIRS/BS foi sugerido que o CONDESB criasse uma pauta específica junto aos municípios para que estes se comprometessem com as diretrizes de redução do plano por meio da assinatura de um protocolo de intenções. Este protocolo foi a ação que materializou a intenção dos nove municípios discutirem a questão e terem ações pensadas na questão de resíduos de forma regional. A Câmara Temática do Meio Ambiente e Saneamento juntamente com a AGEM, deve discutir agora a criação de grupos de trabalhos em torno das diretrizes do plano para a definição de uma agenda de implementação das ações, sugerindo ainda uma articulação com outras secretarias como a de políticas públicas, educação, entre outras, e a participação do Estado.

A Agência Metropolitana da Baixada Santista (AGEM/BS) é uma autarquia que desempenha papel de secretaria executiva do Conselho de Desenvolvimento da Região Metropolitana da Baixada Santista (CONDESB), conselho paritário, formado por

representantes do Estado, Prefeitos Municipais e sociedade civil. O CONDESB tem caráter normativo e deliberativo e a ele estão vinculadas a Câmara Temática do Meio Ambiente e Saneamento e fóruns consultivos, nos quais a questão da gestão de resíduos sólidos vem sendo discutida.

Cabe à Câmara Temática do Meio Ambiente e Saneamento e AGEM, coordenarem ações para elaboração do edital para chamamento público de empresas para oferecer as tecnologias de processamento e tratamento de resíduos para as unidades microrregionais. Conjuntamente o CONDESB, junto ao Estado de São Paulo, deve estabelecer a forma de contratação, utilizando como base o Novo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei Federal nº 14.026), com possibilidades como uma PPP, consórcio, concessão, etc.

Por se tratar de prestação de serviços envolvendo a responsabilidade da gestão pública e a iniciativa privada, sua operação pode ser realizada diretamente, de forma centralizada ou descentralizada; ou indiretamente, por concessão, por meio de processo de licitação, e por gestão associada, que compreende o Consórcio Público ou a Cooperação Técnica, via contrato de programa (Lei nº 11.107/2005 e Decreto nº 6.017/07).

Desse modo, a gestão de resíduos sólidos, de acordo com a visão do Poder Público, pode ser realizada das seguintes formas (PPIAF, 2011 apud FUNDAÇÃO DE APOIO AO DESENVOLVIMENTO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, 2014):

I Pela Administração Pública (Gestão Pública própria), por meio de administração direta; administração indireta (via uma autarquia, empresa pública ou sociedade de economia mista).

II De forma consorciada com outros entes públicos, via consórcio público ou convênio associativo (Gestão Pública Consorciada).

III Mediante delegação a iniciativa privada, a qual pode ser efetivada por meio de:

a. Concessão, nas suas modalidades:

— Concessão de serviço público comum – consórcio público;

— PPP – concessão patrocinada;

— PPP – concessão administrativa ou

— Concessão urbanística.

b. Permissão;

c. Autorização, sujeita a regulação setorial, caso não se relacione a serviço público.

A escolha de um dos modelos apresentados é de extrema importância, pois permite que o setor privado invista recursos em infraestrutura, com remuneração proveniente do Poder Público, sem depender necessariamente de tarifas dos usuários. Além disso, a adoção desse modelo deve atrair investimentos e expertise do setor privado, aliviando o Poder Público da responsabilidade direta na execução de atividades específicas. Dado o alto investimento necessário para a criação da infraestrutura, a utilização de um contrato administrativo nos termos da Lei Federal n.º 8.666/93, revogada pela Lei nº 14.133/21, não é viável.

É importante ressaltar que o sucesso do empreendimento depende, em grande parte, das definições e combinações de tecnologias, o que implica em riscos inerentes ao investimento privado. Além disso, a amortização dos investimentos ocorrerá em prazos seguramente superiores a 15 anos, tornando os contratos de longo prazo uma necessidade para assegurar a viabilidade do projeto.

Um ponto relevante para a implantação e operacionalização de um sistema de limpeza urbana regional, o qual atende mais de um titular em determinado território é a necessidade de uniformizar a regulação, a fiscalização, a remuneração e a compatibilidade com o planejamento determinado pelo prestador (Art.14, incisos I, II e III da Lei de Saneamento). Sugere-se no aprofundamento da integração das ações para a regionalização da gestão de resíduos definindo as competências dos municípios e do arranjo ou arranjos que serão estabelecidos.

Atuando nessas dimensões tem-se uma rede de atores que exercem diferentes influências nos sistemas de gerenciamento. Alguns desses atores são responsáveis diretos e uma atuação integrada entre eles é desejada para o bom funcionamento do sistema. A política nacional de resíduos sólidos traz, em seu artigo 6º, que: “São princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos: [...] VI - a cooperação entre as diferentes esferas do poder público, o setor empresarial e demais segmentos da sociedade” (BRASIL, 2010a), devendo ainda se prever atividades que garantam a sociedade informações e participação na formulação, implementação e avaliação das políticas públicas relacionadas aos resíduos sólidos (sendo estas denominadas de controle social). A PNRS trouxe o conceito da responsabilidade compartilhada, retratada no Capítulo III, Seção I, artigo 25: “O poder público, o setor empresarial e a coletividade são responsáveis pela efetividade das ações voltadas para assegurar a observância da Política Nacional de Resíduos Sólidos” (BRASIL, 2010a).

Contudo, a tomada de decisão em um ambiente de muitas variáveis e muitos atores dificulta o consenso, visto que, muitas vezes, não são definidos, a priori, os critérios a serem considerados e a forma de serem analisados. O grande desafio é definir critérios e analisá-

los dentro de um princípio democrático que atenda os anseios da maioria e que traga avanços para a gestão de resíduos da região, objeto do esforço dispendido na elaboração do plano e desta segunda etapa do trabalho.

O presente modelo conceitual apresentado, que incluiu aspectos técnicos e conceituais e os modelos tecnológicos das unidades de triagem; unidades de tratamento de resíduos orgânicos; unidade de tratamento de rejeitos e unidade de disposição final; servirá para a elaboração do processo de consulta pública e licitação, onde será construído o Termo de Referência e o projeto básico. Como sugestão são apresentados a seguir alguns itens básicos que devem constar nas propostas:

- I. Parâmetros para a proposta técnica
- II. Projeto Executivo
- III. Licenciamento Ambiental
- IV. Execução da Obra
- V. Operação do Sistema
- VI. Veículos, máquinas e equipamentos
- VII. Pessoal
- VIII. Sistema Informatizado de Controle
- IX. Atualização Tecnológica
- X. Fiscalização
- XI. Cronograma de implantação e operação do sistema
- XII. Plano de negócio

8. Considerações finais

A condução dos estudos pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e a Agência Metropolitana da Baixada Santista (AGEM) para a elaboração do Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PRGIRS) reflete um comprometimento significativo com a sustentabilidade na região propondo soluções integradas entre os nove municípios da Baixada Santista, destacando-se por metas, estratégias e um plano de ações para aprimorar continuamente a gestão de resíduos.

A segunda etapa do projeto, iniciada em 2020, evidencia o compromisso da Região em avaliar a efetividade do PRGIRS, analisando a implementação das ações e propondo instrumentos para a continuidade do processo. Destaca-se a importância dos Guias elaborados, que contribuem para o fortalecimento de sistemas descentralizados e adaptáveis aos volumes de resíduos específicos de cada município, considerando sempre a realidade da Baixada Santista, fornecendo subsídios técnicos para elaboração de projetos e fornecendo informações que subsidiem a tomada de decisões do poder público para

alcançar as metas de redução de resíduos sólidos destinados aos aterros sanitários, e reforça a aplicabilidade das diretrizes técnicas apresentadas.

Ao alinhar as ações propostas com a Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Novo Marco do Saneamento, a Baixada Santista demonstra um comprometimento com os requisitos legais e diretrizes estabelecidas, visando a gestão sustentável dos resíduos sólidos. A busca por alternativas institucionais e de gestão, aliada à promoção da conscientização e educação ambiental, evidencia uma visão abrangente para enfrentar os desafios futuros.

Em síntese, o modelo conceitual de processamento apresentado neste documento surge como um instrumento valioso, fornecendo especificações técnicas de diferentes rotas tecnológicas que se complementam na missão de reduzir ao máximo a quantidade dos resíduos dispostos em aterro. A atenção aos detalhes técnicos, a análise criteriosa dos cenários econômicos e temporais, e a busca pela melhor combinação tecnológica reforçam a solidez do plano para promover a gestão sustentável dos resíduos sólidos na Baixada Santista.

A implementação de uma rota térmica com recuperação de energia, apesar de ter enfrentado resistência, destaca-se como uma estratégia para superar as restrições relacionadas à escassez de áreas disponíveis para novos aterros sanitários. A abertura do mercado para empresas oferecerem seus serviços e o estabelecimento de uma figura institucional de longo prazo são imperativos para viabilizar esse e os demais investimentos de todas as unidades previstas para que esse sistema possa ser viabilizado. Nesse contexto, a consideração cuidadosa de aspectos técnicos, sociais, econômicos e ambientais na escolha das alternativas tecnológicas ressalta uma abordagem conceitual equilibrada e viável.

A Região em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e o Novo Marco do Saneamento vem atendendo aos requisitos e diretrizes estabelecidos por essas legislações ao apresentar o PRGIRS e sua atualização. Os estudos que compõem o PRGIRS da Baixada Santista apontaram a necessidade de implementar ações integradas e estratégicas para promover a gestão sustentável dos resíduos sólidos na região. Essas ações incluem a redução da geração de resíduos, o estímulo à reciclagem, a melhoria da coleta seletiva, o tratamento adequado de resíduos orgânicos, a promoção da logística reversa e a busca por alternativas institucionais e de gestão que permitam planejamento a longo prazo e investimento em tecnologias avançadas. Portanto, o presente documento intitulado modelo conceitual tecnológico do sistema de processamento de resíduos sólidos da baixada santista, trouxe a especificação técnica de um conjunto de tecnologias e processos, visando que a destinação final em aterros sanitários seja apenas de rejeito. O

nível de detalhamento permite a combinação destas tecnologias em função do fluxo de resíduos e pode subsidiar a elaboração do projeto básico das unidades.

9. Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS. **Estudo sobre os aspectos econômicos e financeiros da implantação e operação de aterro sanitários**. São Paulo: Fundação Getúlio Vargas – FGV Projetos, 2009.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Visão 2035: Brasil, país desenvolvido: agendas setoriais para alcance da meta**. 1. ed. Rio de Janeiro: BNDES, 2018.

BIOFERM ENERGY SYSTEMS. **Statement of Qualifications**. **Madison: Bioferm**, 2015. Disponível em <<ftp://ftp.aidea.org/REFund/Round%209/Applications/1227%20City%20of%20Hoonah%20Waste%20to%20Energy%20Project/BioFerm%20Hoonah%20Feasibility%20Study.pdf>>. Acesso em: 1 dez. 2023.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2022. **Plano Nacional de Resíduos**. Brasília, 2022. Brasil, 2022a. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/acao-informacao/acoes-e-programas/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano_nacional_de_residuos_solidos-1.pdf. Acesso em: 01 de nov. De 2023.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Lei do Saneamento. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 11 jan. 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 01 nov. 2023.

BRASIL. Decreto nº 10.936 de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 12 jan. 2022. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=DEC&numero=10936&ano=2022&data=12/01/2022&ato=2f2UTRE1kMZpWTb9a>. Acesso em: 30 maio 2023.

BRASIL. Decreto nº 6.017, de 17 de janeiro de 2007. Regulamenta a Lei no 11.107, de 6 de abril 2005, que dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 18 jan. 2007.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 03 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm. Acesso em: 30 maio 2023.

BRASIL. Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005. Dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 7 abr. 2005.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Lei do Saneamento. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 11 jan. 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 08 nov. 2023.

BRASIL. LEI Nº 14.026, DE 15 DE JULHO DE 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. **Diário Oficial da União**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em 5 dez. 2023.

BRASIL. Lei nº 14.133, de 1 de abril de 2021. Lei de Licitações e Contratos Administrativos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 1 abr. 2021. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/L14133.htm. Acesso em: 01 de nov. de 2023.

Brown D.& Li, Y. Solid state anaerobic co-digestion of yard waste and food waste for biogas production. **Bioresource Technology** 127 (2013) 275–280.

CARVALHO, M. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 1999. 300 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

CIMPAN, C. et al. Central sorting and recovery of MSW recyclable materials: a review of technological state - of- the-art, cases, practice and implications for materials recycling. **Journal of Environmental Management**, v. 156, p. 181-199, 2015.

CIMPAN, C. et al. Techno-economic assessment of central sorting at material recovery facilities e the case of lightweight packaging waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, part 5, p. 4387-4397, Jan. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, **Nota Técnica DEA 18/14** – Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro: EPE, 2014. 50 p.

FRICKE, K.; SANTEN, H.; WALLMANN, R. Comparison of selected aerobic and anaerobic procedures for MSW treatment. **Waste Management**, 2014.

FADE – Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco. **Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão**. BNDES, jun. 2014.

GOMEZ, A. C. G. **Caracterização da fração combustível de resíduos sólidos urbanos úmidos do município de Santo André visando seu aproveitamento energético por processos termoquímicos**. 2016. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do ABC, Santo André, 2016.

GUERRERO, L. A.; MAAS, G.; HOGLAND, W. Solid waste management challenges for cities in developing countries. **Waste Management**, v. 33, n. 1; p. 220–232, 2013.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Agência Metropolitana da Baixada Santista. **Plano Regional de gestão integrada de resíduos sólidos da Baixada Santista**,

PRGIRS/BS. São Paulo: IPT, Santos: AGEM, 2018. Disponível em: https://www.agem.sp.gov.br/wp-content/uploads/2023/01/20180600-DC-PRGIRS_BS_compressed.pdf. Acesso em: 05 maio 2023.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Relatório Técnico 153896-250.** RSU Energia: um programa IPT de apoio às prefeituras nas decisões relativas a resíduos sólidos urbanos. Fase 2 – montagem e desenvolvimento (finalização) e início da fase 3 – Operação e monitoramento. São Paulo, 2018.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Relatório Técnico 158839-250.** Desenvolvimento de sistema integrado para escoamento de materiais recicláveis por meio de uma interface digital acoplada ao processo de pesagem - COOPERARI. São Paulo, 2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Guia: implantação de unidades de compostagem para tratamento de resíduos orgânicos** [livro eletrônico]. São Paulo: IPT -Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; SP:IPT, 2023. Disponível em: <https://ipt.br/residuossolidosbaixadasantista/>. Acesso em 26 de janeiro de 2024.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Guia: sistemas de logística reversa no contexto dos municípios** [livro eletrônico]. São Paulo: IPT -Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; SP:IPT, 2024. Disponível em: <https://ipt.br/residuossolidosbaixadasantista/>. Acesso em 26 de janeiro de 2024.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Guia: sistemas de recuperação de resíduos recicláveis secos** [livro eletrônico]. São Paulo: IPT -Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; SP:IPT, 2024. Disponível em: <https://ipt.br/residuossolidosbaixadasantista/>. Acesso em 26 de janeiro de 2024.

INSTITUTO VIA PÚBLICA, CLIMATE WORKS FOUNDATION. **Estudo de alternativas de tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos. Incinerador *mass burn* e Biodigestor anaeróbio. Subsídios técnicos à elaboração dos Planos Locais de Gestão dos Resíduos Sólidos.** 2012. 40 p.

Jha A. K., Li J., Nies L., Zhang L. Research advances in dry anaerobic digestion process of solid organic wastes. **African Journal of Biotechnology**. Vol. 10(65), pp. 14242-14253, 24 October, 2011.

JOINT POWERS AUTHORITY. **Technical Advisory Committee Breakout Session.** Monterey: Monterey Regional Waste Management District. Environmental Services Joint Powers' Authority Board of Directors Meeting, 2013. Disponível em: <http://www.esjpa.org/meetings/2013/0321/ESJPA_TAG_pp_143_176.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2023.

Li Y., Park S.Y., Zhu J. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 15 (2011) 821–826.

LIPPEL. **Informações gerais da homepage.** Disponível em: < <https://www.lippel.com.br/>>. Acesso em: 29 de jan. 2024.

LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E.; CORTI, A. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. **Waste Management**, v. 37, p. 26-44, Mar. 2015.

Ministério de Meio Ambiente (MMA). **Projeto 3E: Eficiência Energética em Edificações**. Governo Federal, Brasília, 2023. Disponível em: <<https://www.mme.gov.br/projeteee/estrategia/ventilacao-natural/>>. Acesso em 01 novembro de 2023.

Munhoz, C. P. (2015). CONTRATOS DE PARCERIAS PÚBLICO-PRIVADAS NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS – ESTUDOS DE CASO. *Revista De Direito Sanitário*, 16(3), 57-74. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9044.v16i3p57-74>

Prefeitura de Bertioga. **Prefeitura de Bertioga participa de oficina sobre Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <https://www.bertioga.sp.gov.br/prefeitura-de-bertioga-participa-de-oficina-sobre-gestao-integrada-de-residuos-solidos>. Acesso em: 11 dez. 2023.

PROBIOGÁS, 2015. RSU – **O Estado da Arte da Tecnologia da Metanização Seca**. Autores: Luis Felipe de Dornfeld Braga Colturato, Felipe Correia de Souza Pereira Gomes, Tathiana Almeida Seraval, Thiago Dornfeld Braga Colturato. Publicado por Projeto Brasil–Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil – PROBIOGÁS.

REVOLUÇÃO VERDE. Ribeirão Preto - Sp: Revista Painel, 2015. Disponível em: <https://aeaarp.org.br/wp-content/uploads/2022/08/No-261-Dezembro-de-2016.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2023.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLOM, M.; VERVAEREN, H. **Techniques for transformation of biogas to biomethane**. Biomass and Bioenergy, n. 35, 2011, pp. 1633-1645.

SÃO PAULO. SECRETARIA MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE-SMA. **Resolução SMA nº 79/2009**, Diário Oficial, Poder Executivo, sessão I, PUBLICAÇÃO EM 05/11/2009.

BABCOCK & WILCOX COMPANY. **Steam/its generation and use**. 41st edition. Editors: John B. Kitto and Steven C. Stultz. The Babcock & Wilcox Company, Barberton, Ohio, U.S.A. 2005

TORRES, Gabriela. **Valor do metro quadrado na construção civil em 2023: dados e tendências**. 2023. Sienge. Disponível em: <https://www.sienge.com.br/blog/valor-do-metro-quadrado-na-construcao-civil-2022/>. Acesso em: 11 dez. 2023.

TSILEMOU, K.; PANAGIOTAKOPOULOS, D. Approximate cost functions for solid waste treatment facilities. **Waste Management & Research**, v. 24, n. 4, p. 310-322, 2006.

UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME. **Global waste management outlook**. Washington, DC: UNEP, 2015.

UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE. **Technology Readiness Assessment (TRA) Guidance**. Washington, DC: UNDD, 2011. 21 p.

WORLD BANK. **Technical Guidance Report on Municipal Solid Waste Incineration**. Washington, DC.: The World Bank, 1999.