

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

JUDITE INÊS BERSCH

**A CONTRIBUIÇÃO DE INICIATIVAS PRIVADAS DE COLETA E COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS
ORGÂNICOS PARA A REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DO GERENCIAMENTO DE
RESÍDUOS SÓLIDOS NO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE/RS**

Porto Alegre

2018

Judite Inês Bersch

**A CONTRIBUIÇÃO DE INICIATIVAS PRIVADAS DE COLETA E COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS
ORGÂNICOS PARA O GERENCIAMENTO INTEGRADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO MUNICÍPIO
DE PORTO ALEGRE/RS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas e Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Carolina Badalotti Passuello

Coorientadora: Me. Michele Ferreira Dias

Porto Alegre

2018

Judite Inês Bersch

**A CONTRIBUIÇÃO DE INICIATIVAS PRIVADAS DE COLETA E COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS
ORGÂNICOS PARA O GERENCIAMENTO INTEGRADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO MUNICÍPIO
DE PORTO ALEGRE/RS**

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de bacharel em engenharia ambiental e aprovado na sua forma final pela professora orientadora.

Data da aprovação: 11 de janeiro de 2018.

Profa. Ana Carolina Badalotti Passuello
Dra. pela Universitat Rovira i Virgili
Orientadora

Michele Ferreira Dias
Doutoranda pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Coorientadora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Ana Carolina Badalotti Passuello (CLN-UFRGS)
Dra. pela Universitat Rovira i Virgili

Prof. Gino Roberto Gehling (IPH-UFRGS)
Dr. pela Universidade Politécnic de Catalunya

Régis Pereira Waskow (LEAMET-UFRGS)
Doutorando pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a contribuição de iniciativas privadas de coleta e compostagem de resíduos orgânicos para minimizar os impactos ambientais relacionados a sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, no contexto do município de Porto Alegre. A Re-Ciclo, uma empresa de pequeno porte atuante no mesmo município, foi selecionada como modelo para a geração de cenários de gerenciamento integrado de resíduos sólidos. Foram estudados diferentes modelos para o gerenciamento de resíduos, através da metodologia da ACV, em três estudos complementares. Inicialmente foi feita uma comparação do impacto ambiental potencial do processo de compostagem com o da destinação de resíduos a aterro sanitário, por tonelada de resíduo gerenciado. Em seguida, foi feita uma avaliação da relevância ambiental da atuação de pequenas empresas na coleta e compostagem de resíduos orgânicos diante do contexto do gerenciamento municipal de resíduos sólidos. Por fim, três cenários foram avaliados, considerando que a compostagem de resíduos orgânicos seja oferecida a 100% dos domicílios do município. Os resultados mostram que o modelo utilizado pela Re-Ciclo gera menos impacto ambiental potencial do que o modelo utilizado pelo DMLU, quando considerados os impactos por tonelada de resíduo gerenciado. A redução dos indicadores de impacto ambiental potencial variou desde 12,5% para o potencial de eutrofização até 94,8% para o potencial de aquecimento global. Por outro lado, quando tomados dentro do contexto do gerenciamento municipal de resíduos sólidos, estas reduções são menos significativas. Benefícios ambientais podem ser percebidos quando os serviços privados de compostagem são oferecidos a, pelo menos, 5% dos domicílios do município. Estes cenários exigem uma multiplicidade de empresas de pequeno porte atuando na coleta e compostagem dos resíduos orgânicos domiciliares, o que pode comprometer a sua viabilidade. Em cenários que consideram uma adesão total do município a processos de compostagem, o modelo de compostagem domiciliar se mostrou o mais eficaz dentre os sistemas estudados.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos, Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos, Compostagem, Avaliação do Ciclo de Vida, ACV, Re-Ciclo.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the contribution of private biowaste collection and composting enterprises to minimize environmental impacts related to urban solid waste systems in Porto Alegre. A small sized enterprise operating in this city, named Re-Ciclo, was selected as a model for the generation of Integrated Waste Management scenarios. Several models for managing solid waste were evaluated by the LCA technique, through three complementary studies. Initially, a comparison was made between the potential environmental impacts of the composting process and the impacts of solid waste disposal in a landfill, per ton of solid waste managed. Then, an evaluation of the environmental relevance of small composting enterprises in the context of municipal solid waste management was carried out. Finally, three scenarios were studied, all of which considering that composting services are offered to 100% of the municipal households. The results show that the model used by Re-Ciclo generates less potential environmental impacts than the model used by DMLU, when considering the impacts per ton of solid waste managed. The reduction of potential environmental impact indicators ranged from 12,5% for the eutrophication potential to 94,8% for the global warming potential. In contrast, the reductions within the context of municipal solid waste management were less significant. Environmental benefits may be perceived when private composting services are offered to, at least, 5% of the households. These scenarios require a manifoldness of small enterprises collecting and composting household biowaste, which may compromise their viability. In scenarios that consider a total adhesion of the municipality to composting processes, the domicile composting model was the most effective among the systems studied.

Keywords: Solid Waste, Integrated Waste Management, Composting, Life Cycle Assessment, LCA, Re-Ciclo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dimensões da sustentabilidade.....	19
Figura 2 – Esquema do balanço de massas e energia de um processo genérico.....	21
Figura 3 – Percentuais de massa de Resíduos Domiciliares e Públicos e respectivas destinações nos municípios participantes do SNIS no ano de 2015, segundo tipo de unidade	31
Figura 4 – Composição dos RSOD gerados no município de Porto Alegre: ano base 2010	41
Figura 5 – Limites do sistema no Modelo base DMLU e no Modelo base PEC.....	51
Figura 6 – Limites do sistema no cenário 1	57
Figura 7 – Limites do sistema nos cenários 2 a 6	57
Figura 8 – Limites do sistema no cenário 7 ^a	59
Figura 9 – Limites do sistema no cenário 7b	60
Figura 10 – Limites do sistema no cenário 7c	60
Figura 11 – Impacto ambiental potencial para aquecimento global: 1 tonelada de resíduos gerenciados pelo Modelo base DMLU e pelo Modelo base PEC	62
Figura 12 – Impacto ambiental potencial para toxicidade humana: 1 tonelada de resíduos gerenciados pelo Modelo base DMLU e pelo Modelo base PEC	63
Figura 13 – Impacto ambiental potencial para formação de foto-oxidantes: 1 tonelada de resíduos gerenciados pelo Modelo base DMLU e pelo Modelo base PEC	65
Figura 14 – Impacto ambiental potencial para acidificação: 1 tonelada de resíduos gerenciados pelo Modelo base DMLU e pelo Modelo base PEC.....	67
Figura 15 – Impacto ambiental potencial para eutrofização: 1 tonelada de resíduos gerenciados pelo Modelo base DMLU e pelo Modelo base PEC.....	68
Figura 16 – Impacto ambiental potencial para aquecimento global do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n ^{os} 1, 2, 3, 4, 5 e 6	71
Figura 17 – Impacto ambiental potencial para toxicidade humana do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n ^{os} 1, 2, 3, 4, 5 e 6	73
Figura 18 – Impacto ambiental potencial para formação de foto-oxidantes do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n ^{os} 1, 2, 3, 4, 5 e 6.....	74
Figura 19 – Impacto ambiental potencial para acidificação do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n ^{os} 1, 2, 3, 4, 5 e 6.....	76

Figura 20 – Impacto ambiental potencial para eutrofização do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n ^{os} 1, 2, 3, 4, 5 e 6.....	77
Figura 21 – Impacto ambiental potencial para aquecimento global do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n ^{os} 1, 7a, 7b e 7c.....	81
Figura 22 – Impacto ambiental potencial para toxicidade humana do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n ^{os} 1, 7a, 7b e 7c.....	82
Figura 23 – Impacto ambiental potencial para formação de foto-oxidantes do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n ^{os} 1, 7a, 7b e 7c.....	84
Figura 24 – Impacto ambiental potencial para acidificação do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n ^{os} 1, 7a, 7b e 7c.....	85
Figura 25 – Impacto ambiental potencial para eutrofização do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n ^{os} 1, 7a, 7b e 7c.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de unidades de processamento e disposição de resíduos no solo com informações atualizadas dos municípios participantes do SNIS em 2015 e massa total de resíduos recebidos nas mesmas unidades.....	30
Tabela 2 – Dados utilizados para a construção do Modelo base DMLU.....	45
Tabela 3 – Dados utilizados para a construção do Modelo base PEC.....	46
Tabela 4 – Dados variáveis entre os diferentes cenários de estudo.....	48
Tabela 5 – Dados variáveis entre os cenários 1, 7a, 7b e 7c.....	50
Tabela 6 – Fatores de caracterização para cada categoria de impacto.....	55
Tabela 7 – Indicadores de impacto potencial para aquecimento global: 1 tonelada de resíduos gerenciados pelo Modelo base DMLU e pelo Modelo base PEC (kg CO ₂ equivalente).....	62
Tabela 8 – Indicadores de impacto potencial para toxicidade humana: 1 tonelada de resíduos gerenciados pelo Modelo base DMLU e pelo Modelo base PEC (kg 1,4-dichlorobenzeno equivalente).....	63
Tabela 9 – Indicadores de impacto potencial para formação de foto-oxidantes: 1 tonelada de resíduos gerenciados pelo Modelo base DMLU e pelo Modelo base PEC (kg etileno equivalente).....	65
Tabela 10 – Indicadores de impacto potencial para acidificação: 1 tonelada de resíduos gerenciados pelo Modelo base DMLU e pelo Modelo base PEC (kg SO ₂ equivalente).....	66
Tabela 11 – Indicadores de impacto potencial para eutrofização: 1 tonelada de resíduos gerenciados pelo Modelo base DMLU e pelo Modelo base PEC (kg PO ₄ equivalente).....	67
Tabela 12 – Redução do impacto ambiental potencial total do gerenciamento de 1 tonelada de resíduos pelo Modelo base PEC, em relação ao Modelo base DMLU.....	69
Tabela 13 – Indicadores de impacto potencial para aquecimento global do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n ^{os} 1, 2, 3, 4, 5 e 6 (kg CO ₂ equivalente).....	71
Tabela 14 – Indicadores de impacto potencial para toxicidade humana do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n ^{os} 1, 2, 3, 4, 5 e 6 (kg 1,4-dichlorobenzeno equivalente).....	72

Tabela 15 – Indicadores de impacto potencial para formação de foto-oxidantes do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n ^{os} 1, 2, 3, 4, 5 e 6 (kg etileno equivalente)	74
Tabela 16 – Indicadores de impacto potencial para acidificação do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n ^{os} 1, 2, 3, 4, 5 e 6 (kg SO ₂ equivalente).....	75
Tabela 17 – Indicadores de impacto potencial para eutrofização do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n ^{os} 1, 2, 3, 4, 5 e 6 (kg PO ₄ equivalente).....	77
Tabela 18 – Redução nos indicadores de impacto ambiental potencial do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano para os cenários nos 2, 3, 4, 5 e 6, relativamente ao cenário n ^o 1.....	78
Tabela 19 – Consumos e gerações do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano para os cenários n ^{os} 1, 2, 3, 4, 5 e 6	79
Tabela 20 – Indicadores de impacto potencial para aquecimento global do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n ^{os} 1, 7a, 7b e 7c (kg CO ₂ equivalente).....	80
Tabela 21 – Indicadores de impacto potencial para toxicidade humana do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n ^{os} 1, 7a, 7b e 7c.....	82
Tabela 22 – Indicadores de impacto potencial para formação de foto-oxidantes do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n ^{os} 1, 7a, 7b e 7c.....	83
Tabela 23 – Indicadores de impacto potencial para acidificação do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n ^{os} 1, 7a, 7b e 7c (kg SO ₂ equivalente).....	84
Tabela 24 – Indicadores de impacto potencial para eutrofização do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n ^{os} 1, 7a, 7b e 7c (kg PO ₄ equivalente)	86
Tabela 25 – Redução nos indicadores de impacto ambiental potencial do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano para os cenários n ^{os} 7a, 7b e 7c, relativamente ao cenário no 1	87
Tabela 26 – Consumos e gerações do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano para os cenários n ^{os} 1, 7a, 7b e 7c	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida
CML	<i>Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden</i> (Instituto de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden)
CRR	Central de Resíduos do Recreio
CRVR	Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
DMLU	Departamento Municipal de Limpeza Urbana
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
PEC	Pequenas Empresas de Compostagem
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSOD	Resíduos sólidos ordinários domiciliares
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i> (Programa Ambiental das Nações Unidas)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS	17
2.1. Objetivo geral.....	17
2.2. Objetivos específicos.....	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1. Avaliação do Ciclo de Vida	18
3.1.1. Diretrizes metodológicas	22
3.2. Gestão de resíduos sólidos urbanos	24
3.2.1. Gestão de resíduos sólidos no Brasil.....	28
3.2.2. Gestão de resíduos sólidos em Porto Alegre	31
3.2.3. Compostagem no gerenciamento dos resíduos sólidos domiciliares.....	33
3.2.4. ACV aplicada a Resíduos Sólidos	36
4. METODOLOGIA.....	39
4.1. Caracterização dos sistemas estudados	39
4.1.1. Sistema de coleta e disposição em aterro sanitário - DMLU.....	40
4.1.2. Sistema de coleta e compostagem - PEC	42
4.1.3. Composição dos cenários.....	44
4.2. Avaliação do Ciclo de Vida	50
4.2.1. Compostagem vs. aterro sanitário.....	50
4.2.2. Pequenas empresas de compostagem	56
4.2.3. Cobertura total.....	58
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1. Compostagem vs. aterro sanitário.....	61
5.1.1. Aquecimento global	61
5.1.2. Toxicidade humana	63
5.1.3. Formação de foto-oxidantes.....	64
5.1.4. Acidificação	66
5.1.5. Eutrofização.....	67

5.1.6. Considerações gerais.....	68
5.2. Pequenas empresas de compostagem	70
5.2.1. Aquecimento global	70
5.2.2. Toxicidade humana	72
5.2.3. Formação de foto-oxidantes	73
5.2.4. Acidificação	75
5.2.5. Eutrofização.....	76
5.2.6. Considerações gerais.....	77
5.3. Cobertura total.....	79
5.3.1. Aquecimento global	80
5.3.2. Toxicidade humana	81
5.3.3. Formação de foto-oxidantes	83
5.3.4. Acidificação	84
5.3.5. Eutrofização.....	85
5.3.6. Considerações gerais.....	87
6. CONCLUSÕES	89
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
APÊNDICE A – Termo de consentimento para a coleta de informações de empresa/instituição	98
APÊNDICE B – Controle de coleta de resíduos orgânicos pela Re-Ciclo: nov/2016 a ago/2017	100
APÊNDICE C – Inventário de emissões para os cenários analisados	105

1. INTRODUÇÃO

A crescente geração de resíduos sólidos, fruto de alterações nos padrões de consumo aliadas ao crescimento populacional, vêm gerando uma preocupação cada vez maior com o destino a ser dado a este material. Connet (2013) afirma que o tema se tornou fonte de preocupação a partir da Revolução Industrial, quando as inovações tecnológicas e produtivas passaram a moldar uma sociedade de consumo linear, em que os materiais são extraídos da natureza, transformados e descartados após sua utilização, em uma velocidade que supera a capacidade de retorno dos materiais à natureza.

A finitude dos recursos naturais é uma ameaça urgente que vem sendo largamente discutida nos últimos 50 anos. Cada vez mais, os debates sobre a sustentabilidade da vida na Terra estão deixando os limites da esfera científica e chegando até os governos e os cidadãos.

No Brasil, o ponto de virada na questão da gestão dos resíduos sólidos veio com a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305 de 2010, e pelo Decreto nº 7.404 de 2010, que a regulamenta. Este instrumento traz em suas diretrizes conceitos fundamentais como o desenvolvimento sustentável, o pensamento do ciclo de vida, a responsabilidade compartilhada e a integração social (BRASIL, 2010). Assim, o poder público passa a reconhecer que a questão dos resíduos sólidos deve ser trabalhada dentro da perspectiva da sustentabilidade.

Assim como o poder público, também as comunidades têm despertado para a importância da problemática dos resíduos. Iniciativas privadas de compostagem urbana têm surgido recentemente no país e são cada vez mais frequentes. Nos municípios do Rio de Janeiro/RJ, Florianópolis/SC, Brasília/DF e Porto Alegre/RS, por exemplo, empresas de pequeno porte se dedicam à coleta e compostagem de resíduos orgânicos em pequena escala, no intuito de dar um destino sustentável à parcela orgânica dos resíduos domiciliares, desviando-os da disposição final em aterro sanitário. Em Porto Alegre, a empresa Re-Ciclo atua desde 2016 prestando o serviço de coleta e compostagem de resíduos sólidos, além de realizar atividades de educação ambiental e incentivar a compostagem domiciliar através da venda de minhocários.

A compostagem da parcela orgânica dos resíduos domiciliares reduz os volumes totais de resíduos enviados a aterros sanitários, proporcionando benefícios ambientais, sociais e econômicos.

Do ponto de vista ambiental, estes processos resultam na menor geração de gases de efeito estufa, tanto pela diminuição do volume de resíduos a transportar por longas distâncias até o aterro sanitário, quanto pela diminuição do volume de resíduos sofrendo decomposição anaeróbia nos aterros sanitários. Além disso, ao diminuir o envio de resíduos aos aterros, estes têm a sua vida útil prolongada.

Do ponto de vista econômico, é importante lembrar que o gerenciamento dos resíduos sólidos requer o emprego de grandes quantias de verba pública pelos municípios. No ano de 2015, 56,7% dos municípios brasileiros não realizaram cobrança pela prestação de serviços de coleta, transporte e destinação de resíduos sólidos domiciliares, arcando integralmente com os custos do sistema. No caso específico do município de Porto Alegre/RS, a prefeitura cobra dos moradores uma taxa referente à gestão de resíduos sólidos, porém o valor arrecadado cobre aproximadamente 65% dos custos com o sistema: em 2015, a receita foi de R\$99,88 por habitante enquanto as despesas correspondentes foram de R\$153,26 por habitante. No mesmo ano, os serviços relacionados à gestão de resíduos consumiram 4,57% da verba da prefeitura de Porto Alegre (BRASIL, 2017).

Do ponto de vista social, a compostagem da parcela orgânica dos resíduos sólidos leva a uma maior conscientização ambiental dos cidadãos e à prática da segregação dos resíduos no ato de sua geração. Isto pode refletir positivamente no sucesso de outros aspectos relacionados ao gerenciamento de resíduos sólidos, como a coleta seletiva de resíduos recicláveis, por exemplo, incentivando de forma indireta a geração de emprego e renda junto a cooperativas de catadores.

A maior dificuldade para o sucesso das iniciativas privadas de coleta e compostagem é a percepção de valor do serviço oferecido, uma vez que essas empresas precisam repassar ao cidadão/cliente os custos da atividade realizada. É importante, portanto, tornar mais tangíveis os impactos benéficos e adversos (ambientais, econômicos e sociais) propiciados por esses empreendimentos.

Ao mesmo tempo, tais iniciativas se caracterizam por trabalhar com pequenos volumes de resíduos orgânicos em municípios de grande população, o que acaba por levantar dúvidas acerca da sua relevância diante do contexto da gestão de resíduos sólidos de todo um município. Assim, a questão de pesquisa que este trabalho se propõe a responder é: em que medida iniciativas privadas de coleta e compostagem podem colaborar para minimizar o impacto ambiental de sistemas de gerenciamento integrado de RSU?

Este estudo se limita à avaliação dos impactos ambientais potenciais relativos aos sistemas avaliados. Não são abordados os impactos sociais e econômicos derivados dos mesmos sistemas, nem tampouco os aspectos de viabilidade técnica, financeira e logística associados à sua implantação. Os modelos e cenários avaliados se referem exclusivamente ao gerenciamento de resíduos sólidos ordinários domiciliares (RSOD), que são constituídos por resíduos orgânicos e rejeitos, conforme definido pela Lei Complementar nº 728/2014 (PORTO ALEGRE, 2014). Não são considerados, portanto, os resíduos sólidos de limpeza urbana, os recicláveis e os especiais, tais como móveis, resíduos eletrônicos ou resíduos de construção civil. A área geográfica de abrangência se restringe ao município de Porto Alegre/RS.

O trabalho tem por premissa a viabilidade da integração de múltiplas empresas de pequeno porte, atuantes na coleta e compostagem de resíduos orgânicos, ao sistema de gestão municipal de resíduos sólidos em Porto Alegre.

Para a elaboração dos modelos e cenários avaliados, é utilizada a estratégia do estudo de caso, tendo como objeto a Re-Ciclo, uma empresa de pequeno porte voltada para a coleta e compostagem de resíduos orgânicos no município de Porto Alegre. É pressuposto deste estudo, portanto, que as iniciativas privadas de coleta e compostagem de resíduos orgânicos atuem segundo os mesmos padrões e procedimentos que a empresa citada.

A metodologia adotada é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao gerenciamento integrado de RSU, e o estudo se divide em três etapas, sendo realizada uma ACV para cada uma delas. Inicialmente será feita uma comparação do impacto ambiental do processo de compostagem com o impacto ambiental da destinação de resíduos a aterro sanitário. Em seguida, será avaliada a relevância, em termos de redução do impacto ambiental, do modelo de gerenciamento utilizado pela Re-Ciclo no contexto do gerenciamento de RSU no município de Porto Alegre. Por fim, serão estudados cenários em que a compostagem seja ofertada à totalidade dos domicílios do município.

O próximo capítulo define os objetivos geral e específicos do presente trabalho. A seguir, no capítulo três, é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito dos temas relevantes para a realização deste estudo. Inicialmente é feita uma apresentação da ferramenta de ACV, incluindo um resgate histórico do seu desenvolvimento e a explanação das suas diretrizes metodológicas. Em seguida, é apresentada uma revisão sobre a problemática da gestão de RSU, com ênfase nos contextos brasileiro e porto-alegrense. Também são abordadas questões relativas ao papel da compostagem na gestão de RSU. Encerrando o capítulo, são levantados aspectos referentes à utilização da ferramenta de ACV no gerenciamento integrado de resíduos sólidos.

No capítulo quatro é feita uma descrição da metodologia utilizada para a realização deste trabalho. Para tanto, apresenta-se uma caracterização do sistema de gerenciamento de RSOD atualmente conduzido pelo Departamento Municipal de Limpeza Urbana de Porto Alegre (DMLU), bem como do sistema de coleta e compostagem utilizado pela empresa Re-Ciclo. Em seguida, é feita uma descrição dos modelos e cenários avaliados em cada uma das etapas do estudo, seguida da apresentação dos objetivos e escopo de cada uma das ACVs realizadas. Os métodos utilizados para a Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e para a Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV) também são apresentados.

O capítulo cinco traz os resultados obtidos em cada uma das etapas do estudo e as respectivas discussões que deles se derivam. Por fim, no capítulo seis são apresentadas as conclusões a que se pode chegar ao final do estudo e retomadas as limitações de especial relevância para a interpretação dos resultados.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo avaliar a contribuição de pequenas empresas de coleta e compostagem de resíduos orgânicos na redução de impactos ambientais relacionados ao gerenciamento dos RSU no município de Porto Alegre.

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar o impacto ambiental da compostagem de 1 tonelada de resíduos orgânicos domiciliares, realizada por uma empresa de pequeno porte, em comparação com o impacto ambiental da disposição de 1 tonelada de RSOD em aterro sanitário.
- Avaliar o impacto ambiental do gerenciamento integrado dos RSOD gerados no município ao longo de 1 ano, incluindo compostagem realizada por empresas de pequeno porte e disposição final em aterro sanitário, em cenários que diferem entre si quanto à cobertura do serviço de compostagem.
- Avaliar o impacto ambiental do gerenciamento integrado dos RSOD gerados no município ao longo de 1 ano, incluindo a oferta de serviços de compostagem e disposição final em aterro sanitário a 100% dos domicílios, em cenários que diferem entre si quanto ao sistema adotado para a compostagem dos resíduos orgânicos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

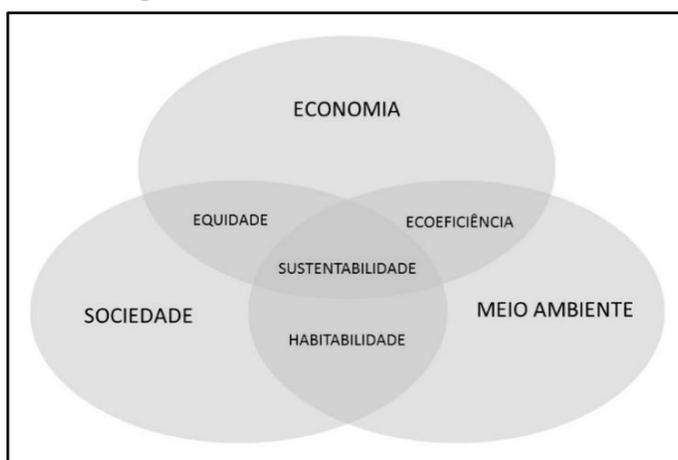
Neste capítulo, apresenta-se uma revisão bibliográfica acerca dos principais temas abordados no presente trabalho. Inicialmente, será feita uma breve explanação da ferramenta da ACV, iniciando por um resgate do contexto histórico e cultural que levou ao seu desenvolvimento, seguido pela apresentação das principais características desta metodologia. Em um segundo momento, procede-se uma revisão sobre a problemática da gestão dos RSU, incluindo uma apresentação dos principais aspectos envolvidos nos contextos brasileiro e porto-alegrense. O papel da compostagem no gerenciamento dos resíduos sólidos domiciliares também será abordado. Por fim, esta revisão bibliográfica contemplará a utilização da ACV como ferramenta auxiliar para o gerenciamento integrado dos resíduos sólidos.

3.1. Avaliação do Ciclo de Vida

O termo Desenvolvimento Sustentável foi cunhado em 1987, pela Comissão Mundial do Desenvolvimento e Meio Ambiente. A equipe, composta por representantes de 22 países por iniciativa da Organização das Nações Unidas, trabalhou ao longo de três anos na avaliação e busca pela solução de conflitos decorrentes dos problemas ambientais vinculados ao desenvolvimento econômico em nível global. O relatório final do trabalho, intitulado Nosso Futuro Comum, tornou-se um marco na cultura ambiental ao propor um novo conceito de desenvolvimento da sociedade: aquele que supre as necessidades [sociais, culturais, econômicas] da presente geração, sem com isso impedir que as futuras gerações satisfaçam também às suas necessidades (BRAGA et al., 2005).

O Desenvolvimento Sustentável, portanto, se fundamenta sobre três pilares: desenvolvimento econômico, desenvolvimento social e proteção ambiental (Figura 1). Estes três aspectos estão intrinsecamente vinculados, de forma que impactos sobre qualquer uma dessas áreas, sejam eles benéficos ou adversos, refletem sobre as demais. Apesar disso, em nossa sociedade atual, as tomadas de decisões frequentemente são feitas com base em aspectos econômicos, excluindo da análise as questões sociais e ambientais envolvidas (UNEP, 2009).

Figura 1 – Dimensões da sustentabilidade



FONTE: Adaptado de UNEP (2007, p. 10).

A urgência em migrar de um modelo de desenvolvimento exclusivamente econômico para um modelo de desenvolvimento sustentável já ultrapassa a esfera técnica e científica, sendo consensual entre os mais variados estratos da sociedade. Essa tomada de consciência coletiva se reflete em uma nova postura de consumo, que por sua vez pressiona tanto a iniciativa pública quanto a privada a se provarem “ecologicamente corretas”:

Consumidores estão se perguntando sob quais circunstâncias sociais e econômicas o produto foi fabricado. Empresas não querem ser relacionadas a “trabalho infantil” ou “corrupção”, tanto dentro da própria organização quanto ao longo da cadeia logística. Sindicatos querem demonstrar solidariedade para com os seus membros. Autoridades públicas precisam adotar uma política integrada de produtos, por exemplo, para os seus contratos públicos, etc. Como esses intervenientes podem saber se um bem ou serviço em particular é produzido de forma sustentável? (UNEP, 2009, p. 16, tradução nossa)

Este momento em que a sociedade anseia por uma solução sustentável para o desenvolvimento humano coincide com um período de intensa modificação cultural no plano das comunicações. O crescente acesso à informação, provocado por uma evolução constante e acelerada no campo tecnológico, confere ao consumidor um maior poder de controle sobre o seu processo de decisão. O consumidor não aceita mais passivamente a imagem de marca construída e comunicada pelas empresas: ele agora tem meios e fontes suficientes para construir a sua própria opinião. Mais do que isso, a democratização do acesso às tecnologias de produção de conteúdo confere ao consumidor a capacidade de difundir a sua própria opinião, tornando-se um influenciador no processo de compra de outros consumidores, em uma rede progressiva. Assim, a empresa já não tem mais a escolha de ocultar do seu público-

alvo informações que venham a ser prejudiciais à marca, uma vez que este dispõe das ferramentas necessárias para obtê-las de qualquer forma (BERSCH & RODRIGUES, 2011).

Nasce, assim, uma demanda por metodologias que permitam às empresas coletar e gerenciar informações no campo da responsabilidade socioambiental. Os gestores, agora, têm a necessidade de avaliar os impactos associados aos seus produtos¹, quantificá-los e desenvolver melhorias que os tornem mais adequados dentro dos três pilares da sustentabilidade (FERRÃO, 1998).

Para a UNEP (da sigla em inglês para Programa Ambiental das Nações Unidas), não existe produto que não provoque impacto. A responsabilidade socioambiental está em escolher o produto com o menor impacto dentre o leque disponível, o que só é possível se houver disponibilidade de informações confiáveis sobre os impactos ambientais, sociais e econômicos decorrentes de todas as etapas do seu ciclo de vida. Essa perspectiva, nomeada como Pensamento do Ciclo de Vida, é válida tanto para o setor privado, no desenvolvimento de produtos, processos e serviços, quanto para o setor público, através da elaboração de políticas públicas dirigidas aos mais diversos setores e atividades (UNEP, 2012).

Considerar o ciclo de vida de um produto requer uma avaliação embasada e criteriosa de todas as etapas envolvidas, de forma a garantir a inclusão de aspectos que se relacionam com o processo de maneira indireta:

Em relação à implementação de novas diretivas, a falta de visão na tomada de decisões para resolver um problema pode levar a consequências inesperadas em outros setores, ou pode ser danosa a sociedades em outros países. Isso aconteceu quando a implantação de diretrizes para a recuperação e reciclagem de resíduo eletrônico em alguns países industrializados culminou na reciclagem de grandes volumes de resíduo eletrônico em condições deficitárias em países em desenvolvimento. (UNEP, 2012, p. 17, tradução nossa).

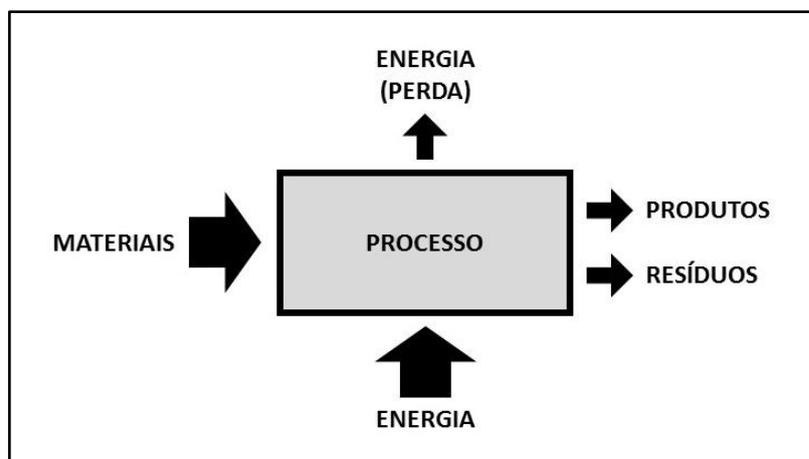
A ACV é uma ferramenta que permite avaliar o impacto ambiental associado à utilização de um produto, desde a extração das matérias-primas até a disposição final, ou seja, até a devolução dos materiais ao ambiente natural. A metodologia considera, portanto, não apenas o momento do consumo propriamente dito, mas também as etapas que precedem e sucedem a vida útil do produto, representando um importante apoio à tomada de decisões.

¹ No contexto deste trabalho, o termo “produto” abrange tanto bens tangíveis quanto serviços.

Através da ACV é possível, por exemplo, realizar uma comparação dos potenciais impactos causados ao longo do ciclo de vida de diferentes produtos que atendem a uma mesma demanda, ou identificar oportunidades de melhoria em uma cadeia produtiva (FERRÃO, 1998).

Esta metodologia se fundamenta no balanço de massas e energia de um sistema fechado, quantificando as entradas e saídas referentes a cada etapa envolvida no processo, a saber: extração, produção, distribuição, utilização, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final. Para viabilizar a comparação entre alternativas diversas, é usual que as entradas e saídas sejam convertidas a unidades de referência padronizadas. Por exemplo, entradas de diferentes fontes de energia podem ser convertidas a equivalentes de petróleo e emissões atmosféricas de diferentes gases de efeito estufa podem ser convertidas a equivalentes de carbono (FERRÃO, 1998). A Figura 2 esquematiza o balanço de massas e energia de um processo genérico, base para a realização de uma ACV.

Figura 2 – Esquema do balanço de massas e energia de um processo genérico



FONTE: Adaptado de Ferrão (1998, p. 62).

Ainda segundo o autor, a análise quantitativa dos impactos é fundamental porque permite fugir de vícios de concepção que conduzam a avaliações equivocadas no processo de tomada de decisões. Por exemplo, é do senso comum que a reciclagem de materiais na cadeia produtiva é uma medida que visa a minimizar impactos ambientais. Porém, o próprio processo de reciclagem, desde a logística até a operação industrial, também implica em impactos como consumo energético, emissões atmosféricas, geração de efluentes, entre outros. A metodologia da ACV permite quantificar estes impactos de forma a identificar em que

condições operacionais a adoção da reciclagem representa um real benefício ambiental na totalidade do ciclo de vida do produto (FERRÃO, 1998).

3.1.1. Diretrizes metodológicas

A ACV é normatizada, globalmente, pela ISO (da sigla em inglês para Organização Internacional para Padronização). Atualmente, estão vigentes as normas ABNT NBR ISO 14.040:2009 (ABNT, 2009a), ABNT NBR ISO 14.044:2009 (ABNT 2009b), ABNT NBR ISO/TR 14.047:2016 (ABNT, 2014) e ABNT NBR ISO/TR 14.049:2014 (ABNT, 2016). A primeira define os princípios e estrutura da ACV, a segunda apresenta os requisitos para a sua execução e as duas últimas trazem exemplos ilustrativos da sua aplicação.

Em termos ideais, o balanço de massas e energia a que se refere uma ACV deveria incluir todos os fluxos desde a origem de cada matéria-prima e fonte de energia envolvidas no processo até o seu retorno ao ambiente original. Porém, uma análise com esse nível de detalhamento não é viável, dadas a multiplicidade e a complexidade dos processos envolvidos. Por isso, é imprescindível definir limites factíveis para a realização do estudo, considerando os objetivos da avaliação e a disponibilidade de recursos, informações e tempo para a sua execução (FERRÃO, 1998). Esses limites incluem a tomada de decisão sobre os processos elementares, o sistema de produto, a função do produto, a unidade funcional e o fluxo de referência.

Processo elementar é definido como o menor elemento considerado em uma ACV, sendo a unidade a respeito da qual são coletados os dados na fase do inventário do ciclo de vida. O sistema de produto é o conjunto de todos os processos elementares que serão abarcados pelo estudo e suas interligações materiais e energéticas. A função do produto é a demanda que o sistema de produto satisfaz. É, por isso, o objeto de estudo de uma ACV. A unidade funcional é a quantificação arbitrada sobre a função do produto, utilizada como referência na interpretação e/ou comparação dos resultados. Já o fluxo de referência é a quantidade de produto necessária para executar a função em estudo, na quantidade determinada pela unidade funcional (IBICT, 2015).

São quatro as fases de uma ACV: definição de objetivos e escopo, análise do inventário do ciclo de vida, avaliação dos impactos do ciclo de vida e interpretação dos resultados. A

seguir, apresenta-se a definição de cada uma das fases conforme as normas técnicas vigentes (ABNT, 2009a, 2009b).

- **Definição de objetivos e escopo:** Nesta fase, devem ser definidos os motivos para execução da ACV e quais as suas aplicações. Dentre as aplicações pretendidas para uma ACV podem estar, por exemplo: a melhoria de produtos já existentes no que diz respeito a impactos ambientais; o levantamento de informações relacionadas ao impacto ambiental associado a determinado produto para utilização em estratégias de marketing e comunicação; a comparação entre múltiplos produtos alternativos que atendem à mesma finalidade; ou o embasamento a políticas públicas ou empresariais. Também devem ser definidos o público alvo do estudo e o nível de visibilidade que se pretende dar aos resultados. Deve-se, ainda, definir o escopo da ACV, que deve incluir: o sistema de produto; a função do produto; a unidade funcional; as fronteiras do sistema; os procedimentos de alocação; as categorias de impacto; a metodologia para a avaliação de impacto; os requisitos de dados; os pressupostos; as limitações; os requisitos de qualidade dos dados; o tipo de análise crítica; e o tipo de relatório a ser apresentado.
- **Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV):** Nesta etapa é realizada a coleta e processamento dos dados de entrada e saída do sistema de produto. As entradas incluem, principalmente, materiais e energia, necessários para a execução da função do produto. As saídas correspondem aos produtos, coprodutos, resíduos, emissões atmosféricas, efluentes, e quaisquer outros aspectos ambientais aplicáveis ao caso. Os dados considerados devem corresponder quantitativamente à unidade funcional, ao fluxo de referência e aos processos elementares. Eles podem ser resultado de medições de campo, cálculos ou estimativas, obtidos diretamente ou através de bibliografia prévia, devendo ser feita a escolha mais conveniente diante do escopo e objetivo previamente definidos.
- **Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV):** A partir dos resultados obtidos na etapa anterior, pretende-se nessa fase estudar os efeitos dos

impactos ambientais potenciais do sistema de produto considerado. Dados adicionais, relativos às categorias de impacto pré-definidas, são tomados em conjunto com os resultados do ICV, no objetivo de proporcionar uma compreensão mais abrangente dos impactos associados ao sistema de produto em estudo.

- **Interpretação do Ciclo de Vida:** Nesta fase, os resultados da ICV e da AICV são avaliados em conjunto, resultando no atendimento aos objetivos definidos na etapa inicial. Preferencialmente é utilizada uma abordagem relativa, com a comparação entre diferentes produtos ou diferentes cenários. Nesta etapa, é importante retomar as decisões metodológicas, de maneira a trazer à luz as limitações que se refletem nos resultados. É usual que a interpretação do ciclo de vida resulte em recomendações que visam a auxiliar os tomadores de decisão nas questões relativas ao objetivo do estudo.

Ainda, conforme a ABNT (2009a), todas as fases de uma ACV são iterativas, de forma que a qualquer momento os objetivos e o escopo do estudo podem ser revisitados.

Uma vez concluída a ACV, os resultados devem ser comunicados, usualmente na forma de relatório. Este deve ser adequado ao público-alvo definido na fase inicial, tanto em termos de linguagem quanto no detalhamento das informações. Adicionalmente, pode ser realizada uma análise crítica do processo, com o intuito de verificar a adequabilidade dos resultados obtidos aos objetivos do estudo, além de garantir a consistência dos dados utilizados (ABNT, 2009a).

3.2. Gestão de resíduos sólidos urbanos

A questão dos RSU representa um problema complexo, cujos efeitos não se restringem ao aspecto ambiental, repercutindo também em impactos econômicos e sociais. Entre as consequências de uma gestão de resíduos mal executada, podemos citar, a título de exemplo: esgotamento de recursos naturais, contaminação do solo e água subterrânea, emissão de gases de efeito estufa, disseminação de doenças, riscos relacionados a acidentes de trabalho, e todos os custos envolvidos nos aspectos anteriores.

Connet (2013) considera que o problema dos resíduos sólidos começa na sua geração excessiva, causada por uma cultura que incentiva o consumismo desenfreado. Os hábitos de consumo das sociedades ocidentais, aliados às taxas de crescimento da população mundial, são a causa direta do esgotamento dos recursos naturais, deixando um rastro de resíduos como marca daquilo que o autor chama de uma sociedade linear:

Desde a revolução industrial, nós tentamos impor uma sociedade linear a um planeta que funciona em círculos. A natureza recicla tudo; nós não. Em quatro passos, nós convertemos matéria bruta em lixo. Isso começa com a extração de matéria-prima, que nós frequentemente enviamos de navio para o outro lado do planeta. A isso, se seguem mais três passos: manufatura, consumo e finalmente a disposição do lixo. Quanto mais “desenvolvida” a sociedade, mais rápido acontece essa transformação. (CONNET, 2013, p. 5, tradução nossa).

Cada um desses passos gera, repetidamente, impactos ao meio ambiente: consumo energético, geração de resíduos sólidos, poluição atmosférica, poluição de corpos hídricos, entre outros. Essa perspectiva vai ao encontro do Pensamento do Ciclo de Vida ao ressaltar que os impactos relacionados a um produto não se restringem a uma etapa isolada da cadeia produtiva, mas permeiam todo o processo, desde a extração da matéria-prima até a destinação dos resíduos gerados.

No que diz respeito aos resíduos sólidos, a ponta final dessa sociedade linear pode ser a sua disposição final em aterros ou a sua incineração. No primeiro caso os resíduos são acumulados em áreas previamente definidas para tal. Além de comprometer áreas de terra cada vez maiores de forma cumulativa, a disposição de resíduos sólidos em aterros impede que a matéria e energia contidas nesse material sejam recuperadas, retornando ao ciclo produtivo (CONNET, 2013). Além disso, segundo Silva (2009) a matéria orgânica disposta em aterros se decompõe sob condições anaeróbias, gerando grandes quantidades de gás metano (CH₄), um composto que contribui para o aquecimento global, e de lixiviado, um líquido de alto potencial poluidor devido a sua composição química variável e imprecisa. Embora os aterros sanitários, quando corretamente projetados, sejam dotados de medidas de controle e tratamento dessas emissões, a suscetibilidade a falhas operacionais transforma os aterros sanitários em uma fonte poluidora potencial, sendo necessário um monitoramento contínuo e aprofundado. Inácio e Miller (2009) complementam que o transporte dos resíduos até os aterros sanitários também acarreta em impactos ambientais e econômicos, já que as áreas

disponibilizadas para esta finalidade normalmente se encontram a grandes distâncias dos centros urbanos.

Já na incineração, os resíduos sólidos são queimados em condições controladas. Em uma avaliação simplista, a incineração traria menos prejuízos ambientais do que a disposição de resíduos em aterro sanitário, por duas vantagens principais: reduz, literalmente, a cinzas o volume final a ser disposto de forma cumulativa; e tem por resultado a geração de gás carbônico (CO₂), composto menos prejudicial do que o metano em termos de aquecimento global. Em uma análise mais detalhada, contudo, somente a primeira vantagem (área reduzida) tem relevância prática. A comparação entre a produção de gás carbônico (incineração) e metano (aterro) é bastante controversa, já que o primeiro é produzido em maior volume e velocidade do que o segundo. Assim, a incineração de resíduos é tão ineficiente quanto a disposição em aterros sanitários, em termos de mitigação de impactos. O reuso de produtos, a reciclagem de materiais, a compostagem de matéria orgânica e, principalmente, a redução do consumo, são abordagens mais sustentáveis para solucionar a questão dos resíduos sólidos (CONNET, 2013).

Inácio e Miller (2009) consideram que o gerenciamento de RSU deve objetivar a maximização da reciclagem (incluindo a compostagem como reciclagem de matéria orgânica) para reduzir ao mínimo o volume de resíduos dispostos em aterros. Além dos impactos ambientais decorrentes do simples aterramento de resíduos sólidos, mesmo em aterros sanitários, deve-se considerar o impacto econômico envolvido na construção e operação desses espaços, além daqueles envolvidos no transporte dos resíduos até o local de destinação final. Para isso, é essencial a implantação de coleta seletiva nos sistemas municipais de gestão de resíduos, sendo indispensável também a separação da parcela orgânica dos resíduos domiciliares.

Connet (2013) vai além e defende a estratégia do “Lixo Zero” para conter a crise ambiental provocada pela sociedade linear. O conceito define um objetivo de produção nula de resíduos sólidos através de uma série de mudanças que incluem: a adequação de processos, produtos e embalagens visando a minimização da geração de resíduos; a adequação urgente de hábitos de consumo por parte da população; e a melhoria no gerenciamento dos resíduos gerados, visando a sua total recuperação pelo reuso, reciclagem ou biodegradação. O autor ressalva que o conceito de “Lixo Zero” é utópico desde a sua

concepção, mas considera que definir um objetivo ideal é importante para obter o melhor resultado possível:

As pessoas levantarão críticas sobre o quanto conseguimos nos aproximar de produzir lixo zero, mas o ponto é que ao mirar em zero nós deixamos nossas intenções muito claras – e estamos mais propícios a chegar perto do objetivo do que se colocássemos objetivos mais modestos. (CONNET, 2013, p. 10, tradução nossa).

Dahlbo et al. (2005) afirmam que as práticas de gerenciamento de RSU, embora tenham surgido com um foco inicial na proteção à saúde pública, hoje se estruturam em torno dos três pilares da sustentabilidade, através da perspectiva do gerenciamento integrado de resíduos. Nesse viés, o impacto ambiental, a sustentabilidade econômica e os aspectos sociais têm igual importância na avaliação das alternativas disponíveis.

O gerenciamento integrado dos RSU consiste na combinação de métodos variados de coleta, tratamento e disposição final dos resíduos visando a minimização do impacto ambiental, a viabilidade econômica e o benefício social advindo das soluções propostas. Esta abordagem destaca a necessidade da segregação dos resíduos no ato de sua geração e a sua posterior valorização através da reciclagem, compostagem, tratamento térmico e/ou disposição final em aterro sanitário (WHITE et al., 1995, apud REICHERT, 2013).

Em relação ao gerenciamento integrado dos RSU, Reichert (2013) complementa que não há um modelo único a ser adotado, dada a complexidade das variáveis envolvidas, cabendo aos municípios desenvolver o sistema mais adequado para o manejo dos resíduos dentro do seu contexto. Imprescindível, porém, é abarcar os três pilares da sustentabilidade.

Para a definição dos sistemas sustentáveis de manejo de resíduos a montagem de cenários com diferentes opções de coleta, de tratamento e de disposição final tem sido utilizada. Cenários de gerenciamento de resíduos são as diferentes possíveis alternativas de manejo dos resíduos, que podem incluir as etapas de coleta, transporte, triagem centralizada, reciclagem de materiais, tratamento biológico, tratamento térmico e aterro sanitário. Quando o objetivo é definição do melhor sistema para uma cidade, o que se busca é a combinação destas diferentes técnicas e tecnologias que resulte no sistema mais ambientalmente efetivo em termos de emissões gasosas, líquidas e de resíduo sólido final; em um custo mais viável; e que seja socialmente aceitável pela população. (REICHERT, 2013, p. 4).

O autor ressalta a importância das etapas de coleta e transporte dos resíduos para o gerenciamento integrado dos RSU. A segregação incorreta dos resíduos na fonte de geração, o acondicionamento inadequado ou formas impróprias de manuseio e transporte podem impedir o seu aproveitamento para reciclagem ou compostagem. A etapa de coleta é

especialmente delicada, pois deve conciliar os requisitos técnicos e logísticos que permitam a valorização dos resíduos com a conveniência ao cidadão gerador, uma vez que a adesão massiva da população é imprescindível para o sucesso de um sistema de gerenciamento de RSU (REICHERT, 2013).

Segundo McDougall et al (2001), o gerenciamento integrado de RSU acaba por ser negligenciado na maioria dos países em desenvolvimento, onde a falta de infraestrutura e a limitação dos recursos disponíveis impedem a implantação de sistemas complexos, com alternativas de alta tecnologia para o máximo aproveitamento dos materiais e minimização da disposição final em aterros sanitários. Para os autores, a ideia de gerenciamento integrado de RSU pode ser simplificada de forma a torná-la mais realista para o cenário encontrado nos países em desenvolvimento, sendo suficiente manter quatro aspectos principais: levantamento de dados acerca da composição dos resíduos, substituição dos lixões por aterros sanitários, separação da parcela orgânica dos RSU para posterior compostagem, e envolvimento formal dos catadores de resíduos na separação de materiais recicláveis.

Para Connet (2013), a participação ativa de todos os setores da sociedade é essencial para o sucesso de todo e qualquer programa de gestão integrada de RSU. Diferentes públicos têm diferentes responsabilidades, e é imprescindível que todos cumpram o seu papel na direção de uma sociedade sustentável. Assim, as indústrias são responsáveis pela tomada de decisões na ponta inicial da cadeia produtiva e os governos têm importância fundamental na concepção da legislação e regulamentação envolvendo resíduos sólidos, mas são os consumidores que terão poder decisivo na ponta final da nossa sociedade linear.

[...] países não reciclam; comunidades reciclam. A liderança política local é crucial. Um aspecto chave dessa liderança é a disposição dos líderes políticos em trabalhar com cidadãos e ativistas. Há muito passou o tempo em que os políticos podiam resolver o problema dos resíduos com “especialistas em resíduos” bem remunerados promovendo “máquinas mágicas”. Máquinas mágicas não nos salvarão: nós precisamos melhor organização, melhor educação, e melhor design industrial. Para conseguir isso nós precisamos aproveitar a experiência que já temos em nossas próprias comunidades. (CONNET, 2013, p. 288, tradução nossa).

3.2.1. Gestão de resíduos sólidos no Brasil

No caso brasileiro, o gerenciamento integrado de RSU passou a ser incentivado com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela lei 12.305 de 02 de agosto de 2010. Esta lei representa um marco para a questão ambiental no país, ao definir as diretrizes

a serem adotadas em relação aos resíduos sólidos, tanto na esfera pública quanto na privada. Entre os seus princípios está a adoção de uma visão sistêmica no que tange à gestão dos RSU, de forma abranger todas as esferas do desenvolvimento sustentável. Isso passa por considerar não apenas o manejo e gerenciamento dos resíduos gerados, mas também a sua não geração. Para tanto, a lei estimula a disseminação da ACV e incentiva a implantação de práticas sustentáveis de produção e consumo (BRASIL, 2010). Em nosso país, os serviços de limpeza urbana são gerenciados pelo poder público municipal, e cada município tem liberdade para definir quais as categorias de resíduos que são de sua responsabilidade, sendo estes denominados de “resíduos urbanos”. Usualmente, os resíduos urbanos englobam os resíduos de origem domiciliar, comercial e de espaços públicos, ficando excluídos os resíduos industriais, resíduos de serviços de saúde e resíduos especiais (REICHERT, 2013).

Desde 2002, o Ministério das Cidades monitora os dados referentes à geração e ao gerenciamento de RSU, em nível nacional. Este controle é feito através da participação voluntária dos prestadores de serviços de saneamento no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). Além de reunir indicadores referentes ao gerenciamento de resíduos sólidos, o SNIS também coleta informações relativas aos serviços de água e esgoto e de águas pluviais. As informações coletadas são publicadas anualmente na forma de diagnósticos ambientais e oferecem um panorama da situação do saneamento básico no país.

O mais recente Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos se refere ao ano-base de 2015. O levantamento contou com a participação de 3.520 municípios de todo o território nacional, e abrange 82,8% da população brasileira (BRASIL, 2017). No *item 3.2.1.1*, será apresentado um breve resumo das informações contidas neste documento.

3.2.1.1. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – ano base 2015

Embora a abrangência dos serviços de coleta de resíduos sólidos seja elevada no país, atendendo a 92,7% da população total, é possível perceber grandes disparidades ao analisar a disponibilidade destes serviços para parcelas específicas da população. A maior diferença ocorre entre a população urbana e a rural: no primeiro caso, 98,6% da população tem acesso a serviços de coleta de resíduos sólidos, enquanto, para a população rural, este índice cai para 52,6%. Outra desigualdade se nota entre as diferentes regiões geográficas no país, uma vez que a cobertura da coleta domiciliar em relação à população total varia entre 84,1%, na região Norte, e 97%, na região Sudeste (BRASIL, 2017).

Embora a PNRS seja explícita quanto à inadequação dos lixões e a necessidade de substituí-los por aterros sanitários, isto ainda está longe de ser uma realidade no país. No ano de 2015, foi registrada a existência de 2.556 unidades de processamento de disposição de resíduos no solo, com informações atualizadas para o período, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Quantidade de unidades de processamento e disposição de resíduos no solo com informações atualizadas dos municípios participantes do SNIS em 2015 e massa total de resíduos recebidos nas mesmas unidades.

Tipo de unidade de disposição final	Quantidade de unidades	Massa (toneladas)
Lixão	1140	7.170.875
Aterro controlado	654	10.332.434
Aterro sanitário	679	41.575.591
Vala específica de Resíduos de Serviços de Saúde	23	19.462
Aterro industrial	4	5.793
Aterro de Resíduos da Construção Civil	56	2.197.644

FONTE: Elaborado pela autora a partir de dados publicados por BRASIL, 2017, p. 126-128

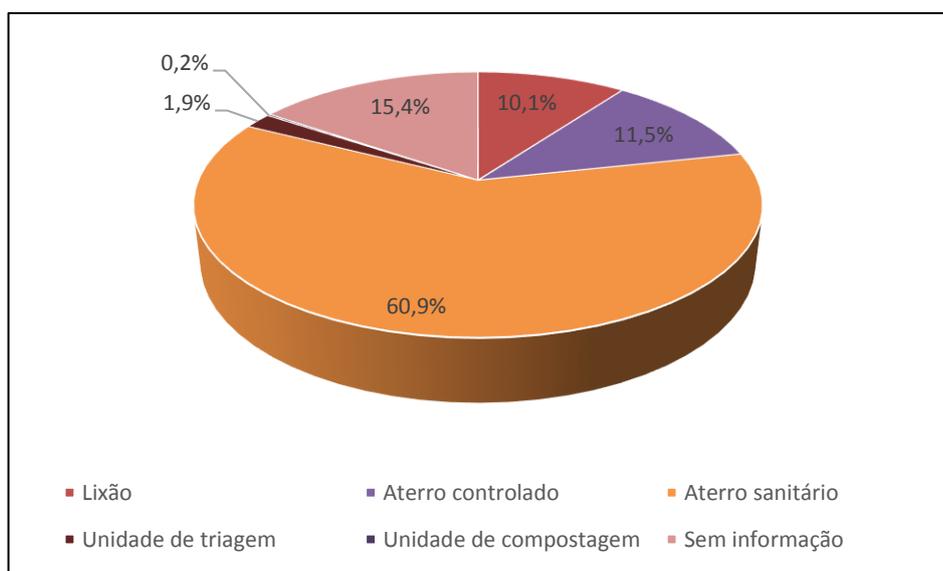
Excetuando-se as unidades dedicadas à disposição final de resíduos de construção civil, resíduos de serviços de saúde e resíduos industriais, existem 2.473 unidades voltadas ao recebimento dos resíduos sólidos domiciliares no país. Desse montante, 46,1% consistem em lixões, 26,4% são aterros controlados e apenas 27,5% são, efetivamente, aterros sanitários. Contudo, em termos de massa de resíduos recebidos, esta proporção se inverte: apesar de serem pouco numerosos, os aterros sanitários receberam 70,4% dos resíduos enviados para disposição final em solo no ano em questão, enquanto as parcelas destinadas aos aterros controlados e aos lixões foram de 17,5% e 12,1%, respectivamente (BRASIL, 2017).

Ainda em 2015, o cidadão brasileiro gerou, em média, 1 kg de resíduos sólidos ao dia, sendo possível notar uma tendência a menor geração de resíduos sólidos em regiões com maior desenvolvimento econômico. Estima-se que o resíduo sólido domiciliar contenha aproximadamente 30% de materiais próprios para reciclagem, além de 50% de matéria orgânica passível de compostagem. Porém, na realidade brasileira, a recuperação deste material ainda é muito incipiente. Dentre os municípios participantes do SNIS, 22,5% declararam oferecer alguma iniciativa de coleta seletiva à população, seja de responsabilidade direta do órgão municipal competente ou realizadas por entidades terceiras, como empresas privadas contratadas pela prefeitura, associações, cooperativas ou organizações não

governamentais, por exemplo. Além disso, 40,6% dos municípios declararam não dispor de coleta seletiva, e 36,8% não forneceram informações a respeito. Ainda, em todo o país estão registradas apenas 846 unidades de triagem para recuperação de resíduos recicláveis. As unidades de compostagem sob administração do poder público são ainda mais raras, somando 65 unidades registradas pelo SNIS em todo o território nacional (BRASIL, 2017).

Mesmo quando os municípios dispõem de coleta seletiva, é importante avaliar a real eficácia dessas iniciativas no cenário atual. Tomando como base os municípios participantes do SNIS, 82,5% dos resíduos coletados em 2015 foram encaminhados para disposição final em solo (aterro sanitário, aterro controlado ou lixão), 1,9% dos resíduos passaram por unidades de triagem para recuperação dos resíduos recicláveis, 0,2% dos resíduos foram encaminhados para unidades de compostagem, e 15,4% não tiveram o destino declarado, conforme indicado na Figura 3 (BRASIL, 2017).

Figura 3 – Percentuais de massa de Resíduos Domiciliares e Públicos e respectivas destinações nos municípios participantes do SNIS no ano de 2015, segundo tipo de unidade



FONTE: Adaptado de BRASIL, 2017, p. 146

3.2.2. Gestão de resíduos sólidos em Porto Alegre

Para o município de Porto Alegre, as diretrizes para a gestão de resíduos sólidos são estabelecidas pela Lei Complementar nº 728/2014, conhecida como Código Municipal de Limpeza Urbana de Porto Alegre. O instrumento define como sendo de responsabilidade do executivo municipal a coleta, transporte e destinação de resíduos sólidos de limpeza urbana,

resíduos sólidos ordinários domiciliares e os resíduos sólidos recicláveis², definidos como a seguir:

Art. 3º Para fins desta Lei Complementar, consideram-se:

I – resíduos sólidos de limpeza urbana os originários da varrição e demais serviços de limpeza executados nos logradouros públicos;

II – resíduos sólidos ordinários domiciliares, para fins de coleta regular, os não recicláveis, produzidos em imóveis, residenciais ou não, que possam ser acondicionados em sacos plásticos com volume igual ou inferior a 100 (cem) litros, compostos por resíduos orgânicos, de origem animal ou vegetal, e rejeito, que são resíduos para os quais ainda não há reaproveitamento ou reciclagem, e que possam ser destinados aos sistemas de tratamento disponibilizados pelo Município de Porto Alegre;

III – resíduos sólidos recicláveis, para fins de coleta seletiva, os potencialmente recicláveis, originários de atividades domésticas em imóveis, residenciais ou não, devidamente acondicionados, independentemente de seu volume, os quais serão destinados preferencialmente às unidades de triagem cadastradas no DMLU; [...] (PORTO ALEGRE, 2014).

O Código Municipal de Limpeza Urbana (PORTO ALEGRE, 2014) incentiva práticas norteadas pelo conceito de “Lixo Zero”, tornando obrigatória a coleta seletiva e encaminhamento para reciclagem dos resíduos sólidos aptos para esta destinação. Está prevista, também, a adoção de sistema de coleta específica e tratamento também para a fração orgânica dos resíduos coletados, embora tais práticas não tenham sido instituídas até a data de elaboração do presente trabalho.

No município de Porto Alegre, especificamente, os resíduos sólidos são gerenciados pelo DMLU. A autarquia oferece o serviço de coleta domiciliar, inclusive o de coleta seletiva, com cobertura disponível à totalidade da população, segundo os dados oficiais. No ano de 2015, a média de resíduos sólidos domiciliares coletados foi de 0,71 kg/hab.dia, e a recuperação de materiais recicláveis foi de 3,43% do total de resíduos sólidos domiciliares e públicos coletados. Apesar de a coleta seletiva estar disponível em todo o município, somente 7,4% dos resíduos domiciliares foram coletados através deste sistema. As despesas com serviços de limpeza urbana no período foram de R\$ 226.340.217,10, correspondendo a aproximadamente 4,6% das despesas da prefeitura no mesmo ano (BRASIL, 2017).

² Para outros tipos de resíduos sólidos, o gerenciamento é de responsabilidade do gerador, podendo ser executado pelo município quando solicitado, sendo cobrada taxa administrativa adicional (PORTO ALEGRE, 2014).

3.2.3. Compostagem no gerenciamento dos resíduos sólidos domiciliares

Compostagem é o processo de decomposição microbiológica dos resíduos sólidos orgânicos, resultando em um produto relativamente estável, denominado “composto”, que pode ser utilizado para o enriquecimento do solo para fins agrícolas. Trata-se de um processo essencialmente aeróbio e termofílico, em que os microorganismos naturalmente presentes no meio atuam na decomposição da matéria orgânica, resultando em um substrato rico em substâncias húmicas e nutrientes (INÁCIO e MILLER, 2009).

A ecologia deste processo é complexa, e envolve uma sucessão de diferentes grupos de microorganismos ao longo de quatro fases principais: fase inicial, fase termófila, fase mesófila e maturação. A primeira fase, com duração média de 24 horas, se caracteriza pelo intenso crescimento das colônias, com predomínio de microorganismos mesófilos que atuam decompondo a matéria orgânica facilmente degradável, resultando na liberação de calor, o que promove a rápida elevação da temperatura. A fase termófila ocorre quando a temperatura supera 45 °C e favorece o crescimento de microorganismos termófilos. Nesta etapa a geração de calor é intensificada e o substrato pode alcançar temperaturas superiores a 80 °C, o que promove a seleção da microbiota presente, promovendo o extermínio de organismos patogênicos. Esta fase se estende até que a matéria orgânica facilmente degradável se torna escassa, após o que o metabolismo dos microorganismos termófilos diminui gradualmente, dando início à fase mesófila. Nesta etapa, os microorganismos mesófilos predominam no substrato, degradando matéria orgânica de maior resistência. Por fim, na etapa de maturação, a atividade microbiana é lenta e resulta na formação de substâncias húmicas, não havendo mais geração de calor. Durante todo o processo, o metabolismo microbiano resulta na produção residual de água e gases, predominantemente o gás carbônico – embora possa haver formação incidental de gás metano quando as condições operacionais favorecerem o surgimento temporário de sítios de anaerobiose em meio ao substrato (INÁCIO e MILLER, 2009).

Essas etapas se repetem, qualquer que seja o método de compostagem utilizado. Reis (2005) afirma que os processos de compostagem diferem entre si pela metodologia utilizada para a aeração do material. Segundo a autora, são três as principais tecnologias de compostagem empregadas em sistemas de gerenciamento de RSU: leiras de revolvimento mecânico, leiras estáticas aeradas e reatores biológicos.

No primeiro caso, também conhecido como sistema *windrow*, a aeração dos resíduos é realizada por difusão e convecção, através do revolvimento mecânico das leiras por meio de equipamentos específicos para tal (tracionados por tratores ou equipamentos autopropelidos) ou pelo uso de pás-carregadeiras e retroescavadeiras. O revolvimento das leiras deve ser realizado com frequência mínima de três vezes por semana, visando a homogeneizar a mistura, aumentar a porosidade do meio e controlar a temperatura e a umidade do processo. Usualmente, as leiras têm seção triangular e dimensões que variam conforme as características estruturantes dos resíduos e as necessidades do maquinário utilizado para o revolvimento (REIS, 2005).

No segundo caso (leiras estáticas) não é realizado o revolvimento dos resíduos, que devem ter granulometria suficientemente grande para permitir a circulação do ar no interior da leira. Neste método, a base da leira é composta por uma tubulação perfurada, pela qual o ar será insuflado ou aspirado, coberta por uma camada de madeira triturada que atua na filtragem do lixiviado e auxilia a passagem do ar para o interior da leira. Os resíduos são dispostos sobre este material, e são cobertos por uma camada de composto pronto, que atua na retenção de calor e na filtragem de gases (REIS, 2005). Uma variante para o método das leiras estáticas é a aeração passiva, apresentada por Inácio e Miller (2009). Neste tipo de processo, as leiras de compostagem têm seção retangular, com paredes perpendiculares em relação ao solo formadas com material vegetal estruturante com alta relação carbono/nitrogênio e baixa densidade, como palha e galhos. Os resíduos podem ser acrescentados continuamente, sendo sempre misturados ao material já em decomposição com o auxílio de um garfo agrícola. A aeração é garantida pela estrutura da leira, que permite uma ventilação constante, garantindo um processo permanentemente aeróbio, que dura entre 3 e 6 meses para ser finalizado.

No terceiro caso (reatores biológicos) a compostagem é realizada em um sistema fechado, o que permite um maior controle das variáveis envolvidas. O ar é insuflado sob pressão, em taxas que variam conforme as características do reator e dos resíduos. Neste método, a fase termófila é mais curta e intensa, o que reduz o tempo de detenção no interior do reator para um período de 7 a 20 dias, ao fim do qual o composto deve ser deixado para maturar por cerca de 60 dias. Os reatores podem ser de fluxo vertical, fluxo horizontal, ou por bateladas (REIS, 2005).

A compostagem dos resíduos orgânicos é uma etapa essencial na gestão de RSU. Em primeiro lugar, ao oferecer outro destino à parcela orgânica dos resíduos domiciliares, o volume total enviado diariamente aos aterros sanitários poderia ser cortado pela metade, prolongando a vida útil desses aterros e evitando a emissão de gases de efeito estufa no transporte deste resíduo até o local de disposição final. Além disso, a deposição de resíduos orgânicos em aterros gera grandes volumes de metano e de lixiviado que, caso não passem por tratamento específico, contribuem para a poluição atmosférica e para a contaminação de águas subterrâneas, respectivamente. A compostagem, por outro lado, promove o sequestro de carbono na forma de celulose, o que retarda a sua conversão para gás carbônico ou metano, desacelerando o impacto dos resíduos sólidos sobre as mudanças climáticas. Ao contrário da mera disposição final dos resíduos, a compostagem permite a reciclagem de nutrientes essenciais para a produção agrícola. O composto resultante do processo pode ser usado em substituição a fertilizantes sintéticos, preservando as suas fontes e minimizando os impactos ambientais vinculados à sua produção. Além disso, o uso de composto orgânico proporciona um enriquecimento natural da microbiota do solo, o que estimula o desenvolvimento radicular da produção agrícola, além de melhorar as condições do solo quanto a estrutura, drenagem, aeração e retenção de umidade (CONNET, 2013; INÁCIO e MILLER, 2009).

McDougall et al (2001) ressaltam que a separação dos resíduos pode ser feita tanto no domicílio quanto no próprio aterro sanitário, antes da deposição dos resíduos. A primeira alternativa garante maior eficiência ao processo, desde que seja acompanhada de uma sólida iniciativa de educação ambiental direcionada à população. Já a segunda opção resulta na geração de emprego para catadores de resíduos, além de oportunizar a produção de composto em larga escala com geração de renda associada.

Connet (2013) defende que a correta separação dos resíduos ainda no domicílio é essencial para a produção de um composto de qualidade. Para tanto, é necessário que a população seja corretamente instruída e, tão importante quanto, seja incentivada a realizar a separação dos resíduos e conscientizada sobre a importância da sua participação. Por isso, embora a destinação da parcela orgânica para grandes áreas de compostagem seja uma alternativa viável, a realização deste processo em menor escala proporciona um melhor controle sobre o composto produzido. Assim, a compostagem individual nas próprias

residências, bem como a compostagem comunitária, é uma prática a ser incentivada pelo poder público.

3.2.4. ACV aplicada a Resíduos Sólidos

Conforme apresentado no item 3.1, a ACV, em sua concepção original, considera todos os impactos potenciais relativos a um produto, desde a extração das matérias primas até a devolução do produto à natureza após a utilização. Assim, a ferramenta auxilia no processo de tomada de decisão envolvendo o setor produtivo e os processos de apoio, como transporte e logística, por exemplo. Porém, a metodologia pode ser utilizada também para apoiar a tomada de decisões no gerenciamento de RSU, voltando-se para os processos que iniciam após o descarte do produto.

Para Dahlbo *et al.* (2005), a execução de uma ACV de resíduos sólidos inicia por uma descrição detalhada dos possíveis sistemas de gerenciamento aplicáveis, sendo usual a utilização da ferramenta para comparar a metodologia em uso (à época do estudo) a metodologias alternativas que se pretenda adotar, de forma a obter uma avaliação integrada sobre qual é o melhor sistema disponível.

Xará *et al.* (2001) apresentam algumas aplicações para a realização de uma ACV na etapa pós-consumo, entre elas: comparação de diferentes sistemas logísticos para a coleta de resíduos, avaliação dos impactos ambientais associados a processos de recuperação de resíduos, comparação de diferentes tecnologias de tratamento de resíduos e geração de dados para o desenvolvimento de programas de gestão integrada de resíduos.

O sistema de produto se limita aos processos pós-consumo, excluindo as etapas de extração de matéria-prima, produção, distribuição e utilização. Nessa perspectiva, as entradas no sistema são o próprio resíduo, ou seja, o produto após o seu descarte, além de energia e insumos adicionais que podem ser empregados, dependendo do processo em estudo. Já o final do ciclo de vida de um resíduo é o mesmo que o de um produto: a sua devolução à natureza, seja na forma de material inerte em aterro sanitário, emissões líquidas ou gasosas, ou mesmo novos produtos oriundos do gerenciamento, tais como composto, materiais recicláveis, combustível ou energia, dependendo do processo (REICHERT, 2013).

Outra adaptação necessária, ao aplicar a ACV para sistemas de gerenciamento de RSU, se refere à unidade funcional utilizada. Originalmente, a unidade funcional de uma ACV está

vinculada ao produto final ou ao serviço utilizado (as saídas do sistema) sendo definida de forma a quantificar estas saídas. Porém, quando a metodologia é aplicada ao gerenciamento de resíduos, a unidade funcional não está mais atrelada ao resultado de um processo, mas sim ao resíduo gerenciado por este processo (as entradas do sistema). Por isso, a unidade funcional deve ser dada em termos do processo em si, considerando a abrangência geográfica do sistema de gerenciamento e o período de tempo determinado. Um exemplo de unidade funcional para a ACV de resíduos é o gerenciamento dos resíduos produzidos em uma municipalidade ao longo de 1 ano (MCDUGALL et al., 2001).

Dahlbo *et al.* (2005) consideram que as particularidades locais têm grande relevância para uma avaliação de impactos aplicada a RSU, de forma que a qualidade e disponibilidade dos dados se torna um fator limitante para a aplicação de uma ACV a esta temática. Outra limitação importante, segundo Silva (2009), é a dificuldade em estimar as emissões de um determinado volume de resíduos sólidos, decorrente da diversidade e da variabilidade de sua composição.

Essas limitações também são reconhecidas por Mcdougall et al. (2001), que enfatizam a complexidade de fatores envolvidos no gerenciamento integrado de resíduos sólidos. Os autores desenvolveram um modelo computacional para a geração de ICV, considerando todo o processo de gerenciamento de resíduos, intitulado IWM-2 (da sigla em inglês para Gerenciamento Integrado de Resíduos). Neste modelo, é possível adequar as emissões à realidade do cenário estudado, a partir da inserção de dados locais ou regionais, como: composição gravimétrica dos resíduos, matriz energética na área de estudo, eficiência do controle de emissões do aterro sanitário utilizado, entre outros. A partir dos dados fornecidos pelo usuário, o modelo calcula as emissões do sistema de gerenciamento de RSU analisado, considerando as seguintes etapas: coleta, triagem, tratamento biológico, tratamento térmico, disposição em aterro sanitário e geração de energia elétrica. Dessa forma, é possível gerar o ICV para diferentes cenários, o que possibilita uma posterior comparação dos impactos ambientais gerados por diferentes sistemas de gerenciamento de resíduos. Uma descrição completa das premissas do modelo, bem como o um guia detalhado para sua utilização são apresentados por Mcdougall et al. (2001), e um exemplo pormenorizado de sua aplicação na avaliação de sistemas de gerenciamento de RSU é apresentado por Reichert (2013).

Reichert e Casagrande (2014) avaliam a aplicabilidade do programa IWM-2 para a ACV do gerenciamento integrado de resíduos sólidos do município de Porto Alegre, demonstrando que a ferramenta apresenta resultados satisfatórios na comparação de diferentes cenários de gerenciamento de resíduos. O mesmo modelo também é utilizado em estudos correlatos, na avaliação de modelos de apoio à tomada de decisão para o gerenciamento integrado de resíduos sólidos do mesmo município (Reichert, 2013; Reichert e Mendes, 2014).

4. METODOLOGIA

Este trabalho teve por objetivo avaliar a contribuição de pequenas empresas de coleta e compostagem de resíduos orgânicos na redução de impactos ambientais relacionados ao gerenciamento de RSU no município de Porto Alegre. Para elaboração do modelo de coleta e compostagem de resíduos por iniciativas privadas, foi estudado o caso particular da empresa Re-Ciclo, sediada no mesmo município. O uso dos dados levantados foi autorizado pela empresa, conforme documento apresentado no Apêndice A.

Os resíduos sólidos gerenciados pelo município são divididos em (a) resíduos sólidos de limpeza urbana; (b) resíduos sólidos ordinários domiciliares (RSOD); (c) resíduos sólidos recicláveis; e (d) resíduos sólidos especiais (PORTO ALEGRE, 2014). Este trabalho se concentrou apenas na parcela de RSOD, uma vez que esta categoria inclui, em sua totalidade, os resíduos orgânicos domiciliares passíveis de compostagem.

Com base em dados públicos relativos ao gerenciamento dos RSU pelo DMLU, e em informações fornecidas pela empresa Re-Ciclo, foi realizada uma avaliação do impacto ambiental potencial vinculado ao gerenciamento de RSOD, em cenários que contam com a participação de empresas privadas de coleta e compostagem de resíduos orgânicos. A metodologia escolhida foi a ACV, e o estudo se dividiu em três etapas: inicialmente, foi feita uma avaliação do impacto ambiental potencial da compostagem dos resíduos orgânicos em comparação com a sua disposição final em aterro sanitário; em um segundo momento, foi avaliado o impacto ambiental potencial da inclusão de pequenas empresas de compostagem (aqui denominadas PEC) no âmbito do gerenciamento integrado de RSU no município de Porto Alegre; por fim foi feita uma avaliação do impacto ambiental potencial proveniente do gerenciamento de resíduos sólidos em cenários nos quais a compostagem dos resíduos orgânicos seja oferecida à totalidade da população.

Os métodos utilizados para a realização deste estudo serão apresentados no presente capítulo.

4.1. Caracterização dos sistemas estudados

Em Porto Alegre, os RSOD são gerenciados pelo DMLU. Desde 2016, o município conta também com a atuação da empresa Re-Ciclo, que realiza a coleta e compostagem de resíduos orgânicos domiciliares. Os resíduos orgânicos, ao serem coletados por esta empresa, são

retirados da cadeia de gerenciamento do DMLU, deixando de ser enviados para disposição final em aterro sanitário. É importante ressaltar que a Re-Ciclo é uma iniciativa privada, sem qualquer relação com o órgão municipal.

Para a realização deste trabalho, foram levantados os impactos ambientais potenciais do processo realizado pelo DMLU, do processo realizado pela Re-Ciclo, e de diferentes cenários de combinação entre os dois processos. A seguir, será feita uma caracterização de ambos os processos, bem como a descrição dos cenários compostos para a realização deste estudo.

4.1.1. Sistema de coleta e disposição em aterro sanitário - DMLU

A coleta dos RSOD no município de Porto Alegre se dá através de dois sistemas³: sistema convencional, realizado por uma equipe de garis que coletam os resíduos diretamente em frente às residências e os colocam em caminhões coletores; e sistema containerizado, em que os resíduos são dispostos pelos residentes em contêineres especialmente preparados, que são esvaziados de forma semiautomática por caminhões adaptados. Os resíduos assim coletados são direcionados para uma estação de transbordo, localizada no bairro Lomba do Pinheiro, de onde são transferidos para caminhões de grande porte, e então encaminhados à Central de Resíduos do Recreio (CRR), um aterro sanitário situado no município de Minas do Leão/RS (REICHERT, 2013).

Conforme Pietzsch (informação verbal)⁴, a totalidade dos RSOD coletados pelo DMLU é direcionada ao aterro sanitário, sem passar por triagem. Houve, no passado, uma tentativa de destinar a matéria orgânica presente nestes resíduos para compostagem. Porém, a iniciativa foi interrompida devido a dificuldades operacionais.

A CRR é operada pela Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR) e tem capacidade total para receber 23 milhões de toneladas de resíduos sólidos. Sua infraestrutura conta com um sistema de captação e tratamento de efluentes líquidos e gases (CRVR, 2017). Desde 2015, o biogás gerado no aterro sanitário é utilizado para abastecimento

³ O DMLU opera, ainda, um sistema de coleta porta-a-porta para resíduos sólidos recicláveis, e disponibiliza meios para a coleta e disposição de resíduos especiais. Estes sistemas não serão considerados no presente trabalho, por estarem fora do escopo dos resíduos sólidos ordinários domiciliares.

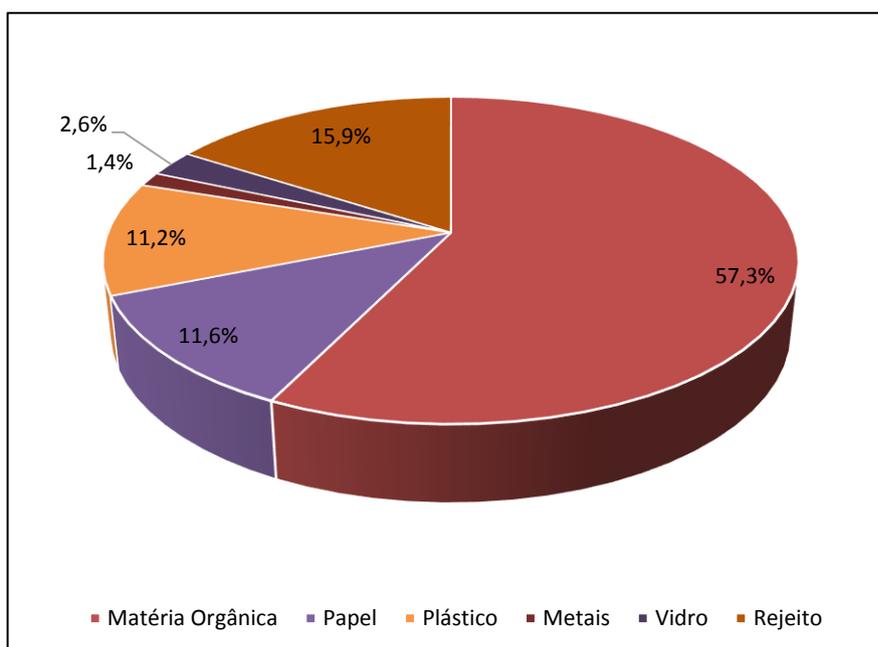
⁴ Entrevista concedida por Natália Pietzsch, sócia-fundadora da Re-Ciclo, em 09 de agosto de 2017.

de uma usina termelétrica – a Biotérmica Energia⁵ – com capacidade para geração de 60mil MWh/ano (VIANA, 2015).

Segundo dados do SNIS, a população de Porto Alegre, no ano de 2015, era de 1.476.867 habitantes. No período, foi coletado um total de 380.387,5 toneladas de resíduos domiciliares, das quais 28.158,9 toneladas consistiram em resíduos domiciliares seletivos (BRASIL, 2017). Destas informações, depreende-se que no ano de 2015 a geração total de RSOD foi de 352.228,6 toneladas, ou 238,5 kg/habitante.

Reichert (2013) enfatiza que a composição dos RSU varia amplamente conforme a região geográfica, o poder aquisitivo e os hábitos culturais da população. Diferentes resíduos geram diferentes impactos ambientais, e implicam em diferentes tomadas de decisão do ponto de vista gerencial. Por este motivo, estudos envolvendo o gerenciamento de resíduos sólidos devem considerar, sempre que possível, a composição gravimétrica específica para a localidade em questão. O mesmo autor apresenta a caracterização dos RSOD do município de Porto Alegre, tendo como base duas caracterizações conduzidas pelo DMLU no ano de 2010. Esta composição é apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Composição dos RSOD gerados no município de Porto Alegre: ano base 2010



FONTE: Adaptado de DMLU, 2012, apud REICHERT, 2013, p. 114.

⁵ Ambas as empresas (Biotérmica Energia e Companhia Riograndens de Valorização de Resíduos) pertencem ao Grupo Solvi, um grupo empresarial com atuação no Brasil, Peru, Bolívia e Argentina.

Dados operacionais relativos ao gerenciamento de resíduos sólidos pelo DMLU no ano de 2011 foram publicados por Reichert (2013) e serão utilizados no presente trabalho para a construção dos cenários em estudo.

4.1.2. Sistema de coleta e compostagem - PEC

A delimitação do sistema de coleta e compostagem realizada por Pequenas Empresas de Compostagem (PEC) teve como base os procedimentos conduzidos pela empresa Re-Ciclo, descritas a seguir.

A Re-Ciclo é uma empresa de pequeno porte que atua desde maio de 2016 no ramo de coleta e compostagem de resíduos sólidos no município de Porto Alegre. Conforme Pietzsch (informação verbal)⁶, a missão da empresa é fazer com que resíduos orgânicos não sejam enviados a aterro sanitário. Entre as motivações que levaram à fundação da empresa estão: oferecer possibilidade de aproveitamento ao resíduo orgânico domiciliar através da compostagem; contribuir para a diminuição do volume de resíduos gerenciados anualmente pela prefeitura, no intuito de reduzir os gastos de verba pública com a gestão de resíduos urbanos; e otimizar a segregação dos resíduos na fonte, melhorando a condição de coleta e aproveitamento dos resíduos recicláveis. Além da coleta e compostagem de resíduos orgânicos domiciliares, a Re-Ciclo também vende minhocários para compostagem caseira, e realiza cursos de capacitação e educação ambiental.

A Re-Ciclo oferece um serviço privado de coleta da parcela orgânica dos resíduos domiciliares, na modalidade de clube de assinatura. Ao aderir, o cliente recebe da empresa um balde para a coleta dos resíduos com opções de volume 3,6 litros ou 10 litros. A empresa fornece, ainda, sacolas feitas de biopolímero de amido de mandioca, que devem ser usadas para forrar o balde, facilitando a retirada dos resíduos no momento da coleta. Este material é compostável, de forma que os resíduos não precisam ser retirados de seu interior durante a operação. O cliente é orientado quanto aos resíduos que podem ser dispostos no balde, que consistem basicamente em restos de alimentos não processados, exceto carne, osso e

⁶ Entrevista concedida por Natália Pietzsch, sócia-fundadora da Re-Ciclo, em 09 de agosto de 2017.

gordura. Uma vez por semana, os resíduos são coletados de bicicleta⁷ e levados até a sede da empresa, situada no bairro Floresta, onde são concentrados por aproximadamente dez dias antes de serem transportados, de carro, até o pátio de compostagem situado no município de Gravataí/RS. Este tempo de espera é feito com o objetivo de acumular um volume maior de resíduos, de forma a reduzir a quantidade de viagens necessárias (informação verbal)⁸.

O pátio de compostagem fica situado em um sítio de propriedade particular, e o composto produzido é utilizado na mesma propriedade para o cultivo de hortaliças. O processo de compostagem utilizado é o de leiras estáticas com aeração passiva, descrito no *item 3.2.3*. O material estruturante utilizado pela Re-Ciclo para a formação das leiras consiste em resíduos de capina e poda gerados no próprio sítio onde se encontra o pátio de compostagem, além de resíduos de serragem, recolhidos de uma serraria distante 5 km do local. Este material é acrescentado a uma proporção aproximada de 1/10 em relação aos resíduos domiciliares. Para otimizar o processo de compostagem, as leiras são inoculadas com microorganismos eficientes, cultivados de forma artesanal pela empresa (informação verbal)⁹.

A empresa mantém um registro dos clientes cadastrados mês a mês, que inclui: número de habitantes no domicílio, data das coletas realizadas e massa de resíduos recolhida em cada coleta. Porém, até a data de execução deste trabalho, o sistema de registro se encontrava em fase de implementação, motivo pelo qual os registros se encontram incompletos. Os dados existentes foram disponibilizados pela empresa, e uma tabela síntese das informações quantitativas é apresentada no Apêndice B. Atualmente, o sistema de coleta por bicicletas da Re-Ciclo atende a aproximadamente 120 domicílios, com 2,5 habitantes por domicílio, sendo que em cada domicílio são coletados em torno de 2,8 kg de resíduos orgânicos a cada semana. Destes dados, depreende-se que a Re-Ciclo gerencia, a cada ano, 59,7 kg de resíduos por pessoa atendida.

⁷ Com o crescimento da rede de clientes, a Re-Ciclo passou a adotar também um segundo modelo de coleta dos resíduos, com o uso de automóveis. Este modelo é utilizado para atender a clientes com maior geração de resíduos (como prédios comerciais e restaurantes) e para recolher os resíduos entregues nos pontos fixos (instituições comerciais parceiras que disponibilizam espaço para centralizar a entrega de resíduos por clientes da Re-Ciclo). O sistema de coleta por automóveis é recente e, até a execução do presente trabalho, não havia disponibilidade de dados quantitativos que permitissem a sua análise. Por este motivo, optou-se por considerar somente o modelo de coleta por bicicletas na execução deste trabalho.

⁸ Entrevista concedida por Natália Pietzsch, sócia-fundadora da Re-Ciclo, em 09 de agosto de 2017.

⁹ Entrevista concedida por Natália Pietzsch, sócia-fundadora da Re-Ciclo, em 09 de agosto de 2017.

4.1.3. Composição dos cenários

Este estudo foi estruturado em três etapas, a saber: avaliação do impacto ambiental potencial da compostagem em comparação com a disposição final em aterro sanitário; avaliação do impacto ambiental potencial da inclusão de PEC no gerenciamento de RSOD; e avaliação do impacto ambiental potencial da disponibilização de compostagem para a totalidade da população. A seguir, será feita uma breve descrição de cada uma dessas etapas e dos cenários elaborados para a sua execução.

4.1.3.1. Compostagem vs. aterro sanitário

Nesta etapa, foram avaliados os impactos ambientais potenciais dos processos utilizados pelo DMLU e pela Re-Ciclo, representando as PEC. Estes processos foram nomeados de *Modelo base DMLU* e *Modelo base PEC*, respectivamente.

A Tabela 2 apresenta as informações consideradas para a composição do *Modelo base DMLU* e suas respectivas fontes.

Para o *Modelo base DMLU*, foram utilizados os dados de geração de resíduos publicados pelo SNIS referentes ao ano base de 2015 (BRASIL, 2017). Dados operacionais dos processos de coleta, transbordo, transporte e compostagem de resíduos sólidos pelo DMLU, referentes ao ano base de 2011 e publicados por Reichert (2013), foram utilizados para a composição deste modelo. Dados faltantes foram obtidos em bibliografia complementar. Todos os dados são relativos ao gerenciamento da parcela de RSOD, sendo excluídas informações referentes ao gerenciamento dos resíduos provenientes de limpeza urbana, dos resíduos recicláveis e dos resíduos especiais.

Para o *Modelo base PEC*, foram utilizados os dados fornecidos pela empresa. As informações consideradas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 2 – Dados utilizados para a construção do *Modelo base DMLU*

Parâmetro	Valor	Fonte
População atendida	1.476.867 hab.	BRASIL, 2017
Habitantes por domicílio	2,7 hab./dom.	REICHERT, 2013
RSOD coletado	238,5 kg/hab.ano	BRASIL, 2017*
Composição gravimétrica dos resíduos	Matéria orgânica: 57,3% Papel: 11,6% Plástico: 11,2% , dos quais: Filme: 48,1% Rígido: 51,8% Metais: 1,4%, dos quais: Ferroso: 78,6% Não-ferroso: 21,4% Vidro: 2,6% Rejeito: 15,9%	REICHERT, 2013
Consumo de diesel na coleta e transporte de resíduos	5,6 L/t	REICHERT, 2013*
Consumo de energia elétrica na estação de transbordo	0,2 kWh/t	REICHERT, 2013
Consumo de diesel na estação de transbordo	3,3 L/t	REICHERT, 2013
Distância entre estação de transbordo e aterro sanitário	110 km	REICHERT, 2013
Consumo de energia elétrica no aterro sanitário	1,6 kWh/t	REICHERT, 2013
Consumo de diesel no aterro sanitário	0,8 L/t	REICHERT, 2013
Eficiência da coleta de biogás no aterro sanitário	70%	REICHERT, 2013
Eficiência da geração de eletricidade a partir de biogás	50%	ABREU et al, 2009
Eficiência da coleta de lixiviados	98%	REICHERT, 2013
Eficiência do tratamento de lixiviados	95%	REICHERT, 2013
Matriz energética	Hídrica: 84% Carvão: 11% Gás: 3% Óleo: 2%	BRASIL, 2015**

FONTE: elaborado pela autora a partir das fontes informadas na tabela

NOTA: * Dados calculados a partir da fonte informada

** Dados adaptados a partir da fonte informada

Tabela 3 – Dados utilizados para a construção do Modelo base PEC

Parâmetro	Valor
População atendida	300 hab.
Habitantes por domicílio	2,5 hab./dom.
Resíduos sólidos orgânicos coletados	59,7 kg/hab.ano
Resíduos sólidos adicionados à compostagem (material estruturante)	6 kg/hab.ano
Composição gravimétrica dos resíduos	Matéria orgânica: 100%
Distância percorrida no transporte de resíduos	47 km
Consumo de gasolina no transporte de resíduos	0,111 L/km
Número de viagens para o transporte de resíduos	36,5 viagens/ano
Perda de massa no processo de compostagem	60%

FONTE: elaborado pela autora a partir de documentação operacional cedida pela Re-Ciclo

4.1.3.2. Pequenas empresas de compostagem

Nesta etapa, foram avaliados os impactos ambientais potenciais de diferentes cenários de gerenciamento de RSOD no município de Porto Alegre, elaborados a partir de combinações entre o *Modelo base DMLU* e o *Modelo base PEC*.

O cenário 1 considera que todos os RSOD do município são gerenciados exclusivamente pelo DMLU, sem a presença de PEC. Este cenário é idêntico ao já apresentado como *Modelo base DMLU*.

O cenário 2 considera a atuação das PEC na coleta, manejo e compostagem de resíduos orgânicos conforme o *Modelo base PEC*. Os resíduos orgânicos assim gerenciados são excluídos da rota do DMLU, sendo feitas as devidas adaptações no *Modelo base DMLU* para contemplar a nova geração de resíduos per capita e a nova composição gravimétrica dos resíduos sólidos gerenciados por este modelo. Tais adaptações são realizadas por meio dos seguintes procedimentos:

- a) A massa total de resíduos gerenciados pelas PEC é subtraída da massa total de matéria orgânica gerenciada pelo DMLU;
- b) As massas totais das demais categorias gerenciadas pelo DMLU (papel, plástico, metal, vidro e rejeito) permanecem inalteradas, uma vez que as PEC coletam somente matéria orgânica;
- c) Os percentuais de cada categoria de resíduos são recalculados com base nas novas massas totais.

Os demais dados operacionais do gerenciamento de resíduos permanecem iguais ao *Modelo base DMLU*.

A empresa Re-Ciclo, utilizada como base para o *Modelo base PEC*, atende, atualmente, cerca de 120 residências¹⁰ no município de Porto Alegre, o que corresponde a uma cobertura de aproximadamente 0,02% dos domicílios da cidade. Trata-se de um pequeno alcance, cujos efeitos são pouco sensíveis no contexto do gerenciamento de resíduos do município, conforme será exposto no capítulo 5. Por este motivo, foram elaborados cenários hipotéticos, considerando a expansão da atuação das PEC.

Para a construção do cenário 3, foram seguidos os mesmos procedimentos realizados para a obtenção do segundo cenário, porém considerando a atuação de 50 PEC. Neste caso, obtém-se uma cobertura aproximada de 1% dos domicílios do município. Os cenários 4, 5 e 6 consideraram a atuação de iniciativas privadas de coleta e compostagem de resíduos orgânicos, em quantidade tal que permita o atendimento de, respectivamente, 5%, 10% e 20% dos domicílios de Porto Alegre.

É importante ressaltar que os cenários consideraram a multiplicação do número de PEC envolvidas no processo, e não a expansão da atuação da empresa já existente. Isto porque, caso a estrutura da empresa atual fosse expandida, haveria modificações significativas na sua forma de operação, que impactariam fortemente as emissões geradas na execução de suas atividades, tornando inválidos os resultados dos estudos aqui conduzidos.

Todos os cenários partiram do *Modelo base DMLU* e do *Modelo base PEC*, variando-se apenas os dados influenciados pela atuação do serviço de coleta e compostagem de resíduos orgânicos. A Tabela 4 apresenta os dados que variam entre os diferentes cenários.

¹⁰ Número de domicílios atendidos através do sistema de coleta por bicicletas.

Tabela 4 – Dados variáveis entre os diferentes cenários de estudo

Cenário	1	2	3	4	5	6
Cobertura do serviço de compostagem	0	0,02%	1%	5%	10%	20%
População atendida pelo serviço de compostagem (hab.)	0	300	15.000	73.843	147.687	295.373
Resíduos coletados pelo DMLU (kg/hab.ano)	238,5	238,5	237,9	235,5	232,5	226,6
Composição gravimétrica dos resíduos coletados pelo DMLU (%)						
Porção de matéria orgânica	57,3	57,3	57,2	56,8	56,2	55,0
Porção de papel	11,6	11,6	11,6	11,7	11,9	12,2
Porção de plástico	11,2	11,2	11,2	11,3	11,5	11,8
Porção de metal	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5
Porção de vidro	2,6	2,6	2,6	2,6	2,7	2,7
Porção de rejeito	15,9	15,9	15,9	16,1	16,3	16,7

FONTES: elaborado pela autora

4.1.3.3. Cobertura total

Nesta etapa, foi avaliado o impacto ambiental potencial de estender a compostagem dos resíduos orgânicos à totalidade dos domicílios de Porto Alegre. Foram avaliados três cenários distintos para o gerenciamento dos RSOD, em comparação com o cenário 1, já descrito no item anterior.

O cenário 7a partiu do *Modelo base DMLU*, considerando a inclusão de uma etapa de compostagem dos resíduos orgânicos coletados através de um sistema de leiras de revolvimento mecânico, descrito no *item 3.2.3*. São pressupostos deste cenário: a segregação total dos resíduos na fonte, de forma a não haver necessidade de triagem dos resíduos coletados; e a compostagem dos resíduos orgânicos na própria estação de transbordo, de forma a não haver necessidade de transporte da matéria orgânica até o pátio de compostagem. Para este cenário, foram utilizados os mesmos dados operacionais já apresentados no *Modelo base DMLU*, acrescidos dos seguintes:

- Resíduos orgânicos coletados separadamente: 59,7 kg/hab.ano;
- Consumo de energia elétrica na operação de compostagem: 40 kWh/t;
- Perda de massa no processo de compostagem: 50%.

Os resíduos orgânicos coletados separadamente se referem à parcela dos RSOD que é de interesse para a processo de compostagem. Por esse motivo, optou-se por utilizar a mesma taxa anual de resíduos considerada no *Modelo base PEC*, uma vez que estes consistem exclusivamente em resíduos de alimentos não processados exceto carne, osso e gordura. Esta escolha foi feita no intuito de não superestimar a massa total de matéria orgânica efetivamente passível de compostagem. Já os dados relativos ao consumo de energia elétrica e à perda de massa são sugeridos por Reichert (2013), citando McDougall et al. (2001), para processos de compostagem em leiras de revolvimento mecânico.

Os cenários 7b e 7c consideraram que, em 100% dos domicílios do município, parte dos resíduos orgânicos é destinada à compostagem. No primeiro caso (7b), os serviços de coleta e compostagem são oferecidos por empresas privadas, atuando de forma idêntica ao considerado no *Modelo base PEC*. No segundo caso (7c), considera-se compostagem domiciliar e/ou comunitária. Este cenário pode incluir, ainda, processos conduzidos por empresas privadas, desde que excluída a etapa de transporte de resíduos por veículos motorizados. Para estes cenários, também foi adotada uma geração per capita de resíduos orgânicos compostáveis de 59,7 kg/hab.ano. Em ambos os casos, os resíduos orgânicos destinados para compostagem são excluídos da rota do DMLU e os dados referentes à geração e à composição gravimétrica dos resíduos são recalculados conforme descrito no *item 4.1.3.2*.

Da mesma forma que para a construção dos cenários 2 a 6, também os cenários 7a, 7b e 7c partiram de uma combinação entre o *Modelo base DMLU* e o *Modelo base PEC*, variando-se apenas os dados influenciados pelo sistema de compostagem adotado. A Tabela 5 apresenta os dados que variam na composição dos cenários avaliados nesta etapa.

Tabela 5 – Dados variáveis entre os cenários 1, 7a, 7b e 7c

Cenário	1	7a	7b	7c
Responsabilidade da compostagem	-	DMLU	Empresas privadas	Cidadão
População atendida pelo serviço de compostagem (hab.)	0	1.476.867	1.476.867	1.476.867
Resíduos coletados pelo DMLU (kg/hab.ano)	238,5	238,5	178,8	178,8
Combustível consumido na coleta e transporte de resíduos orgânicos compostáveis (L/t)	5,6 (diesel)	5,6 (diesel)	10,6 (gasolina)	0
Composição gravimétrica dos resíduos coletados pelo DMLU (%)				
Porção de matéria orgânica	57,3	57,3	43,0	43,0
Porção de papel	11,6	11,6	15,5	15,5
Porção de plástico	11,2	11,2	14,9	14,9
Porção de metal	1,4	1,4	1,9	1,9
Porção de vidro	2,6	2,6	3,5	3,5
Porção de rejeito	15,9	15,9	21,2	21,2

FONTE: elaborado pela autora

4.2. Avaliação do Ciclo de Vida

Para cada uma das etapas mencionadas no *item 4.1.3* foi realizada uma ACV. A seguir, serão descritas as diretrizes e os procedimentos utilizados para a realização de cada um dos estudos.

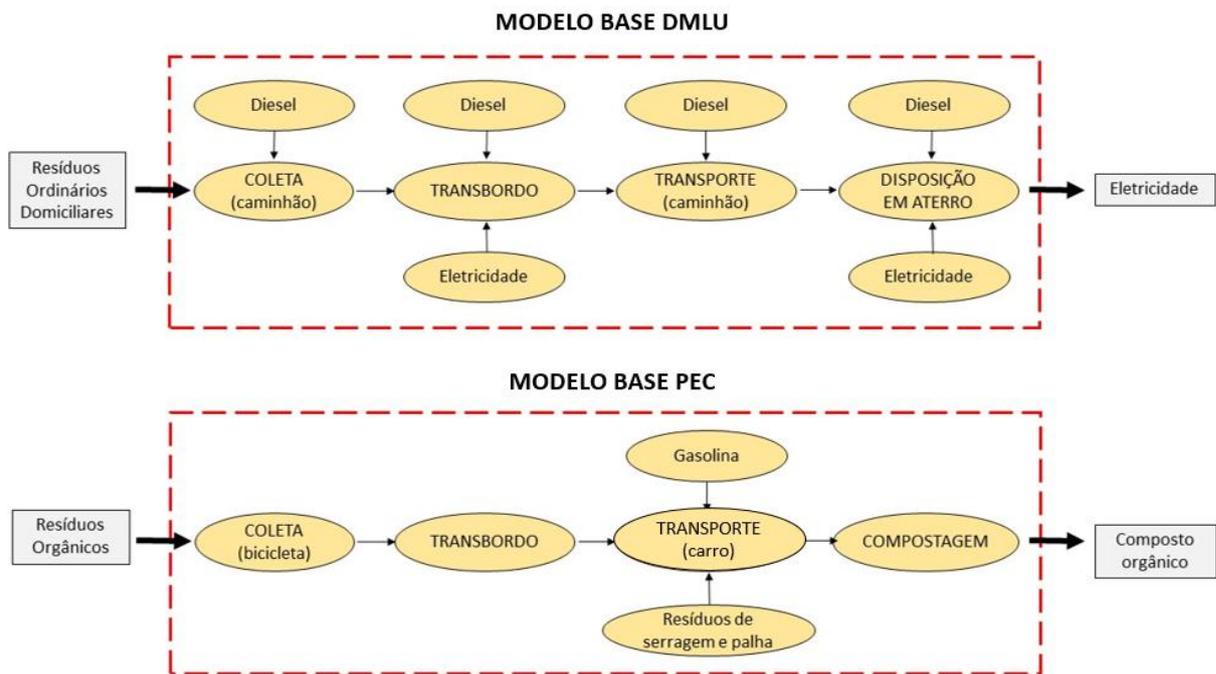
4.2.1. Compostagem vs. aterro sanitário

O primeiro estudo teve por objetivo comparar o impacto ambiental potencial do modelo de gerenciamento de resíduos adotado pelas PEC com o impacto do modelo utilizado pelo DMLU. Neste caso, a função de produto estudada é a destinação de RSOD, e a unidade funcional é o gerenciamento e destinação de 1 tonelada de resíduos produzidos nos domicílios de Porto Alegre.

O sistema de produto consiste nos procedimentos de gerenciamento de resíduos, desde a coleta até a disposição final, descritos nos *itens 3.1.1 e 3.1.2*. No *Modelo Base DMLU*, as entradas do sistema são os resíduos sólidos coletados, enquanto a saída é a energia elétrica gerada no aterro sanitário. Já no *Modelo Base PEC*, as entradas são os resíduos sólidos coletados e a saída é o composto orgânico produzido. Os dois modelos consideram as

emissões gasosas e o lixiviado resultante da decomposição dos resíduos como impactos potenciais do sistema. Em ambos os casos estão excluídos os impactos ambientais potenciais associados à construção das instalações e à fabricação do maquinário e veículos utilizados. Também não são considerados os impactos da fabricação das sacolas utilizadas para o armazenamento dos RSOD. A Figura 5 apresenta os limites do sistema para cada um dos modelos.

Figura 5 – Limites do sistema no Modelo base DMLU e no Modelo base PEC



FONTE: elaborado pela autora

O inventário de emissões de ambos os modelos foi gerado através do software IWM-2, apresentado no *item 3.2.4* deste trabalho. Essa escolha foi feita para permitir a adequação do inventário às características específicas do caso em estudo, uma vez que o programa considera aspectos operacionais intrínsecos ao sistema, tais como a taxa de geração e composição gravimétrica dos resíduos gerenciados, a matriz energética local e o consumo de energia e combustível em cada uma das etapas do processo. Além disso, o inventário gerado apresenta as emissões do sistema como um todo e considera, ainda, as emissões evitadas através do tratamento de lixiviado, tratamento e produção de energia a partir do biogás, e produção de composto orgânico. Os resultados são apresentados distribuídos entre as seguintes etapas: coleta, triagem, tratamento biológico, tratamento térmico, aterro sanitário e reciclagem. Ambos os modelos não incluem triagem nem tratamento térmico, sendo estas

etapas excluídas deste estudo. Os dados utilizados para cada modelo estão descritos no *item 4.1.3* deste trabalho.

Uma limitação do programa utilizado na geração dos inventários é apresentar as emissões da operação de transbordo e do transporte entre a estação de transbordo e o aterro sanitário como parte das emissões do próprio aterro sanitário. Para este primeiro estudo, considera-se importante conhecer as emissões de cada uma dessas etapas separadamente. Portanto, o inventário do *Modelo base DMLU*¹¹ foi calculado em três etapas, descritas a seguir:

- a) Inicialmente foi feito o inventário de emissões do sistema de gerenciamento completo, conforme descrito no *item 4.1.3*. Este inventário, denominado *inv.A*, traz as emissões referentes às três etapas integradas (transbordo, transporte e aterro sanitário).
- b) Em seguida foi feito o inventário de emissões do sistema desconsiderando o transporte entre a estação de transbordo e o aterro sanitário. Este, denominado *inv.B*, traz as emissões referentes às etapas de transbordo e aterro sanitário (sem a etapa de transporte).
- c) Na sequência, foi realizado o inventário de emissões do sistema desconsiderando a operação de transbordo e o transporte até o aterro sanitário. Este, denominado *inv.C*, traz os resultados referentes somente à operação do aterro sanitário.
- d) Por fim, os inventários de cada etapa individualmente são dados pelas seguintes equações:

$$\text{EMISSÕES DA OPERAÇÃO DE TRANSBORDO} = \text{inv.B} - \text{inv.C}$$

$$\text{EMISSÕES DA OPERAÇÃO DE TRANSPORTE} = \text{inv.A} - \text{inv.B}$$

$$\text{EMISSÕES DA OPERAÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO} = \text{inv.C}$$

Para a AICV, as emissões assim obtidas foram classificadas em categorias de impacto segundo a metodologia CML 2001. Segundo Reichert (2013), esta classificação tem o objetivo de relacionar as emissões geradas com os potenciais impactos ao meio ambiente. O procedimento consiste em multiplicar a emissão total de cada contaminante por fatores de caracterização, resultando em indicadores relativos a cada categoria de impacto. Estes

¹¹ O mesmo procedimento não é necessário para o *Modelo base PEC*, já que neste caso não há emissões na etapa de transbordo, nem há disposição de resíduos em aterro sanitário.

indicadores são expressos em termos equivalentes, o que permite somar os impactos potenciais de todos os contaminantes emitidos, obtendo um indicador global do impacto potencial de todo o sistema de produto para cada categoria analisada. As categorias de impacto consideradas neste trabalho são apresentadas a seguir, conforme definidas por Den Boer *et al.* (2005 apud Reichert 2013).

- Aquecimento global: indicador que expressa o potencial de um determinado contaminante atmosférico em contribuir para o aquecimento global. É calculado por

$$AG = \sum_{i=1}^n Fag_i \times m_i$$

Sendo:

AG = Indicador de aquecimento global, em kg CO₂ equivalente;

Fag_i = Fator de caracterização para aquecimento global do contaminante i ;

m_i = massa total emitida do contaminante i , em kg.

- Toxicidade humana: indicador que expressa o potencial de um contaminante em provocar danos à saúde humana, considerando emissões para o ar e para a água doce. É calculado por

$$TH = \sum_{i=1}^n \sum_{meio=1}^k Fth_{i,meio} \times m_{i,meio}$$

Sendo:

TH = Indicador de toxicidade humana, em kg 1,4-diclorobenzeno equivalente;

$Fth_{i,meio}$ = Fator de caracterização para toxicidade humana do contaminante i

no *meio* considerado (ar ou água doce);

m_i = massa total emitida do contaminante i , para o *meio*, em kg.

- Formação de foto-oxidantes: indicador que expressa o potencial de um determinado contaminante de, sob a ação da radiação solar, formar substâncias reativas com o ozônio, resultando em poluentes secundários nocivos à saúde humana, à produção agrícola, e ao equilíbrio de ecossistemas. É calculado por

$$FO = \sum_{i=1}^n Ffo_i \times m_i$$

Sendo:

FO = Indicador de formação de foto-oxidantes, em kg etileno equivalente;

Ffo_i = Fator de caracterização para formação de foto-oxidantes do contaminante i ;

m_i = massa total emitida do contaminante i , em kg.

- Acidificação: indicador que expressa o potencial de um determinado contaminante em contribuir para a acidificação do meio. É calculado por

$$AC = \sum_{i=1}^n Fac_i \times m_i$$

Sendo:

AC = Indicador de acidificação, em kg SO_2 equivalente;

Fac_i = Fator de caracterização para acidificação do contaminante i ;

m_i = massa total emitida do contaminante i , em kg.

- Eutrofização: indicador que expressa o potencial de um determinado contaminante em contribuir para a eutrofização de corpos hídricos, pela concentração excessiva de macronutrientes. É calculado por

$$EU = \sum_{i=1}^n Feu_i \times m_i$$

Sendo:

EU = Indicador de eutrofização, em kg PO_4 equivalente;

Feu_i = Fator de caracterização para eutrofização do contaminante i ;

A Tabela 6 apresenta os fatores de caracterização para cada contaminante identificado pelo ICV¹².

Por fim, os resultados assim categorizados serão analisados graficamente, para avaliar o potencial impacto ambiental, em cada categoria, originado por cada etapa do processo de gerenciamento de resíduos em ambos os modelos. Para fins de comparação, considerou-se o tratamento biológico como destino final no *Modelo base PEC*, e o aterro sanitário como destino final no *Modelo base DMLU*.

¹² Os seguintes contaminantes não são considerados pelo método CML 2001: N_2O e SO_x em ar; e sólidos suspensos, COT, AOX, HC clorados, cloreto, cromo, cianeto, fluoreto, ferro, sulfato e sulfito em água.

Tabela 6 – Fatores de caracterização para cada categoria de impacto

Meio	Contaminante	Fag _i	Fth _i	Ffo _i	Fac _i	Feu _i
Ar	Particulados	-	-	-	-	-
	CO	-	-	2,70E-02	-	-
	CO ₂	1	-	-	-	-
	CH ₄	28	-	6,00E-03	-	-
	NO _x	-	1,2E+00	-	5,00E-01	1,30E-01
	HCl	-	5,0E-01	-	-	-
	HF	-	2,9E+03	-	-	-
	H ₂ S	-	2,2E-01	-	-	-
	HC Total	1650	-	-	-	-
	HC Clorados	-	-	-	-	-
	Dioxinas e furanos	-	1,9E+09	-	-	-
	Amônia	-	1,0E-01	-	1,60E+00	3,50E-01
	Arsênio	-	3,5E+05	-	-	-
	Cádmio	-	1,5E+05	-	-	-
Água	Cromo	-	-	-	-	-
	Cobre	-	4,3E+03	-	-	-
	Chumbo	-	4,7E+02	-	-	-
	Manganês	-	-	-	-	-
	Mercúrio	-	6,0E+03	-	-	-
	Níquel	-	3,5E+04	-	-	-
	Zinco	-	1,0E+02	-	-	-
	DBO	-	-	-	-	-
	DQO	-	-	-	-	2,20E-02
	Dioxinas e furanos	-	8,6E+08	-	-	-
	Fenóis	-	4,9E-02	-	-	-
	Amônio	-	-	-	-	3,30E-01
	Arsênio	-	9,5E+02	-	-	-
	Bário	-	6,3E+02	-	-	-
Cádmio	-	2,3E+01	-	-	-	
Cobre	-	1,3E+00	-	-	-	
Chumbo	-	1,2E+01	-	-	-	
Mercúrio	-	1,4E+03	-	-	-	
Níquel	-	3,3E+02	-	-	-	
Nitrato	-	-	-	-	1,00E-01	
Fosfato	-	-	-	-	1,00E+00	
Zinco	-	5,8E-01	-	-	-	

FONTE: Adaptado de OERS, 2015

NOTA: Fag_i = fator de caracterização para aquecimento global; Fth_i = fator de caracterização para toxicidade humana; Ffo_i = fator de caracterização para formação de foto-oxidantes; Fac_i = fator de caracterização acidificação; Feu_i = fator de caracterização para eutrofização.

É importante ressaltar que este estudo traz uma importante limitação relacionada ao tipo de resíduos coletados. Enquanto o *Modelo Base DMLU* se refere ao gerenciamento de RSOD, o *Modelo Base PEC* se restringe à parcela orgânica compostável destes resíduos. Dessa forma, a comparação entre os dois modelos se presta apenas a fornecer um panorama superficial sobre os potenciais impactos de cada um, sendo aqui tratada como uma aproximação inicial. Por este motivo, será realizado o segundo estudo, descrito no item a seguir.

4.2.2. Pequenas empresas de compostagem

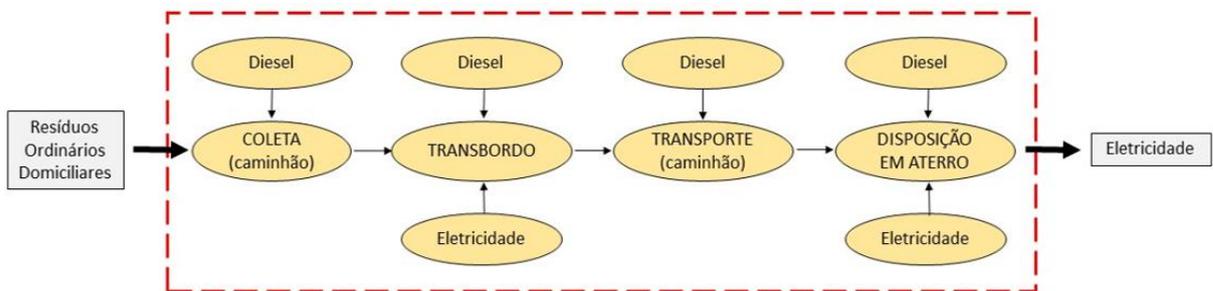
O objetivo do segundo estudo foi avaliar o impacto ambiental potencial da integração de PEC ao gerenciamento de RSOD do município de Porto Alegre. Foram avaliados, comparativamente, os seguintes cenários de gerenciamento:

- cenário 1: atuação exclusiva do DMLU;
- cenário 2: atuação de 1 empresa de pequeno porte na coleta e compostagem de resíduos orgânicos (atendimento a aproximadamente 0,02% dos domicílios do município), em conjunto com a atuação do DMLU;
- cenário 3: atuação de 50 empresas de pequeno porte na coleta e compostagem de resíduos orgânicos (atendimento a aproximadamente 1% dos domicílios do município), em conjunto com a atuação do DMLU;
- cenário 4: atuação de empresas de pequeno porte na coleta e compostagem de resíduos orgânicos, atendendo a 5% dos domicílios municipais, em conjunto com a atuação do DMLU;
- cenário 5: atuação de empresas de pequeno porte na coleta e compostagem de resíduos orgânicos, atendendo a 10% dos domicílios municipais, em conjunto com a atuação do DMLU;
- cenário 6: atuação de empresas de pequeno porte na coleta e compostagem de resíduos orgânicos, atendendo a 20% dos domicílios municipais, em conjunto com a atuação do DMLU;

Para este estudo, a função de produto é o gerenciamento integrado dos RSOD do município de Porto Alegre, e a unidade funcional é o gerenciamento e destinação dos resíduos produzidos por 546.988 domicílios no município de Porto Alegre no período de 1 ano.

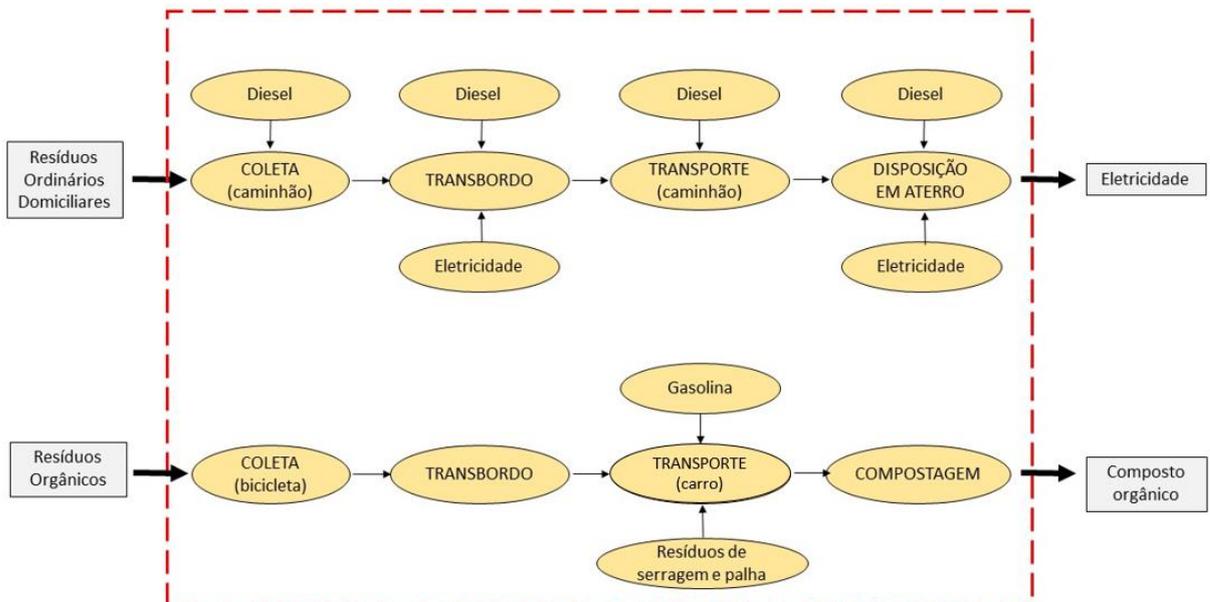
O sistema de produto consiste nos procedimentos de gerenciamento de resíduos, iniciando com a coleta e terminando com a disposição final, em cenários integrados, conforme descrito no *item 4.1.3* deste trabalho. As entradas do sistema são os resíduos sólidos coletados, enquanto as saídas são a energia elétrica gerada no aterro sanitário e o composto orgânico produzido, quando aplicável. Assim como no estudo anterior, não são incluídos os impactos ambientais potenciais associados à construção de instalações ou à fabricação de maquinário, de veículos ou de sacolas para o armazenamento de resíduos. A Figura 6 apresenta os limites do sistema para o cenário 1, e a Figura 7 apresenta os limites do sistema para os cenários 2 a 6.

Figura 6 – Limites do sistema no cenário 1



FONTE: elaborado pela autora

Figura 7 – Limites do sistema nos cenários 2 a 6



FONTE: elaborado pela autora

Assim como no estudo anterior, descrito no *item 4.2.1* os inventários de emissões foram gerados através do software IWM-2, através de dados referentes à população, aos

resíduos e aos parâmetros operacionais de cada sistema de gerenciamento. Para este estudo, considera-se importante diferenciar os impactos ambientais potenciais relacionados ao processo que culmina com a compostagem daqueles relacionados ao processo que leva à disposição final em aterro sanitário. Para tanto, a geração do inventário foi realizada em duas etapas, sendo uma referente ao gerenciamento dos resíduos orgânicos compostáveis por PEC, e outra referente ao gerenciamento dos resíduos orgânicos ordinários domiciliares. O inventário final consiste na soma das emissões dos dois processos.

Por fins de clareza na exposição dos resultados, este estudo não fará distinção entre as emissões geradas em cada etapa do gerenciamento (coleta, transbordo, transporte, tratamento biológico e disposição final), uma vez que esta avaliação já é contemplada no primeiro estudo.

A AICV foi realizada conforme os mesmos procedimentos já descritos no *item 4.2.1*.

4.2.3. Cobertura total

O último estudo teve por objetivo avaliar o impacto ambiental da inserção da compostagem no gerenciamento dos RSOD de Porto Alegre, considerando cobertura de 100% dos domicílios do município. Foram avaliados, comparativamente, os seguintes cenários:

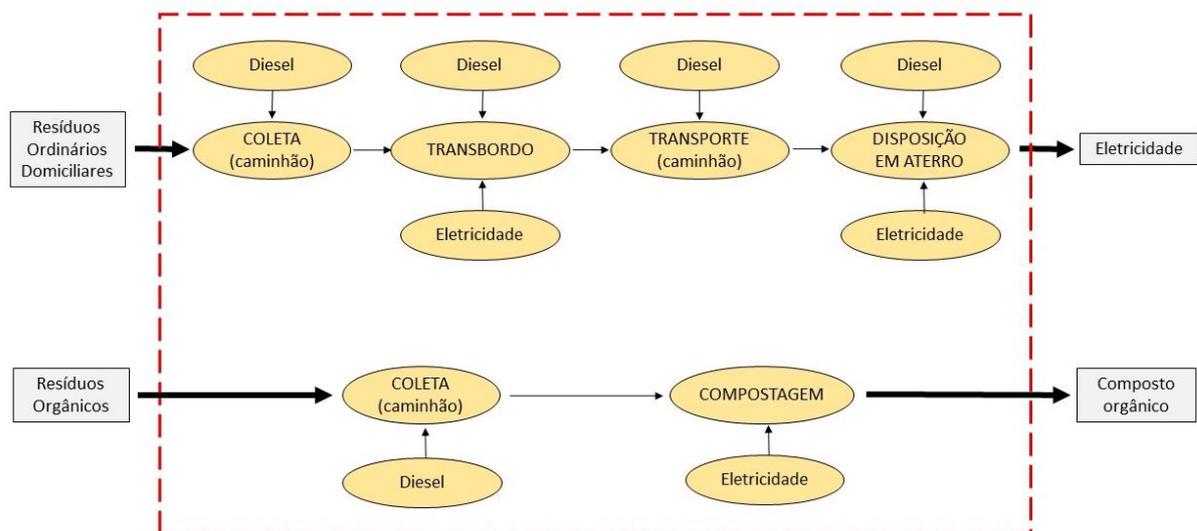
- cenário 1: gerenciamento dos resíduos realizado exclusivamente pelo DMLU, sem compostagem (cenário utilizado como base para a comparação dos resultados);
- cenário 7a: gerenciamento de resíduos realizado exclusivamente pelo DMLU, com compostagem da fração orgânica compostável.
- cenário 7b: atuação de PEC para a coleta e compostagem de resíduos orgânicos, com cobertura de 100% dos domicílios, em conjunto com a atuação do DMLU para o gerenciamento dos demais RSOD.
- cenário 7c: compostagem caseira, comunitária ou descentralizada, realizada por 100% dos domicílios do município, em conjunto com a atuação do DMLU no gerenciamento dos demais RSOD.

Neste estudo, a função de produto é o gerenciamento integrado dos RSOD em Porto Alegre, e a unidade funcional é o gerenciamento e destinação dos resíduos produzidos por 546.988 domicílios do município ao longo de 1 ano.

O sistema de produto consiste nas atividades de gerenciamento de resíduos sólidos, desde a coleta no domicílio até a disposição final, em cenários integrados, já descritos no item 4.1.3 deste trabalho. As entradas do sistema são os resíduos sólidos coletados, e as saídas do sistema são a energia elétrica gerada no aterro sanitário e o composto orgânico produzido. Novamente não foram incluídos os impactos potenciais associados à construção de instalações e à fabricação de maquinário, de veículos ou de sacolas para o armazenamento de resíduos. As Figuras 8 a 10 apresentam os limites do sistema para cada um dos cenários considerados.

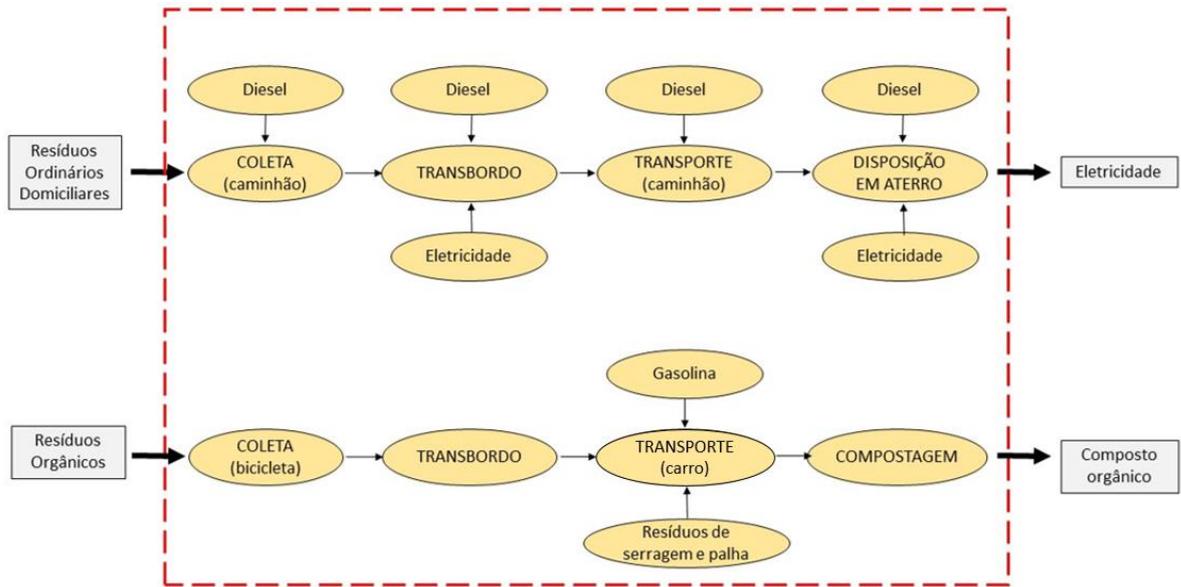
O inventário de emissões será gerado de forma idêntica à descrita no *item 4.2.2*, e a AICV será realizada de acordo com os procedimentos descritos no *item 4.2.1*.

Figura 8 – Limites do sistema no cenário 7a



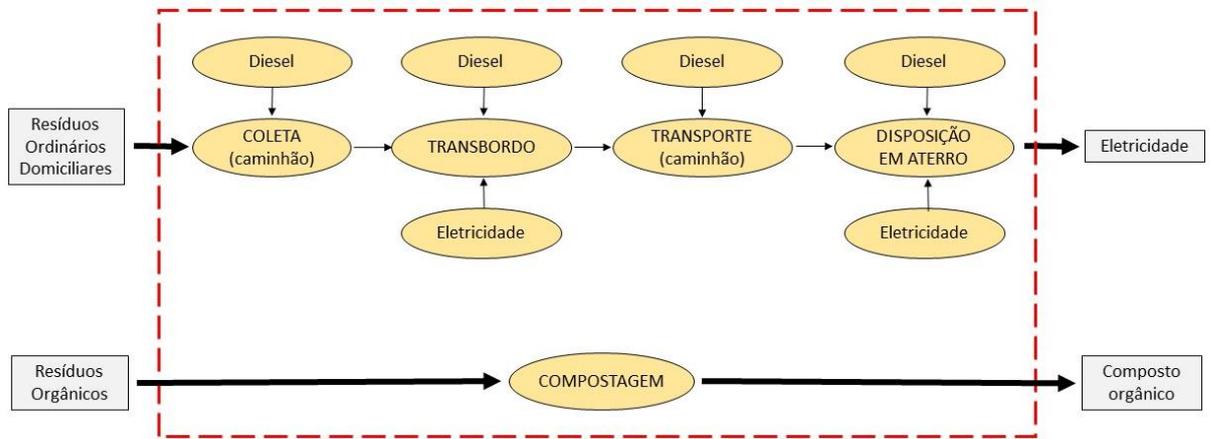
FONTE: elaborado pela autora

Figura 9 – Limites do sistema no cenário 7b



FONTE: elaborado pela autora

Figura 10 – Limites do sistema no cenário 7c



FONTE: elaborado pela autora

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo serão apresentados os resultados dos três estudos descritos no *item 4.2*. Em todos os casos, foram calculados os impactos ambientais potenciais de cada sistema, já alocados dentro das seguintes categorias: aquecimento global, toxicidade humana, formação de foto-oxidantes, acidificação e eutrofização.

A seguinte convenção é utilizada: valores positivos representam impactos potenciais adversos do sistema gerados pela emissão de contaminantes, enquanto valores negativos representam impactos potenciais benéficos do sistema gerados pela reciclagem de compostos e/ou por emissões evitadas através da produção de energia elétrica e de composto orgânico.

Os resultados serão apresentados na forma de gráficos e tabelas simplificadas. O inventário completo de emissões, em sua forma original, é apresentado no Apêndice C.

5.1. Compostagem vs. aterro sanitário

O primeiro estudo teve por objetivo avaliar o impacto ambiental potencial do gerenciamento de uma tonelada de resíduos sólidos pelo *Modelo base PEC*, em comparação com o seu gerenciamento pelo *Modelo base DMLU*. É importante destacar que o *Modelo base DMLU* considera o gerenciamento de RSOD, enquanto o *Modelo base PEC* considera somente a parcela de matéria orgânica compostável destes resíduos. Por isso, as comparações feitas a seguir devem ser vistas com ressalvas, consistindo em uma abordagem meramente introdutória a respeito do assunto. Uma comparação mais precisa será feita no segundo estudo, cujos resultados são apresentados no *item 5.2* deste trabalho.

Os potenciais impactos, adversos e benéficos, foram segregados entre as diferentes etapas do gerenciamento de resíduos: coleta, transbordo, transporte e destino – sendo que o destino se refere à disposição final em aterro sanitário, no caso do *Modelo base DMLU*, ou à compostagem em leira estática de aeração passiva, no caso do *Modelo base PEC*.

5.1.1. Aquecimento global

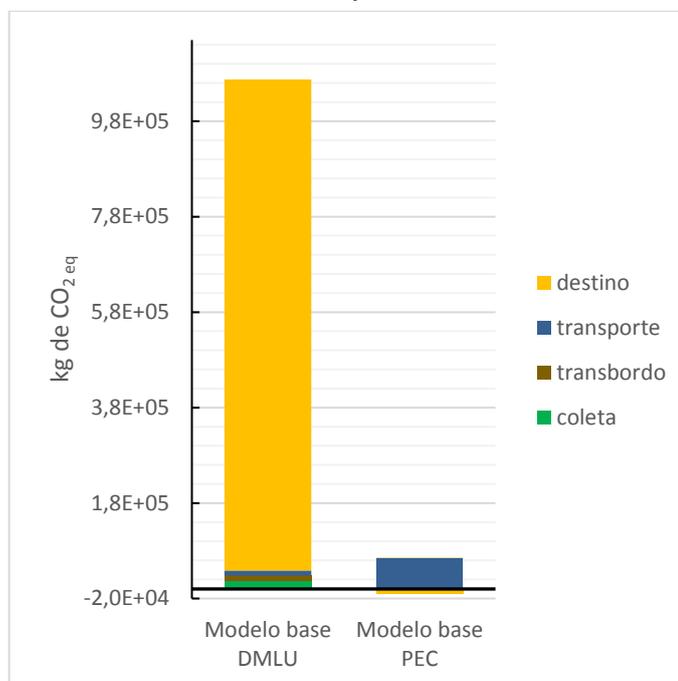
Os resultados referentes ao indicador de aquecimento global são apresentados na Tabela 7 e na Figura 11.

Tabela 7 – Indicadores de impacto potencial para aquecimento global: 1 tonelada de resíduos gerenciados pelo Modelo base DMLU e pelo Modelo base PEC (kg CO₂ equivalente)

Etapa	Impacto potencial do Modelo base DMLU		Impacto potencial do Modelo base PEC	
	Adverso	Benéfico	Adverso	Benéfico
Coleta	1,7E+04	-	-	-
Transbordo	1,0E+04	-	-	-
Transporte	1,1E+04	-	6,4E+04	-
Destino	1,0E+06	-	3,5E+01	-9,4E+03
Total	1,1E+06	-	6,4E+04	-9,4E+03

FONTE: elaborado pela autora

Figura 11 – Impacto ambiental potencial para aquecimento global: 1 tonelada de resíduos gerenciados pelo Modelo base DMLU e pelo Modelo base PEC



FONTE: elaborado pela autora

No que diz respeito ao impacto potencial sobre o aquecimento global, o impacto ambiental total do *Modelo base DMLU* (somando-se impactos potenciais adversos e benéficos) é 19,4 vezes maior do que o impacto ambiental do *Modelo base PEC*.

No *Modelo base DMLU* a etapa que mais impacta o indicador de aquecimento global é a operação do aterro sanitário. As emissões dessa etapa são provenientes, principalmente, da decomposição de resíduos em condições anaeróbias. Além disso, contribuem para as emissões a utilização de diesel e energia elétrica nas atividades operacionais.

Já no *Modelo base PEC*, a etapa de maior impacto sobre o mesmo indicador é o transporte dos resíduos, da estação de transbordo até o pátio de compostagem. É importante destacar que o impacto ambiental potencial, para aquecimento global, gerado na etapa de transporte neste modelo é 5,7 vezes superior ao impacto ambiental potencial do transporte no *Modelo base DMLU*, para a mesma categoria. Isto ocorre porque o DMLU gerencia volumes muito maiores de resíduos do que uma PEC, o que possibilita uma otimização do combustível consumido: enquanto o DMLU utiliza 5,6 litros de diesel por tonelada de resíduo transportada em caminhões, uma PEC utiliza 10,6 litros de gasolina por tonelada de resíduo transportado em veículo de passeio.

Ainda para o *Modelo base PEC*, não há emissões nas etapas de coleta e transbordo, já que estas são realizadas sem o auxílio de maquinário ou veículos motorizados.

Quanto às emissões evitadas, somente o *Modelo base PEC* resulta em impactos potenciais benéficos para o indicador de aquecimento global, provenientes da produção de composto orgânico, material de grande importância na ciclagem de carbono e de macronutrientes.

5.1.2. Toxicidade humana

A Tabela 8 e a Figura 12 trazem os resultados que indicam o impacto potencial quanto à toxicidade humana, para os dois modelos.

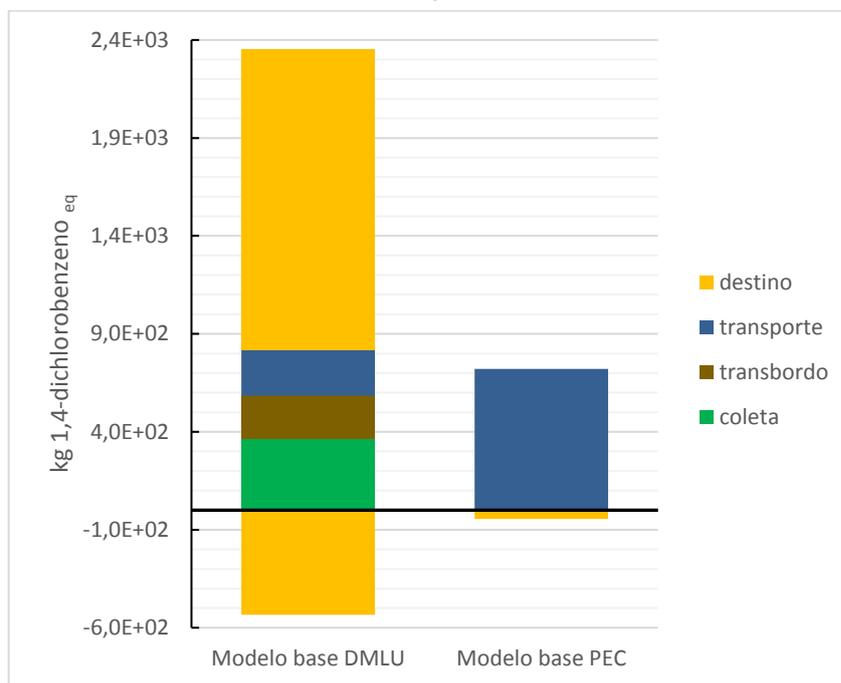
Tabela 8 – Indicadores de impacto potencial para toxicidade humana: 1 tonelada de resíduos gerenciados pelo Modelo base DMLU e pelo Modelo base PEC (kg 1,4-dichlorobenzeno equivalente)

Etapa	Impactos potenciais do Modelo base DMLU		Impactos potenciais do Modelo base PEC	
	Adversos	Benéficos	Adversos	Benéficos
Coleta	3,6E+02	-	-	-
Transbordo	2,2E+02	-	-	-
Transporte	2,4E+02	-	7,2E+02	-
Destino	1,5E+03	-5,3E+02	-	-4,5E+01
Total	2,4E+03	-5,3E+02	7,2E+02	-4,5E+01

FONTE: elaborado pela autora

Para o indicador de toxicidade humana, somando-se impactos potenciais adversos e benéficos, o *Modelo base DMLU* resulta em um impacto potencial 2,7 vezes maior do que o *Modelo base PEC*.

Figura 12 – Impacto ambiental potencial para toxicidade humana: 1 tonelada de resíduos gerenciados pelo Modelo base DMLU e pelo Modelo base PEC



FONTE: elaborado pela autora

No *Modelo base DMLU*, a operação do aterro sanitário é a maior responsável pelos impactos potenciais adversos gerados, seguida das etapas de coleta, transporte e transbordo dos *resíduos*, nesta ordem. Já no *Modelo base PEC*, os impactos potenciais adversos relativos à toxicidade humana são integralmente gerados na etapa de transporte dos resíduos entre o local de transbordo e o pátio de compostagem.

A geração de energia elétrica a partir do biogás produzido no aterro sanitário, no *Modelo base DMLU*, resulta em um impacto potencial benéfico, já que esta geração acaba por substituir outras fontes na matriz energética da área de estudo. Este benefício é 11,8 vezes maior do que aquele proveniente da produção de composto no *Modelo base PEC*, fato que ajuda a mitigar os impactos potenciais adversos originados pelo primeiro modelo.

5.1.3. Formação de foto-oxidantes

A Tabela 9 e a Figura 13 apresentam os resultados referentes à formação de foto-oxidantes, para os dois modelos.

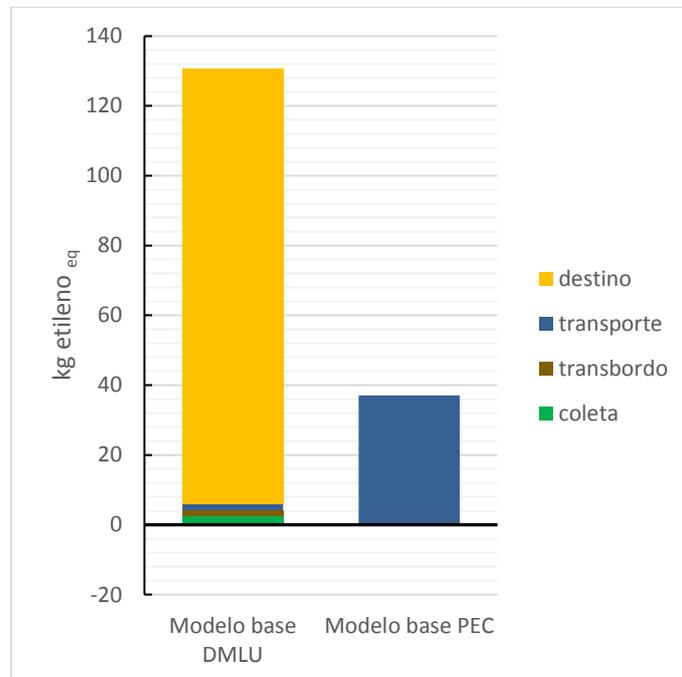
Somando-se impactos potenciais adversos e benéficos, o *Modelo base DMLU* tem um impacto 3,5 vezes maior do que o *Modelo base PEC* no que diz respeito à formação de foto-oxidantes.

Tabela 9 – Indicadores de impacto potencial para formação de foto-oxidantes: 1 tonelada de resíduos gerenciados pelo Modelo base DMLU e pelo Modelo base PEC (kg etileno equivalente)

Etapa	Impactos potenciais do Modelo base DMLU		Impactos potenciais do Modelo base PEC	
	Adversos	Benéficos	Adversos	Benéficos
Coleta	2,6	-	-	-
Transbordo	1,5	-	-	-
Transporte	1,7	-	37,1	-
Destino	124,6	-	-	-0,2
Total	130,5	-	37,1	-0,2

FONTE: elaborado pela autora

Figura 13 – Impacto ambiental potencial para formação de foto-oxidantes: 1 tonelada de resíduos gerenciados pelo Modelo base DMLU e pelo Modelo base PEC



FONTE: elaborado pela autora

Os impactos potenciais adversos do *Modelo base DMLU* se originam especialmente no aterro sanitário, com a decomposição dos resíduos sob condições anaeróbias e com as atividades operacionais da etapa. A coleta, o transporte e a operação de transbordo têm participação menor nesta categoria de impacto.

Já no *Modelo base PEC*, os impactos potenciais adversos são gerados na etapa de transporte dos resíduos para o local de compostagem. Neste modelo, há também um

pequeno impacto potencial benéfico originado na produção do composto orgânico, porém em escala inferior ao impacto potencial adverso correspondente.

5.1.4. Acidificação

Os impactos ambientais potenciais relativos à acidificação são apresentados na Tabela 10 e na Figura 14.

Tabela 10 – Indicadores de impacto potencial para acidificação: 1 tonelada de resíduos gerenciados pelo Modelo base DMLU e pelo Modelo base PEC (kg SO₂ equivalente)

Etapa	Impactos potenciais do Modelo base DMLU		Impactos potenciais do Modelo base PEC	
	Adversos	Benéficos	Adversos	Benéficos
Coleta	1,5E+02	-	-	-
Transbordo	9,0E+01	-	-	-
Transporte	9,8E+01	-	3,0E+02	-
Destino	1,9E+01	-5,0E-02	-	-1,9E+01
Total	3,6E+02	-5,0E-02	3,0E+02	-1,9E+01

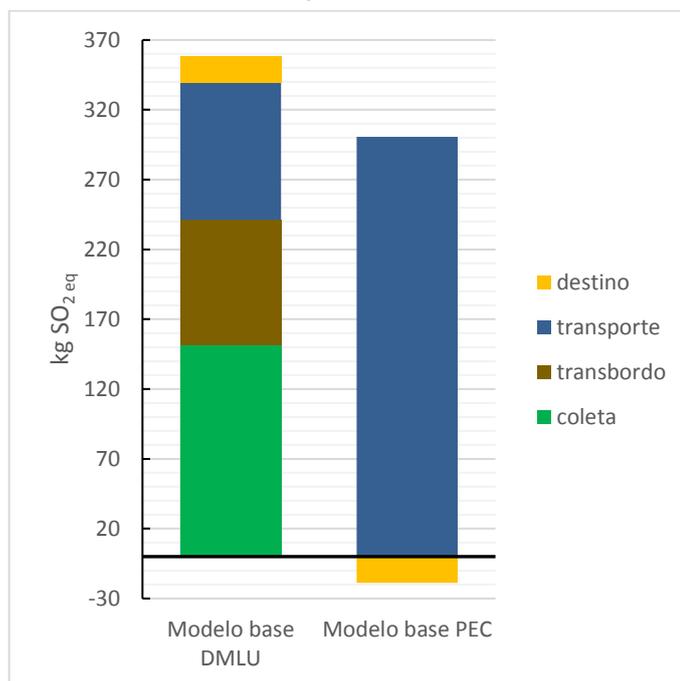
FONTE: elaborado pela autora

Somando-se impactos potenciais adversos e benéficos, o impacto ambiental potencial para acidificação do *Modelo base DMLU* equivale a 1,3 vezes o impacto potencial gerado no *Modelo base PEC*.

No *Modelo base DMLU*, os impactos potenciais adversos relativos a esta categoria de impacto se originam principalmente na etapa de coleta, seguida de perto pelas operações de transporte e transbordo. A operação do aterro sanitário, bem como a decomposição dos resíduos, tem maior participação nos indicadores de acidificação. Nesta última etapa, há também um pequeno impacto potencial benéfico, vinculado à geração de energia elétrica a partir do biogás, mas este é pouco expressivo diante da ordem de grandeza dos impactos potenciais adversos originados.

No *Modelo base PEC*, os impactos potenciais relativos à acidificação se originam na fase de transporte dos resíduos até o pátio de compostagem. A produção de composto orgânico gera um impacto potencial benéfico moderado, que ajuda a mitigar os adversos.

Figura 14 – Impacto ambiental potencial para acidificação: 1 tonelada de resíduos gerenciados pelo Modelo base DMLU e pelo Modelo base PEC



FONTE: elaborado pela autora

5.1.5. Eutrofização

Os resultados relativos ao indicador de impacto ambiental potencial para eutrofização são apresentados na Tabela 11 e na Figura 15.

Tabela 11 – Indicadores de impacto potencial para eutrofização: 1 tonelada de resíduos gerenciados pelo Modelo base DMLU e pelo Modelo base PEC (kg PO₄ equivalente)

Etapa	Impacto potencial do Modelo base DMLU		Impacto potencial do Modelo base PEC	
	Adversos	Benéficos	Adversos	Benéficos
Coleta	3,9E+01	-	-	-
Transbordo	2,3E+01	-	-	-
Transporte	2,5E+01	-	7,8E+01	-
Destino	5,6E+00	-3,3E-01	8,4E+00	-4,9E+00
Total	9,4E+01	-3,3E-01	8,7E+01	-4,9E+00

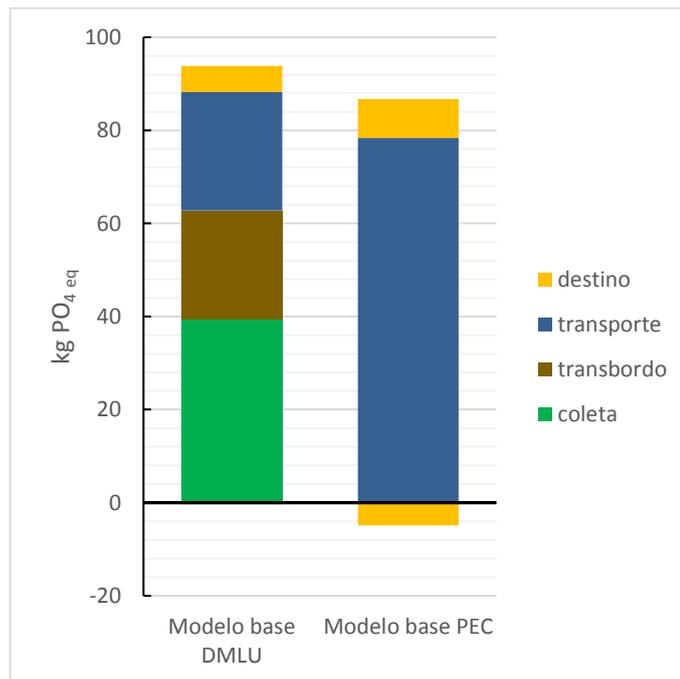
FONTE: elaborado pela autora

No que diz respeito à categoria de eutrofização, os impactos potenciais do *Modelo base DMLU*, somando-se os adversos e benéficos, representam pouco mais de 1,1 vezes os impactos potenciais do *Modelo base PEC*.

No *Modelo base DMLU*, de maneira semelhante ao que ocorre na categoria de acidificação, os impactos potenciais adversos estão distribuídos em todas as fases do

processo, com ênfase na etapa de coleta, seguida de perto pelas operações de transporte e transbordo dos resíduos. A operação do aterro sanitário é menos expressiva para esta categoria de impacto. Identifica-se ainda um impacto potencial benéfico advindo da geração de energia a partir do biogás, mas este é pouco expressivo diante da magnitude dos impactos potenciais adversos envolvidos.

Figura 15 – Impacto ambiental potencial para eutrofização: 1 tonelada de resíduos gerenciados pelo Modelo base DMLU e pelo Modelo base PEC



FONTE: elaborado pela autora

No *Modelo base PEC*, os impactos potenciais adversos se originam, em sua maioria, na etapa de transporte dos resíduos entre o local de transbordo e o pátio de compostagem. O processo de compostagem, em si, também responde por impactos potenciais adversos na categoria de acidificação, porém estes são mitigados por impactos potenciais benéficos gerados na mesma etapa, com a produção de composto orgânico. Os potenciais benéficos gerados na etapa de compostagem correspondem a 58% dos potenciais passivos gerados na mesma etapa.

5.1.6. Considerações gerais

No *Modelo base PEC*, a grande maioria dos impactos potenciais adversos foi gerada pela etapa de transporte dos resíduos entre o local de transbordo e o pátio de compostagem, para todas as categorias. Depreende-se, dessa informação, que as PEC poderiam minimizar

largamente o seu passivo ambiental caso operassem em um sistema descentralizado, com pequenos pontos de compostagem instalados próximos aos domicílios geradores, eliminando a etapa de transporte de resíduos em veículo motorizado.

Para o *Modelo base DMLU*, a operação do aterro sanitário responde pela maior parte dos impactos potenciais adversos relativos aos indicadores de aquecimento global, toxicidade humana e formação de foto-oxidantes. Já os indicadores de acidificação e eutrofização estão mais relacionados às etapas de coleta, transbordo e transporte dos resíduos.

Apesar de os impactos potenciais do *Modelo base PEC* serem expressivamente inferiores aos impactos potenciais do *Modelo base DMLU* (Tabela 12), é importante ressaltar que estes dados se referem ao impacto unitário, quantificado por tonelada de resíduo gerenciado. Porém, a única PEC que opera atualmente em Porto Alegre atua junto a 0,02% dos domicílios do município. Por isso é importante avaliar qual é o impacto potencial que esta iniciativa tem diante do cenário de gerenciamento dos RSOD a nível municipal.

Tabela 12 – Redução do impacto ambiental potencial total do gerenciamento de 1 tonelada de resíduos pelo *Modelo base PEC*, em relação ao *Modelo base DMLU*

Categoria de impacto	Redução do impacto potencial (%)
Aquecimento global	94,8
Toxicidade humana	62,8
Formação de foto-oxidantes	71,8
Acidificação	21,4
Eutrofização	12,5

FONTE: elaborado pela autora

Cabe, ainda, lembrar que o DMLU gerencia RSOD, enquanto as PEC atuam somente com a parcela orgânica compostável destes resíduos. Portanto, uma comparação direta entre os impactos ambientais dos dois modelos se torna bastante limitada.

Por ambos os motivos acima citados, foi realizado o segundo estudo, que considera a atuação de iniciativas privadas de coleta e compostagem de resíduos sólidos como parte integrante do sistema de gerenciamento municipal, em diferentes cenários que combinam o *Modelo base DMLU* e o *Modelo base PEC* dentro de um único sistema de produto. Os resultados do segundo estudo serão apresentados a seguir.

5.2. Pequenas empresas de compostagem

O segundo estudo teve por objetivo avaliar o potencial impacto ambiental de se integrar iniciativas privadas de coleta e compostagem de resíduos orgânicos domiciliares ao gerenciamento municipal dos resíduos sólidos em Porto Alegre. Foram analisados, comparativamente, seis diferentes cenários.

No cenário 1, o gerenciamento de resíduos é realizado exclusivamente pelo DMLU, sem envio de resíduos para compostagem. O cenário 2 considera a integração de 01 PEC, com cobertura de 0,02% dos domicílios do município e capacidade para gerenciar 17,9 toneladas de resíduo ao ano. O cenário 3 considera a integração de 50 PEC, resultando em uma cobertura de 1% dos domicílios e capacidade para gerenciar 895,5 toneladas de resíduos por ano. No cenário 4, o sistema de gerenciamento de resíduos considera a integração de serviços de compostagem em quantidade suficiente para atender a 5% dos domicílios. Neste caso, são necessárias 246 PEC, resultando na compostagem anual de 4.408,4 toneladas de resíduos orgânicos. Para o cenário 5, as empresas de compostagem estão em quantidade suficiente para atender a 10% dos domicílios de Porto Alegre, sendo necessárias 492 PEC para realizar a coleta e compostagem de 8.816,9 toneladas de resíduos ao ano. Já o cenário 6 considera a cobertura de 20% dos domicílios por 985 PEC, e os resíduos orgânicos compostados somam 17.633,8 toneladas ao ano.

Cada cenário consiste em uma combinação entre o *Modelo base DMLU* e o *Modelo base PEC*, avaliados individualmente no *item 5.1*. Em todos os casos, o sistema considerado se refere ao gerenciamento integrado dos resíduos sólidos ordinários gerados em 546.988 domicílios do município de Porto Alegre ao longo de um ano.

Os impactos potenciais adversos e benéficos foram segregados entre aqueles gerados nos processos conduzidos pelo DMLU e aqueles gerados nos processos realizados por PEC. A seguir, serão apresentados os resultados relativos a cada uma das categorias de impacto consideradas. Para todos os casos, os cenários 2 a 6 serão avaliados em comparação ao cenário 1, que caracteriza o modelo conduzido atualmente pelo município.

5.2.1. Aquecimento global

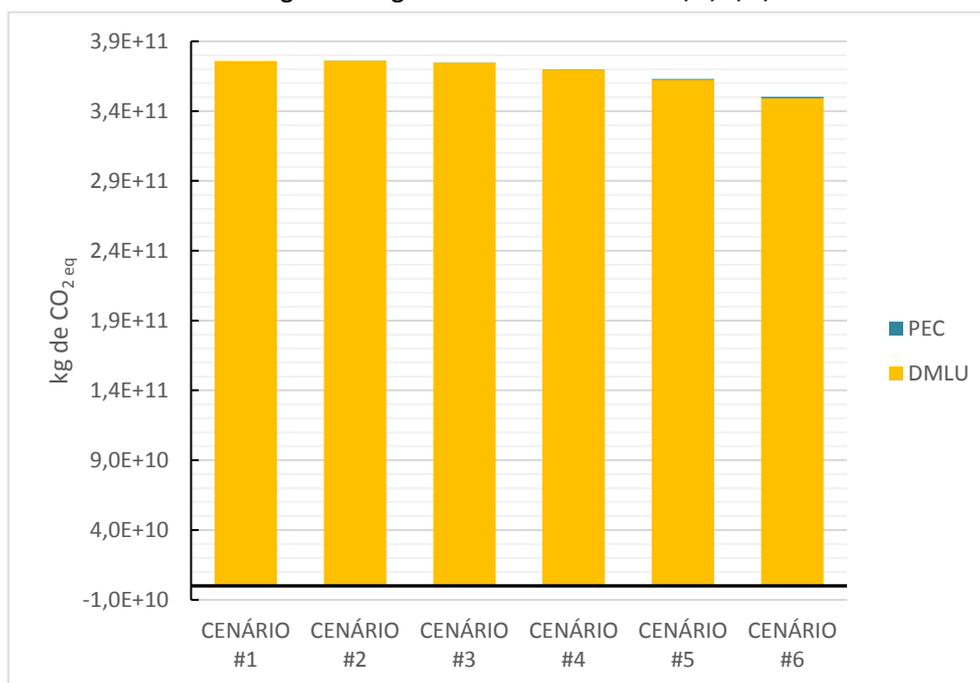
A Tabela 13 e a Figura 16 apresentam os resultados referentes ao indicador de aquecimento global.

Tabela 13 – Indicadores de impacto potencial para aquecimento global do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários nºs 1, 2, 3, 4, 5 e 6 (kg CO₂ equivalente)

Cenário	Emissões		Emissões evitadas		Total
	DMLU	PEC	DMLU	PEC	
CENÁRIO 1	3,8E+11	-	-	-	3,8E+11
CENÁRIO 2	3,8E+11	1,2E+06	-	-1,7E+05	3,8E+11
CENÁRIO 3	3,7E+11	5,8E+07	-	-8,4E+06	3,7E+11
CENÁRIO 4	3,7E+11	2,8E+08	-	-4,1E+07	3,7E+11
CENÁRIO 5	3,6E+11	5,7E+08	-	-8,3E+07	3,6E+11
CENÁRIO 6	3,5E+11	1,1E+09	-	-1,7E+08	3,5E+11

FONTE: elaborado pela autora

Figura 16 – Impacto ambiental potencial para aquecimento global do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários nºs 1, 2, 3, 4, 5 e 6



FONTE: elaborado pela autora

Considerando o indicador de aquecimento global, as diferenças entre os três primeiros cenários são bastante sutis. Para o segundo cenário, há inclusive um pequeno incremento nos impactos potenciais adversos gerados, devido às emissões provenientes da atuação da PEC no sistema. Isto acontece porque a atuação de 01 PEC, com cobertura a 0,02% dos domicílios, não é suficiente para atenuar as emissões causadas pela operação do modelo de gerenciamento conduzido pelo DMLU.

No terceiro cenário, esta situação modifica. Ao atender a 1% dos domicílios do município, as iniciativas privadas de coleta e compostagem de resíduos retirariam, a cada ano, mais de 4.000 toneladas de resíduos orgânicos da rota do aterro sanitário. Esta diferença é suficiente para compensar as emissões causadas pela operação das próprias PEC, embora seja pouco expressiva diante da dimensão total dos impactos potenciais do sistema.

Nos cenários 4, 5 e 6, a redução nos indicadores de aquecimento global é perceptível, embora pequena, chegando a uma redução máxima de 6,9% no último caso.

Em todos os cenários em que há integração de PEC ao sistema, é registrado um pequeno impacto potencial benéfico relativo ao indicador de aquecimento global. Porém, este benefício, proveniente da produção de composto orgânico nestes modelos, ocorre em escala inferior aos impactos potenciais adversos gerados.

5.2.2. Toxicidade humana

A Tabela 14 e a Figura 17 apresentam os resultados relativos ao indicador de toxicidade humana.

Tabela 14 – Indicadores de impacto potencial para toxicidade humana do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários nºs 1, 2, 3, 4, 5 e 6 (kg 1,4-dichlorobenzeno equivalente)

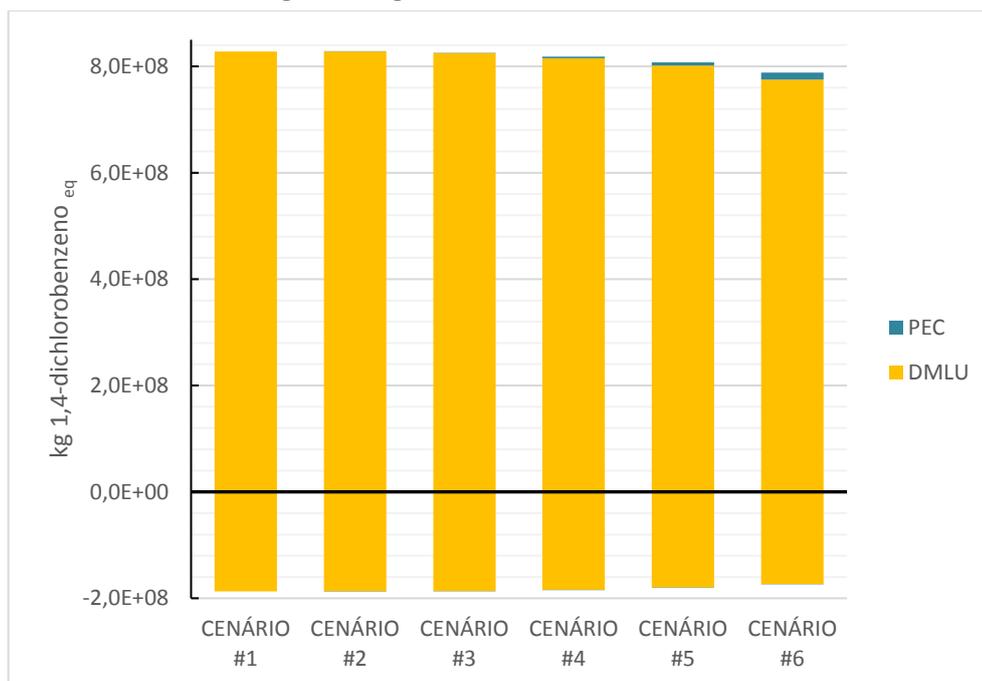
Cenário	Emissões		Emissões evitadas		Total
	DMLU	PEC	DMLU	PEC	
CENÁRIO 1	8,3E+08	-	-1,9E+08	-	6,4E+08
CENÁRIO 2	8,3E+08	1,3E+04	-1,9E+08	-8,1E+02	6,4E+08
CENÁRIO 3	8,3E+08	6,5E+05	-1,9E+08	-4,2E+04	6,4E+08
CENÁRIO 4	8,2E+08	3,2E+06	-1,8E+08	-2,1E+05	6,3E+08
CENÁRIO 5	8,0E+08	6,4E+06	-1,8E+08	-4,1E+05	6,3E+08
CENÁRIO 6	7,8E+08	1,3E+07	-1,7E+08	-7,7E+05	6,1E+08

FONTE: elaborado pela autora

O comportamento dos indicadores relativos a toxicidade humana é semelhante ao dos indicadores de aquecimento global. Também neste caso há um aumento nos impactos potenciais adversos gerados pelo cenário 2 e uma diminuição no cenário 3, ambos graficamente inexpressivos diante dos impactos potenciais totais do sistema. Nos cenários 4, 5 e 6 a redução nos impactos potenciais passa a ser perceptível, embora ainda pequena,

chegando a um máximo de 4,2% no último cenário. É possível perceber, ainda, que os impactos potenciais adversos gerados pelas PEC são ligeiramente mais notáveis nos cenários 4 e 5. Contudo, a sua participação continua sendo pouco relevante diante dos impactos potenciais totais do sistema.

Figura 17 – Impacto ambiental potencial para toxicidade humana do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n^{os} 1, 2, 3, 4, 5 e 6



FONTE: elaborado pela autora

Diferentemente do que ocorria na categoria anterior, há um expressivo impacto potencial benéfico decorrente da geração de energia elétrica a partir do biogás produzido no aterro sanitário. Este decresce à medida em que aumenta a participação das PEC no cenário, uma vez que a geração de biogás é diretamente proporcional ao volume de resíduos, especialmente matéria orgânica, destinados ao aterro sanitário. Complementarmente, a produção de composto orgânico também origina um pequeno impacto potencial benéfico, porém em escala menor do que o proveniente da produção de energia elétrica. Estes benefícios ajudam a atenuar os impactos potenciais adversos decorrentes de cada cenário.

5.2.3. Formação de foto-oxidantes

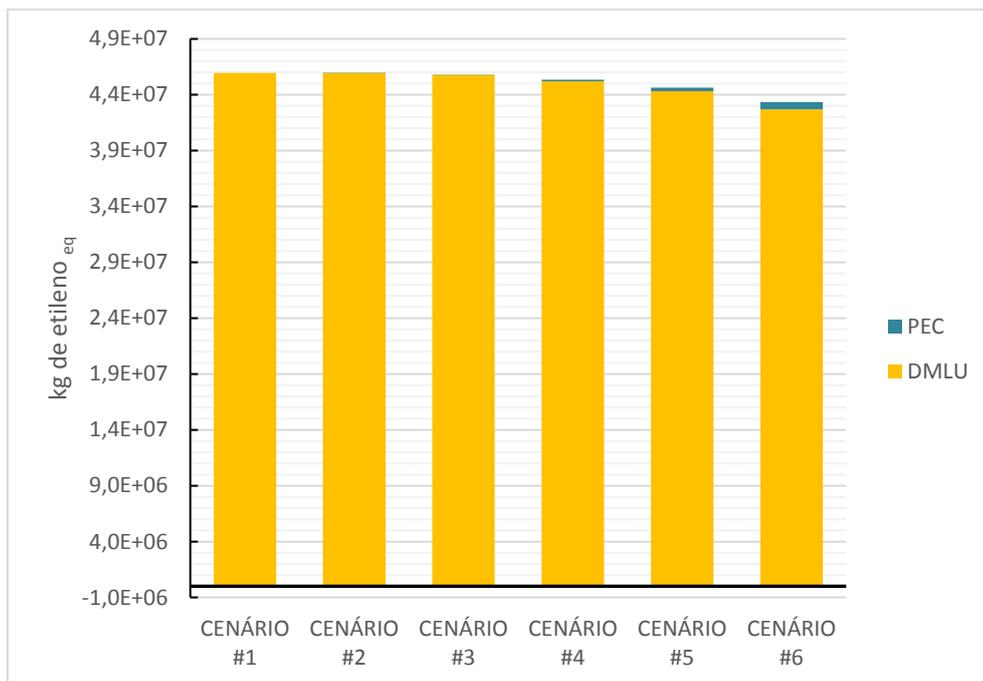
A Tabela 15 e a Figura 18 apresentam os resultados relativos à formação de foto-oxidantes.

Tabela 15 – Indicadores de impacto potencial para formação de foto-oxidantes do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n^{os} 1, 2, 3, 4, 5 e 6 (kg etileno equivalente)

Cenário	Emissões		Emissões evitadas		Total
	DMLU	PEC	DMLU	PEC	
CENÁRIO 1	4,6E+07	-	-	-	4,6E+07
CENÁRIO 2	4,6E+07	6,6E+02	-	-4,0E+00	4,6E+07
CENÁRIO 3	4,6E+07	3,3E+04	-	-2,0E+02	4,6E+07
CENÁRIO 4	4,5E+07	1,6E+05	-	-9,8E+02	4,5E+07
CENÁRIO 5	4,4E+07	3,3E+05	-	-2,0E+03	4,5E+07
CENÁRIO 6	4,3E+07	6,5E+05	-	-3,9E+03	4,3E+07

FONTE: elaborado pela autora

Figura 18 – Impacto ambiental potencial para formação de foto-oxidantes do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n^{os} 1, 2, 3, 4, 5 e 6



FONTE: elaborado pela autora

A diferença entre os indicadores dos três primeiros cenários, novamente, é sutil diante da magnitude dos impactos potenciais produzidos em cada cenário. Assim como nos outros casos, ocorre um pequeno aumento nos impactos potenciais adversos no cenário 2 e um pequena diminuição no cenário 3, ambos de pouca expressividade dentro do contexto.

Nos cenários 4, 5 e 6, há uma redução progressiva no indicador de formação de foto-oxidantes, alcançando uma redução máxima de 5,7% no último caso. Novamente, os impactos potenciais gerados pelas PEC são levemente mais perceptíveis nos cenários 4 e 5, embora ainda sejam de pouca relevância na totalidade do sistema.

Para a formação de foto-oxidante, não são registrados impactos potenciais benéficos ambientais decorrentes da geração de energia elétrica no aterro sanitário. Já a produção de composto responde por um pequeno impacto potencial benéfico, porém em uma ordem de grandeza pouco expressiva diante dos impactos potenciais totais do sistema.

5.2.4. Acidificação

A Tabela 16 e a Figura 19 apresentam os resultados relativos ao indicador de acidificação.

Tabela 16 – Indicadores de impacto potencial para acidificação do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n^{os} 1, 2, 3, 4, 5 e 6 (kg SO₂ equivalente)

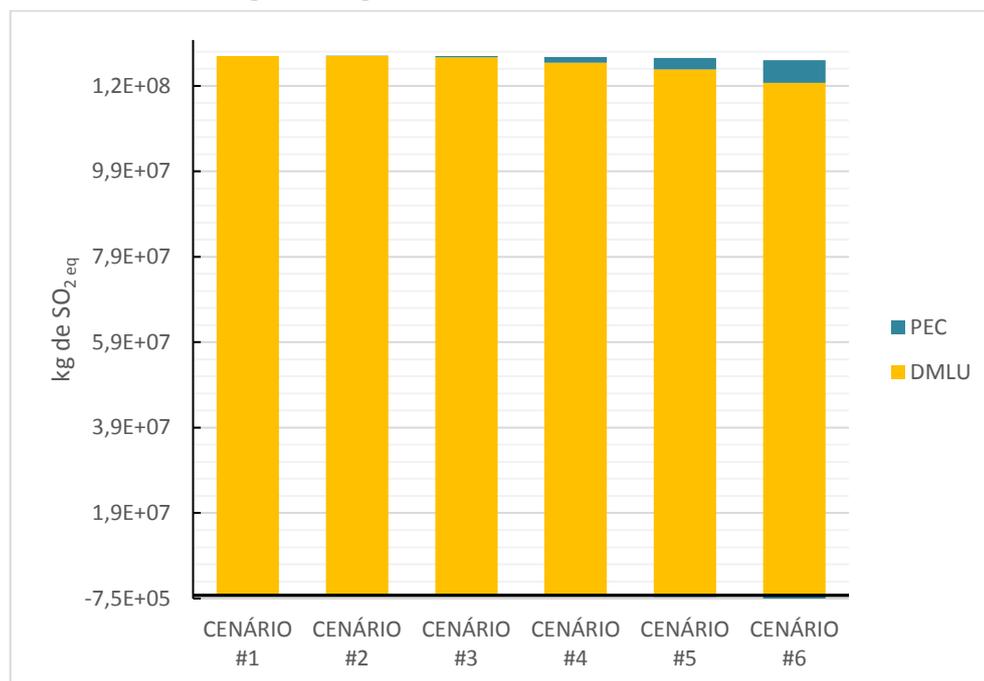
Cenário	Emissões		Emissões evitadas		Total
	DMLU	PEC	DMLU	PEC	
CENÁRIO 1	1,3E+08	-	-1,7E+04	-	1,3E+08
CENÁRIO 2	1,3E+08	5,4E+03	-1,7E+04	-3,4E+02	1,3E+08
CENÁRIO 3	1,3E+08	2,7E+05	-1,7E+04	-3,9E+04	1,3E+08
CENÁRIO 4	1,2E+08	1,3E+06	-1,7E+04	-1,9E+05	1,3E+08
CENÁRIO 5	1,2E+08	2,7E+06	-1,7E+04	-3,8E+05	1,3E+08
CENÁRIO 6	1,2E+08	5,3E+06	-1,6E+04	-7,4E+05	1,2E+08

FONTE: elaborado pela autora

Para os cenários 2 e 3, assim como nas demais categorias, as variações no indicador de acidificação são graficamente inexpressivas, com um mínimo aumento no Cenário 2 e uma leve redução no Cenário 3.

Nos cenários 4, 5 e 6, ocorre uma diminuição gradativa nos impactos potenciais adversos gerados pelo processo conduzido pelo DMLU. Porém, os impactos potenciais adversos originados no processo conduzido pelas PEC aumentam em magnitude semelhante, o que faz com que a redução do impacto potencial total do sistema seja mínima. No melhor dos casos, representado pelo cenário 6, a redução do indicador de acidificação é de apenas 1,4% em relação ao primeiro cenário.

Figura 19 – Impacto ambiental potencial para acidificação do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n^{os} 1, 2, 3, 4, 5 e 6



FONTE: elaborado pela autora

Tanto a geração de energia elétrica no aterro sanitário quanto a produção de composto resultam em impactos potenciais benéficos para o sistema, porém sua magnitude é pouco expressiva no contexto.

5.2.5. Eutrofização

A Tabela 17 e a Figura 20 apresentam os resultados relativos ao indicador de eutrofização.

Também para a eutrofização, o aumento dos indicadores no cenário 2 e a sua redução no cenário 3 têm pouca relevância no contexto do gerenciamento municipal de resíduos sólidos.

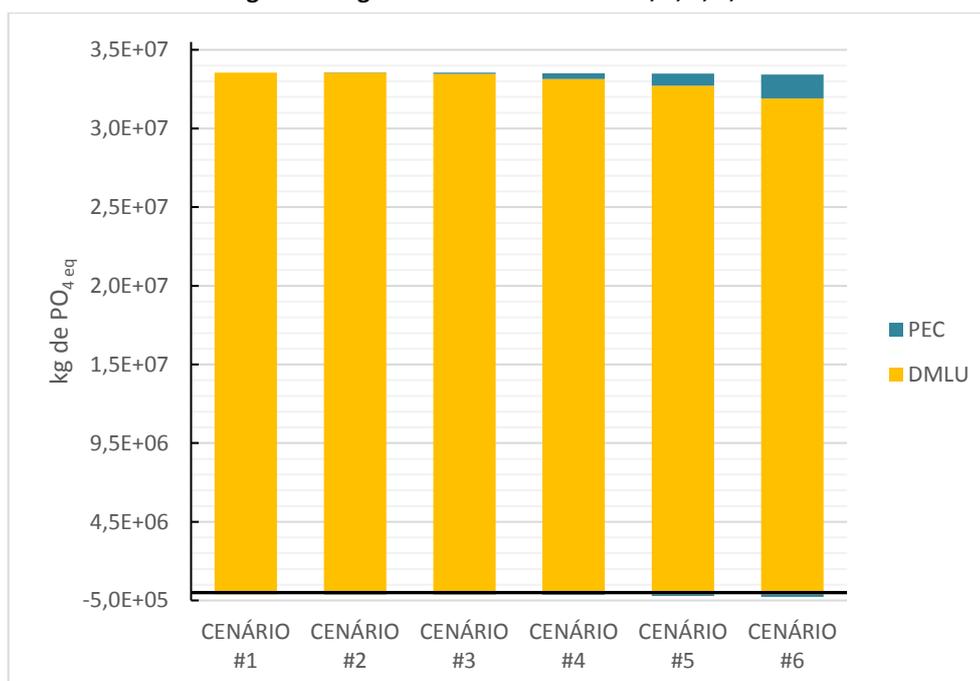
Nos cenários 4, 5 e 6, os indicadores apresentam um comportamento semelhante ao já observado no caso da categoria “acidificação”: a redução dos impactos potenciais adversos gerados pelo processo do DMLU é compensada pelo seu aumento no processo conduzido pelas PEC. Neste caso, essa inversão é ainda mais acentuada, sendo que a maior redução no indicador de eutrofização se restringe a 0,9% no cenário 6.

Tabela 17 – Indicadores de impacto potencial para eutrofização do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n^{os} 1, 2, 3, 4, 5 e 6 (kg PO₄ equivalente)

Cenário	Emissões		Emissões evitadas		Total
	DMLU	PEC	DMLU	PEC	
CENÁRIO 1	3,3E+07	-	-1,2E+05	-	3,3E+07
CENÁRIO 2	3,3E+07	1,6E+03	-1,2E+05	-8,7E+01	3,3E+07
CENÁRIO 3	3,3E+07	7,8E+04	-1,2E+05	-9,2E+03	3,3E+07
CENÁRIO 4	3,3E+07	3,8E+05	-1,1E+05	-4,5E+04	3,3E+07
CENÁRIO 5	3,2E+07	7,6E+05	-1,1E+05	-9,1E+04	3,3E+07
CENÁRIO 6	3,1E+07	1,5E+06	-1,1E+05	-1,7E+05	3,3E+07

FONTE: elaborado pela autora

Figura 20 – Impacto ambiental potencial para eutrofização do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n^{os} 1, 2, 3, 4, 5 e 6



FONTE: elaborado pela autora

Quanto aos impactos potenciais benéficos decorrentes da geração de energia elétrica e da produção de composto, estes estão presentes em todos os cenários, porém são pouco expressivos diante da magnitude dos impactos potenciais adversos gerados.

5.2.6. Considerações gerais

Com exceção do segundo cenário, que considera a atuação de uma única iniciativa privada na coleta e compostagem de resíduos orgânicos, todos os demais cenários

apresentaram redução em todas as categorias de impacto potencial avaliadas, sendo que os resultados mais relevantes dizem respeito às seguintes categorias de impacto: aquecimento global, toxicidade humana e formação de foto-oxidantes. Porém, estas reduções são pouco expressivas diante da magnitude dos impactos potenciais totais do sistema. As maiores reduções nos impactos potenciais adversos são notados nos cenários 5 e 6, nos quais se considera que os serviços de compostagem atendem a 10% e 20% dos domicílios do município, respectivamente. A Tabela 18 traz uma síntese das reduções nos indicadores de impacto ambiental potencial nos cenários 2 a 6, relativamente ao cenário 1.

Tabela 18 – Redução nos indicadores de impacto ambiental potencial do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano para os cenários nºs 2, 3, 4, 5 e 6, relativamente ao cenário nº 1

Cenário	Domicílios atendidos por serviços de compostagem (%)	Nº de PEC necessárias	Redução no impacto potencial em relação ao cenário 1 (%)				
			AG	TH	FO	AC	EU
2	0,02	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	1	50	0,4	0,2	0,3	0,1	0,0
4	5	246	1,6	1,0	1,3	0,4	0,2
5	10	492	3,5	2,1	2,9	0,7	0,5
6	20	984	6,9	4,2	5,7	1,4	0,9

NOTA: AG = aquecimento global; TH = toxicidade humana; FO = formação de foto-oxidantes; AC = acidificação; EU = eutrofização. **FONTE:** elaborado pela autora

É importante destacar que estes cenários consideram um grande número de PEC atuando no município: 492 no cenário 5 e 984 no cenário 6. Deve-se considerar que cada uma dessas empresas deverá contar com infraestrutura idêntica à descrita no *Modelo base PEC*, inclusive: área disponível para o pátio de compostagem na região metropolitana de Porto Alegre; demanda para a aplicação do composto no mesmo local em que é realizado o processo de compostagem; e sede operacional no município de Porto Alegre com espaço para o transbordo dos resíduos. Tratam-se, portanto, de cenários pouco viáveis na prática.

Cabe atentar, ainda, para as variações nos consumos de diesel e eletricidade em cada cenário, assim como para a produção de composto e geração de energia elétrica proporcionados em cada caso. A Tabela 19 apresenta os principais resultados em relação a estes fatores.

Tabela 19 – Consumos e gerações do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano para os cenários n^{os} 1, 2, 3, 4, 5 e 6

Parâmetro	Unidade	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
Diesel consumido	litros	4.684.871	4.684.771	4.673.033	4.626.066	4.567.260	4.450.787
Gasolina consumida	litros	-	373	18.648	91.802	183.604	367.208
Eletricidade consumida	kWh	634.019	634.019	632.424	626.044	618.069	602.385
Eletricidade gerada	kWh	17.001.778	17.001.778	16.934.392	16.714.822	16.381.618	15.778.354
Eletricidade: consumo/geração	%	3,7	3,7	3,7	3,7	3,8	3,8
Composto produzido	toneladas	-	8	394	1.938	3.875	7.751

FONTE: elaborado pela autora

Em relação ao combustível, consumido, observa-se que o volume de gasolina consumido em todos os cenários é superior ao volume de diesel que se deixa de consumir.

Já a eletricidade consumida reduz gradativamente ao longo dos cenários, uma vez que não há consumo de eletricidade no processo de compostagem por leiras estáticas de aeração passiva. Por outro lado, a geração de eletricidade a partir do biogás produzido no aterro sanitário também diminui com a minimização do envio de resíduos para aterro sanitário. Porém, a taxa de consumo/geração de eletricidade se mantém estável em todos os cenários, com um aumento de 0,1% somente nos cenários 4 e 5.

A massa total de composto produzido é um fator a ser tratado com cuidado. Deve-se recordar que o *Modelo base PEC*, utilizado na construção de todos os cenários, considera que todo o composto produzido é utilizado para a fertilização do solo na mesma propriedade em que se encontra o pátio de compostagem. Caso haja a necessidade de transporte motorizado deste composto, para venda ou doação, as emissões deste transporte devem ser computadas entre os impactos ambientais potenciais do sistema.

5.3. Cobertura total

O terceiro e último estudo teve por objetivo avaliar o potencial impacto ambiental de inserir a compostagem no gerenciamento municipal dos resíduos sólidos em Porto Alegre, considerando cobertura de 100% dos domicílios do município. Foram propostos três novos cenários para esta avaliação: o cenário 7a considera que a compostagem é realizada pelo

DMLU; o cenário 7b considera a compostagem sendo realizada por iniciativas privadas atuando conforme o *Modelo base PEC*, e o cenário 7c considera a compostagem realizada de forma domiciliar¹³. Os três novos cenários serão avaliados em comparação com o cenário 1, que consiste no modelo atual de gerenciamento de RSOD pelo DMLU.

Assim como no segundo estudo, também aqui o sistema considerado se refere ao gerenciamento integrado dos RSOD gerados em 546.988 domicílios do município de Porto Alegre ao longo de um ano. Os impactos potenciais adversos e benéficos foram segregados entre aqueles gerados nos processos conduzidos pelo DMLU, os gerados nos processos realizados por PEC, e os gerados na compostagem domiciliar. A seguir, serão apresentados os resultados relativos a cada uma das categorias de impacto consideradas.

5.3.1. Aquecimento global

A Tabela 20 e a Figura 21 apresentam os resultados relativos ao indicador de aquecimento global.

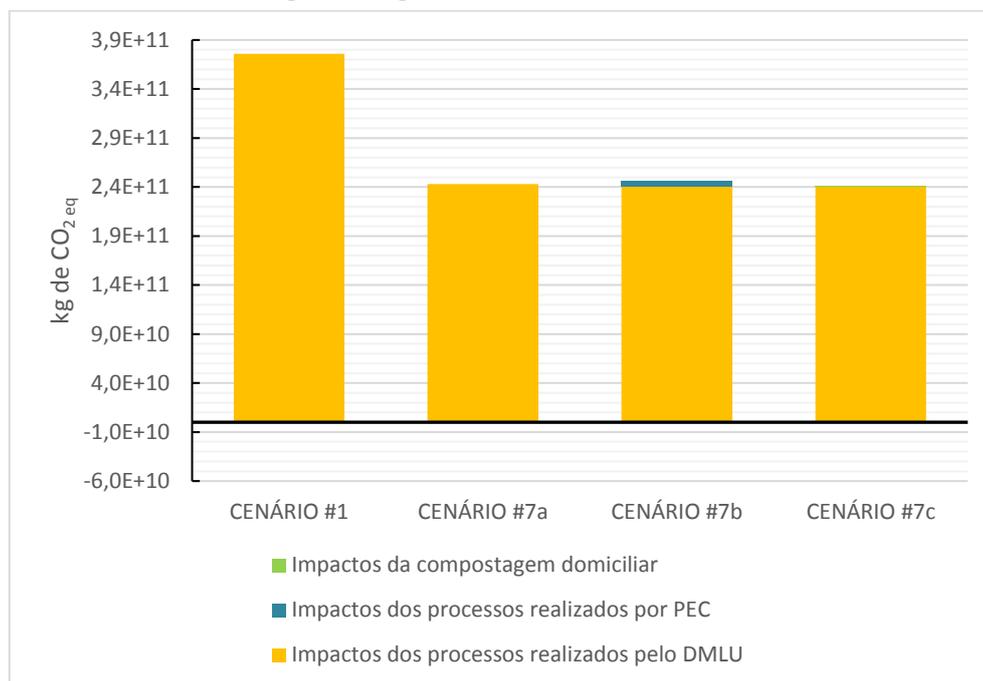
Tabela 20 – Indicadores de impacto potencial para aquecimento global do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n^{os} 1, 7a, 7b e 7c (kg CO₂ equivalente)

Origem	Emissões			Emissões evitadas			Total
	DMLU	PEC	Domiciliar	DMLU	PEC	Domiciliar	
CENÁRIO 1	3,8E+11	-	-	-	-	-	3,8E+11
CENÁRIO 7a	2,4E+11	-	-	-9,4E+08	-	-	2,4E+11
CENÁRIO 7b	2,4E+11	5,7E+09	-	-	-8,3E+08	-	2,5E+11
CENÁRIO 7c	2,4E+11	-	3,1E+06	-	-	-8,3E+08	2,4E+11

FONTE: elaborado pela autora

¹³ Para facilitar a expressão, o termo “compostagem domiciliar” é utilizado para designar sistemas que não requeiram o uso de veículos motorizados para o transporte de resíduos, podendo incluir processos de compostagem realizados no domicílio gerador, em pequenas comunidades, ou mesmo processos conduzidos por iniciativas privadas, desde que sem o uso de transporte motorizado.

Figura 21 – Impacto ambiental potencial para aquecimento global do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários nos 1, 7a, 7b e 7c



FONTE: elaborado pela autora

Em comparação ao cenário 1, em que não é realizada compostagem dos resíduos orgânicos, os três novos cenários proporcionam uma grande redução dos impactos ambientais potenciais relacionados ao aquecimento global.

Comparando os cenários 7a, 7b e 7c entre si, percebe-se que o desempenho é sutilmente melhor no último cenário, em que a compostagem é realizada pelos próprios cidadãos, em sistemas domiciliares ou comunitários. Em seguida, vem o cenário 7a, em que a compostagem é realizada de forma centralizada pelo DMLU. O cenário 7b, em que a compostagem é realizada por PEC, apresentou o pior desempenho nesta categoria. Contudo, essas diferenças são pouco significativas diante da magnitude dos impactos potenciais considerados.

Nos três cenários avaliados, a produção de composto orgânico reverte em impactos potenciais benéficos para o sistema, porém estes são de baixa magnitude quando comparados aos impactos potenciais adversos gerados no sistema.

5.3.2. Toxicidade humana

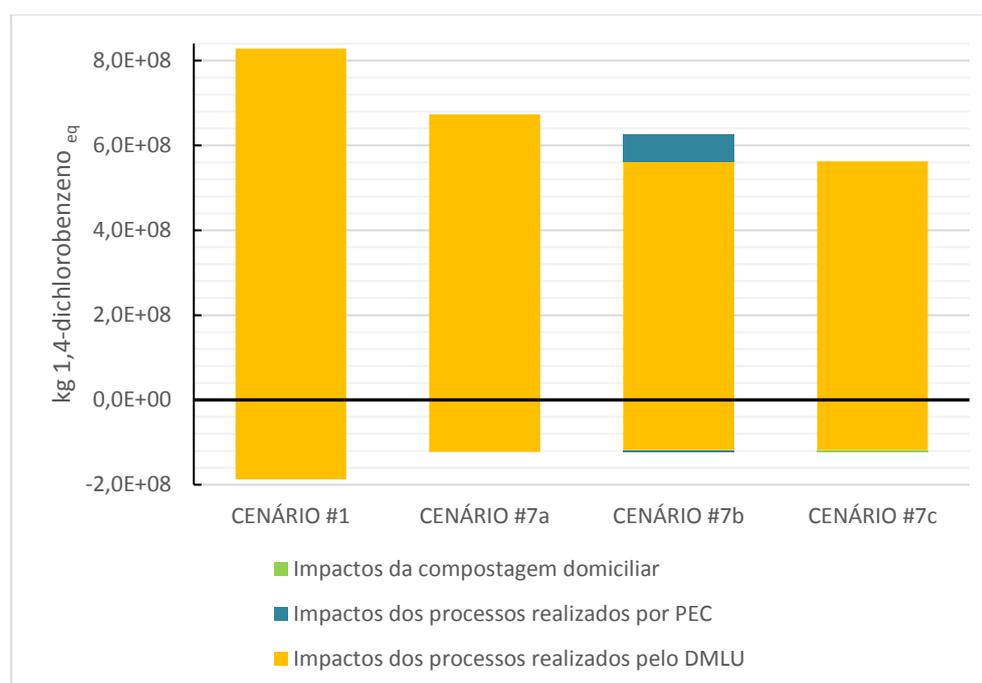
A Tabela 21 e a Figura 22 apresentam os resultados relativos ao indicador de impacto potencial para toxicidade humana.

Tabela 21 – Indicadores de impacto potencial para toxicidade humana do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n^{os} 1, 7a, 7b e 7c (kg 1,4-dichlorobenzene equivalente)

Origem	Emissões			Emissões evitadas			Total
	DMLU	PEC	Domiciliar	DMLU	PEC	Domiciliar	
CENÁRIO 1	8,3E+08	-	-	-1,9E+08	-	-	6,4E+08
CENÁRIO 7a	6,7E+08	-	-	-1,2E+08	-	-	5,5E+08
CENÁRIO 7b	5,6E+08	6,4E+07	-	-1,2E+08	-4,1E+06	-	5,0E+08
CENÁRIO 7c	5,6E+08	-	-	-1,2E+08	-	-4,1E+06	4,4E+08

FONTE: elaborado pela autora

Figura 22 – Impacto ambiental potencial para toxicidade humana do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n^{os} 1, 7a, 7b e 7c



FONTE: elaborado pela autora

Para o indicador de toxicidade humana, o melhor desempenho foi, novamente do cenário que considera a compostagem domiciliar. Isto porque o processo de compostagem, em si, não gera emissões que contribuam para esta categoria. O cenário que considera a atuação das PEC tem o segundo desempenho, uma vez que a etapa de transporte dos resíduos, em veículos motorizados, contribui para impactos potenciais adversos relacionados à toxicidade ambiental. O cenário em que a compostagem é realizada pelo DMLU apresentou o pior desempenho entre os três analisados, mas ainda assim apresenta uma expressiva

redução de impactos potenciais adversos quando comparado ao cenário 1, em que a compostagem não é realizada.

Quanto aos impactos potenciais benéficos relativos a emissões evitadas, estes são expressivos em todos os cenários e são provenientes, principalmente, da geração de energia a partir do biogás gerado no aterro sanitário. A produção de composto resulta, também, em um pequeno impacto potencial benéfico, mas este é pouco expressivo dentro do contexto.

5.3.3. Formação de foto-oxidantes

A Tabela 22 e a Figura 23 apresentam os resultados relativos à formação de foto-oxidantes.

Tabela 22 – Indicadores de impacto potencial para formação de foto-oxidantes do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários nºs 1, 7a, 7b e 7c
(kg etileno equivalente)

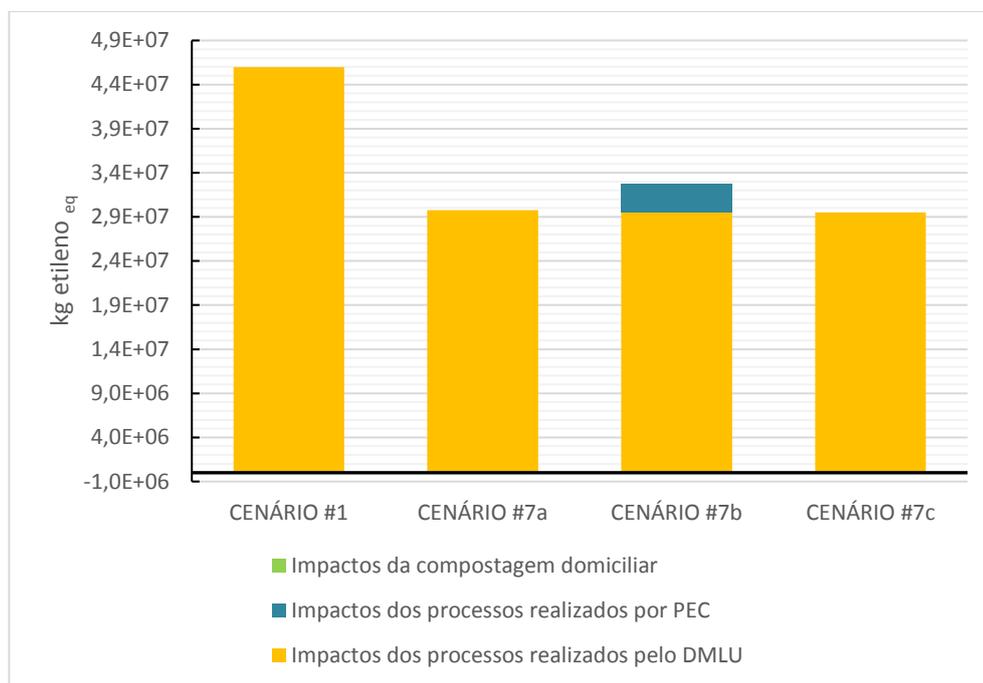
Origem	Emissões			Emissões evitadas			Total
	DMLU	PEC	Domiciliar	DMLU	PEC	Domiciliar	
CENÁRIO 1	4,6E+07	-	-	-	-	-	4,6E+07
CENÁRIO 7a	3,0E+07	-	-	-2,2E+04	-	-	3,0E+07
CENÁRIO 7b	3,0E+07	3,3E+06	-	-	-2,0E+04	-	3,3E+07
CENÁRIO 7c	3,0E+07	-	-	-	-	-2,0E+04	2,9E+07

FONTE: elaborado pela autora

Para a formação de foto-oxidantes o melhor desempenho é o da compostagem domiciliar (cenário 7c), seguido de perto pela compostagem realizada pelo DMLU (cenário 7a). A compostagem realizada por PEC (cenário 7b) apresenta um impacto potencial um pouco superior do que as duas outras opções, o que se explica devido ao alto consumo de gasolina neste cenário. Contudo, este cenário ainda resulta em impactos potenciais expressivamente inferiores aos gerados pelo cenário 1 (sem compostagem).

Em relação aos impactos potenciais benéficos vinculados a emissões evitadas, estes estão presentes nos três cenários que incluem compostagem, porém em escala inferior à dos impactos potenciais adversos gerados.

Figura 23 – Impacto ambiental potencial para formação de foto-oxidantes do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n^{os} 1, 7a, 7b e 7c



FONTE: elaborado pela autora

5.3.4. Acidificação

A Tabela 23 e a Figura 24 apresentam os resultados relativos ao indicador de impacto ambiental para acidificação.

Tabela 23 – Indicadores de impacto potencial para acidificação do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n^{os} 1, 7a, 7b e 7c (kg SO₂ equivalente)

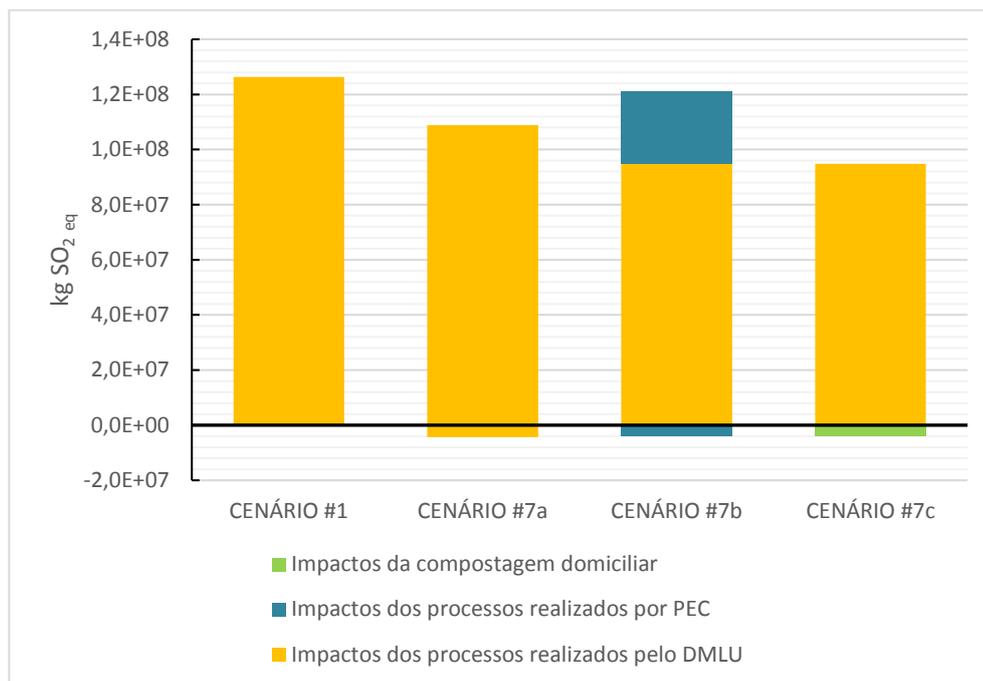
Origem	Emissões			Emissões evitadas			Total
	DMLU	PEC	Domiciliar	DMLU	PEC	Domiciliar	
CENÁRIO 1	1,3E+08	-	-	-1,7E+04	-	-	1,3E+08
CENÁRIO 7a	1,1E+08	-	-	-4,4E+06	-	-	1,0E+08
CENÁRIO 7b	9,5E+07	2,7E+07	-	-1,1E+04	-3,8E+06	-	1,2E+08
CENÁRIO 7c	9,5E+07	-	-	-1,1E+04	-	-3,8E+06	9,1E+07

FONTE: elaborado pela autora

Na categoria de acidificação, o melhor desempenho é proporcionado pela compostagem domiciliar (cenário 7c). O cenário 7a, que considera a realização de compostagem pelo DMLU, apresenta um impacto potencial superior ao 7c, porém expressivamente inferior ao cenário 1 (sem compostagem). Já o cenário 7b, que considera a

atuação de PEC, apresenta um impacto potencial adverso pouco inferior ao cenário 1, sendo o pior o resultado dentre os três envolvendo compostagem. Neste caso, assim como no anterior, o impacto ambiental potencial está diretamente associado ao consumo de combustível em cada cenário.

Figura 24 – Impacto ambiental potencial para acidificação do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários n^{os} 1, 7a, 7b e 7c



FONTE: elaborado pela autora

O impacto potencial benéfico decorrente das emissões evitadas pela geração de energia elétrica no aterro sanitário está presente em todos os cenários, porém é pouco expressivo dentro do contexto. Já o benefício decorrente da produção de composto orgânico é um pouco mais significativo, embora seja, ainda, muito inferior aos impactos potenciais adversos gerados em cada cenário.

5.3.5. Eutrofização

A Tabela 24 e a Figura 25 apresentam os resultados relativos à eutrofização.

Em relação à categoria de eutrofização, o cenário 7c, que considera a compostagem realizada em domicílio, apresenta o melhor desempenho. Neste cenário, o impacto potencial benéfico gerado pela produção de composto é superior ao adverso gerado no mesmo processo. Assim, o impacto potencial adverso total do sistema diz respeito à operação do DMLU no gerenciamento dos resíduos não-compostáveis. O cenário 7a, em que a

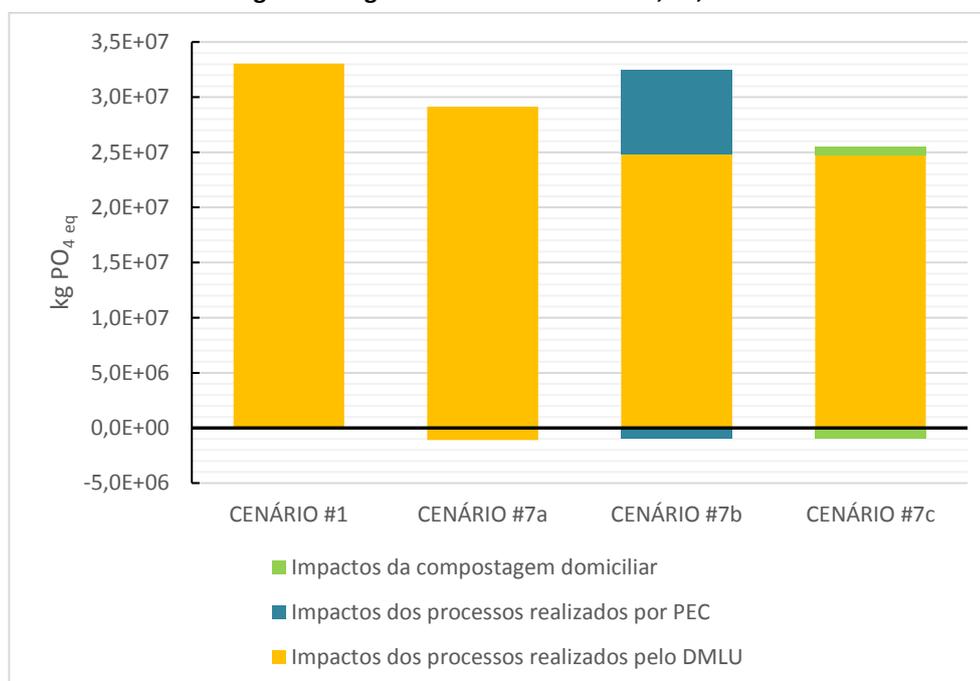
compostagem é realizada pelo DMLU, apresenta um desempenho intermediário, com impacto potencial significativamente superior ao obtido pelo 7c, mas ainda bastante inferior ao gerado no cenário 1 (sem compostagem). Já o cenário 7b, em que a compostagem é realizada pelo modelo de PEC, apresentou um impacto potencial apenas ligeiramente inferior ao do cenário 1, tendo o pior desempenho dentre os três cenários envolvendo compostagem.

Tabela 24 – Indicadores de impacto potencial para eutrofização do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários nºs 1, 7a, 7b e 7c (kg PO₄ equivalente)

Origem	Emissões			Emissões evitadas			Total
	DMLU	PEC	Domiciliar	DMLU	PEC	Domiciliar	
CENÁRIO 1	3,3E+07	-	-	-1,2E+05	-	-	3,3E+07
CENÁRIO 7a	2,9E+07	-	-	-1,1E+06	-	-	2,8E+07
CENÁRIO 7b	2,5E+07	7,6E+06	-	-7,4E+04	-9,1E+05	-	3,1E+07
CENÁRIO 7c	2,5E+07	-	7,4E+05	-7,4E+04	-	-9,1E+05	2,5E+07

FONTE: elaborado pela autora

Figura 25 – Impacto ambiental potencial para eutrofização do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano: cenários nºs 1, 7a, 7b e 7c



FONTE: elaborado pela autora

Em relação aos impactos potenciais benéficos provenientes de emissões evitadas, estes estão relacionados tanto à geração de energia elétrica no aterro sanitário quanto à

produção de composto, sendo mais expressivos no segundo caso. São, contudo, muito inferiores ao impacto potencial adverso total produzido em cada cenário.

5.3.6. Considerações gerais

Os três novos cenários gerados neste estudo resultam em reduções significativas no impacto ambiental potencial, relativamente ao cenário 1, que representa o modelo de gerenciamento de RSOD atualmente utilizado pelo DMLU. Tais reduções se devem à alteração no gerenciamento da fração de matéria orgânica compostável presente nesses resíduos. A Tabela 25 sintetiza as reduções nos indicadores das cinco categorias de impacto potencial aqui avaliadas.

Tabela 25 – Redução nos indicadores de impacto ambiental potencial do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano para os cenários n^{os} 7a, 7b e 7c, relativamente ao cenário n^o 1

Cenário	Aquecimento global (%)	Toxicidade humana (%)	Formação de foto-oxidantes (%)	Acidificação (%)	Eutrofização (%)
CENÁRIO 7a	35,6	14,2	35,3	17,3	14,9
CENÁRIO 7b	34,6	21,4	28,7	7,0	4,5
CENÁRIO 7c	36,1	31,3	35,8	28,0	25,5

FONTE: elaborado pela autora

O melhor desempenho, para todas as categorias, foi obtido pelo cenário 7c, em que a compostagem é realizada no próprio domicílio gerador ou em pequenas comunidades. Tal desempenho, supõe-se, também poderia ser alcançado por PEC, caso estas atuassem de maneira descentralizada, com pequenas áreas de compostagem instaladas próximas aos domicílios geradores, de forma a dispensar a etapa de transporte de resíduos em veículo motorizado.

O cenário 7a, em que a compostagem é realizada pelo próprio DMLU, apresentou o segundo melhor desempenho, exceto para a categoria de toxicidade humana. Nas categorias de aquecimento global e formação de foto-oxidantes, a redução dos impactos potenciais foi semelhante à obtida pelo modelo 7c. Já nas categorias toxicidade humana, acidificação e eutrofização, que sofrem maior influência do consumo de combustível e energia elétrica, houve uma expressiva redução de impactos potenciais, relativamente ao cenário 1, porém

muito menos significativa do que a obtida pelo cenário 7c. Este desempenho se justifica pela mecanização do processo de compostagem no cenário 7a.

O cenário 7b, que conta com a atuação de PEC para a compostagem dos resíduos, somente a categoria aquecimento global apresentou um desempenho semelhante aos demais cenários. Nas categorias toxicidade humana e formação de foto-oxidantes, este cenário proporcionou uma expressiva redução de impactos potenciais, em relação ao cenário 1, porém com menor eficiência do que o obtido pelo cenário 7c. Nas categorias acidificação e eutrofização, embora tenha ocorrido uma redução de impactos, relativamente ao cenário 1, esta redução foi menos relevante, restringindo-se a 7% e 4,5%, respectivamente. O pior desempenho deste cenário está relacionado ao maior consumo de combustível (Tabela 25). Reitera-se que o *Modelo base PEC* considera o transporte dos resíduos orgânicos, entre o local de transbordo e o pátio de compostagem, em veículos de passeio movidos a gasolina. Para grandes volumes de resíduos, como é o caso deste cenário, esta característica implica em uma baixa eficiência no consumo de combustível.

É importante destacar o aumento no consumo energético no cenário 7a, em relação a todos os demais (Tabela 26). Este incremento se deve ao uso de processos mecanizados na compostagem realizada pelo DMLU, necessários para a compostagem de grandes volumes de resíduos em uma área única. Os cenários 7b e 7c consideram a replicação múltipla de processos de compostagem de pequenas dimensões, com operação manual, não dependendo de energia elétrica. Nota-se, ainda, que a massa total de composto produzido é superior no cenário 7a do que nos demais cenários. Isto se deve, também, à diferença nos processos de compostagem considerados em cada cenário.

Tabela 26 – Consumos e gerações do gerenciamento de RSOD gerados em Porto Alegre ao longo de 1 ano para os cenários nº 1, 7a, 7b e 7c

Parâmetro	Unidade	CENÁRIO 1	CENÁRIO 7a	CENÁRIO 7b	CENÁRIO 7c
Diesel consumido	Litros	4.684.871	4.005.910	3.512.175	3.512.175
Gasolina consumida	Litros	-	-	1.836.041	-
Eletricidade consumida	kWh	634.019	4.002.282	475.315	475.315
Eletricidade gerada	kWh	17.001.778	10.824.630	10.922.064	10.922.064
Eletricidade: consumo/geração	%	3,7	37,0	4,4	4,4
Composto produzido	Toneladas	-	44.087	38.753	38.753

FONTE: elaborado pela autora

6. CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo avaliar a contribuição de pequenas empresas de compostagem de resíduos orgânicos na redução de impactos ambientais relacionados ao gerenciamento dos RSU no município de Porto Alegre. Através da metodologia da ACV, foram avaliados os impactos ambientais potenciais do modelo de gerenciamento adotado por uma PEC, do modelo de gerenciamento adotado pelo DMLU e de cenários integrados compostos por estes dois modelos. Foi possível observar que os potenciais impactos adversos da destinação de resíduos para compostagem são expressivamente inferiores aos de sua disposição em aterro sanitário, para todas as categorias de impacto avaliadas. Porém, devido ao pequeno alcance do modelo de gerenciamento utilizado pelas PEC, uma contribuição efetiva ao contexto do gerenciamento de RSU implica na operação concomitante de um grande número dessas pequenas empresas, o que levanta dúvidas acerca da viabilidade operacional desta alternativa.

Este trabalho foi estruturado em três estudos de ACV, cada um visando atender a um dos objetivos específicos propostos.

O primeiro estudo buscou avaliar o impacto ambiental da compostagem de 1 tonelada de resíduos orgânicos domiciliares, realizada por uma empresa de pequeno porte (*Modelo base PEC*), em comparação com o impacto ambiental da disposição de 1 tonelada de RSOD em aterro sanitário (*Modelo base DMLU*).

No *Modelo base DMLU*, os impactos potenciais estão distribuídos ao longo de todo o sistema de gerenciamento de resíduos. Para as categorias de aquecimento global e formação de foto-oxidantes, o maior impacto se deve à etapa de disposição final do resíduo em aterro sanitário, enquanto as categorias de toxicidade humana, acidificação e eutrofização sofrem maior influência das etapas de coleta, transbordo e transporte dos resíduos.

Já no *Modelo base PEC*, a etapa de transporte é a principal responsável pelos impactos potenciais adversos em todas as categorias de impacto. Assim, considera-se que uma alteração neste modelo, descentralizando o processo em pequenas unidades de compostagem situadas próximas aos domicílios geradores – de forma a eliminar a etapa de transporte de resíduos por veículos motorizados –, pode ser uma opção viável para minimizar o impacto ambiental deste modelo.

Para todas as categorias avaliadas, o impacto potencial adverso do sistema utilizado por uma PEC é expressivamente inferior ao provocado pelo sistema utilizado pelo DMLU, quando considerados os impactos potenciais por tonelada de resíduo gerenciado. A redução do impacto potencial proporcionada pelo *Modelo base PEC*, relativamente ao *Modelo base DMLU*, varia entre 12,5%, para a categoria de eutrofização, e 94,8%, para a categoria de aquecimento global. Porém, esse modelo atende, aproximadamente, a 0,02% dos domicílios do município, motivo pelo qual o impacto ambiental por tonelada acaba por ser pouco significativo diante da magnitude do sistema de gerenciamento de resíduos sólidos atuante no município. Outra limitação importante a considerar é que o sistema utilizado pelo DMLU tem capacidade para o gerenciamento dos RSOD em sua totalidade, enquanto o sistema utilizado pelas PEC lida apenas com uma parcela destes resíduos, que consiste nos restos de alimentos não processados, exceto carne, osso e gordura. Dessa forma, a comparação entre os dois sistemas é bastante frágil, servindo apenas como uma aproximação.

Por esses motivos, realizou-se o segundo estudo, com o objetivo de avaliar o impacto ambiental do gerenciamento integrado dos RSOD gerados no município ao longo de 1 ano, incluindo compostagem realizada por PEC e disposição final em aterro sanitário, em cenários que diferem entre si quanto à cobertura do serviço de compostagem oferecido. Foi possível verificar que a participação destas iniciativas traz um impacto potencial benéfico bastante sutil diante do contexto do gerenciamento de resíduos do município. De uma forma geral, a redução de impactos potenciais adversos mais perceptível se concentra nos cenários 4, 5 e 6, em que tais empresas atuam atendendo a 5%, 10% e 20% dos domicílios, respectivamente. É importante ressaltar que todos estes cenários consideram um grande número de empresas atuando de forma idêntica ao *Modelo base PEC*: 246 no cenário 4, 492 no cenário 5 e 985 no cenário 6. Assim, a viabilidade destes modelos de gerenciamento deve ser analisada com muita cautela, inclusive do ponto de vista de demanda do mercado.

A partir do segundo estudo, foi possível perceber que a contribuição da inclusão de PEC nos sistemas de gerenciamento de resíduos se torna relevante quando a cobertura do serviço oferecido é ampla. Por este motivo, realizou-se o terceiro estudo, com o objetivo de avaliar o impacto ambiental do gerenciamento integrado dos RSOD gerados no município ao longo de 1 ano, incluindo a oferta de serviços de compostagem e disposição final em aterro sanitário a 100% dos domicílios, em cenários que diferem entre si quanto ao sistema adotado

para a compostagem dos resíduos orgânicos. Foram avaliados três modelos: compostagem realizada pelo DMLU, compostagem realizada por PEC, e compostagem domiciliar.

É importante destacar que, neste último estudo, os três cenários avaliados são meramente hipotéticos, dada a sua inviabilidade prática, como será exposto a seguir:

- O cenário 7a (compostagem via DMLU) considera que a compostagem dos resíduos orgânicos de todo o município seja realizada na estação de transbordo que opera atualmente, de forma a não haver necessidade de transporte dos resíduos até um pátio de compostagem. Não foi avaliada a capacidade da mesma estação de absorver esta demanda. Além disso, este cenário considera ainda que os resíduos orgânicos sejam segregados no domicílio gerador, sem necessidade de triagem para retirada de materiais contaminantes. Alcançar este objetivo em um município de aproximadamente 1,5 milhões de habitantes é um processo que requer anos de trabalho contínuo de educação ambiental e fiscalização.
- O cenário 7b (compostagem por meio de PEC) considera que a compostagem dos resíduos orgânicos de todos os domicílios seja realizada por empresas de pequeno porte, atuando em modelo idêntico ao utilizado hoje pela empresa Re-Ciclo. Para isso, seriam necessárias nada menos que 4.923 empresas atuando concomitantemente em Porto Alegre. Cada uma dessas empresas deveria dispor de ponto de transbordo dentro do município e pátio de compostagem na região metropolitana, com capacidade para absorver o composto produzido no próprio local, sem necessidade de transporte posterior do material. Quaisquer alterações neste cenário levariam a um incremento no impacto ambiental gerado, invalidando os resultados.
- O cenário 7c (compostagem domiciliar e/ou comunitária) considera uma adesão de 100% dos domicílios de Porto Alegre à prática da compostagem domiciliar, comunitária ou descentralizada. Assim como no primeiro caso, este objetivo requer um extenso trabalho de educação ambiental junto à população.

Apesar dessas limitações, considerou-se válido prosseguir com o estudo a título de exercício teórico. Embora a cobertura de 100% dos domicílios seja uma perspectiva bastante

utópica, os resultados podem contribuir para identificar, dentre as três opções de compostagem avaliadas, qual a mais promissora do ponto de vista da minimização dos impactos ambientais do gerenciamento de resíduos sólidos.

Assim, foi possível verificar que a compostagem de resíduos orgânicos exclusivamente através de PEC, visando a um atendimento massivo aos domicílios do município, é uma opção contraproducente, quando se considera a simples replicação do *Modelo base PEC*. Os resultados deste cenário foram os piores dentre os três avaliados, especialmente devido ao alto consumo de combustível na etapa de transporte dos resíduos orgânicos até o pátio de compostagem. Embora esta opção ainda produza um menor impacto potencial adverso do que o cenário hoje adotado pelo DMLU (sem compostagem), esta redução é inconstante entre as diferentes categorias de impacto, o que leva a uma baixa eficiência em termos de minimização de impactos ambientais potenciais. Esse motivo, aliado à dificuldade operacional vinculada a esse cenário, indica uma baixa relação custo/benefício na replicação do *Modelo base PEC* para atendimento em larga escala. É importante considerar, contudo, que os impactos potenciais adversos relacionados a este cenário poderiam ser significativamente reduzidos caso as unidades de compostagem fossem descentralizadas, eliminando a etapa de transporte de resíduos por veículos motorizados, como já observado no primeiro estudo.

Em relação ao cenário 7a, que considera a realização de compostagem pelo DMLU, os resultados são melhores que no caso anterior, com redução significativa em todas as categorias de impacto. Porém, há que se analisar com muita cautela a viabilidade do sistema. É muito provável que, para tornar esse cenário operacional, devam ser realizadas alterações expressivas no modelo de gerenciamento, podendo levar a uma diminuição na sua eficiência.

Já o cenário 7c, que considera a compostagem domiciliar, apresentou os melhores resultados. A redução dos potenciais impactos ambientais, em relação ao modelo atualmente utilizado pelo DMLU (sem compostagem), variou entre 25,5% para o indicador de eutrofização e 36,1% para o indicador de aquecimento global. Embora a adesão de 100% dos domicílios seja um objetivo difícil de ser atingido, os resultados demonstram que a prática da compostagem domiciliar resulta em claros benefícios na minimização dos impactos ambientais provenientes do gerenciamento de resíduos sólidos.

É importante destacar que o modelo de compostagem domiciliar difere do modelo de gerenciamento adotado pelas PEC apenas no que tange às etapas de coleta e transporte dos

resíduos. Dessa forma, a contribuição das PEC para a redução dos impactos ambientais do gerenciamento de RSU poderia ser otimizada através da descentralização das unidades de compostagem, visando a minimizar o uso de veículos motorizados no transporte de resíduos. Esta alteração nos procedimentos operacionais aproximaria o modelo de compostagem por meio de PEC ao da compostagem domiciliar.

É possível concluir, a partir dos estudos aqui apresentados, que a compostagem da fração orgânica dos RSOD tem um grande potencial para contribuir favoravelmente na redução dos impactos ambientais do gerenciamento de RSU, porém este potencial encontra entraves nos aspectos operacionais de cada um dos sistemas estudados.

Neste sentido, cabe ressaltar que a perspectiva do gerenciamento integrado de RSU incentiva o uso concomitante de diferentes sistemas, de forma a aproveitar os benefícios de cada uma das opções existentes e evitar suas desvantagens, otimizando o resultado geral. Assim, um sistema de gerenciamento integrado que viabilize a compostagem urbana em larga escala, aliando PEC, gestão pública e compostagem domiciliar, deve ser incentivado.

O fomento às práticas de compostagem, seja por iniciativas privadas ou pelo próprio cidadão – de forma domiciliar ou comunitária – requer o apoio do poder público, através de legislações que facilitem e/ou obriguem a sua execução, além de massivas campanhas de sensibilização ambiental. Práticas de educação ambiental são essenciais para angariar a colaboração dos cidadãos, porém são iniciativas que resultam em um retorno a longo prazo. Para obter resultados a curto e médio prazo, o uso de ferramentas de gestão pública, em especial instrumentos de comando e controle e instrumentos econômicos, tendem a resultar em uma maior efetividade.

Qualquer que seja o instrumento adotado, este deve estar embasado por um sólido conhecimento técnico, motivo pelo qual é sugerido o aprofundamento dos estudos aqui iniciados. Sugere-se, portanto, a realização de um estudo de viabilidade para a integração dos cenários 7a, 7b e 7c, considerando aspectos logísticos, técnicos e financeiros, para além dos impactos ambientais. Adicionalmente, sugere-se ainda o estudo de novos cenários de gerenciamento de RSU, considerando a adoção de instrumentos legais para o incentivo de práticas de compostagem, tais como a implantação compulsória de projetos de compostagem em condomínios horizontais e a obrigatoriedade de compostagem para resíduos alimentícios em restaurantes, por exemplo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU F. V. et al. Biogás de aterros sanitários para geração de energia renovável e limpa - um estudo de viabilidade técnica e econômica. *In: IX Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecânica* (CIBIM), 2009. Disponível em <<http://www.eng.uerj.br/publico/anexos/1280380722/07-c0343-a1-viana-cibim2009.pdf>>. Acesso em 01 out. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. Rio de Janeiro: 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044**: Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – requisitos e orientações. Rio de Janeiro: 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/TR 14047**: Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 a situações de avaliação de impacto. Rio de Janeiro: 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/TR 14049**: Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário. Rio de Janeiro: 2014.

BRAGA JUNIOR, B. P. F. et al. **Introdução à engenharia ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>>. Acesso em 06 jul. 2017.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2015. Brasília: MCIDADES.SNSA, 2017. Disponível em <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos/diagnostico-rs-2015>>. Acesso em 30 jun. 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Matrizes Elétricas Estaduais**: Ano Referência 2015. N3E, 2016. Disponível em <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/03+-+Matrizes+El%C3%A9tricas+Estaduais+2016+-+ano+ref.+2015+%28PDF%29/ddfaad8c-a436-4aa8-b619-f95dd2cf689c?version=1.0>>. Acesso em 30 set. 2017.

BERSCH, J. I.; RODRIGUES, A. I. Comunicação publicitária no cenário pós-moderno: o exemplo da campanha Life's for Sharing. **Comunicação, Mídia e Consumo**, São Paulo, v. 8, n. 21, p. 135-162, mar. 2011.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS. **Central de Resíduos do Recreio**. Disponível em <<http://crvr.com.br/area-de-atuacao/central-de-residuos-do-recreio>>. Acesso em 19 out. 2017.

CONNET, P. H. **The zero waste solution**: untrashing the planet one community at a time. White River Junction: Chelsea Green Publishing, 2013.

CULTRI, C. N.; SAAVEDRA, Y. M. B.; OMETTO, A. Indicadores sociais como subsídios para a avaliação do ciclo de vida: uma revisão da literatura. *In*: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 30., 2010, São Carlos. **Anais eletrônicos...** Disponível em <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2010_TN_STO_123_795_15951.pdf>. Acesso em 03 fev. 2017

DAHLBO, H. et al. **Waste management options for discarded newspaper in the Helsinki Metropolitan Area**: Life cycle assessment report. Helsinki: The Finnish Environment Institute, 2005. Disponível em <<http://hdl.handle.net/10138/40384>>. Acesso em 03 fev. 2017.

INÁCIO, C. T.; MILLER, P. R. M. **Compostagem**: ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Avaliação do ciclo de vida**: ontologia terminológica. Brasília: 2015. Disponível em <<http://acv.ibict.br/wp-content/uploads/2016/02/OntologiaACV-2.pdf>>. Acesso em 03 fev. 2017.

FERRÃO, P. C. Introdução a gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida de produtos. Lisboa: Ist, 1998.

MCDougall, F. R. et al. **Integrated Solid Waste Management**: a Life Cycle Inventory. Oxford: Blackwell Science, 2001.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação do impacto do ciclo de vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, n. 1, p. 160-175, 2015. Disponível em <http://www.prod.org.br/files/v26n1/prod1532_13.pdf>. Acesso em 03 fev. 2017.

OERS, L. V. **CML-IA database, characterisation and normalisation factors for midpoint impact category indicators**. Versão 4.5, abr. 2015. Disponível em <<http://www.cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>>. Acesso em 20 set. 2017.

PORTO ALEGRE. **Lei Complementar nº 728, de 08 de janeiro de 2014**. Disponível em <<http://www2.portoalegre.rs.gov.br/cgi-bin/nph-brs?s1=000033832.DOCN.&l=20&u=%2Fnethtml%2Fsiel%2Fsimples.html&p=1&r=1&f=G&d=atos&SECT1=TEXT>>. Acesso em 06 jul. 2017. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>>. Acesso em 06 jul. 2017.

REICHERT, G. A. **Apoio à tomada de decisão por meio da avaliação do ciclo de vida em sistemas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos**: o caso de Porto Alegre. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

REICHERT, G. A.; CASAGRANDE, V. Aplicação do modelo IWM-2 para a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos do município de Porto

Alegre/RS. In Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, 9. 2014. Porto Alegre. **Anais eletrônicos...** Porto Alegre: ABES-RS, 2014. Disponível em <<http://www.abes-rs.org.br/qualidade2014/trabalhos/id978.pdf>>. Acesso em 05 nov. 2017.

REICHERT, G. A.; MENDES, C. A. B. Avaliação do ciclo de vida e apoio à decisão em gerenciamento integrado e sustentável de resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 3, p. 301-313, set. 2014. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522014000300301&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 05 nov. 2017.

REIS, M. F. P. **Avaliação do processo de compostagem de resíduos sólidos urbanos**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SILVA, L. M. S. **Compostagem de resíduos sólidos urbanos em locais contemplados com coleta seletiva: influência da triagem e da frequência de revolvimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2009.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Greening the economy trough life cycle thinking**. Paris, 2012. Disponível em <http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1164xPA-guidelines_sLCA.pdf>. Acesso em 03 fev. 2017.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Guidelines for social life cycle assessment of products**. Paris: UNEP, 2009. Disponível em <http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1164xPA-guidelines_sLCA.pdf>. Acesso em 03 fev. 2017.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Life cycle assessment: a business guide to sustainability**. Paris: UNEP, 2007. Disponível em <http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1164xPA-guidelines_sLCA.pdf>. Acesso em 03 fev. 2017.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Towards a life cycle sustainability assessment: making informed choices on products**. Paris: UNEP, 2011. Disponível em <http://www.unclearn.org/sites/default/files/unep_lifecycleinit_dec_final_1.pdf>. Acesso em 08 jul. 2017.

VIANA, L. Gás total. **Portal Institucional Grupo Solvi**, 11 ago. 2015. Disponível em <<http://www.solvi.com/gas-total>>. Acesso em 19 out. 2017.

VINYES, E. et al. Application of LCSA in used cooking oil (UCO) waste management. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 2, p. 445-455, 2012. Disponível em <http://ictaweb.uab.cat/pubs_detail.php?id=1082>. Acesso em 04 abr. 2017.

XARÁ, S. et al. A aplicação da análise do ciclo de vida no planeamento da gestão integrada de resíduos sólidos urbanos. *In* International Chemical Engineering Conference, 8., 2001, Aveiro. **Proceedings...** Aveiro, 2001. p. 1467-1474. Disponível em <<http://hdl.handle.net/10400.14/6966>>. Aceso em 03 fev. 2017.

**APÊNDICE A – TERMO DE CONSENTIMENTO PARA A COLETA DE INFORMAÇÕES DE
EMPRESA/INSTITUIÇÃO**

TERMO DE CONSENTIMENTO PARA COLETA DE INFORMAÇÕES DE EMPRESA/INSTITUIÇÃO.

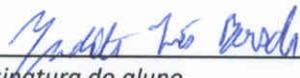
Eu, **Judite Inês Bersch**, aluna do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - FURGS, matriculado(a) sob o número 00135319, declaro que a Empresa **Re-Ciclo**, objeto de estudo do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **A CONTRIBUIÇÃO DE INICIATIVAS PRIVADAS DE COLETA E COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS ORGÂNICOS PARA A REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE/RS**, entregue no semestre 2017/2, permitiu a pesquisa e o uso de todos os dados que nele constam.

Declaro, ainda, que as informações apresentadas são verdadeiras e correspondem à realidade da Empresa/Instituição estudada.

A Empresa/Instituição autorizou a divulgação do seu nome fantasia/razão social.

A Empresa/Instituição não autorizou a divulgação do seu nome fantasia/razão social. Nesse caso, responsabilizo-me em preservar o nome da Empresa/Instituição de forma a que ela não seja passível de identificação no meu Trabalho.

Porto Alegre, 29 de novembro de 2017.


Assinatura do aluno

Ciência da empresa


Nome do responsável da Empresa/Instituição

RE-CICLO COMPOSTAGEM URBANA LTDA.

CNPJ: 26.420.173/0001-52

Inscr.: Est.: 096/3682970


Assinatura do Responsável da Empresa/Instituição
Carimbo ou CNPJ

**APÊNDICE B – CONTROLE DE COLETA DE RESÍDUOS ORGÂNICOS PELA RE-CICLO: NOV/2016 A
AGO/2017**

Cliente	Nº de residentes	nov/16					dez/16				jan/17				fev/17				mar/17				abr/17					mai/17				jul/17					ago/17														
		Semana					Semana				Semana					Semana				Semana																															
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5										
55	s.i.																				s.i.	s.i.	s.i.	2			s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	5	4	4,8	5		4	s.i.	s.i.	5												
56	s.i.																																																		
57	s.i.																											s.i.	s.i.	s.i.	s.i.							2,5	2,5	1,5	2,5										
58	2	2,8	2	2	s.i.		2	1	2	s.i.			1	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.									s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	3,5	s.i.	3,5	2,5		2	s.i.	2	2,5	3											
59	s.i.																																																		
60	1	s.i.	3	s.i.	s.i.		3	3	5	s.i.	5	6	5	s.i.	s.i.						s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	3,5	3	2		s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	3,5	2,5	3	3		4	s.i.	4	2,5										
61	1	0,5	2,5	3	s.i.		1,5	s.i.	1,5	s.i.	0,1	2	5	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.				s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	3	s.i.	2	5		s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	3,5	1	1	2		2	3,5	2	2,5	0,1								
62	3	s.i.	8	2,5	4		5	7,5	6	s.i.	5	3,1	3,5	s.i.	s.i.									3,5	3	6	s.i.	2	2		s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	4	2	5	6		4	6	3	4,5	3,5							
63	s.i.																																																		
64	s.i.											5	4,5	3	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.					4	2,5	2	s.i.			3	3	s.i.	2						s.i.	1,5	s.i.	s.i.									
65	1	s.i.	4,5	4,5	6		5	0	6	5,8	1,5	4	3	0	s.i.	5	5	0			s.i.	s.i.	5	2,5	s.i.	s.i.	4	5		s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	4	5	4	4		3	4	s.i.	0,5	4								
66	3	s.i.	4	s.i.	s.i.		0	0	2		4	1	4	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.			s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	2,5	3,5	2,5	3		s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	2,5	2	3	2		3	2	4	3	3,5								
67	s.i.																																																		
68	s.i.																																																		
69	s.i.																																																		
70	s.i.																																																		
71	s.i.																																																		
72	s.i.																																																		
73	2	1,5	1	2	s.i.		1	s.i.	2	s.i.	0,5	1,5	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.						4	s.i.	s.i.	1,5	s.i.	3	0,5		s.i.	s.i.	s.i.	s.i.																	
74	3	s.i.	2,5	s.i.	s.i.		1	0	0,2	s.i.	s.i.	s.i.	0,2	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.						2	s.i.	0,5	s.i.			s.i.	s.i.	s.i.	s.i.																		
75	2	1,5	0,5	0,3	s.i.		s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	2	0,5	s.i.	0,8	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.						0,5	1	1,5	1			s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	0,3	1	1,5	0,5		1	s.i.	s.i.	1,5									
76	1	5	0	0	0		s.i.	1,5	s.i.	s.i.		2	0	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	0													s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	5	s.i.	3,5	s.i.		3	0	3,5	s.i.								
77	s.i.						4,5	s.i.	4,5	s.i.	s.i.	5	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.						6	s.i.	s.i.	5	s.i.		s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	5	5	5,5	s.i.		5	5	3	5									
78	2	s.i.	2	s.i.	s.i.		0,8	s.i.	1	s.i.	2	1,5	0	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.						1,5	1,5	s.i.	s.i.			s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	1,5	1,5	2	1,5	1,5		2	1	s.i.	0,5								
79	1																																																		
80	3	7	2,6	0	0		4	4	6,5	s.i.														3	s.i.	s.i.	s.i.			3,5	4,5	s.i.	4,5	s.i.	4	0,5	5		s.i.	3	4	4									
81	s.i.																																																		
82	3	0	4	2,5	s.i.		4	2,5	4,5	s.i.	4	4,5	2	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.						3,5	5,5	1,5	3			s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	2,5	s.i.		s.i.		s.i.	1,5	2,5	s.i.	5,5								
83	s.i.																																																		
84	s.i.																																																		
85	s.i.	s.i.	2,5	2	s.i.							3	1	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.																																	
86	s.i.																																																		
87	2	3	2,5	1	s.i.		s.i.	3	2,5	s.i.	3	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.						1,5	s.i.	s.i.	s.i.			1,5	1,5	s.i.	1																		
88	s.i.																																																		
89	s.i.																																																		
90	s.i.																																																		
91	s.i.																																																		
92	3	5,2	2,8	s.i.	s.i.		3	s.i.	7	s.i.	2	5	s.i.	s.i.	s.i.	0	0	s.i.						3,5	3,5	s.i.	s.i.	s.i.			s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	5	s.i.	3,5	4,5	4		4	3,5	s.i.	3							
93	s.i.																																																		
94	s.i.																																																		
95	3	0,5	2	5,5	4,5		2,5	5	5	s.i.	2	4,5	4	4,5	3,5	3	s.i.	s.i.						2	3,5	2,5	0,5			s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	3,5	6	5	4,5	7		4	5,5	5	4								
96	1																																																		
97	2	1	0	s.i.	1		1	0,2	0	s.i.	0			1	s.i.	s.i.	1,5	0	s.i.					1,5	s.i.																										
98	s.i.	0,6	3	s.i.	s.i.	s.i.	2	s.i.	2,5																																										
99	1	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.		s.i.	0	2,5	s.i.																																									
100	s.i.																																																		
101	5	4	3	4	3,5		4	4,5	4		2	4,8	6	5																																					
102	s.i.																																																		
103	s.i.																																																		
104	s.i.																																																		
105	2						s.i.	2,5	2,5	s.i.			5	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.																																	
106	5	5	6	6,2	3,5		3	s.i.	4,5	s.i.	2,5	s.i.	s.i.	3	s.i.					</																															

APÊNDICE C – INVENTÁRIO DE EMISSÕES PARA OS CENÁRIOS ANALISADOS

Meio	Parâmetro	Cenário base DMLU										
		coleta		transbordo		transporte		disposição		total		
		emissões	benefícios	emissões	benefícios	emissões	benefícios	emissões	benefícios	emissões	benefícios	
ar	Particulados	2.448.931	0	1.459.129	0	1.579.928	0	0	-2.751.019	5.487.988	-2.751.019	
	CO	32.597.260	0	19.236.208	0	21.030.123	0	38.554.386	0	111.417.977	0	
	CO2	5.940.312.832	0	3.515.684.685	0	3.832.392.956	0	97.925.248.938	0	111.213.639.411	0	
	CH4	7.230.966	0	4.305.102	0	4.665.057	0	7.142.793.783	0	7.158.994.908	0	
	NOx	106.892.537	0	63.100.184	0	68.961.723	0	13.602.059	0	252.556.503	0	
	GWP	6.092.207.585	0	3.606.144.751	0	3.930.387.860	0	247.917.697.622	0	261.546.437.818	0	
	N2O	143	0	171	0	92	0	0	-20.067	406	-20.067	
	SOx	8.951.836	0	5.327.080	0	5.775.278	0	0	-8.114.853	20.054.194	-8.114.853	
	HCl	12.145	0	9.507	0	7.835	0	1.148.537	0	1.178.024	0	
	HF	1	0	249	0	1	0	179.486	0	179.737	0	
	H2S	0	0	0	0	0	0	3.654.341	0	3.654.341	0	
	HC Total	0	0	0	0	0	0	38.951.486	0	38.951.486	0	
	HC Clorados	0	0	0	0	0	0	1.061.762	0	1.061.762	0	
	Dioxinas e furanos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Amônia	0	0	47	0	0	0	0	-10.904	47	-10.904	
	Arsênio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Cádmio	0	0	0	0	0	0	74	0	74	0	
	Cromo	0	0	0	0	0	0	12	0	12	0	
	Cobre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Chumbo	0	0	3	0	0	0	0	-410	3	-410	
	Manganês	0	0	1	0	0	0	0	-254	1	-254	
	Mercurio	0	0	0	0	0	0	0	-77	0	-77	
	Níquel	3	0	12	0	1	0	0	-2.327	16	-2.327	
	Zinco	2	0	4	0	1	0	611	0	618	0	
	água	DBO	8	0	6	0	6	0	7.954.492	0	7.954.512	0
		DQO	266	0	206	0	172	0	7.943.481	0	7.944.125	0
		Sólidos Suspenso	5.162.612	0	3.048.189	0	3.330.659	0	309.612	0	11.851.072	0
COT		832	0	1.185	0	537	0	0	-154.562	2.554	-154.562	
AOX		0	0	0	0	0	0	7.273	0	7.273	0	
HC Clorados		0	0	0	0	0	0	3.748	0	3.748	0	
Dioxinas e furanos		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Fenóis		0	0	3	0	0	0	596	0	599	0	
Alumínio		199	0	7.866	0	129	0	0	-1.808.171	8.194	-1.808.171	
Amônio		23.827	0	14.092	0	15.372	0	72.534	0	125.825	0	
Arsênio		0	0	16	0	0	0	0	-3.605	16	-3.605	
Bário		228	0	812	0	147	0	0	-157.983	1.187	-157.983	
Cádmio		0	0	1	0	0	0	0	-48	1	-48	
Cloro		48.316.751	0	28.571.118	0	31.171.552	0	0	-7.002.387	108.059.421	-7.002.387	
Cromo		1	0	79	0	0	0	0	-17.948	80	-17.948	
Cobre		0	0	39	0	0	0	0	-8.879	39	-8.879	
Cianeto		0	0	0	0	0	0	0	-62	0	-62	
Fluoreto		0	0	0	0	0	0	1.422	0	1.422	0	
Ferro		50.799	0	32.394	0	32.773	0	0	-210.911	115.966	-210.911	
Chumbo		0	0	39	0	0	0	0	-8.865	39	-8.865	
Mercurio		0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	
Níquel		0	0	40	0	0	0	0	-8.535	40	-8.535	
Nitrato		60	0	231	0	38	0	0	-45.558	329	-45.558	
Fosfato		2	0	466	0	2	0	0	-108.529	470	-108.529	
Sulfato		1.704.324	0	1.040.752	0	1.099.545	0	0	-7.939.795	3.844.621	-7.939.795	
Sulfeto		0	0	1	0	0	0	0	-196	1	-196	
Zinco		1	0	79	0	1	0	0	-15.771	81	-15.771	

Meio	Parâmetro	Cenário 1				Cenário 2				
		DMLU		RE-CICLO		DMLU		RE-CICLO		
		Emissão	Emissão evitada	Emissão	Emissão evitada	Emissão	Emissão evitada	Emissão	Emissão evitada	
ar	Particulados	2736969	0	0	0	2.736.845	0	186	-3	
	CO	111417977	0	0	0	111.416.322	0	24252	-142	
	CO2	1,11E+11	0	0	0	111.213.337.851	0	1113916	-167.653	
	CH4	7158994908	0	0	0	7.158.994.541	0	1469	-27	
	NOx	252556503	0	0	0	252.551.077	0	10769	-672	
	GWP	2,62E+11	0	0	0	261.546.128.548	0	1144152	-335.491	
	N2O	143	-19.804	0	0	143	-19.804	0	-540	
	SOx	11939341	0	0	0	11.938.887	0	1827	-451	
	HCl	1178024	0	0	0	1.178.024	0	5	-9	
	HF	179737	0	0	0	179.737	0	0	0	
	H2S	3654341	0	0	0	3.654.341	0	0	0	
	HC Total	38951486	0	0	0	38.951.486	0	0	0	
	HC Clorados	1061762	0	0	0	1.061.762	0	0	0	
	Dioxinas e furanos	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Amônia	0	-10.857	0	0	0	-10.857	0	0	
	Arsênio	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Cádmio	74	0	0	0	74	0	0	0	
	Cromo	12	0	0	0	12	0	0	0	
	Cobre	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Chumbo	0	-407	0	0	0	-407	0	0	
	Manganês	0	-253	0	0	0	-253	0	0	
	Mercurio	0	-77	0	0	0	-77	0	0	
	Níquel	3	-2.314	0	0	3	-2.314	0	0	
	Zinco	618	0	0	0	618	0	0	0	
	água	DBO	7954512	0	0	0	7.954.512	0	2551	0
		DQO	7944125	0	0	0	7.944.125	0	2696	0
		Sólidos Suspenso	11851072	0	0	0	11.850.810	0	0	0
		COT	832	-152.840	0	0	832	-152.840	0	0
		AOX	7273	0	0	0	7.273	0	0	0
		HC Clorados	3748	0	0	0	3.748	0	0	0
		Dioxinas e furanos	0	0	0	0	0	0	0	0
		Fenóis	599	0	0	0	599	0	0	0
Alumínio		199	-1.800.176	0	0	199	-1.800.176	0	0	
Amônio		125825	0	0	0	125.824	0	285	0	
Arsênio		0	-3.589	0	0	0	-3.589	0	0	
Bário		228	-157.024	0	0	228	-157.024	0	0	
Cádmio		0	-47	0	0	0	-47	0	0	
Cloreto		101057034	0	0	0	101.054.581	0	8895	0	
Cromo		1	-17.869	0	0	1	-17.869	0	0	
Cobre		0	-8.840	0	0	0	-8.840	0	0	
Cianeto		0	-62	0	0	0	-62	0	0	
Fluoreto		1422	0	0	0	1.422	0	0	0	
Ferro		50799	-145.744	0	0	50.796	-145.744	16	0	
Chumbo		0	-8.826	0	0	0	-8.826	0	0	
Mercurio		0	-1	0	0	0	-1	0	0	
Níquel		0	-8.495	0	0	0	-8.495	0	0	
Nitrato		60	-45.289	0	0	60	-45.289	0	0	
Fosfato		2	-108.061	0	0	2	-108.061	0	0	
Sulfato		1704324	-5.799.498	0	0	1.704.237	-5.799.498	392	0	
Sulfito		0	-195	0	0	0	-195	0	0	
Zinco		1	-15.691	0	0	1	-15.691	0	0	

Meio	Parâmetro	Cenário 3				Cenário 4				
		DMLU		RE-CICLO		DMLU		RE-CICLO		
		Emissão	Emissão evitada	Emissão	Emissão evitada	Emissão	Emissão evitada	Emissão	Emissão evitada	
ar	Particulados	2734672	0	9413	0	24.486.514	0	45.717	-619	
	CO	111087763	0	1212586	-7.111	109.872.881	0	5.969.400	-35.007	
	CO2	1,11E+11	0	55695768	-8.382.657	109.398.096.146	0	274.182.840	-41.266.701	
	CH4	7130645786	0	73426	-1.330	7.038.241.383	0	361.469	-6.547	
	NOx	251921038	0	538461	-33.606	249.394.564	0	2.650.772	-165.440	
	GWP	2,61E+11	0	57239064	-16.774.555	257.195.174.882	0	281.780.281	-82.578.898	
	N2O	143	-19.724	4	-26.981	142	-19.465	21	-132.822	
	SOx	11923188	0	91329	-22.561	11.831.661	0	449.598	-111.065	
	HCl	1173427	0	249	-435	1.158.357	0	1.226	-2.143	
	HF	179028	0	0	0	176.713	0	0	0	
	H2S	3639857	0	0	0	3.592.663	0	0	0	
	HC Total	38797104	0	0	0	38.294.063	0	0	0	
	HC Clorados	1057553	0	0	0	1.043.841	0	0	0	
	Dioxinas e furanos	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Amônia	0	-10.814	0	-13.782	0	-10.672	0	-67.847	
	Arsênio	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Cádmio	74	0	0	0	73	0	0	0	
	Cromo	12	0	0	0	12	0	0	0	
	Cobre	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Chumbo	0	-406	0	0	0	-400	0	0	
	Manganês	0	-252	0	0	0	-249	0	0	
	Mercurio	0	-76	0	0	0	-75	0	0	
	Níquel	3	-2.304	0	0	3	-2.274	0	0	
	Zinco	616	0	0	0	608	0	0	0	
	água	DBO	7922984	0	79704	0	7.820.256	0	392.372	0
		DQO	7912641	0	134810	0	7.810.049	0	663.654	0
		Sólidos Suspenso	11821768	0	47832	0	11.704.251	0	235.471	0
COT		830	-152.213	8	0	822	-150.197	39	0	
AOX		7255	0	0	0	7.181	0	0	0	
HC Clorados		3739	0	0	0	3.701	0	0	0	
Dioxinas e furanos		0	0	0	0	0	0	0	0	
Fenóis		599	0	0	0	595	0	0	0	
Alumínio		198	-1.792.940	2	0	196	-1.769.492	9	0	
Amônio		125520	0	14212	0	124.277	0	69.965	0	
Arsênio		0	-3.575	0	0	0	-3.528	0	0	
Bário		228	-156.392	2	0	225	-154.346	10	0	
Cádmio		0	-47	0	0	0	-46	0	0	
Cloreto		100822674	0	444755	0	99.851.749	0	2.189.469	0	
Cromo		1	-17.797	0	0	1	-17.563	0	0	
Cobre		0	-8.804	0	0	0	-8.688	0	0	
Cianeto		0	-62	0	0	0	-61	0	0	
Fluoreto		1418	0	0	0	1.404	0	0	0	
Ferro		50670	-144.532	817	0	50.163	-141.401	4.021	0	
Chumbo		0	-8.790	0	0	0	-8.674	0	0	
Mercurio		0	-1	0	0	0	-1	0	0	
Níquel		0	-8.460	0	0	0	-8.347	0	0	
Nitrato		59	-45.107	1	0	59	-44.517	0	0	
Fosfato		2	-107.627	0	0	2	-106.219	0	0	
Sulfato		1699991	-5.772.654	19580	0	1.682.993	-5.690.158	96.392	0	
Sulfito		0	-194	0	0	0	-192	0	0	
Zinco		1	-15.624	0	0	1	-15.412	0	0	

Meio	Parâmetro	Cenário 5				Cenário 6				
		DMLU		RE-CICLO		DMLU		RE-CICLO		
		Emissão	Emissão evitada	Emissão	Emissão evitada	Emissão	Emissão evitada	Emissão	Emissão evitada	
ar	Particulados	2.704.800	0	91.435	-1.237	2.670.906	0	182.869	-2.475	
	CO	108.235.607	0	11.938.881	-70.015	105.105.749	0	23.877.682	-140.030	
	CO2	107.318.712.988	0	548.369.393	-82.533.961	103.523.644.905	0	1.096.735.072	-165.067.363	
	CH4	6.898.061.713	0	722.943	-13.093	6.644.229.685	0	1.445.880	-26.186	
	NOx	246.237.717	0	5.301.579	-330.881	239.978.917	0	10.603.123	-611.761	
	GWP	252.172.140.530	0	563.564.379	-165.158.914	243.046.819.800	0	1.127.124.941	-330.316.711	
	N2O	140	-19.070	43	-265.645	136	-18.357	85	-531.289	
	SOx	11.750.508	0	899.203	-222.132	11.557.324	0	1.798.400	-444.262	
	HCl	1.135.621	0	2.451	-4.285	1.094.355	0	4.902	-8.571	
	HF	173.206	0	0	0	166.853	0	1	0	
	H2S	3.521.045	0	0	0	3.391.380	0	0	0	
	HC Total	37.530.685	0	0	0	36.148.593	0	0	0	
	HC Clorados	1.023.033	0	0	0	985.359	0	0	0	
	Dioxinas e furanos	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Amônia	0	-10.456	0	-135.696	0	-10.067	0	-271.391	
	Arsênio	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Cádmio	72	0	0	0	69	0	0	0	
	Cromo	12	0	0	0	11	0	0	0	
	Cobre	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Chumbo	0	-392	1	0	0	-377	1	0	
	Manganês	0	-244	0	0	0	-235	0	0	
	Mercurio	0	-74	0	0	0	-71	0	0	
	Níquel	3	-2.228	0	0	3	-2.145	1	0	
	Zinco	596	0	0	0	575	0	0	0	
	água	DBO	7.664.362	0	784.751	0	7.382.118	0	1.569.495	0
		DQO	7.654.367	0	1.327.316	0	7.372.501	0	2.654.623	0
Sólidos Suspenso		11.558.643	0	470.945	0	11.268.762	0	941.888	0	
COT		811	-147.098	78	0	791	-141.518	157	0	
AOX		7.090	0	0	0	6.910	0	0	0	
HC Clorados		3.654	0	0	0	3.562	0	0	0	
Dioxinas e furanos		0	0	0	0	0	0	0	0	
Fenóis		593	0	0	0	587	0	0	0	
Alumínio		194	-1.733.720	17	0	189	-1.669.094	35	0	
Amônio		122.750	0	139.932	0	119.714	0	279.864	0	
Arsênio		0	-3.456	0	0	0	-3.327	0	0	
Bário		223	-151.223	21	0	217	-145.583	42	0	
Cádmio		0	-45	0	0	0	-43	0	0	
Cloreto		98.686.192	0	4.378.967	0	96.329.070	0	8.757.904	0	
Cromo		1	-17.207	0	0	1	-16.563	0	0	
Cobre		0	-8.511	0	0	0	-8.192	0	0	
Cianeto		0	-60	0	0	0	-58	0	0	
Fluoreto		1.386	0	0	0	1.351	0	0	0	
Ferro		49.527	-135.469	8.042	0	48.256	-125.590	0	-16.084	
Chumbo		0	-8.497	0	0	0	-8.178	0	0	
Mercurio		0	-1	0	0	0	-1	0	0	
Níquel		0	-8.174	0	0	0	-7.862	0	0	
Nitrato		58	-43.616	0	0	57	-41.989	0	0	
Fosfato		2	-104.072	0	0	2	-100.193	0	0	
Sulfato		1.661.662	-5.557.793	192.785	0	1.618.999	-5.323.383	385.568	0	
Sulfito		0	-188	0	0	0	-181	0	0	
Zinco	1	-15.083	0	0	1	-14.492	0	0		

Meio	Parâmetro	Cenário 7a		Cenário 7b				
		Compostagem via DMLU		DMLU		RE-CICLO		
		Emissão	Emissão evitada	Emissão	Emissão evitada	Emissão	Emissão evitada	
ar	Particulados	3.733.477	-14.077	2415548	0	914348	-12.374	
	CO	87.936.902	-796.524	79694418	0	119388570	-700.150	
	CO2	74.429.040.403	-938.943.050	72399627601	0	5483682786	-825.337.931	
	CH4	4.563.674.065	-148.953	4558867488	0	7229412	-130.931	
	NOx	217.617.121	-3.764.255	189551803	0	53015685	-3.308.808	
	GWP	170.263.701.770	-1.878.921.277	1,68E+11	0	5635632337	-1.651.585.790	
	N2O	4.454	-3.034.596	108	-12.495	426	-2.656.446	
	SOx	14.540.418	-2.527.070	10054481	0	8992011	-2.221.314	
	HCl	875.847	-48.752	755494	0	24511	-42.853	
	HF	127.138	0	114661	0	3	0	
	H2S	2.326.633	0	2326081	0	0	0	
	HC Total	24.799.490	0	24793612	0	0	0	
	HC Clorados	675.999	0	675838	0	0	0	
	Dioxinas e furanos	0	0	0	0	0	0	
	Amônia	2.340	-1.550.601	0	-6.863	0	-1.356.955	
	Arsênio	0	0	0	0	0	0	
	Cádmio	53	0	47	0	0	0	
	Cromo	8	0	8	0	0	0	
	Cobre	0	0	0	0	0	0	
	Chumbo	108	-257	0	-257	6	0	
	Manganês	55	-160	0	-160	0	0	
	Merúrio	17	-48	0	-48	0	0	
	Níquel	502	-1.462	2	-1.462	5	0	
	Zinco	561	0	397	0	2	0	
	água	DBO	12.206.683	0	5063253	0	7847487	0
		DQO	17.140.391	0	5056760	0	13273133	0
		Sólidos Suspenso	10.321.904	0	8935187	0	4709445	0
COT		131.236	0	624	-95.625	785	0	
AOX		5.458	0	5455	0	0	0	
HC Clorados		2.812	0	2811	0	0	0	
Dioxinas e furanos		0	0	0	0	0	0	
Fenóis		710	0	542	0	0	0	
Alumínio		388.166	-1.138.218	149	-1.137.935	175	0	
Amônio		1.337.207	0	95200	0	1399318	0	
Arsênio		784	-2.264	0	-2.263	0	0	
Bário		34.132	-99.249	171	-99.224	209	0	
Cádmio		21	-24	0	-24	0	0	
Cloreto		92.554.185	0	77414536	0	43789579	0	
Cromo		3.899	-11.273	1	-11.270	1	0	
Cobre		1.947	-5.566	0	-5.565	0	0	
Cianeto		13	-39	0	-39	0	0	
Fluoreto		1.066	0	1066	0	0	0	
Ferro		171.937	-43.287	38083	-43.192	80419	0	
Chumbo		1.951	-5.553	0	-552	0	0	
Merúrio		1	0	0	0	0	0	
Níquel		1.964	-5.299	0	-5.297	0	0	
Nitrato		9.837	-28.627	45	-28.619	0	0	
Fosfato		23.288	-68.327	2	-68.310	0	0	
Sulfato		3.460.788	-3.391.313	1277702	-3.389.994	1927843	0	
Sulfito		42	-123	0	-123	0	0	
Zinco		3.917	-9.630	1	-9.627	1	0	

Meio	Parâmetro	Cenário 7c				
		DMLU		Copostagem caseira		
		Emissão	Emissão evitada	Emissão	Emissão evitada	
ar	Particulados	2.415.548	0	0	-12.374	
	CO	79.694.418	0	0	-700.150	
	CO2	72.399.627.601	0	3100239	-825.337.931	
	CH4	4.558.867.488	0	0	-130.931	
	NOx	189.551.803	0	0	-3.308.808	
	GWP	168.132.004.577	0	3100239	-1.651.585.790	
	N2O	108	-12.495	0	-2.656.446	
	SOx	10.054.481	0	0	-2.221.314	
	HCl	755.494	0	0	-42.853	
	HF	114.661	0	0	0	
	H2S	2.326.081	0	0	0	
	HC Total	24.793.612	0	0	0	
	HC Clorados	675.838	0	0	0	
	Dioxinas e furanos	0	0	0	0	
	Amônia	0	-6.863	0	-1.356.955	
	Arsênio	0	0	0	0	
	Cádmio	47	0	0	0	
	Cromo	8	0	0	0	
	Cobre	0	0	0	0	
	Chumbo	0	-257	0	0	
	Manganês	0	-160	0	0	
	Mercurio	0	-48	0	0	
	Níquel	2	-1.462	0	0	
	Zinco	397	0	0	0	
	água	DBO	5.063.253	0	7847480	0
		DQO	5.056.760	0	13272899	0
Sólidos Suspenso		8.935.187	0	0	0	
COT		624	-95.625	0	0	
AOX		5.455	0	0	0	
HC Clorados		2.811	0	0	0	
Dioxinas e furanos		0	0	0	0	
Fenóis		542	0	0	0	
Alumínio		149	-1.137.935	0	0	
Amônio		95.200	0	1356355	0	
Arsênio		0	-2.263	0	0	
Bário		171	-99.224	0	0	
Cádmio		0	-24	0	0	
Cloreto		77.414.536	0	0	0	
Cromo		1	-11.270	0	0	
Cobre		0	-5.565	0	0	
Cianeto		0	-39	0	0	
Fluoreto		1.066	0	0	0	
Ferro		38.083	-43.192	0	0	
Chumbo		0	-552	0	0	
Mercurio		0	0	0	0	
Níquel		0	-5.297	0	0	
Nitrato		45	-28.619	0	0	
Fosfato		2	-68.310	0	0	
Sulfato		1.277.702	-3.389.994	0	0	
Sulfito		0	-123	0	0	
Zinco	1	-9.627	0	0		