

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADEMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JOÃO FRANCISCO SCHITTENHELM BOZZANO

**INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS
CLASSE II-A SUBMETIDOS AO PROCESSO DE COMPOSTAGEM
POR REVOLVIMENTO DE LEIRAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2019

JOÃO FRANCISCO SCHITTENHELM BOZZANO

**INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS
CLASSE II-A SUBMETIDOS AO PROCESSO DE COMPOSTAGEM
POR REVOLVIMENTO DE LEIRAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 (TCC II) do curso de Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Campus Ponta Grossa, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Tesser.

PONTA GROSSA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

**INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS CLASSE II-A
SUBMETIDOS AO PROCESSO DE COMPOSTAGEM POR REVOLVIMENTO DE
LEIRAS**

por

JOÃO FRANCISCO SCHITTENHELM BOZZANO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 6 de dezembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Daniel Tesser
Orientador

Prof. Dr. Cassiano Moro Piekarski
Membro Titular

Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho**
Coordenador do Curso

Aos meus pais Valéria Schittenhelm e
Ulisses Bozzano e todos meus
educadores que me ensinaram a
buscar o conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por terem me dado toda condição necessária para minha formação.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela oportunidade de adquirir conhecimento além de proporcionar um ambiente criativo e amigável.

A todos os professores por me proporcionarem o conhecimento didático e de vida, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender.

Ao Prof. Dr. Daniel Poletto Tesser pela transmissão do conhecimento e pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho. A todos os amigos e companheiros de que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida.

A minha namorada, por me incentivar e motivar para a finalização desse trabalho além de me dar o apoio em todos os momentos.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“O maior inimigo do conhecimento não é a ignorância, mas sim a ilusão de conhecimento”.

(Stephen Hawking)

RESUMO

BOZZANO, João Francisco S. **Inventário do ciclo de vida de resíduos industriais classe ii-a submetidos ao processo de compostagem por revolvimento de leiras**. 2019. 65f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

A geração de resíduos orgânicos tem aumentado progressivamente devido aumento do consumo e da população, além disso há a preocupação social em relação aos impactos ambientais gerados por sua destinação final. A compostagem se destaca nesse prognóstico pelos seus impactos benéficos ao meio ambiente, evitando o descarte em lixões e reciclando essa matéria orgânica para um novo uso. Com o objetivo de gerenciar os resíduos, em 2014, entrou em vigor a lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Essa lei apresenta as diretrizes relativas à gestão de resíduos sólidos através da destinação e tratamento apropriado mediante a logística reversa seguindo uma ordem que consiste em não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final em aterros. Considerando essa conjuntura, utilizou-se nessa pesquisa a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para identificar, quantificar e avaliar os impactos ambientais associados a compostagem industrial de resíduos Classe II. O ciclo de vida se inicia com a entrada de recursos (energia, água, matérias primas) para a manufatura e finaliza após as saídas retornarem ao meio ambiente, o fim de vida. A coleção de dados e procedimentos de cálculos que determinam as entradas e saídas de um sistema com o intuito de quantificar o consumo de matéria prima, energia é composto por produtos, emissões atmosféricas, efluentes líquidos, resíduos sólidos e outros aspectos ambientais, definido como Inventário do Ciclo de Vida (ICV). O presente estudo teve como objetivo a elaboração do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do processo de compostagem industrial pelo sistema de revolvimento de leiras em uma empresa da região dos campos gerais, Paraná. Com os dados do ICV, avaliaram-se os impactos do ciclo de vida do processo de compostagem através do método *ReCiPe*. Foram apresentados todos os resultados nas categorias desse método com foco no potencial de aquecimento global. Com os resultados encontrados, foi possível avaliar e quantificar os impactos ambientais gerados nas etapas da compostagem, deste modo, possibilitando a continuidade ao estudo através das etapas seguintes do ACV em outros estudos. Os resultados encontrados permitiram encontrar os impactos ambientais relacionados ao processo e seus insumos, onde foi verificado que o processamento principal da compostagem, que compreende ao revolvimento das leiras, é o mais impactante tanto no consumo de insumos como no impacto de potencial de aquecimento global. O estudo mostrou que o processo de compostagem industrial pelo sistema de revolvimento de leiras possui baixo impacto ambiental, que pode ser mostrado com a comparação desses resultados com outros métodos de destinação final em estudos futuros. A pesquisa, também, contribui para a ampliação do banco de dados de ACV no Brasil e no mundo, podendo ser utilizado em trabalhos futuros de mesma natureza.

Palavras-chave: Análise de Ciclo de Vida (ACV). Inventário de Ciclo de Vida (ICV). Compostagem Industrial.

ABSTRACT

BOZZANO, João Francisco S. **Life Cycle Inventory for windrow composting system of industrial waste class ii-a.** 2019. 65f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

Organic waste generation has progressively increased due to increasing consumption and population, and there is a social concern regarding the environmental impacts generated by its final destination. Composting stands out in this prognosis for its beneficial impacts on the environment, avoiding disposal in dumps and recycling this organic matter for new use. In order to manage waste, in 2014, the National Solid Waste Policy (PNRS) law came into force. This law sets forth guidelines for solid waste management through proper disposal and treatment through reverse logistics following an order consisting of no generation, reduction, reuse, recycling, treatment and final disposal in landfills. Considering this conjuncture, we used in this research the Life Cycle Assessment (LCA), identify, quantify and evaluate the environmental impacts associated with a service, process or product throughout its life cycle. The life cycle begins with the input of resources (energy, water, raw materials) into manufacturing and ends after the outputs return to the environment, the end of life. The collection of data and calculation procedures that determine the inputs and outputs of a system in order to quantify the consumption of raw materials, energy and other physical inputs and outputs consisting of products, atmospheric emissions, liquid effluents, solid waste and others. Environmental aspects are defined as Life Cycle Inventory (LCI). The aim of the present study was to elaborate the Life Cycle Inventory (ICV) of the industrial composting process by the windrow system in a company from the Campos Gerais region, Paraná. With ICV data, the life cycle impacts of the composting process were evaluated using the ReCiPe method. All results were presented in the categories of this method focusing on global warming potential. With the results found, it was possible to evaluate and quantify the environmental impacts generated in the composting stages, thus allowing the continuity of the study through the following stages of the LCA in other studies. The study showed that the industrial composting process by the windrow system has low environmental impact, which can be shown by comparing these results with other disposal methods in future studies. The research also contributes to the expansion of the LCA database in Brazil and worldwide, and can be used in future works of the same nature.

Keyword: Life Cycle Assessment (LCA). Life Cycle Inventory (LCI). Industrial Composting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos Resíduos Sólidos, segundo ABNT NBR 10004 de 2004.	12
Figura 2 - Estágios do ciclo de vida de um produto.....	16
Figura 3 - Fases de um ACV.....	17
Figura 4 - Procedimento simplificado para análise de inventário.	21
Figura 5 - Processo da compostagem.....	24
Figura 6 - Fases do processo de compostagem	26
Figura 7 - Representação esquemática do processo de compostagem com metodologia de aeração passiva.....	27
Figura 8 - Exemplificação do sistema de leiras revolvidas	28
Figura 9 - Processo de compostagem e suas fronteiras	33
Figura 10 - Função, unidade funcional e fluxo de referência.....	34
Figura 11 - Fluxograma completo do processo de compostagem englobando entradas e saídas.....	36
Figura 12 - Local de recebimento do material	39
Figura 13 - Equipamentos Móveis no processo de enleiramento e transportes internos. (a) Caminhão vermelho 16m ³ (b) Caminhão Azul 10,5 m ³	41
Figura 14 - Equipamento Móvel para carregamento de caminhões para transportes internos	41
Figura 15 - Equipamento para revolvimento de leiras.....	42
Figura 16 - Composto em maturação.....	43
Figura 17 - Equipamento estacionário para peneiramento.....	45
Figura 18 - Equipamento móvel para alimentação da peneira.	45
Figura 19 - Consumo energia para as etapas do sistema estudado	56
Figura 20 - Consumo diesel para as etapas do sistema estudado.....	56
Figura 21 - Energias Totais do Processo.	57
Figura 22 - Emissões Totais: CO ₂	58
Figura 23 - Emissões totais: CO, NO _x , VOCs totais.....	58
Figura 24 - Emissões totais: NO ₂ , CH ₄ , SO ₂ , Pb.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição das Etapas da Compostagem	33
Tabela 2 - Formulação das leiras.....	40
Tabela 3 - Consumo de energia elétrica por processo.....	46
Tabela 4 - Consumo de combustível, eletricidade e água durante o processo de compostagem.....	47
Tabela 5 - Emissões estimadas do processo de compostagem.....	49
Tabela 6 - Emissões de gases do efeito estufa por processo da compostagem.....	49
Tabela 7 - Dados de emissões de combustível.....	50
Tabela 8 - Inventário de ciclo de vida para o processo de compostagem por revolvimento de leiras para 100 toneladas de composto acabado.....	51
Tabela 9 - Fluxo de entradas e saídas: Recepção	52
Tabela 10 - Fluxo de entradas e saídas: Processo Inicial	53
Tabela 11 - Fluxo de entradas e saídas: Processamento Principal.....	53
Tabela 12 - Fluxo de entradas e saídas: Gestão do Lixiviado.....	54
Tabela 13 - Fluxo de entradas e saídas: Peneiramento	54

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
C	Carbono
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CRMD	<i>Canadian Raw Materials Data Base</i>
ELCD	<i>European reference Life Cycle Data Base</i>
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
N	Nitrogênio
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
SICV	Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida
SO ₂	Dióxido de enxofre
UNEP	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
US EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
USLCI	<i>U.S. Life Cycle Inventory Database</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)	15
2.1.1	Importância e Aplicações	19
2.1.2	Inventário do Ciclo de Vida (ICV)	20
2.1.3	Métodos para avaliação de impactos	23
2.2	COMPOSTAGEM	24
2.2.1	Sistema de Leiras Revolvidas	26
3	METODOLOGIA	29
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	29
3.2	ESTRUTURA METODOLÓGICA	30
4	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM POR REVOLVIMENTO DE LEIRAS	31
4.1	DEFINIÇÃO DO OBJETIVO	31
4.2	DEFINIÇÃO DO ESCOPO	31
4.2.1	Sistema estudado	32
4.2.2	Função e unidade funcional	34
4.2.3	Fronteiras do Sistema	35
4.2.4	Exclusões	37
4.2.5	Requisitos da Qualidade dos Dados Iniciais	38
4.3	ICV: O PROCESSO DE COMPOSTAGEM	38
4.3.1	Inventário do subsistema: Recepção da matéria orgânica compostável	38

4.3.2	Inventário do subsistema: Processo Inicial do Compostagem	40
4.3.3	Inventário do subsistema: Processamento Principal Da Compostagem	42
4.3.4	Inventário do subsistema: Gestão do Lixiviado	43
4.3.5	Inventário do subsistema: Peneiramento	44
4.3.6	Consumo de Combustível e Energia Elétrica	45
4.3.7	Consumo de Energias	47
4.3.8	Emissões.....	47
4.3.9	Inventário Consolidado.....	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5.1	ENERGIA ELÉTRICA.....	55
5.2	COMBUSTÍVEL FÓSSIL – DIESEL	56
5.3	ENERGIAS.....	57
5.4	EMISSÕES ATMOSFÉRICAS.....	57
6	CONCLUSÕES	59
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
8	REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

A preocupação social em relação ao impacto ambiental gerado pelo ciclo de vida do produto tem despertado o interesse na avaliação e controle desses impactos. Entre esses impactos pode-se destacar a destinação final dos resíduos gerados pelo processo e pelo produto.

Segundo um levantamento do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) realizado em 2012, o Paraná tem uma geração de resíduos sólidos industriais de mais de 15 mil toneladas ao ano.

Segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA (2002), “Resíduo sólido industrial é todo o resíduo que resulte de atividades industriais e que se encontre nos estados sólido, semissólido, gasoso - quando contido, e líquido - cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição”.

Os resíduos sólidos industriais, segundo a Lei Nº 12.305, de 2010 (BRASIL; 2010) e pela Norma Brasileira Regulamentadora ABNT NBR 10004 (2004), podem ser classificados em duas classes: Classe I, Perigosos e Classe II, Não Perigosos como observados na Figura 1.

Figura 1 - Classificação dos Resíduos Sólidos, segundo ABNT NBR 10004 de 2004.

Classe I	Classe II	
Resíduos Perigosos	Resíduos Não Perigosos	
	Classe II A- Não Inertes	Classe II B - Inertes
Em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, pode apresentar: a) risco à saúde pública, provocando mortalidade incidência de doenças ou acentuando seus índices; b) riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.	Podem ter as seguintes propriedades: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Geralmente mais fácil de ser classificado por exclusão, quando não classificado em classe I, nem classe II B.	Quaisquer resíduos que quando amostrados, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, confirme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhuma de suas constituintes solubilidades a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água.

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004).

Tais resíduos, mesmo dentro de uma mesma categoria, podem ser muito diferentes entre si. Suas características físicas, químicas e biológicas, são resultadas condicionantes distintas, como: a origem da geração (industrial, agrícola, domiciliar, entre outros), composição química (orgânico e inorgânico), a natureza física (seco ou molhado), os riscos que podem gerar ao ambiente ou à saúde humana (D'ALMEIDA; VILHENA, 2010).

Dentre os vários métodos de destinação do resíduo sólido industrial da classe II, a compostagem se destaca pelos seus impactos benéficos a natureza, dando um destino útil aos resíduos. A compostagem é um processo biológico de decomposição e de reciclagem da matéria orgânica contida em restos de origem animal ou vegetal formando um composto. A compostagem além de evitar a acumulação dos resíduos em aterros, gera um material que pode ser utilizado como substrato para melhorar as características do solo.

Desde 02 de agosto de 2010, está vigente a lei de Política Nacional de Resíduos Sólidos, que torna o gerador do produto como responsável pelo impacto ambiental em seu ciclo de vida. Entre as obrigações do gerador do resíduo estão à responsabilidade sobre o descarte dos subprodutos do processo, os resíduos sólidos industriais.

Apresenta-se ao longo do trabalho, o estudo inicial para possibilitar futuramente a aplicação da técnica de ACV, e assim, calcular o impacto ambiental gerado pela compostagem de resíduos sólidos industriais classe II. Esta etapa inicial compreende a descrição do processo de compostagem e a análise do inventário do ciclo de vida (ICV).

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Os impactos ambientais gerados pelos resíduos sólidos indústrias têm grande relevância no pensamento sustentável e ecológico na atualidade. O estudo sobre os impactos de serviços e práticas de melhoria de descarte, como a compostagem, e reciclagem desses resíduos é fundamental para tanto a sustentabilidade dos negócios envolvidos como do ambiente em si.

A busca por novos meios de reciclagem ou reuso dos resíduos sólidos industriais é necessária, tendo em vista que aterros são alternativas de alto custo e

pouco sustentáveis. De acordo com o artigo 9º da Política Nacional dos Resíduos sólidos (2010), existe uma ordem a ser seguida na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, seguindo em ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento de resíduos sólidos e disposição adequada dos rejeitos. A compostagem é uma solução possível por proporcionar um composto que pode ser reutilizável no campo sem gerar volumes em aterros e impactos ambientais, além de auxiliar a empresa a dar um fim limpo a seus resíduos obedecendo ao Plano Nacional de Resíduos Sólidos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é realizar o estudo do ICV do processo de compostagem industrial por sistema de leiras revolvidas.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Seleção do Processo.
2. Definição do escopo do estudo de avaliação do inventário.
3. Mapeamento dos processos e levantamento de dados referentes a entradas e saídas para o processo de geração de composto
4. Realização do inventário de ciclo de vida do processo de compostagem industrial.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos itens a seguir será apresentado a revisão bibliográfica sobre ACV, ICV e as definições de compostagem e a metodologia do processo.

2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

O método de ACV surgiu da crescente conscientização quanto à importância da proteção ambiental e os possíveis impactos associados aos produtos (bens e serviços), não somente em relação a sua fase de fabricação, mas em todo o ciclo de vida do produto, desde a retirada das matérias primas até os métodos de descarte dos resíduos (ABNT 2009a).

A partir do final da década de 1960, a conscientização da importância ambiental e do impacto do seu mau uso tornaram-se global. Em 1968, cientistas, economistas e diretores de grandes empresas se reuniram em Roma para discutir problemas globais e identificar os maiores que determinarão o futuro do planeta, e assim foi criado o Clube de Roma. Em 1972, o clube lançou seu estudo *The Limits to Growth* - O limite do crescimento, no qual explanava a previsão de um colapso do mundo devido ao desequilíbrio entre a oferta de matérias primas (recursos naturais) e o consumo (MEADOWS et al., 1972). Em meio a essa temática que surge o ACV.

Um dos primeiros estudos que pode ser caracterizado com ACV, foi gerido pelo “MidWest Research Institute” (MRI) para a Companhia Coca Cola em 1969, esse estudo tinha o objetivo de identificar qual a embalagem de refrigerante geraria menores níveis de emissões e em seu processo produtivo utilizaria menos recursos. Para atingir os resultados, durante vários meses foram coletados dados de energia, materiais utilizados e impactos ambientais desde a extração das matérias primas até seu descarte. Dentre as embalagens de vidro e de plástico apresentadas no estudo, as embalagens de plástico tiveram os melhores resultados, uma ideia revolucionária para época (Hunt e Franklin, 1996).

Em 1974, a Midwest Research Institute (MRI), aprimorou o modelo ao realizar um novo estudo a pedido da agência norte Americana de proteção ambiental (Environmental Protection Agency – EPA), visando comparar diversas embalagens de cerveja. Esse estudo levou em conta além do processo de fabricação, as interconexões com as fases de uso e distribuição e as cadeias produtivas das matérias primas envolvidas. Esse novo modelo se tornou a base do que se chamaria Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (CHEHEBE, 1997).

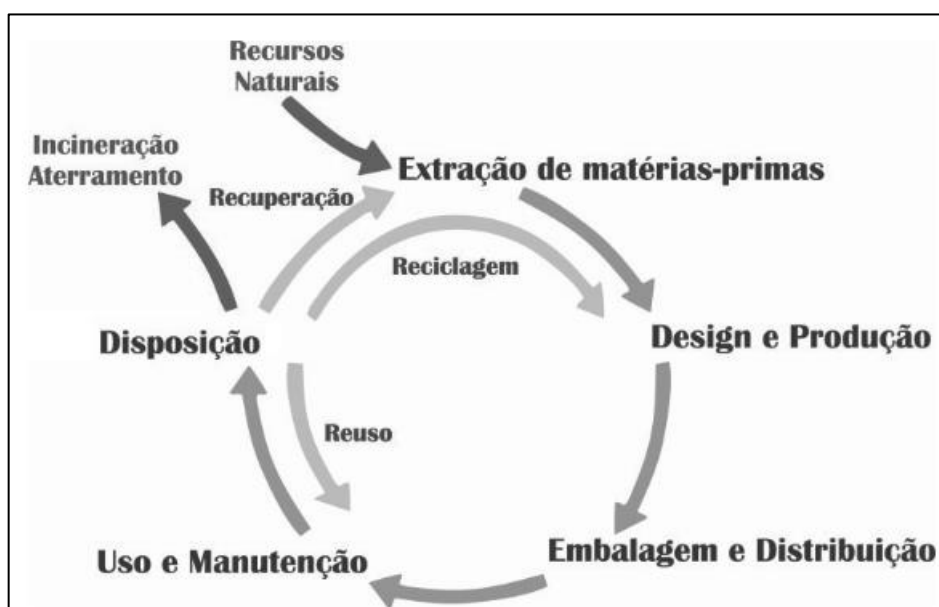
Em 1992, a técnica da ACV foi normalizada pela *International Organization for Standardization* (ISO) pela ISO 14040, princípios gerais e diretrizes. Desde 1998, a

ABNT rege as atividades que regulamentam a técnica do ACV no Brasil. (ABNT, 1998).

Em 2006, num processo de revisão, foi substituída pela ISO 14040:2006 , princípios e estruturas da ACV (ISO, 2006a) e ISO 14044, requisitos e diretrizes (ISO, 2006b).

Segundo Sonnemann (2007), o pensamento do ciclo de vida é essencial para o desenvolvimento sustentável. Vai além do foco tradicional de produção e engloba todo tipo de impacto, econômico, ambiental e social de um produto por todo seu ciclo de vida estendendo a responsabilidade dos impactos do produto desde a extração até seu fim (*Cradle to grave*). O ACV é baseado nesse conceito e entendido por Silva (2006) como o “conjunto de todas as etapas necessárias para que um produto cumpra sua função, contando da aquisição dos recursos naturais aplicados na sua fabricação até sua disposição final após cumprimento da sua função”, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Estágios do ciclo de vida de um produto



Fonte: Adaptado de Sonnemann (2007)

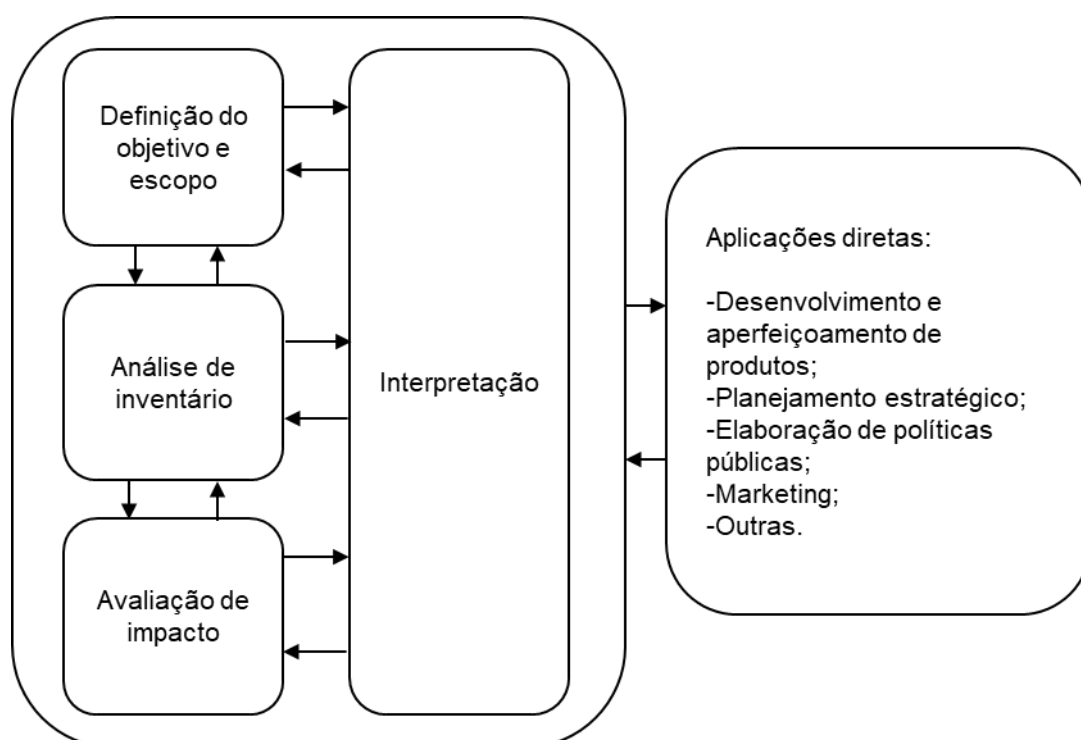
O conceito de ciclo de vida ilustrado na figura 1 é dividido em cinco etapas: a primeira é a extração de matérias-primas (recursos naturais); a segunda, a produção dos produtos; a terceira, a embalagem e a distribuição; a quarta, o uso e a manutenção do produto; e a quinta etapa, a disposição, onde se abre um leque de métodos de

acordo com o material envolvido, entre esses métodos, reciclagem, reuso, recuperação, aterramento, incineração, etc.

A norma ISO 14040 define ACV como a “compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida” (ABNT, 2009b). Dentro das entradas incluem a medição de energia e materiais envolvidos, e nas saídas, os fluxos de produto e coprodutos, emissões gasosas na atmosfera, efluentes líquidos, resíduos sólidos, perdas de energia, entre outros (Silva, 2012).

Segundo a Norma ISO 14040 (ISO, 2006b), a aplicação da técnica de ACV é composta de quatro fases: definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos ambientais e interpretação dos resultados. As fases, que se comportam de forma iterativa, são melhores detalhadas na Figura 3:

Figura 3 - Fases de um ACV



Fonte: ISO, 2006b

a) Definição do objetivo e escopo

O objetivo de uma ACV deve ser apresentado de forma clara e conter a aplicação pretendida, as razões para se realizar o estudo, o público alvo e todos os aspectos que auxiliem nas decisões tomadas.

O a definição do escopo define os parâmetros e os limites do estudo, dentre os itens que precisam ser apresentados nessa etapa, destacam-se: o sistema englobado do produto, a unidade funcional e as fronteiras do sistema.

b) Análise de inventário

Essa etapa consiste na análise de ICV e envolve a coleta de dados físicos ou em banco de dados e os procedimentos de cálculos para quantificar as entradas e saídas relevantes dos processos envolvidos no sistema estudado assim como a validação dos mesmos.

c) Avaliação de impactos

A avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV) é a fase que tem como objetivo estudar e interpretar os dados obtidos na ICV e associá-los com categorias de impactos específicos, tentando através deles compreender os impactos, a fim de fornecer informações para a interpretação.

A avaliação de impactos pode ser de acordo com os objetivos e o escopo pré-definidos ou pode incluir um processo interativo, que, com base na análise crítica, pode qualificar o objetivo e o escopo ou pode modifica-los se a avaliação os considerar inviáveis.

d) Interpretação dos resultados

É a etapa em que a ICV e a AICV são consideradas em conjunto com o intuito de oferecer resultados harmônicas com o objetivo e escopo pré-definidos de um modo conclusivo a ponto de esclarecer as limitações do estudo e fornece recomendações.

É importante nessa etapa o fornecimento de resultados de forma clara, consistente e completa, levando em conta o objetivo e o escopo definidos.

Como visto, a ACV é um método que atua em várias frentes a fim de avaliar o desempenho ambiental de produtos levando em consideração todo o ciclo de vida

do produto. O estudo ambiental resultante do ACV tem uma abrangência mais completa em relação a outros estudos possibilitando encontrar os pontos críticos do ciclo de vida. A importância e aplicações da ACV são abordadas a seguir.

2.1.1 Importância e Aplicações

Segundo Wenzel et al. (1994), o ACV se destaca perante os outros métodos semelhantes por ser a única técnica capaz de comparar ambientalmente dois produtos que desempenham funções iguais além de ser a que melhor utiliza o conceito de ciclo de vida. Guinée et al. (2001) explica que ao se analisar todo o ciclo de vida de um produto, ao tentar encontrar a solução de um problema, evita que um novo seja criado pela transferência ou surgimento de novos impactos ambientais, evitando assim, perdas econômicas.

As aplicações da ACV variam de acordo com o objetivo e do escopo do estudo. Algumas aplicações são abordadas na ABNT (2009a):

- Identificar oportunidades para melhoria do desempenho ambiental de produtos em diversos pontos de seus ciclos de vida;
- Fornecer informações precisas aos tomadores de decisões das indústrias, visando o planejamento estratégico, à definição de prioridades e metas e adequação as normas ambientais;
- Selecionar indicadores de desempenho ambientais relevantes; e
- Implementar um esquema de rotulagem ambiental, ou elaborar declarações ambientais de produtos como estratégia de marketing.

Segundo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, UNEP (1996), os usuários da ACV são diversos, entre eles: organizações não governamentais, governos, órgãos reguladores, consumidores e, na maioria, setor empresarial.

Como usuário predominante, o setor empresarial, para a UNEP (1996) tem as seguintes aplicações: a melhoria de desempenho ambiental, cumprimento de normas ambientais, identificação de *hotspots*, questões referentes ao marketing, projeto e comparação de produtos.

O uso da ACV como estratégia de *marketing*, pode acontecer por meio da rotulagem ambiental, nomeada também por *eco-labeling*, ou pela declaração

ambiental de produtos (Silva, 2012). ABNT (2011) define como um programa voluntário de certificação e rotulagem, que atesta que um produto apresenta menor impacto ambiental em relação a semelhantes no mercado.

Como exposto sobre a importância e aplicações da ACV, mostra a importância dessa técnica no desenvolvimento sustentável. Além disso, quanto maior número de ACVs realizados e disponibilizados aumenta a base de dados para realizações de novos estudos, a base de dados será discutida a seguir.

2.1.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

O ICV é à base de um ACV, este é adquirido mediante a uma aferição quantitativa das cargas ambientais ao longo do ciclo de vida estudado, sendo ele do berço ao túmulo ou do berço ao berço (JOHN et al., 2006).

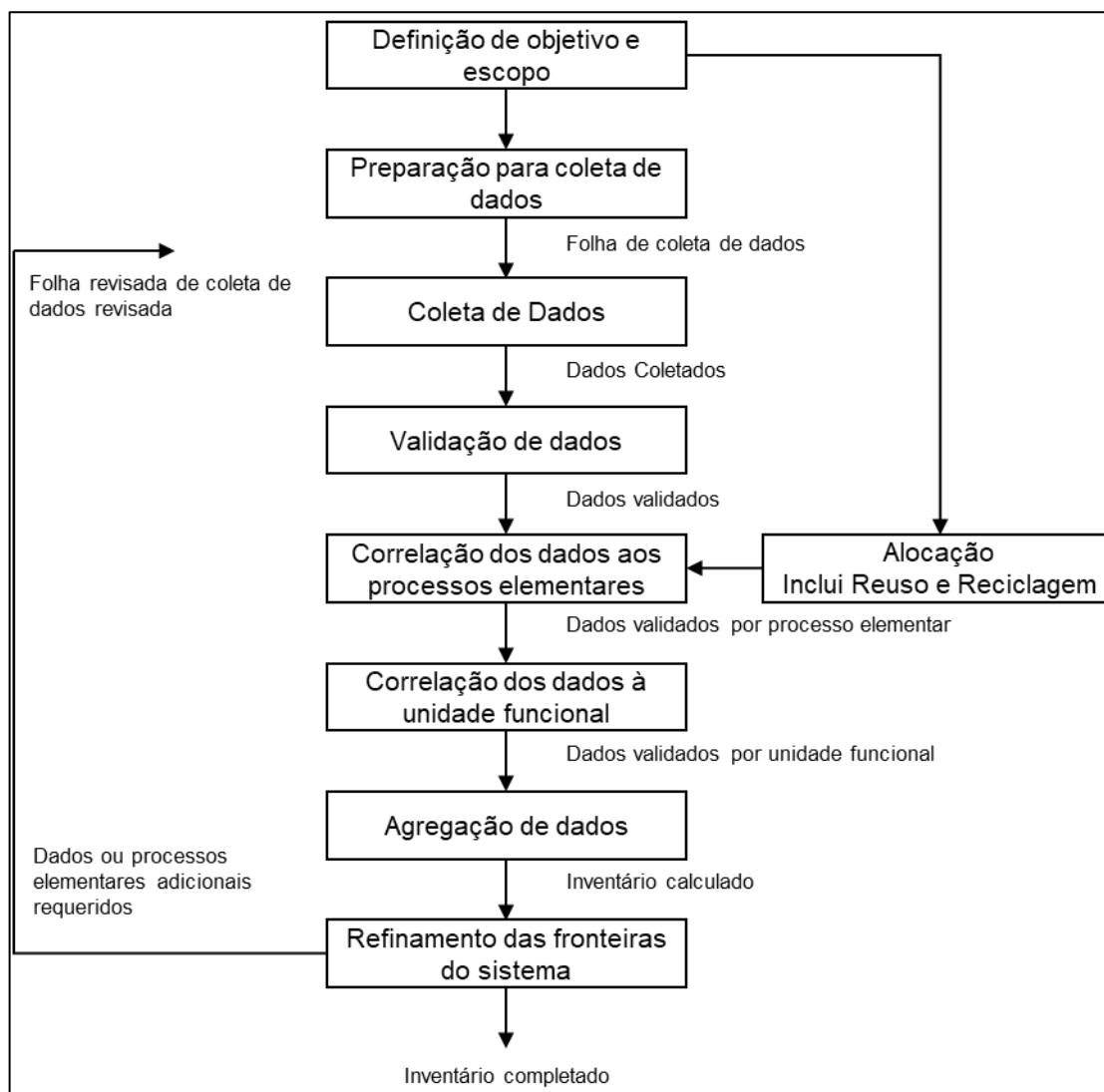
O ICV é correspondido pela pesquisa, a coleta de dados, todas as metodologias de cálculos referente às categorias de impactos abordadas, as fronteiras do sistema e os dados da unidade funcional. Essa fase do ACV é a que demanda mais trabalho e tempo para ser executada. (GUINNÉ et al, 2011; ABNT, 2009a)

O ICV deve abranger dados sobre todas as entradas e saídas de cada processo envolvido no sistema estudado. Borges (2004) descreve que os bancos de dados diminuem o tempo e o custo dos estudos e geram dados confiáveis e de melhor qualidade. Conseqüentemente, o ACV terá resultados mais precisos. Para isso, são necessários que estes bancos de dados contenham inventários de elementos comuns presentes a inúmeros ciclos de vidas, como: energia, metal, plástico, transporte, etc.

Para a formação de bancos de dados é preciso à colaboração mútua entre os potenciais usuários da ACV, principalmente entre academia, empresas e governo. O governo deve definir políticas públicas sobre como será conduzido os trabalhos, a importância e a necessidade do mesmo. As empresas devem disponibilizar os dados sobre suas cadeias produtivas. E a academia tem a função de capacitar recursos humanos e auxiliar na criação de bases de dados (SILVA, 2012).

Para a realização do ICV é recomendado que sejam seguidos alguns passos operacionais. A ISO 14044 (ABNT, 2009b) representa através do fluxograma (Figura 4) o procedimento simplificado para análise de inventário.

Figura 4 - Procedimento simplificado para análise de inventário.



Fonte: ABNT (2009b)

De acordo com as etapas do fluxograma, a definição do objetivo e escopo do estudo é a parte inicial para realização da fase de ICV de um ACV. Essa etapa corresponde à discriminação dos dados entre primários e secundários, a elaboração da folha de coleta de dados e o treinamento dos responsáveis pela coleta de dados (Passuelo, 2007).

Dados primários referem-se àqueles obtidos *in loco* por um responsável, ou seja, diretamente na fonte. Esses dados também são chamados de específicos. Os dados secundários são de referência literária e por isso são mais genéricos. Ambos os dados são importantes para a realização do ACV e devem ser justificados de acordo com o escopo do ACV estudado (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Para que o estudo tenha confiabilidade são necessários dados de qualidade. A ISO 14044 (ABNT, 2009b) fornece exemplos com os requisitos de qualidade a serem seguidos para a coleta desses dados.

À medida que é realizada a coleta e a análise dos dados, novos requisitos e dificuldades surgem para garantir o prosseguimento do estudo, isso gera mudanças na metodologia de coleta para atingir os resultados esperados. Em alguns estudos é necessária a mudança do objetivo e escopo do estudo. Isso caracteriza o processo de ICV como iterativo (Zocche e Francisco, 2013).

Segundo CHEHEBE (1997), conforme os dados são recebidos é necessária a validação dos mesmos, verificando se estão compatíveis e completas em relação a metodologia empregada. Essa validação pode ocorrer baseando-se em literaturas semelhantes ou baseadas em dados teóricos.

O refinamento da fronteira do sistema é a última etapa do ICV. De acordo com a ISO 14044 (ABNT, 2009 a), ao decorrer da aquisição dos dados se, podem-se observar novos requisitos e limitações, ampliando o conhecimento sobre o sistema e dessa forma alterando os procedimentos de coleta de dados.

Após todas as etapas e com o inventário completo, obtém-se de forma quantificada os dados com a finalidade de relacioná-los com as categorias de impacto e indicadores ambientais através da próxima etapa do ACV, a AICV.

Atualmente as bases de dados existentes estão disponíveis em *softwares* de ACV ou em alguns poucos casos, sites específicos. Dentre os principais bancos de dados no mundo se destacam o *Ecoinvent*, USLCI, CRMD, ELCD. Em alguns desses, como PE o caso do ELCD e USLCI, o acesso é gratuito. Já o Banco de dados do *Ecoinvent* é privado, sendo necessário adquirir uma licença para obter acesso. O *Ecoinvent* é considerado o banco de dados mais completa na literatura, possuindo mais de 4000 processos inventariados para diversos setores da indústria, como a indústria de embalagem e a indústria de combustíveis.

No Brasil, o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil) é utilizado para abrigar ICVs de produtos nacionais, implicando em ACVs com resultados mais confiáveis, gerando diretamente o aumento da competitividade da indústria nacional vinculada.

2.1.3 Métodos para avaliação de impactos

Os métodos de AICV auxiliam nos cálculos dos impactos ambientais baseados no perfil ambiental do produto (RIBEIRO, 2009). Cada método possui informações relevantes como categorias de impacto ambiental, os modelos de caracterização e indicadores de categoria. Utilizando de *softwares* de ACV a manipulação de tais métodos se facilita (SILVA, 2012).

Os métodos de AICV são caracterizados em *midpoint* (ponto médio) e *endpoint* (ponto final). Pennington (2004) descreve que os métodos *midpoint* se limitam à análise quantitativa antes do fim do ciclo do impacto, dentre as categorias dentro desse método se pode citar: aquecimento global, acidificação, diminuição da camada de ozônio, eco toxicidade, etc. Os métodos *endpoint* são diretamente relacionados aos danos finais, que relacionam as categorias: ameaça de extinção de espécies, prejuízos à saúde humana, danos à qualidade do ecossistema. O autor ressalta que os métodos *endpoint* conduzem a maiores incertezas em relação com os métodos *midpoint*, por apresentar uma complexibilidade maior em relação ao método *midpoint*.

A utilização de mais de um método na avaliação de impactos ambientais é de grande importância, pois permite verificar se os resultados encontrados em outras avaliações são coesos e independem do método utilizado. Diversas categorias de impactos ambientais são avaliadas em estudos de ACV, dentre as mais utilizadas, destacam-se: mudanças climáticas, toxicidade humana e ecotoxicidade, acidificação, eutrofização, uso da terra, recursos.

A AICV deve conter obrigatoriamente três fases: seleção, classificação e caracterização. A fase de seleção é onde é determinado a categoria de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização. A fase de classificação representa a consolidação dos dados obtidos no ICV e classificação destes entre as categorias de acordo com a fase anterior. A caracterização é a determinação de um valor numérico aos dados, quantificando-os. Ao final dessa, busca obter um valor total de contribuição de acordo com a categoria de impacto definida.

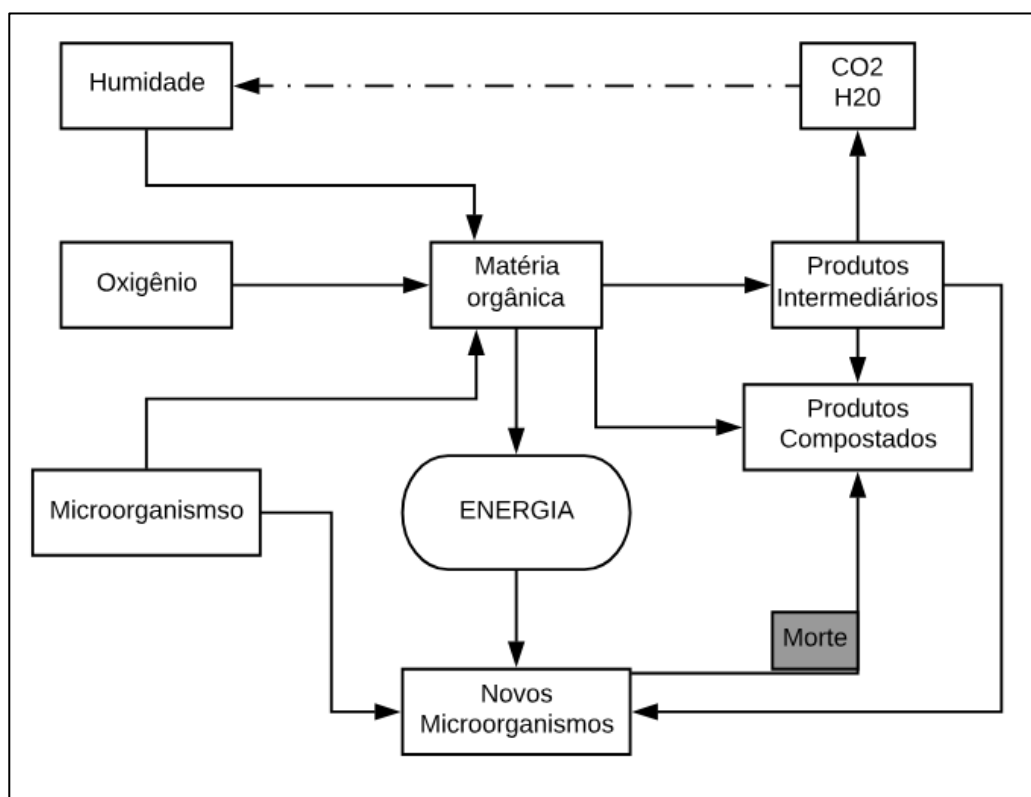
Demonstrado todos os pontos principais referentes à técnica de ACV, a partir da próxima seção, são discutidos os pontos relativos ao processo de compostagem industrial, iniciando pela sua definição.

2.2 COMPOSTAGEM

A compostagem baseia-se numa série de processos biológicos interdependentes, em sua maioria aeróbicos, realizados pela decomposição da matéria orgânica por microrganismos (Day & Shaw, 2005).

O processo ocorre pela ação de micro-organismos na presença de umidade e oxigênio degradando a matéria orgânica, gerando energia e nutrientes para sua reprodução e crescimento, inicialmente utilizando de substâncias mais simples e temporalmente usando substâncias mais complexas. A energia adquirida é utilizada para fomentar seu metabolismo enquanto o restante é liberado na forma de calor. Durante o processo, há a produção de dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O), calor, subprodutos gasosos e um composto final, de acordo com a Figura 5 (Day & Shaw, 2005).

Figura 5 - Processo da compostagem



Fonte: Adaptado de Gray et al. ,1975

O processo de compostagem tem um tempo ótimo variável de acordo com o material e as condições em que é manuseado (Day & Shaw, 2005). Os principais fatores para realização do processo de compostagem são: a temperatura, a umidade, o pH, o tipo e frequência de arejamento e os nutrientes do composto inicial (Beata-Hall et al., 2002). De acordo com Cunha-Queda (2006), as condições ótimas para realização do processo são: teor de umidade entre 40 e 60 %, pH entre 5,5 e 9, relação entre carbono e nitrogênio entre 25 e 30 e concentração de oxigênio na atmosfera local superior a 10%.

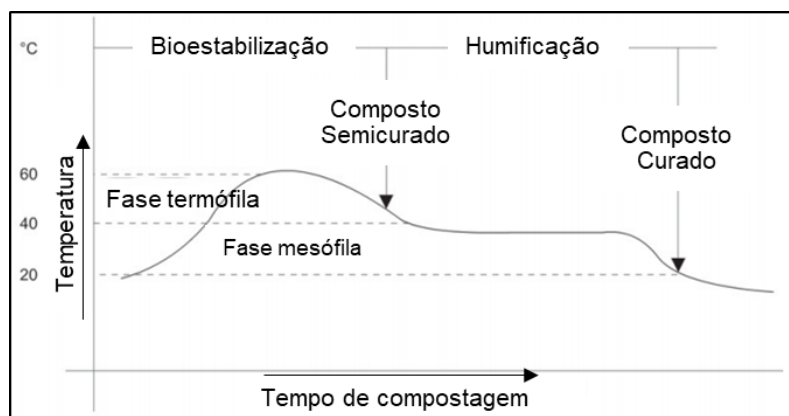
Dentre as várias formas de se avaliar a estabilidade de um composto, podemos definir empiricamente o estágio final do composto ao tomarmos uma amostra na mão e ele apresentar as seguintes características (Fernandes & Costa, 1997):

- Não aderir a mão;
- Não possuir cheiro desagradável;
- Apresentar coloração castanha escura;
- Apresentar granulometria homogênea; e
- Não possibilitar a identificação do material orgânico.

O processo de compostagem envolve a seleção dos materiais para a mistura, escolha do sistema de compostagem, o local onde será processado, como também, a disponibilidade desses materiais para que processo aconteça (KIEHL, 1998).

Kiehl (1998) descreve que o processo de compostagem é dividido em três fases: uma primeira inicial e rápida de fito toxicidade ou de composto cru ou imaturo, seguida de uma segunda fase de semicura ou bioestabilização, para atingir finalmente a terceira fase, a humificação, acompanhada da mineralização de determinados componentes da matéria orgânica. A Figura 6 representa as fases do processo relacionando a temperatura do composto com o tempo de compostagem.

Figura 6 - Fases do processo de compostagem



Fonte: D'ALMEIDA & VILHENA, 2000

2.2.1 Sistema de Leiras Revolvidas

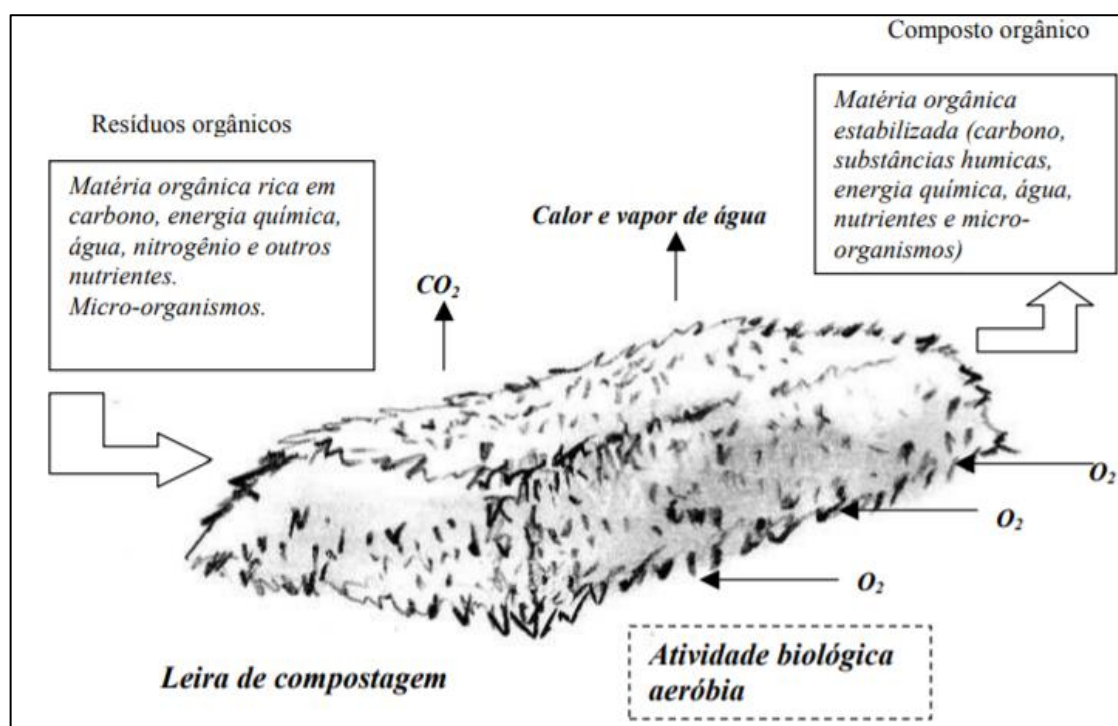
O processo de compostagem é um processo linear, ou seja, é realizado sempre seguindo as mesmas etapas. A primeira etapa compreende do recebimento do resíduo, estes necessitam de uma certificação de laboratórios especializados atestando que pertence a Classe IIA, ou seja, são resíduos não perigosos e não inertes, na sua grande maioria os resíduos que são misturados correspondem a uma parte de lodo orgânico e outra parte de resíduos estruturantes (serragem, cinza, material orgânico).

A segunda etapa é a mistura dos resíduos recebidos junto com outros elementos para adequar a relação de carbono (C) e nitrogênio (N). Essa relação é importante, pois segundo Kiehl (1998), o monitoramento da relação C: N desde o início na compostagem permite conhecer o progresso do processo, uma vez que, quando o composto atinge a fase de semicura a relação C: N se concentra próximo de 18/1, e quando se transforma em produto acabado, a relação C/N se apresenta em torno de 10/1.

A etapa três é representada pelo preparo e formação das leiras, ou, pilhas compridas de compostos misturadas. A formação das leiras deve ser disposta sobre piso de concreto impermeável, não permitindo o contato do produto diretamente com o solo, com canaletas para direcionar os líquidos do processo. As leiras são dispostas com largura variável entre 2,5 e 4 metros e altura entre 1,5 a 1,8 metros, dependendo do resíduo estruturante da mistura. Alturas inferiores a 1,5 metros não são

recomendadas, pois dificultam manter a temperatura adequada, uma vez que, não há volume suficiente. Do mesmo modo, alturas acima de 1,8 metros, acumulam muito peso levando a compactação e impossibilitando a aeração da pilha, por esse motivo, também deve ser evitado. Na Figura 7, pode-se observar a esquematização de uma leira.

Figura 7 - Representação esquemática do processo de compostagem com metodologia de aeração passiva.

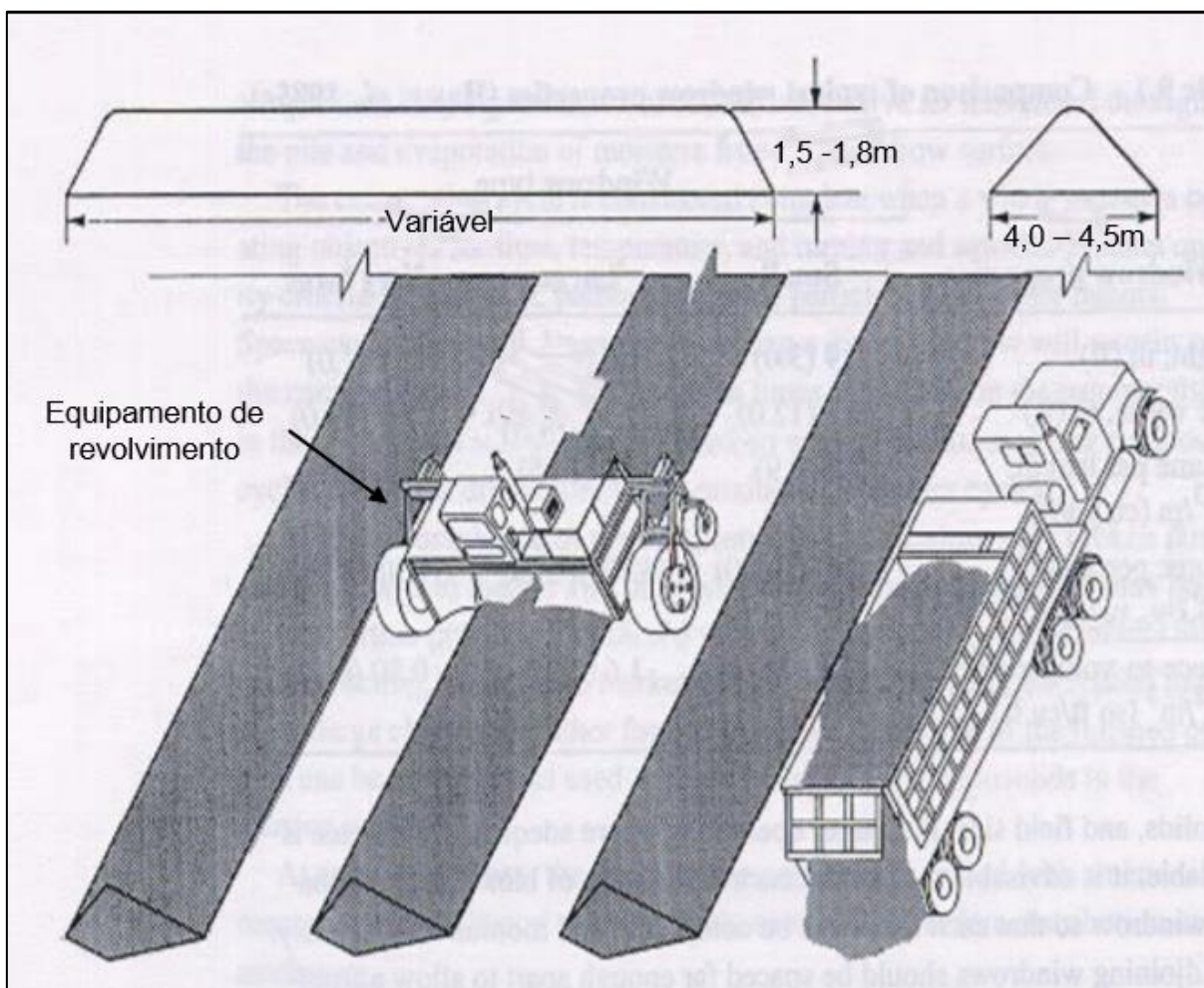


Fonte: INÁCIO, MILLER, 2009

A etapa quatro, aeração, é a mais demorada e a mais importante no processo. Nos primeiros 15 dias as leiras necessitam um revolvimento mecânico, ilustrado na 8, a cada cinco dias, isso gera aeração no composto e controla a temperatura. Após os primeiros quinze dias, há um monitoramento de umidade e temperatura do composto, o revolvimento acontece de forma variada, variando, as leiras devem ser revolvidas no mínimo três vezes por semana (Kuter, 1995). Nesse período, pode-se haver necessidade de umidificar a leira, em vista de temperaturas muito altas ou falta de umidade, que afeta o processo. O revolvimento das leiras tem um papel fundamental no processo, ela promove a aeração do composto, aumento da porosidade,

homogeneização da mistura, controle de temperatura e uniformidade do composto, redução da granulometria do composto, diminuir a umidade do composto, pode ser observado na Figura 8. Esses fatores auxiliam na aceleração o processo além de impedir o mau cheiro e evitar quantidades anormais de insetos.

Figura 8 - Exemplificação do sistema de leiras revolvidas



Fonte: Kiehl, 1998.

A quinta etapa, maturação, o material é transferido de leiras para pilhas com até 15 metros de altura em um pátio específico, nessa etapa o composto fica em repouso finalizando o processo por cerca de 30 dias.

A sexta etapa varia de acordo com a destinação final do composto. A partir do final da etapa cinco, o composto está pronto para ser utilizado, pode ser utilizado da forma que o produto é retirado da compostagem ou passando pelo processo de

peneiramento, tanto da forma a granel como o produto beneficiado para comercialização.

O processo de compostagem tem um ciclo necessário de 90 a 120 dias após a mistura dos materiais. Esse tempo é diretamente proporcional a relação de carbono e nitrogênio. O resultado é um composto normalmente escuro e de textura terrosa. É utilizado como condicionador de propriedades biológicas e físicas do solo, ou seja, é um fertilizante natural que fornece nutrientes essenciais para o suprimento das plantas.

3 METODOLOGIA

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Pesquisa é definida como os procedimentos racionais e sistemático que tem como objetivo gerar respostas aos problemas que são abordados (GIL, 2002). A pesquisa é desenvolvida mediante a diversas fases, desde a formulação do problema até a apresentação dos resultados.

Yin (2002) e Gil (2002) classificam o objetivo da pesquisa de três formas: pesquisa exploratória (onde se aborda estudos com problemas pouco conhecidos elaborando hipóteses para novas pesquisas, tendo como objetivo principal o desenvolvimento de ideias ou a descoberta de intuições), pesquisa descritiva (se caracteriza pela descrição do fenômeno de seu contexto, ou relaciona variáveis) e pesquisa explanatória (que explica as relações de causa e efeito baseado em uma teoria além de aprimorar o conhecimento da realidade com intuito de esclarecer a razão e o porquê das coisas).

Segundo Yin (2002), estudo de caso é uma investigação empírica que analisa um fenômeno contemporâneo abordado em um contexto da vida real, em especial em estudos onde os limites entre o fenômeno e o contexto não estão evidentemente definidos. Yin (2001) classifica o estudo de caso em dois tipos: o de caso único (em que se analisa uma situação ou caso particular) e os estudos multicascos (em que vários casos são analisados afim de comparações).

De acordo com essas informações, essa pesquisa se caracteriza como um estudo de caso único e exploratório.

3.2 ESTRUTURA METODOLÓGICA

O experimento foi conduzido na empresa onde é empregado o método aeróbico de fermentação com revolução mecânica, utilizando a fase mesófila de temperatura, em ambiente semiaberto (piso de concreto para evitar contato direto ao solo, com cobertura superior e aberturas laterais), com processo lento de decomposição. O ambiente de estudo foi isolado do restante dos outros resíduos em processamento para evitar contaminações e erros.

Os dados de entrada e saída do processo foram monitorados por um colaborador no local de estudo por meio de folhas de dados que foram respondidas periodicamente. Essas folhas de dados seguem as recomendações dos exemplos contidos na ISO 14044 (ABNT, 2009b).

O estudo foi conduzido utilizando a estrutura metodológica apresentada na norma ISO 14040 (ABNT, 2009 a 2009b) seguindo os seguintes passos:

1. Definição do objetivo e escopo estudado, cujos detalhes estão apresentados no tópico 4 (Inventário do Ciclo de Vida do Processo de Compostagem por Revolvimento de Leiras).
2. Descrição dos sistemas e subsistemas do processo de compostagem.
3. Coleta de dados: o processo de coleta de dados foi realizado na área de compostagem industrial de resíduos orgânicos industriais Bozzano Transportes Ltda. – Me, situada em Castro/Paraná/Brasil, no período de março de 2019 a setembro de 2019. O objetivo dessa coleta foi a quantificação da massa de resíduo envolvido no processo assim como todo combustível utilizado pelo processo.
4. Coleta de dados da literatura e em bancos de dados de ACV
5. Metodologia dos cálculos para a adequação da unidade funcional escolhida, ou seja, os dados foram calculados em função da quantidade composto final produzido, conforme a unidade funcional.
6. Formulação dos balanços de massa e energia de cada subsistema.
7. Realização do refinamento da fronteira do sistema onde foi verificada a necessidade de exclusão de algumas entradas ou saídas inadequadas.

8. Reconhecimento dos principais fatores ambientais do processo através de valores quantificados concebidos nesse estudo e reportá-los através desse estudo.

4 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM POR REVOLVIMENTO DE LEIRAS

4.1 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO

O estudo tem como objetivo gerar dados de entrada e saídas de insumos e energias no processo de compostagem, desde a entrada do material no processo até a saída do mesmo, a fim de desenvolver um banco de dados para inserir na técnica de ICV.

A realização desse estudo foi ambientada em uma empresa da região dos Campos Gerais, Paraná, com produção de 12.000 toneladas de composto. A indústria representa uma das maiores indústrias no ramo na região e apresenta todos os parâmetros técnicos e legais para realização do processo.

O estudo cobre o ciclo de vida do processo de compostagem (dentro do ACV, está definido com *gate-to-gate*), documentando todas as entradas e saídas.

O público-alvo do Inventário Do Ciclo De Vida Do Processo De Compostagem Por Revolvimento De Leiras compreende todos os usuários da técnica da ACV como, por exemplo, setor privado, setor público e pesquisadores entre outros que interesse pelos elementos comuns do ciclo de vida do sistema estudado.

Dentro dessa fase do ACV, temos uma sequência de itens que deve ser descrita: unidade funcional, descrição do processo, fronteiras do sistema. Esses itens estão expandidos nos itens a seguir.

4.2 DEFINIÇÃO DO ESCOPO

A compostagem industrial é um processo que transforma resíduos orgânicos gerados em indústrias em composto com a finalidade de enriquecer o solo onde é aplicado. A compostagem industrial utiliza-se de equipamentos mecânicos e é semelhante em indústrias de compostagem pelo mundo.

Um modelo esquemático foi desenvolvido para o sistema de compostagem de leiras revolvidas conforme Figura 7. Na Tabela 1, se descreve brevemente cada processo dentro da compostagem. As entradas e saídas e as emissões do processo de compostagem são definidas neste esquema. Para este estudo, o limite do estudo é a partir do ponto que a matéria-prima é recebida na entrada da instalação e finaliza após o peneiramento do produto.

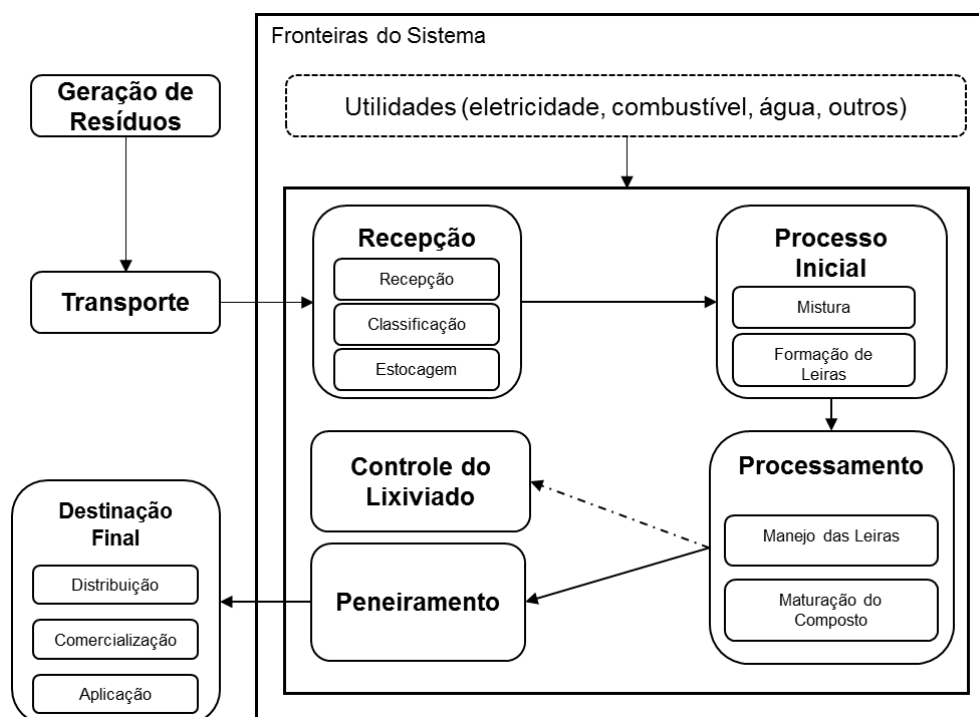
4.2.1 Sistema estudado

Um sistema de compostagem de leiras revolvidas resulta em impactos e impactos evitados de vários subsistemas, entre eles estão inclusos:

- Coleta da matéria orgânica compostável (matéria-prima);
- Construção de infraestrutura do processo;
- Recebimento da matéria-prima e processamento inicial (pesagem, mistura e enleiramento);
- Processo de compostagem (revolvimento, umidificação se necessário, peneiramento);
- Transporte e aplicação do produto final no solo;
- Efeitos da aplicação da adição no solo.

Esses subsistemas do processo de compostagem são descritos nas seções posteriores. O escopo desse estudo exclui os dois primeiros itens (coleta de matéria orgânica compostável; construção de infraestrutura do processo) e os dois últimos itens (transporte e aplicação do produto final no solo; efeitos da aplicação da adição no solo) e foca o processo em si de beneficiamento do composto desde a entrada do mesmo até sua saída. Os limites do sistema estão descritos na figura 9.

Figura 9 - Processo de compostagem e suas fronteiras



Fonte: Autor, 2019.

Tabela 1 - Descrição das Etapas da Compostagem

Descrição do Processo Produtivo	
Recepção	Ao chegar à planta, os resíduos são dispostos em uma área de recepção impermeabilizada, são classificados de acordo com suas características e retirados contaminantes físicos.
Mistura	Os resíduos então são separados e misturados proporcionalmente de acordo com uma fórmula
Enleiramento	A mistura é transportada e disposta em leiras (pilhas de resíduo compridas) via caminhões. As leiras são estáticas nos primeiros 05 dias, para atingir as condições de temperatura necessária (75 a 80 °C).
Revolvimento	As leiras são aeradas através do revolvimento das mesmas com a utilização de uma máquina denominada "compostador" ou "revolvedor de leiras". Geralmente são revolvidas a cada 2 dias até a estabilização da temperatura (35 °C). Essa etapa tem duração de 45 a 60 dias.
Maturação	Após a etapa anterior, as leiras são transportadas via caminhão para um depósito onde se formam pilhas, nesse espaço permanecem por cerca de trinta dias para maturação.
Peneiramento	O composto maturado é então movimentado através de esteira rolante até uma peneira vibratória, esse processo finaliza o ciclo de produção do composto.
Expedição	O composto formado é enviado de acordo com as necessidades do consumidor.

Fonte: Autor, 2019.

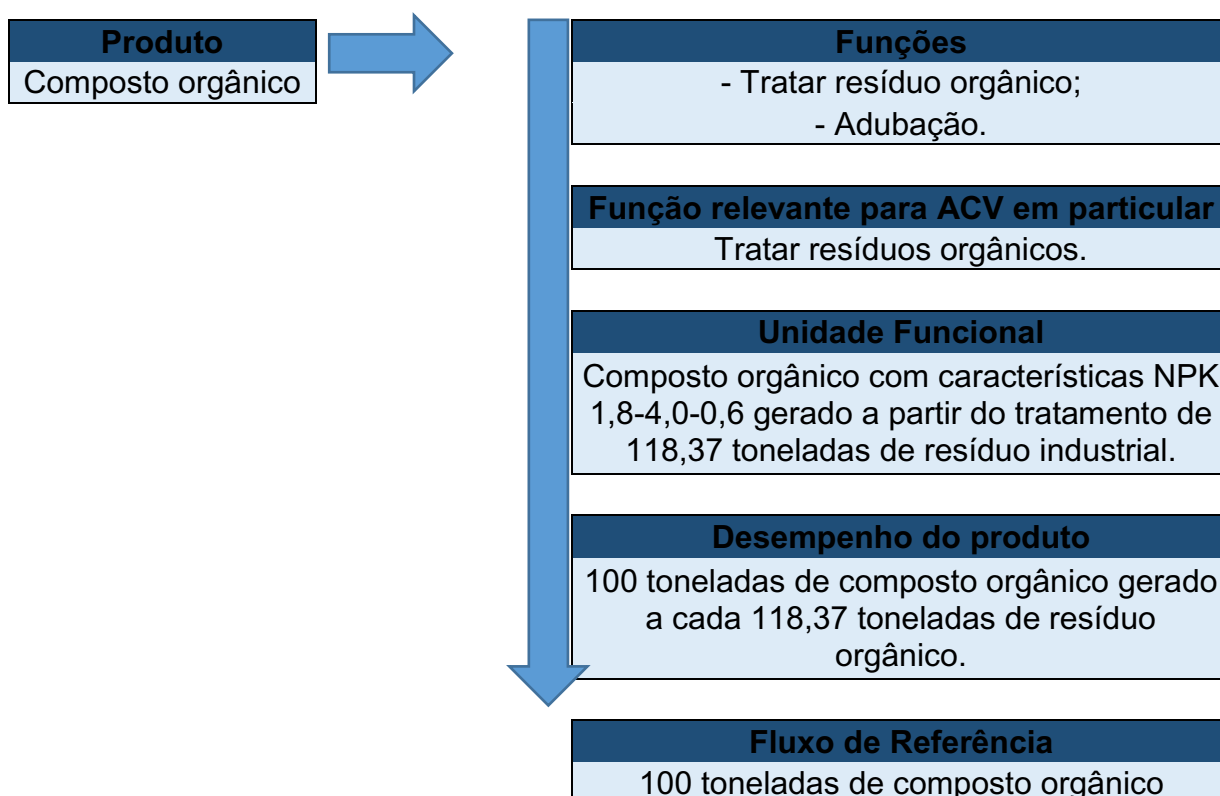
4.2.2 Função e unidade funcional

A função definida para o sistema é realizar tratamento de resíduos orgânicos industriais classe II-a ou a adubação, sendo a primeira como relevante para o ACV.

Uma unidade funcional é uma medida do desempenho das saídas funcionais do sistema (ABNT, 2009a). A unidade de massa é adotada como base para dados de produção e comércio. A unidade funcional foi definida como: composto orgânico com características NPK 1,8-4,0-0,6 gerado a partir do tratamento de 118,37 toneladas de resíduo industrial.

O desempenho do produto é 100 toneladas de composto orgânico produzido a cada 118,37 toneladas de resíduo orgânico. Sendo assim, o fluxo de referência é de 100 toneladas de composto orgânico.

Figura 10 - Função, unidade funcional e fluxo de referência.



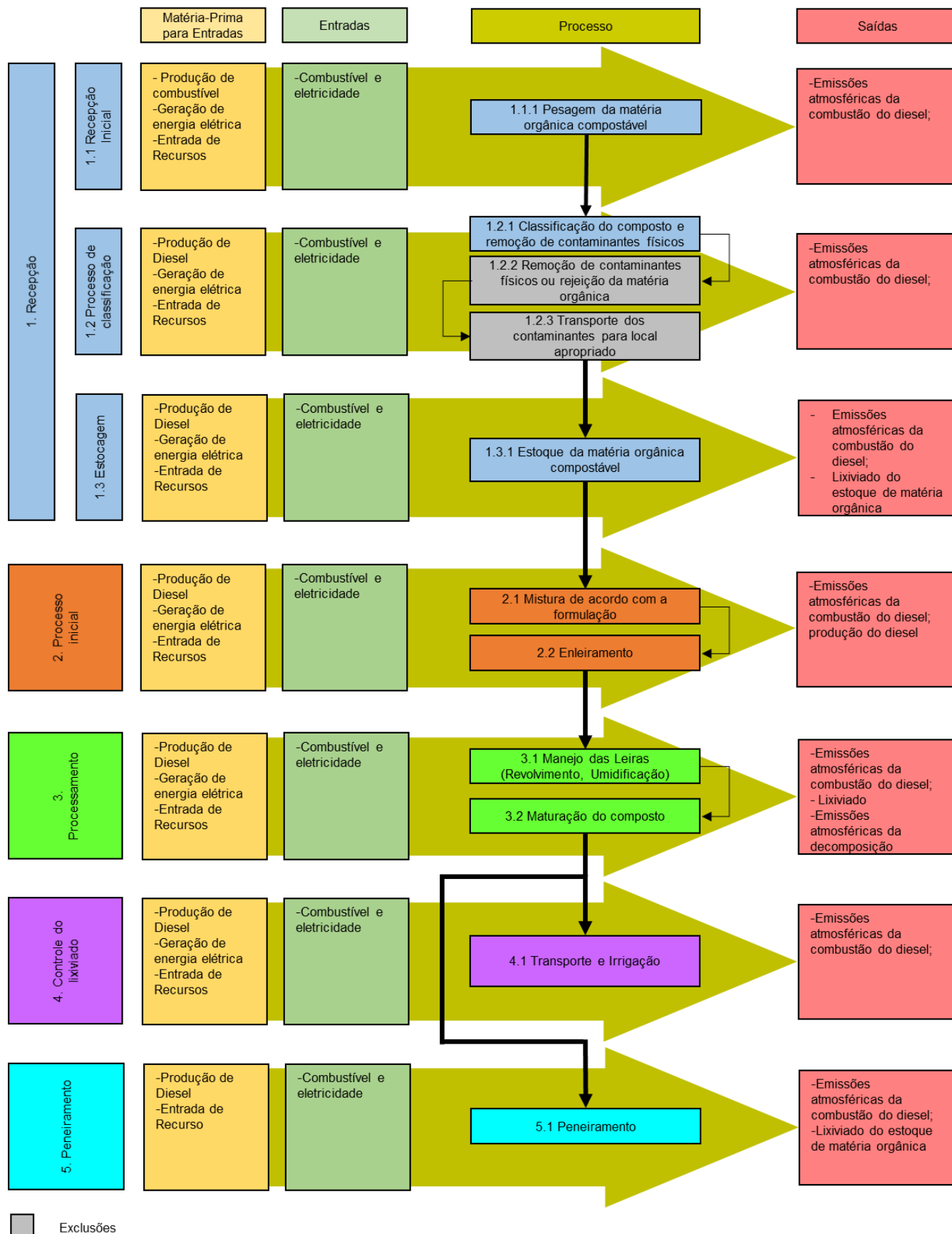
4.2.3 Fronteiras do Sistema

As fronteiras do sistema para este estudo são definidas como gate-to-gate e seguem de acordo com o sistema de compostagem por leiras revolvidas abrange impactos relacionados com:

- Recebimento da matéria-prima na entrada das instalações, armazenamento inicial e remoção de contaminantes físicos da matéria-prima, mistura e formação de leiras, manejo das leiras, estocagem e peneiramento do composto, além de todo transporte que o composto realiza ao longo do processo.
- O uso de combustível para o processamento do composto tanto de fontes móveis (caminhão, tratores, etc.) como de fontes estacionárias durante todas as etapas do processo.
- O uso de energia elétrica utilizada na instalação e por equipamentos durante todo o processamento do composto.

A Figura 11 demonstra as entradas e as saídas e todas as etapas dos processos que compõe a compostagem

Figura 11 - Fluxograma completo do processo de compostagem englobando entradas e saídas.



4.2.4 Exclusões

Nas definições das fronteiras do sistema, os seguintes itens não foram considerados no estudo:

- Coleta da matéria-prima (matéria orgânica compostável);
- Emissões provenientes da construção da infraestrutura do local e da construção dos equipamentos utilizados;
- Transporte de qualquer tipo de contaminante físico para aterros;
- Transporte e aplicação do produto final no solo.
- Testes, ensacamento do produto.

Embora a coleta da matéria orgânica compostagem é um importante aspecto do sistema total de compostagem, está além do escopo desse estudo. A coleta de matéria-prima requer um estudo aprofundado e deve ter diversas considerações que não puderam ser feitas no momento.

Os impactos ambientais decorrentes da construção tanto da infraestrutura quando do maquinário do sistema de compostagem por revolvimento de leiras também não foi considerado. Se estes fossem considerados, a emissão total de construção seria dividida pela expectativa de vida desses itens.

O transporte de possíveis contaminantes físicos não foi considerado nas fronteiras desse sistema, uma vez que, o contaminante é parte de outro sistema, um sistema externo.

Como para entrar nas fronteiras do sistema a matéria-prima deve ser orgânica e compostável, os contaminantes físicos e seu transporte não são considerados subprodutos do processo de compostagem. Além disso, o processo de compostagem não gera lixos sólidos, ou seja, qualquer resíduo sólido é uma externalidade ao sistema de coleta.

O transporte e aplicação do composto em sua forma final também não foram considerados dentro das fronteiras desse estudo. Esse trabalho, assim como a coleta de matéria-prima pode ser visível em algum estudo futuro com foco nessa etapa.

4.2.5 Requisitos da Qualidade dos Dados Iniciais

Os dados primários coletados foram baseados nas fronteiras do sistema definido e foram obtidos na empresa em estudo.

As emissões pelo consumo, produção e transporte do diesel e da energia elétrica foram obtidas em banco de dados de ACV. As emissões decorrentes do processo de compostagem foram obtidas na literatura.

4.3 ICV: O PROCESSO DE COMPOSTAGEM

Um processo de compostagem por revolvimento de leiras convencional é dividido em três operações principais:

- Recepção da matéria orgânica compostável, matéria-prima (incluído a remoção de contaminantes físicos e armazenamento)
- Processamento inicial do composto (mistura de acordo com formulação e formação de leiras)
- Compostagem (incluindo o revolvimento das leiras, umidificação se necessário, estocagem e peneiramento).

4.3.1 Inventário do subsistema: Recepção da matéria orgânica compostável

Recepção da matéria orgânica compostável inclui: Recebimento da matéria orgânica compostável na instalação (Figura 12); pesagem e caracterização do resíduo; remoção de possíveis contaminantes físicos (plástico, metal, vidro); estocagem de matéria-prima para beneficiamento futuro. Pode ser observado na Figura 11 referenciado ao item 1.

Figura 12 - Local de recebimento do material



Todo material recebido desse estar de acordo com a legislação e se caracterizar na categoria classe II-A. A remoção de contaminantes envolve o descarregamento do material em uma área específica e com o uso de trabalho manual é verificado a qualidade do resíduo visualmente e se os níveis de contaminantes são considerados baixos, é feita a remoção dos contaminantes maiores pelo método de recolhimento manual. Após a remoção dos contaminantes, o material é colocado em uma pilha de estocagem de matéria-prima de acordo com sua caracterização, entre os tipos estão: Lodos orgânicos biológicos; resíduos da queima de biomassa (cinza); resíduos de processos com madeira (serragem, pó); outros resíduos compostáveis (resíduos frigoríficos, resíduos refeitório/alimentos; casca de ovos; farelos de tortas vegetais; resíduos orgânicos de peneira e afins).

O transporte dos contaminantes para local adequado não está no escopo desse estudo. Somente matéria orgânica compostável limpa é processada pelo processo de compostagem. Sendo assim, os contaminantes não são considerados matérias-primas do sistema, assim como, não são consideradas saídas decorrentes ao processo.

O cálculo do consumo de diesel para a recepção de matéria orgânica foi uma média do deslocamento desde a entrada da propriedade até a área de recepção da matéria-prima. Para atingir o valor de referência de 100 toneladas de composto ao final do processo, foram necessárias 118,37 toneladas de resíduos. O consumo de combustível diesel para movimentação desse composto foi em média de 8,6 litros.

4.3.2 Inventário do subsistema: Processo Inicial do Compostagem

O processo inicial de compostagem inclui: Mistura da matéria-orgânica compostável de acordo com uma formulação base para garantir a qualidade do processo; adição de água quando necessário para garantir a umidade e temperatura da leira (no caso estudado as leiras foram umidificadas com o próprio lixiviado resultante das mesmas); revolvimento das leiras para aeração e mistura; transporte do composto para uma pilha de maturação; peneiramento do composto. O sub-processo está demonstrado na Figura 11 no item 2.

A mistura da matéria orgânica compostável é realizada durante o processo de enleiramento, que consiste na inserção de cargas de lodos, cinza, serragem e resíduos diversos seguindo um sequenciamento de acordo com a formulação representada abaixo:

Tabela 2 - Formulação das leiras

FORMULAÇÃO	
Lodos orgânicos biológicos	45%
Resíduos cinza	20%
Resíduos de serragem	15%
Resíduos de varrição	10%
Diversos (resíduos refeitório/alimentos + casca de ovos + farelos de tortas vegetal + resíduos orgânicos de peneira e afins)	10%

Fonte: Autor, 2019.

A formulação correta tem como principal função garantir que o composto inicial tenha características como umidade, relação de carbono (C) e nitrogênio (N) apropriados para o processo de compostagem.

Os equipamentos envolvidos nessa etapa podem ser observados na Figura 13 e Figura 14. O consumo geral para formação e mistura da leira de estudo consiste no transporte das cargas alternadas das matérias primas somadas ao consumo das pás carregadeiras para carregamento dos caminhões. O consumo médio desses equipamentos em conjunto é em média de 22,3 litros por horas de trabalho, para a formulação da leira de estudo, o tempo de trabalho foi de duas horas e quarenta e cinco minutos, totalizando o consumo de 61,325 litros de Diesel para o transporte e carregamento de 117,84 toneladas de resíduos.

Figura 13 - Equipamentos Móveis no processo de enleiramento e transportes internos. (a) Caminhão vermelho 16m³ (b) Caminhão Azul 10,5 m³.



Figura 14 - Equipamento Móvel para carregamento de caminhões para transportes internos



4.3.3 Inventário do subsistema: Processamento Principal Da Compostagem

O processo da compostagem em si se inicia a partir da montagem das leiras até o final da fase de maturação. Pode ser observado na Figura 11 sob o item 3.

O revolvimento das leiras é realizado por um maquinário próprio para a atividade, na Figura 15 pode ver visualizado. O processo de revolvimento das leiras geralmente leva 7-10 semanas e as leiras são revolvidas a cada 2-3 dias. A adição de água nas leiras é de acordo com as necessidades ligadas a temperatura da leira, a temperatura é controlada periodicamente através de medição instrumental manualmente.

Figura 15 - Equipamento para revolvimento de leiras.



Após o processo de revolvimento as leiras são transportadas até uma pilha para a fase de maturação, onde fica estática, esta etapa tem duração entre 3-5 semanas.

Para o cálculo do consumo total dessa etapa foi considerado os revolvimentos da leira e o transporte da mesma até a área de maturação. Durante essa etapa foram realizados 20 revolvimentos na leira de estudo, cada revolvimento nas leiras com dimensões idênticas as da de estudo tem um consumo médio de 9,3 litros de combustível diesel, totalizando esse processo em 186 litros. Para o transporte e carregamento da leira até a zona de maturação foram gastos 92 litros de diesel. Foram

movimentadas 109,94 toneladas de composto nessa etapa, que geraram 100 toneladas de composto acabado ao final do processo.

Figura 16 - Composto em maturação.



4.3.4 Inventário do subsistema: Gestão do Lixiviado

Observando o item 04 da Figura 11, se nota o gerenciamento do líquido resultante da compostagem (lixiviado) é um parâmetro ambiental para o licenciamento de instalações de compostagem comercial. Esses efluentes são coletados através de canaletas em cada leira e enviados para um caixa de coleta. Esse lixiviado é utilizado para umidificar as leiras, conforme necessário. Desse modo, as instalações comerciais de compostagem não utilizam recursos hídricos externos e não produzem efluentes como poluentes. Portanto, em relação aos impactos ambientais resultantes do uso da água são minimizados apenas ao consumo de energia elétrica para o bombeamento desses lixiviado para irrigação das leiras. Como o manejo desses lixiviado depende da retirada desse lixiviado da caixa de armazenagem e transporte até as leiras ou transporte até a zona de tratamento depende de equipamentos movimentados a diesel, esse consumo está no escopo desse estudo.

As mudanças químicas, físicas e biológicas resultantes do processo de compostagem podem ser observadas na Figura 5. Observa-se que o dióxido de carbono (CO_2) é identificado como principal gás liberado pelo processo e que este é

considerado uma emissão biogênica que é definida como toda emissão de fontes naturais, sendo elas biológicas ou não.

O consumo dessa etapa é basicamente o combustível necessário para o bombeamento do reservatório até um caminhão tanque e a irrigação da leira ou transporte até o tratamento. Durante o período de estudo a média de consumo proporcional da leira foi de 11,3 litros de diesel.

4.3.5 Inventário do subsistema: Peneiramento

Após a fase de maturação, o composto final é submetido ao processo de peneiramento para retirada de partes sólidas de tamanho excessivas e possíveis contaminantes sólidos que não foram retirados na fase inicial. O material retirado não contaminante retorna ao início do processo para reprocessamento. Pode-se observar na Figura 17 o funcionamento da peneira: o material é introduzido pela parte superior e por vibração é peneirado, o produto peneirado se encontra abaixo da peneira enquanto o produto a ser reprocessado se encontra ao fim do curso do equipamento. Esse processo é referente ao item 05 na Figura 11.

O consumo da etapa de peneiramento engloba o transporte e o carregamento do composto não peneirado até o local de peneiramento, esse trajeto é relativamente curto (cerca de 30 metros), por isso o baixo consumo de combustível. Essa etapa consumiu 19,10 litros para movimentação de 109,94 toneladas de composto não peneirado.

Para o peneiramento também deve ser considerado o consumo de energia elétrica da peneira. O motor desse equipamento é de 5 CV e o tempo para processar 109,94 toneladas é em média de 37 minutos, totalizando um consumo aproximado de 2,83 kWh.

Figura 17 - Equipamento estacionário para peneiramento.



Figura 18 - Equipamento móvel para alimentação da peneira.



4.3.6 Consumo de Combustível e Energia Elétrica

Todos os equipamentos presentes nesse estudo utilizam o Diesel como combustível. O consumo total de combustível (Diesel) e de energia elétrica por processo é demonstrado na Tabela 4. Os dados na Tabela 4 são baseados nas descrições dos itens de Inventário de Subsistema. Este estudo apenas abrange o total de consumo de combustível pelos maquinários utilizados diretamente no processo de compostagem. O consumo de combustível (litros) foi convertido em unidade de peso

(quilograma) multiplicando o volume pela densidade média do diesel ($0,845 \text{ kg L}^{-1}$) (ASTM D-86).

O uso de energia elétrica para instalações e serviços gerais da compostagem foi definido de acordo com a duração em dias de cada processo. Esse valor foi obtido multiplicando o consumo médio da compostagem ($1,15 \text{ kWh}$), pela porcentagem que a leira de estudo representa perante as outras leiras da compostagem ($6,25\%$), pelo número de dias de cada processo. Além disso, no processo de peneiramento, há utilização de um equipamento que utiliza de energia elétrica para o funcionamento, esse consumo ($2,83 \text{ kWh}$). Esses dados podem ser observados na tabela a seguir:

Tabela 3 - Consumo de energia elétrica por processo.

Processo	Duração [dias]	Energia Elétrica [kWh]
Recepção	07	0,5031
Processo Inicial	01	0,0719
Processamento Principal	84	6,0369
Peneiramento	01	2,9019

Fonte: Autor, 2019.

Para fins de comparação aproximada, o consumo de diesel usado em uma instalação comercial nos EUA para processar uma tonelada de material orgânico é em média de 221.000 Btu segundo os US EPA (2002). Equacionando esse valor se obtém $5,9026 \text{ kg}$ de diesel para processar uma tonelada de material orgânico (assumindo que densidade do diesel = $0,845 \text{ kg L}^{-1}$; $43,5 \text{ MJ}$ por kg de diesel, $1 \text{ Btu} = 0,001055 \text{ MJ}$). Como esses dados não identificam os dados de operação para chegar a esses valores, se utiliza esse valor apenas de uma forma comparativa. De acordo com os dados apresentados na Tabela 4, podemos observar que o processo em estudo tem um consumo de combustível diesel $36,09\%$ menor que o apresentado pela US EPA, totalizando um consumo de $3,7723 \text{ kg}$ de diesel para processar uma tonelada de material orgânico.

Tabela 4 - Consumo de combustível, eletricidade e água durante o processo de compostagem.

Processo	Atividade	Consumo (por 100 toneladas de produto acabado)		
		Diesel (litros)	Eletricidade (kWh)	Água (litros)
Recepção	Recepção	8,60	0,5031	0,0
Processo Inicial	Formação das leiras e mistura	61,33	0,0719	0,0
Processamento Principal	Revolvimento das leiras (Aeração)	186,00	4,0246	0,0
	Armazenagem (Maturação)	92,00	2,0123	0,0
Gestão do Lixiviado	Transporte e Irrigação	11,30	0,0000	0,0
Peneiramento	Transporte e Peneiramento	19,10	2,9019	0,0
TOTAL		378,33	9,0826	0,0

Fonte: Autor, 2019.

4.3.7 Consumo de Energias

As entradas e o consumo de energias (diesel, energia elétrica) durante a recepção, classificação, aeração, umidificação, armazenamento e beneficiamento de 100 toneladas de composto é o mesmo para todos os tipos de formulação do composto. Embora se possa ocorrer de a formulação variar seus componentes e a maneira que são processadas (por exemplo, podas de árvores precisam ser processadas para diminuição de tamanho, enquanto resíduos de varrição não), essas necessidades extras não foram consideradas.

Para relacionar o consumo do diesel com energia, foi assumido que densidade a do mesmo equivale a $0,845 \text{ kg L}^{-1}$ e a energia gerado por um quilograma de diesel é 43,5 MJ.

4.3.8 Emissões

Não é esperado que as matérias orgânicas compostáveis abordadas nesse estudo liberem emissões significativas (antrópicas ou biogênicas) ou lixiviados que afetem o meio ambiente. No entanto, o armazenamento de produtos orgânicos

compostáveis (matéria-prima inicial) ou produtos orgânicos instáveis podem contribuir na geração de alguns problemas (liberação de lixiviado em excesso, odores, liberação de metano (CH_4)) se não forem manejados adequadamente.

Os odores são evitados pela formulação que a empresa adota (principalmente ao se adicionar cinza e serragem), tendo somente uma quantidade mínima nos primeiros dias e diminuindo ao decorrer do processo.

As emissões antropogênicas, derivados de atividades humanas, se originam de máquinas móveis (ex. caminhão), máquinas estacionárias (peneira vibratória) e energia elétrica. Máquinas como tratores, caminhões, revolvedoras, pás carregadoras, peneiras são utilizadas. A eletricidade é utilizada para o funcionamento da infraestrutura do local, como escritórios, oficina e equipamentos estacionários (peneira vibratória, bombas para movimentação de líquido).

Para fins desse estudo, as emissões são estimadas pela produção (perfuração, extração, transporte e refino) e combustão do combustível utilizado nas máquinas. As emissões associadas a produção de energia elétrica são estimadas a partir da quantidade total de eletricidade usada pelas instalações no decorrer de um período.

Em compostagens com baixo número de revolvimentos ou mal executada desenvolvem uma característica anaeróbica à leira. Em condições anaeróbicas, as bactérias responsáveis pela produção de metano podem liberar metano na decomposição (Derikx et al., 1986). Porém, relatórios mostram a ausência de metano em sistemas mal executados são fortemente inibidos pela amônia liberada durante a fase termofílica do processo de compostagem (Miller, 1993; Jackson e Line, 1998).

O processo de compostagem por revolvimento de leiras quando bem executado gera metano (CH_4) em baixa quantidade, pois pelo revolvimento correto garante um ambiente aeróbico que auxilia a decomposição aeróbica do composto. Mesmo se o composto gere metano no centro da pilha, ele tem grande probabilidade de ser oxidado por microrganismos antes de chegar à superfície da leira (US EPA, 2002).

Como não existe na literatura uma análise dos gases gerados pelo processo de compostagem por revolvimento de leiras, foi utilizado uma análise de quantificação dos gases do efeito estufa referente a uma compostagem de leiras sem revolvimento de resíduos de jardim (Andersen et al., 2010). Essa análise fornece uma estimativa de emissão de CO_2 , CH_4 , N_2O e CO baseado no tratamento de 15,540 toneladas de

resíduos de jardim, os valores de acordo com a unidade de referência podem ser observados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**3. Esses valores são descritos conforme a metodologia do autor e são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 5 - Emissões estimadas do processo de compostagem.

Substância Emitida	Emissões (kg ton ⁻¹ rbu)	Potencial de Aquecimento Global (GWP ₁₀₀)	Emissões (kg CO ₂ -eq ton ⁻¹ rbu)
CO ₂	113 ± 14	1	413 ± 50
CH ₄	2,4 ± 0,5	25	81 ± 16
N ₂ O	0,06 ± 0,03	298	30 ± 14
CO	0,15 ± 0,07	-	-

†rbu, resíduo na base úmida; GWP₁₀₀, Potencial de aquecimento global com horizonte de tempo de 100 anos

Fonte: Andersen et al.,2010

Utilizando desses dados foi possível calcular as emissões aproximadas de cada processo baseado na duração de cada processo. Multiplicando a duração em percentual pelo fator da Tabela 3, os dados por processo podem ser observados na encontrada, e estão relacionadas a produção de 100 toneladas de composto acabado.

Tabela 6 - Emissões de gases do efeito estufa por processo da compostagem.

Processo	Duração Percentual	Emissões por processo (g)			
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO
Recepção	7,53%	1.002,27	21,29	0,53	1,33
Processo Inicial	1,08%	143,18	3,04	0,08	0,19
Processamento Principal	90,32%	12.027,28	255,45	6,39	15,97
Gestão do Lixiviado	0,00%	-	-	-	-
Peneiramento	1,08%	143,18	3,04	0,08	0,19
Total	100%	13.315,91	282,74	7,09	17,68

Fonte: Autor, 2019.

Em relação as emissões decorrentes do uso do combustível diesel foram utilizadas dados da literatura que relacionam a massa consumida de diesel com a emissão das principais substâncias, na Tabela 8.

Tabela 7 - Dados de emissões de combustível.

Área de Atuação	Substância Emitida	Fator de Emissão	Unidade	Referência
Transporte e Carregamento de Composto (Uso do Diesel) ¹	CO ₂	9,04	g.MJ ⁻¹ Combustível	Bauer (2007)
	CO	0,0435	g.MJ ⁻¹ Combustível	Bauer (2007)
	N ₂ O	0,02	g.MJ ⁻¹ Combustível	Schwaiger and Zimmer (2001)
	CH ₄	0,013	g.MJ ⁻¹ Combustível	Bauer (2007)
	NO _x	0,108	g.MJ ⁻¹ Combustível	Bauer (2007)
	NMVOC	0,0378	g.MJ ⁻¹ Combustível	Bauer (2007)
	SO ₂	0,0139	g.MJ ⁻¹ Combustível	Bauer (2007)
	Pb	3,00 E-06	g.MJ ⁻¹ Combustível	Bauer (2007)

¹ Características do Diesel: Densidade = 0,845 kg L⁻¹; Poder Calorífico Superior: 43,5 MJ kg

4.3.9 Inventário Consolidado

O inventário completo do processo de compostagem, apresentando todas as entradas e saídas do sistema, com todas as informações de procedência e destinação de cada item especificado encontra-se descrito na Tabela 8. Os dados informados são proporcionais para se chegar ao volume final de 100 toneladas de produto acabado depois da etapa de peneiramento, respeitando a unidade funcional. Todos os dados apresentados foram de acordo com as tabelas e informações presentes nas seções anteriores.

Tabela 8 - Inventário de ciclo de vida para o processo de compostagem por revolvimento de leiras para 100 toneladas de composto acabado.

#	Fornecedor	Entrada	Fluxo	Unid.		Saída	Cliente	Fluxo	Unid.	
1	Gerador de Resíduo	Composto Bruto	Lodo Orgânico Biológico	53,27	ton.	Recepção	Composto Caracterizado	Processo Inicial	117,84	ton.
	Gerador de Resíduo		Resíduos de Varrição	11,84	ton.					
	Gerador de Resíduo		Resíduos Cinza	23,67	ton.					
	Gerador de Resíduo		Outros	11,84	ton.					
	Gerador de Resíduo		Serragem	17,76	ton.					
	Fornecedor de Energia Elétrica	Energia Elétrica	0,5031	kWh						
	Fornecedor de Diesel	Diesel	8,60	L			Gases	Atmosfera		
2	Recepção	Composto Caracterizado	117,84	ton.	Processo Inicial	Composto Enleirado	Processamento Principal	117,84	ton.	
						Gases	Atmosfera			
	Fornecedor de Energia Elétrica	Energia Elétrica	0,0719	kWh						
	Fornecedor de Diesel	Diesel	61,33	L		Gases	Atmosfera			
3	Processo Inicial	Composto Enleirado	117,84	ton.	Processamento Principal	Composto Aerado	Peneiramento	109,94	ton.	
						Lixiviado	Gestão de Lixiviado	0,79	ton.	
						Água, no ar	Atmosfera	7,11	m ³	
						Gases	Atmosfera			
Fornecedor de Energia Elétrica	Energia Elétrica	6,0369	kWh							
Fornecedor de Diesel	Diesel	278,00	L		Gases	Atmosfera				
4	Fornecedor de Diesel	Diesel	11,30	L	Gestão de Lixiviado	Gases	Atmosfera			
	Processamento Principal	Lixiviado	0,79	ton.		Água não poluída	Solo	0,79	m ³	
5	Processamento Principal	Composto aerado	109,94	ton.	Peneiramento	Composto Acabado	Cliente Final	100,00	ton.	
						Compostos fora do padrão	Reprocesso	9,94	ton.	
						Gases	Atmosfera			
	Fornecedor de Energia Elétrica	Energia Elétrica	2,9019	kWh						
Fornecedor de Diesel	Diesel	19,10	L		Gases	Atmosfera				

Fonte: Autor, 2019.

O inventário apresentado na Tabela 8 é o inventário sem citar as emissões discriminadas, a seguir (Tabela 9, Tabela 10, Tabela 11,

Tabela 12, Tabela 13), segue o inventário por etapa da compostagem com todos os dados de emissões assim como os dados apresentados anteriormente.

Tabela 9 - Fluxo de entradas e saídas: Recepção

Dados	Unidade	Unidade. Ton-1
RECEPÇÃO		
Entradas		
Composto		
Lodo Orgânico Biológico	ton	53,27
Resíduos de Varrição	ton	11,84
Resíduos Cinza	ton	23,67
Outros	ton	11,84
Serragem	ton	17,76
Eletricidade		
Eletricidade	kWh	0,5031
Combustível		
Diesel	L	8,60
Saídas		
Composto		
Composto caracterizado	ton	117,84
Contaminantes Físicos	ton	0,53
Emissões Gasosas		
Dióxido de Carbono (CO ₂)	kg	2,87E+00
Monóxido de carbono (CO)	kg	1,38E-02
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	kg	6,33E-03
Metano (CH ₄)	kg	4,32E-03
Óxidos de Nitrogênio (NO _X)	kg	3,41E-02
VOCs totais	kg	1,19E-02
Dióxido de enxofre (SO ₂)	kg	4,39E-03
Chumbo (Pb)	kg	9,48E-07

Tabela 10 - Fluxo de entradas e saídas: Processo Inicial

Dados	Unidade	Unidade. Ton-1
PROCESSO INICIAL		
Entradas		
Composto		
Composto caracterizado	ton	117,84
Eletricidade		
Eletricidade	kWh	0,0719
Combustível		
Diesel	L	61,33
Saídas		
Composto		
Composto Enleirado	ton	117,84
Emissões Gasosas		
Dióxido de Carbono (CO ₂)	kg	2,04E+01
Monóxido de carbono (CO)	kg	9,81E-02
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	kg	4,51E-02
Metano (CH ₄)	kg	2,93E-02
Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	kg	2,43E-01
VOCs totais	kg	8,52E-02
Dióxido de enxofre (SO ₂)	kg	3,13E-02
Chumbo (Pb)	kg	6,76E-06

Tabela 11 - Fluxo de entradas e saídas: Processamento Principal

Dados	Unidade	Unidade. Ton-1
PROCESSAMENTO PRINCIPAL		
Entradas		
Composto		
Composto Enleirado	ton	117,84
Eletricidade		
Eletricidade	kWh	6,0369
Combustível		
Diesel	L	278,00
Saídas		
Composto		
Composto aerado	ton	109,94
Lixiviado	ton	0,79
Aguá, no ar	m ³	7,11
Emissões Gasosas		
Dióxido de Carbono (CO ₂)	kg	9,25E+01
Monóxido de carbono (CO)	kg	4,45E-01
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	kg	2,04E-01
Metano (CH ₄)	kg	1,35E-01
Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	kg	1,10E+00
VOCs totais	kg	3,86E-01
Dióxido de enxofre (SO ₂)	kg	1,42E-01
Chumbo (Pb)	kg	3,07E-05

Tabela 12 - Fluxo de entradas e saídas: Gestão do Lixiviado

Dados	Unidade	Unidade. Ton-1
GESTÃO DO LIXIVIADO		
Entradas		
Lixiviado		
Lixiviado	m ³	0,79
Combustível		
Diesel	L	11,30
Saídas		
Água não poluída	m ³	0,79
Emissões Gasosas		
Dióxido de Carbono (CO ₂)	kg	3,88E+00
Monóxido de carbono (CO)	kg	1,82E-02
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	kg	8,37E-03
Metano (CH ₄)	kg	7,95E-03
Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	kg	4,49E-02
VOCs totais	kg	1,57E-02
Dióxido de enxofre (SO ₂)	kg	5,77E-03
Chumbo (Pb)	kg	1,25E-06

Tabela 13 - Fluxo de entradas e saídas: Peneiramento

Dados	Unidade	Unidade. Ton-1
PENEIRAMENTO		
Entradas		
Composto		
Composto aerado	ton	109,94
Eletricidade		
Eletricidade	kWh	2,9019
Combustível		
Diesel	L	19,10
Saídas		
Composto		
Composto peneirado	ton	100,00
Compostos fora do padrão	ton	9,94
Emissões Gasosas		
Dióxido de Carbono (CO ₂)	kg	6,35E+00
Monóxido de carbono (CO)	kg	3,05E-02
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	kg	1,40E-02
Metano (CH ₄)	kg	9,13E-03
Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	kg	7,58E-02
VOCs totais	kg	2,65E-02
Dióxido de enxofre (SO ₂)	kg	9,76E-03
Chumbo (Pb)	kg	2,11E-06

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse estudo utilizou a técnica de ACV obtendo assim o ICV do sistema estudado subdividindo entre os subprocessos. A partir dessa segmentação foi possível identificar e quantificar os principais aspectos ambientais gerados no processo: consumo energético, emissões para a atmosfera. Utilizando a base de dados de outros inventários, é possível calcular as emissões do diesel utilizado assim como da energia elétrica.

Os dados coletados desse estudo comparados aos dados de um processo de compostagem semelhante nos Estados Unidos, apresentaram um valor bem próximo, essa comparação possibilitou a validação desses dados. A diferença é decorrente da desigualdade do tipo de processo utilizados na compostagem e do tipo de tecnologia, porém a nível de comparação está aceitável.

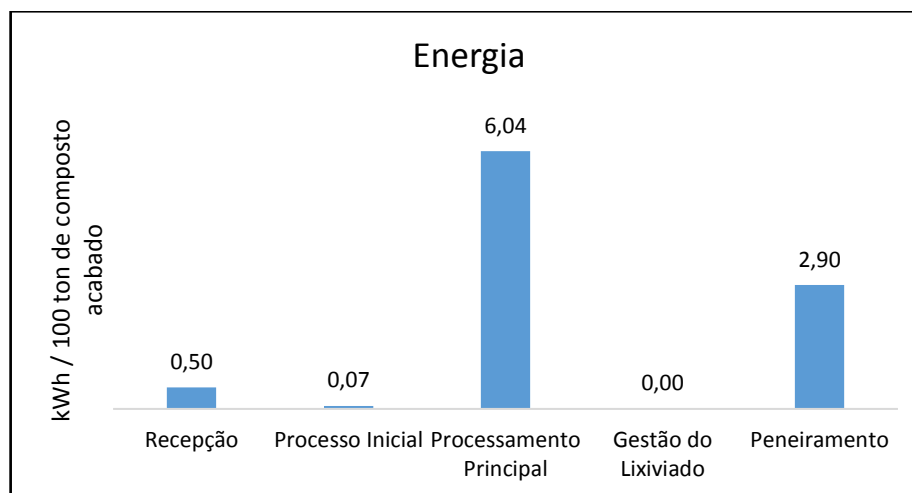
Utilizando da unidade funcional de 100 toneladas de composto acabado foi possível fazer a normatização de todos os dados.

Em relação as entradas e saídas do sistema têm-se:

5.1 ENERGIA ELÉTRICA

A energia elétrica é uma das únicas entradas do sistema, por isso a dada importância. O processamento principal da compostagem foi o que obteve o maior consumo de energia elétrica em relação às outras etapas, esse resultado se deve que a energia elétrica, salvo no caso do peneiramento, só é utilizada para estrutura física geral e de poucos equipamentos que estão atrelados ao processo como um todo, dividindo-se temporalmente entre os sub-processos. Como essa etapa é a de maior duração, obteve-se o maior consumo.

Figura 19 - Consumo energia para as etapas do sistema estudado

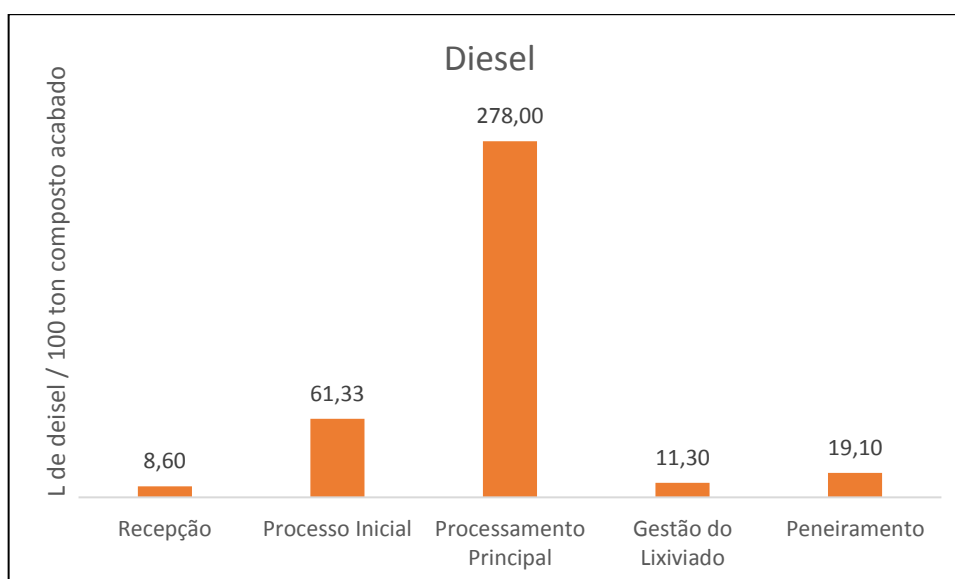


Fonte: autor, 2019.

5.2 COMBUSTÍVEL FÓSSIL – DIESEL

O consumo de combustível é considerado o maior fator de emissões no sistema, pois é considerado nos cálculos de emissões a produção, o transporte e o uso do diesel. Na Figura 20 pode-se observar que o processamento principal é o maior consumidor de diesel, pois além do consumo em transporte e carregamento, também há nessa etapa a revolução mecânica das leiras.

Figura 20 - Consumo diesel para as etapas do sistema estudado

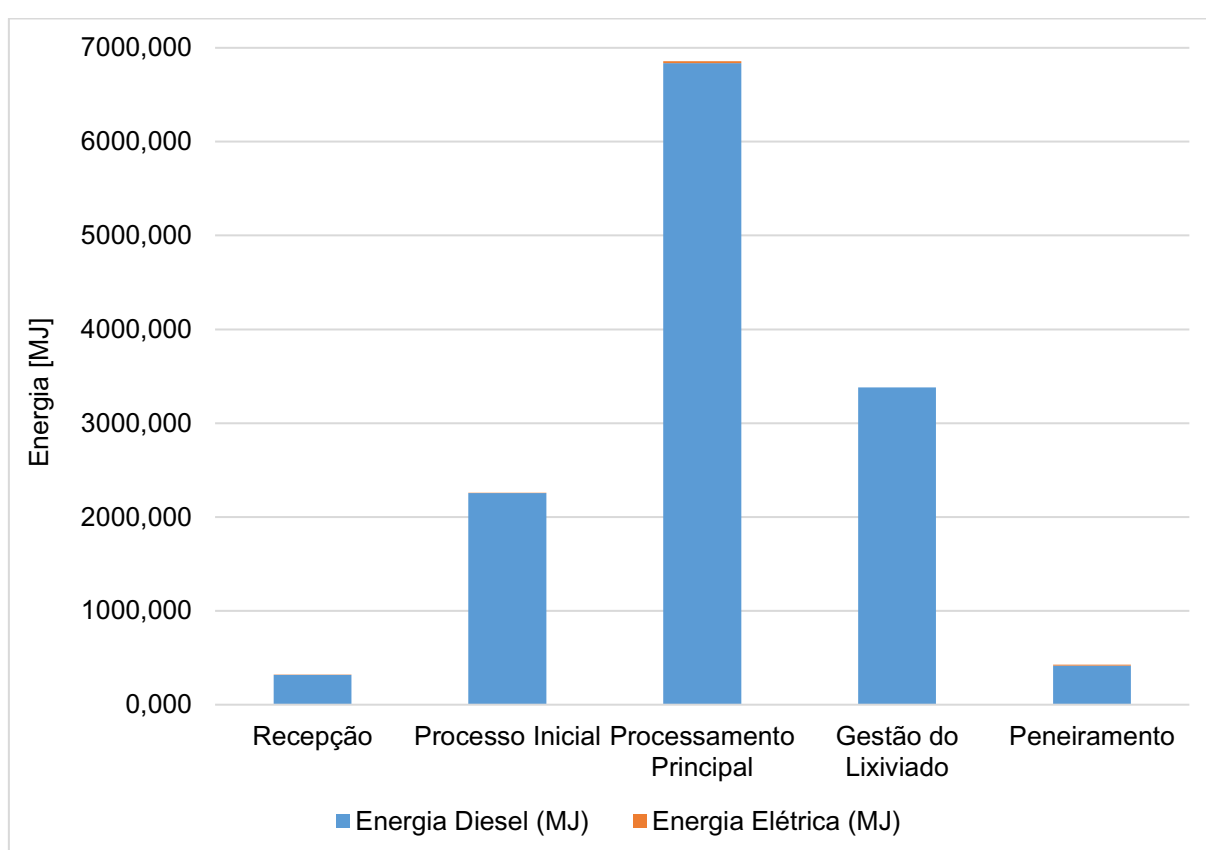


Fonte: autor, 2019

5.3 ENERGIAS

A análise de energia leva em consideração a utilização da energia elétrica, fator de conversão de 1 kWh é igual a 3,6 MJ, somadas a energia produzida pela combustão do Diesel, para isso, foi considerado que o poder calorífico superior do Diesel é de 43,5 MJ kg⁻¹. O maior consumidor de energia foi o processamento principal, isso se deve as entradas de combustível nessa etapa do processo. A energia elétrica pouco representou no cálculo de energias, devido ao seu uso básico. O consumo de energia total foi de 13.236,91 MJ, sendo 99,75% desse valor referente a combustão do diesel.

Figura 21 - Energias Totais do Processo.



5.4 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

As emissões atmosféricas correspondem as emissões do processo de decomposição e das emissões geradas pela combustão do diesel. De acordo com as

figuras a seguir, podemos notar que o processamento principal é responsável por cerca de 75% das emissões totais do processo, seguido do processo inicial com aproximadamente 16% e pelo peneiramento, 5%. Isso se deve a principalmente ao consumo de diesel, mas também leva em consideração as emissões do processo em si. As Figura 22, Figura 23, Figura 24 mostram graficamente esses valores.

Figura 22 - Emissões Totais: CO₂

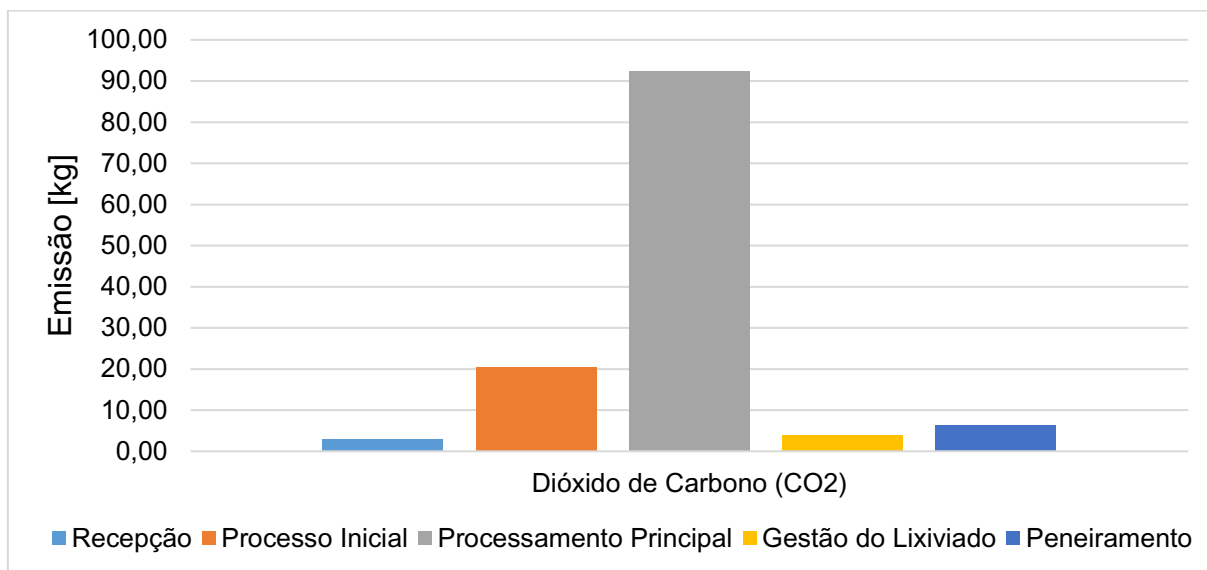


Figura 23 - Emissões totais: CO, NO_x, VOCs totais.

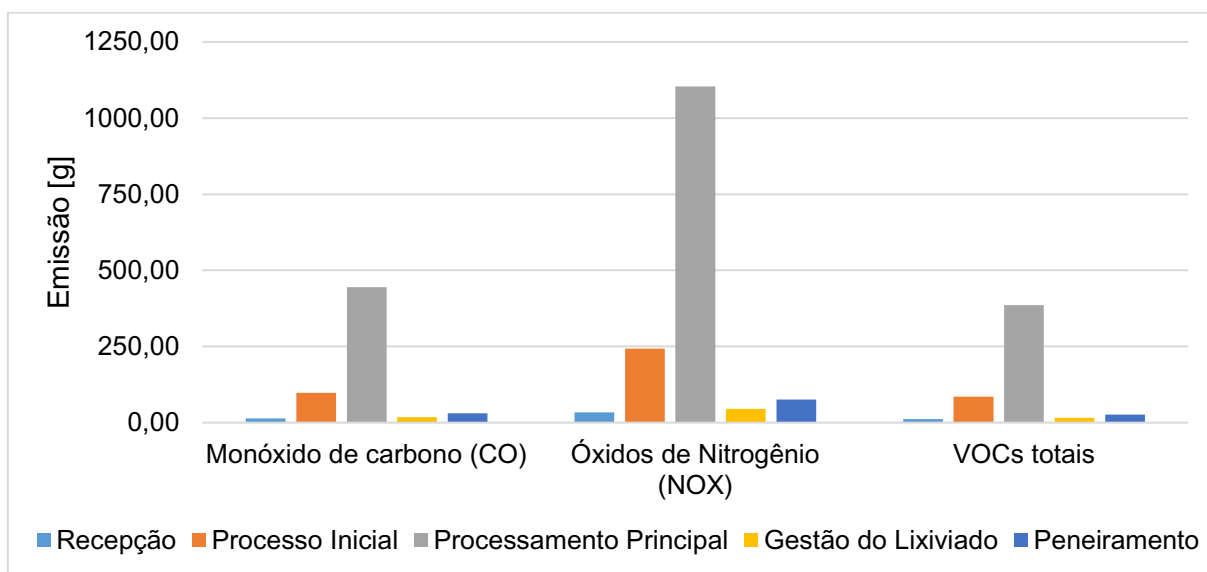
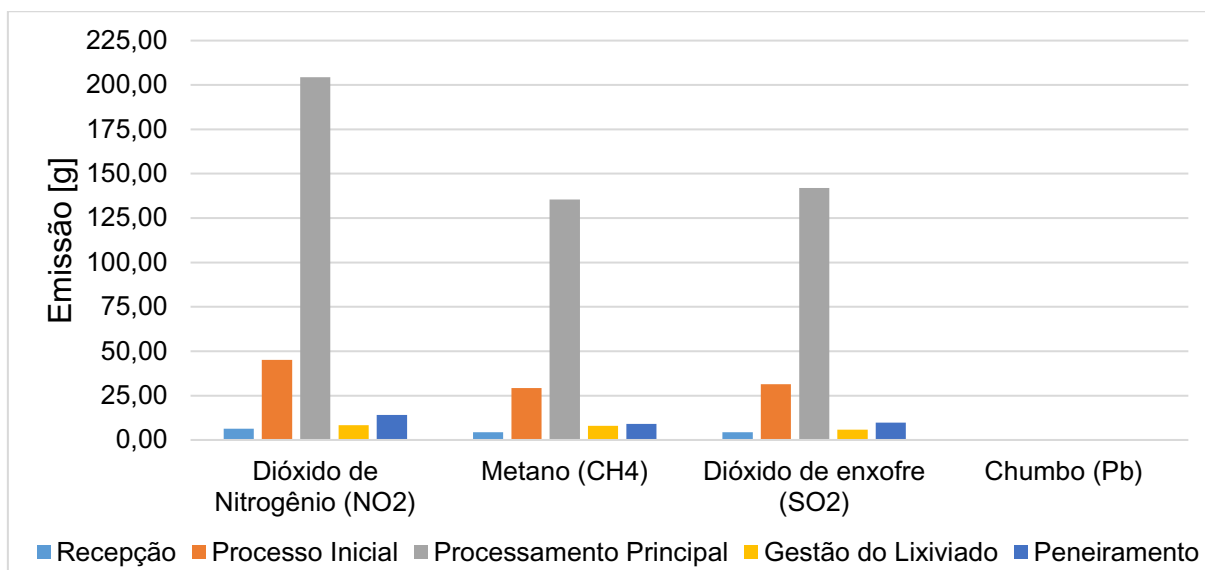


Figura 24 - Emissões totais: NO₂, CH₄, SO₂, Pb.

6 CONCLUSÕES

Como considerações finais do desenvolvimento dessa pesquisa, obteve-se através do estudo de caso realizado em uma empresa situada na região dos campos gerais do Paraná o ICV do processo de compostagem industrial por revolvimento mecânico de leiras utilizando da técnica de ACV.

Esse estudo atendeu os objetivos gerais e específicos pois foi gerado a quantificação das entradas e saídas do sistema de compostagem resultando no do inventário de ciclo de vida além de possibilitar a identificação e quantificação dos aspectos ambientais gerados nas etapas desse sistema, evidenciando o baixo potencial de emissões e qualificando ainda mais a importância desse método de disposição e tratamento de resíduos em relação aos processos tradicionais

Nesse estudo foi observado a utilização de menos recursos de entrada em comparação a metodologia americana apresentada anteriormente, o que caracteriza que pode haver diferenças entre os processos americano e o brasileiro.

Além disso, essa pesquisa poderá contribuir através dos dados apresentados para a construção de um banco de dados de ciclo de vida brasileiro e internacional não existente. Também auxiliara estudos de ACV que analisam a disposição de resíduos sólidos orgânicos em suas fronteiras.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se dar continuidade com as fases da ACV para melhorar a qualificação do estudo e seus resultados. Também se recomenda aumentar as fronteiras do sistema, englobando o transporte da unidade produtora de composto até a entrada do processo assim como adicionar o subsistema de transporte e aplicação desse composto acabado.

Outra sugestão é fazer a comparação desse ICV com outros métodos de disposição final de resíduos, como a disposição em aterros, calculando os impactos entre os métodos.

Para o aperfeiçoamento desse ICV recomenda-se fazer com mais equipamentos e recursos, buscando quantificar as emissões do composto em todo seu processo. Além disso, pode-se realizar em um ambiente com mais controle para refinamento das variáveis.

Para finalizar, pode-se trabalhar com ICVs mais específicos com as características da região do estudo, por exemplo, utilizar a matriz energética local para o cálculo dos impactos do uso da energia elétrica.

8 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040:** Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Brasil, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14044:** Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações. Brasil, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2011). **Rótulo ecológico: diretrizes para a elaboração dos critérios da marca ABNT – qualidade ambiental.** Disponível em: <http://abnt.org.br/criterios/app/arquivos/pdf/PE-351.01_Rotulo_Ecologico_de_Computadores.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:2004:** Resíduos sólidos – Classificação. 2 eds. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. Disponível em: <http://www.suape.pe.gov.br/images/publicacoes/normas/ABNT_NBR_n_10004_2004.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2018.

ANDERSEN, J. K., A. BOLDRIN, J. SAMUELSSON, T. H. CHRISTENSEN, AND C. SCHEUTZ. 2010. **Quantification of Greenhouse Gas Emissions from Windrow Composting of Garden Waste.** J. Environ. Qual. 39:713-724. doi: 10.2134/jeq2009.0329

BAUER, C. H. **Diesel, burned in building machine:** GLO 2004-2004. Switzerland: Ecoinvent Centre, 2007. Ecoinvent database.

BEATA-HALL, L., SÂÁGUA, M. C., BARTOLOMEU, M. L., ANSELMO, A. M., ROSA, M. F. 2002. **A compostagem como processo de valorização dos resíduos produzidos na extracção de azeite em contínuo.** Biotecnologia Ambiental. Boletim de Biotecnologia 72, 31-37.

BORGES, Fúlvia Jung. **Inventário do ciclo de vida do PVC produzido no Brasil.** 2004. 174 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos;** Altera A Lei Nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; E dá outras

providências. Diário Oficial da república Federativa do Brasil. Brasília, DF, 02 de ago. 2010.

CHEHEBE, J. R. **Análise do Ciclo de Vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark Ed., CNI, 1997. 120 p.

CUNHA-QUEDA, A.C. 2006. **Compostagem de resíduos orgânicos biodegradáveis para o uso compatível em agricultura biológica**. Vida Rural 1719 (54), 37-40.

D'ALMEIDA, Maria Luiza Otero; VILHENA, André (organizador). **Lixo Municipal: Manual do Gerenciamento Integrado**. 2ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000, 170 p

DAY, M., SHAW, K. 2005. **Processos Biológicos, químicos, físicos del compostaje**. In: Stollella, P. & Kahn, B. (eds.), *Utización de compost en sistemas de cultivo hortícola*. Ediciones Mundi-Prensa. pp. 17-50.

DERIKX P.J.L., Op Den Camp H.J.M., Bosch W.P.G.M., Vogels G.D., Gerrits J.P.G., van Grienseven L.J.L.D. 1988. **Production of methane during preparation of mushroom compost**. Mededelingen Faculteit Landbouwwetenschappen Rijksuniversiteit (Gent). 53 (4a): 1727-1732.

EUROPEAN COMMISSION. **ILCD Handbook**: international reference life cycle data system: general guide for life cycle assessment. 1ed. Luxemburg: Publications Office of European Union, 2010, 417p.

FERNANDES, A. & COSTA, A. 1997. **Compostagem: Uma técnica para a obtenção de um fertilizante ecológico**. Ficha técnica nº 69. Direção Regional da Agricultura de EntreDouro e Minho.

GUINÉE, J. B. et al. Life Cycle Assessment: past, present, and future. *Environmental Science and Technology*. v. 45, n.1, p.90-96, 2011.

HUNT, R.; FRANKLIN, E. (1996). LCA – How it came about reflections on the origin and the development of LCA in USA. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 1, n. 1, p. 4-7.

INÁCIO, C.T., MILLER, P. R. M. **Compostagem: ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos**. Rio de Janeiro. Embrapa Solos, 2009. p. 156.

ISO. International Organization for Standardization. **ISO 14040**. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework. Geneva: ISO, 2006a. 20p.

ISO. International Organization for Standardization ISO 14044. **Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines**. Geneva: ISO, 2006b. 46p.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais**. Brasília: Ipea, 2012. Disponível em: <http://ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120927_relatorio_esiduos_solidos_industriais.pdf>. Acessado em 20 abr. 2018.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. p. 176

Godoy, João C. – **Compostagem** – Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/secex_consumo/arquivos/compostagem.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2018.

GRAY, K. R., SHERMAN, K., BIDDLESTONE, A. J. 1971. **A Review of Composting, Part 1 - The practical process. Process Biochemistry**.

JACKSON M.J., LINE M.A. 1998. **Assessment of periodic turning as an aeration mechanism for pulp and paper mill sludge composting**. Waste Management and Research 16: 312-319.

JOHN, V. M.; OLIVEIRA, D. P.; AGOPYAN, V. (2006). **Critério de sustentabilidade para a seleção de materiais e componentes – uma perspectiva de países em desenvolvimento**. Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

KIEHL, E. J. **Manual de Compostagem: maturação e qualidade do composto**. Piracicaba,:E. J. Kiehl, 1998.

KUTER, G. A. (coordenador). **Biosolids composting**. Water Environmental Federation, Alexandria, VA, 187 p., 1995.

MEADOWS, D. H.; MEADOWS, D. L.; RANDERS, J.; BEHRENS III, W. W. **The limits to growth & a report for The Club of Rome's project on the predicament of mankind**. New York: Universe Books, 1972.

MILLER F.C. 1993. **Composting as a process based on the control of ecologically selective factors**. IN: F. B. Metting Jr. (ed.), *Soil Microbial Ecology: Applications in Agricultural and Environmental Management*. Marcel Dekker Publishing, New York, USA. pp. 515-544.

PASSUELO, A. C. B. **Aplicação da Avaliação do ciclo de vida em embalagens descartáveis para frutas**: estudo de caso. 2007. 148p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

RIBERITO, P. H. (2009). **Contribuição ao banco de dados brasileiro para apoio à avaliação do ciclo de vida**: fertilizantes nitrogenados. 343f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

RODRIGUES, C.R.B.; ZOLDAN, M.A.; LEITE, M.L.G.; OLIVEIRA, I.L. **Sistemas Computacionais de apoio a ferramenta Análise de Ciclo de Vida do Produto (ACV)**. Enegep, Rio de Janeiro, 2008

SILVA, DIOGO A. L. (2012) – **Avaliação do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDP no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento Engenharia de Materiais Universidade de São Paulo, São Paulo.

SONNEMANN, G. et al. (2007). **Life cycle Assessment** – a business guide to sustainability Disponível em:
<<http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx0889xPA-LifeCycleManagement.pdf>>. Acesso em: 27 Mai. 2018.

SCHWAIGER, H.; ZIMMER, B. **Energy, carbon and other material flows in the life cycle assessment of forestry and forest products**. Helsinki: European Forest Institute, 2001.

US EPA 2002. **Solid waste management and greenhouse gases: a life-cycle assessment of emission and sinks**. EPA530-R-02-006, Environmental Protection Agency, USA. <http://www.epa.gov>

WENZEL, H. Et al. (1994). Environmental tools in product development. In: SYMPOSIUM ON ELECTRONICS THE ENVIRONMENT. 1994, San Francisco. **Proceedings....** San Francisco: [s.n.] p.100-108

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.200 p.

ZOCHE, L.; FRANCISCO, A.C. **Diagnóstico do cenário da ACV no Brasil**. XXXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. A Gestão dos Processos de Produção e as Parcerias Globais para o Desenvolvimento Sustentável dos Sistemas Produtivos, Salvador, BA, Brasil, 2013.